

Zur Ermittlung mechanischer Kennwerte von Bestandsbetonen

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Michael Weber

aus Pirmasens

Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Oliver Kornadt
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
3. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Christian Glock
Tag der mündlichen Prüfung:	05.11.2019

Kaiserslautern 2019

(D 386)

Michael Weber

**Zur Ermittlung mechanischer Kennwerte von
Bestandsbetonen**

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2013 bis 2018 während meiner Zeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion der Technischen Universität Kaiserslautern.

Meine Forschungstätigkeit wurde maßgeblich im Rahmen der Forschungsvorhaben „Untersuchungen zur Korrelation von Druck- und Zugfestigkeit in alten, niederfesten Betonen als Grundlage für die Bestimmung der Tragfähigkeit von z. B. Befestigungsmitteln“ (Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, Aktenzeichen II 3-F20-12-1-005 / SWD-10.08.18.07-13.01), „Ermittlung der charakteristischen Betondruckfestigkeit im Bestand bei geringem Stichprobenumfang“ (Industrielle Gemeinschaftsforschung, Vorhaben Nr. 19346 N), „Experimentelle Ermittlung der Korrelation der Druckfestigkeiten von Bohrkernen aus Bauwerkbeton und genormten Probekörpern“ (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V., V 496) und „Bestimmung des Dauerstandbeiwertes α_{cc} für die Nachrechnung bestehender Massivbauwerke bei experimenteller Ermittlung der Betondruckfestigkeit am Bestandstragwerk“ (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E. V., DBV 313) gefördert. Für die Finanzierung danke ich an dieser Stelle ganz herzlich.

Die vorliegende Dissertation ist im Wesentlichen im Rahmen meiner Mitarbeit im DAfStb-Unterausschuss Bewertung von Bestandsbauwerken entstanden. Teile dieser Arbeit sind in der Schriftenreihe des DAfStb „grüne Hefte“ unter den Nummern 619 (*DAfStb 619*) und 632 (*DAfStb 632*) veröffentlicht.

Des Weiteren sind verschiedene Ergebnisse in Form von Publikationen in Büchern, Fachzeitschriften, auf nationalen und internationalen Konferenzen und Tagungen sowie in Form von Forschungsberichten vorgestellt und veröffentlicht worden. Insbesondere sind hierbei die Veröffentlichungen *Weber et al. 2016*, *Weber u. Thiele 2016* und *Weber et al. 2019c* in der Zeitschrift *Beton- und Stahlbetonbau*, die Veröffentlichung *Weber et al. 2019a* in der Zeitschrift *beton*, der Beitrag *Weber u. Thiele 2018* in der Zeitschrift *Structural Concrete* sowie der Forschungsbericht *Weber et al. 2019b* zu nennen. Die Veröffentlichungen sind im Literaturverzeichnis mit der (Co-) Autorenschaft „Weber, M.“ aufgeführt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell für die Anstellung am Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion und dafür, dass er mir die Möglichkeit zur Promotion anbot. Neben der fachlichen Ausbildung möchte ich mich insbesondere auch für die persönliche Förderung und das entgegengebrachte Vertrauen bedanken. Durch meine Zuarbeit in verschiedenen nationalen und europäischen Normenausschüssen zum Thema „Bauen im Bestand“ konnte ich vielfältige Erfahrungen im Bereich der Regelwerkerstellung sammeln, aber auch zahlreiche Kontakte knüpfen, für die ich mich ebenfalls recht herzlich bedanken möchte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx und Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Glock danke ich für die Übernahme des Korreferats und die Erstellung des zweiten und dritten Berichtes. Besonders möchte ich mich für die Durchsicht meiner Arbeit und die daraus resultierenden Anmerkungen und Hinweise bedanken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

möchte ich außerdem für die stets gewinnbringende Zusammenarbeit im DAfStb-Unterausschuss „Bewertung von Bestandsbauwerken“ danken.

Weiterhin danke ich meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen an der TU Kaiserslautern, den wissenschaftlichen Hilfskräften, dem Laborpersonal sowie allen Bearbeiter/-innen von Bachelor-, Master- oder sonstigen Vertieferarbeiten für die Unterstützung und tolle Zusammenarbeit. Mein besonderer Dank gilt meinen Zimmerkolleginnen und -kollegen Herrn Dr.-Ing. Florian Stauder, Frau Dipl.-Ing. Mona Lisa Keller und Frau Rabea Sefrin, M.Sc. für das stets angenehme Arbeitsumfeld sowie für den persönlichen Kontakt.

Zuletzt möchte ich mich schließlich bei meiner Familie und insbesondere bei meiner Frau Julia für deren fortwährende Unterstützung bei all den von mir angestrebten Zielen bedanken.

Pirmasens, November 2019

Michael Weber

Kurzfassung

Die Nachrechnung bestehender Bauwerke muss grundsätzlich auf Basis der aktuellen, bauaufsichtlich eingeführten technischen Baubestimmungen geführt werden. Dazu werden charakteristische Materialkennwerte der verwendeten Baustoffe benötigt.

Im Rahmen einer Vordimensionierung kann die Betondruckfestigkeit durch Umrechnung von aus der Herstellzeit dokumentierten Werten abgeschätzt werden. Für eine abgesicherte Nachrechnung hingegen muss die charakteristische Betondruckfestigkeit durch Untersuchungen am Bauwerk ermittelt werden, um den Einfluss verschiedener last- oder zeitabhängiger Prozesse zu erfassen.

Zur statistischen Bewertung der experimentell ermittelten Werte der In-situ-Betondruckfestigkeit existieren verschiedene Verfahren. Besonders bei kleinem Stichprobenumfang führen die bisher gebräuchlichen Verfahren nach *DIN EN 1990:2010-12* und *DIN EN 13791:2008-05* jedoch teilweise zu ingenieurmäßig als kritisch einzustufenden Ergebnissen, welche die tatsächliche In-situ-Betondruckfestigkeit erheblich über- oder unterschätzen können.

Aufbauend auf Untersuchungen an realen, umfangreichen Datensätzen wurde in dieser Arbeit ein neues Verfahren mit den vom Stichprobenumfang und dem Variationskoeffizienten abhängigen modifizierten Ansätzen A und B zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit, basierend auf experimentell, mit direkten Prüfverfahren ermittelten Einzelwerten, entwickelt.

Zur Bestimmung des Nachrechnungswertes der Betondruckfestigkeit gilt es über den charakteristischen Wert der In-situ-Betondruckfestigkeit hinaus auch noch den Unterschied zwischen Bauwerks- und Normprobekörperdruckfestigkeit sowie den Einfluss von Dauerstandseffekten zu bewerten.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass bei Bestandsbetonen, wie auch bereits im Neubaufall, das Verhältnis zwischen Bauwerks- und Normprobekörperfestigkeit ca. 0,85 beträgt. Auch bei der experimentellen Ermittlung der In-situ-Betondruckfestigkeit an aus dem Bauwerk entnommenen Proben ist der Unterschied zwischen Kurzzeit- und Dauerstandsfestigkeit mit dem im Neubaufall gebräuchlichen Faktor $\alpha_{cc} = 0,85$ zu berücksichtigen.

Neben der Druckfestigkeit, ist im Rahmen der Nachrechnung von Bestandsbauwerken auch teilweise die Zugfestigkeit oder der Elastizitätsmodul von Bestandsbetonen zu bewerten. Die in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* enthaltenen Beziehungen zwischen Druck- und Zugfestigkeit sowie zwischen Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul sind jedoch ausschließlich für im Neubaufall verwendete Betone nach *DIN EN 206-1:2001-07* ausgelegt.

Die Untersuchungen zeigen, dass die in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* enthaltene Korrelation zwischen Druck- und Zugfestigkeit auch zur groben Abschätzung der Zugfestigkeit von Bestandsbetonen verwendet werden kann. Im Einzelfall sind jedoch auch große Abweichungen nicht auszuschließen. Bedingt durch den großen Einfluss der Gesteinskörnung ist nur eine sehr grobe Abschätzung des Elastizitätsmoduls aus der In-situ-Betondruckfestigkeit möglich.

Abstract

The assessment of existing structures has to be based on current standards. For this purpose characteristic properties of the materials used for construction are required.

The concrete compressive strength can be gained for pre-dimensioning at least from documents from the construction period by conversion. Whereas, for an ensured assessment, the characteristic concrete compressive strength has to be determined by a qualified structural investigation. In this way, time- and load-dependent impacts can be considered.

The experimentally derived values can be evaluated by different statistical methods. But especially for small sample sizes, the currently used methods according to *DIN EN 1990:2010-12* and *DIN EN 13791:2008-05* can result in doubtful values of the characteristic concrete compressive strength with a high rate of over- or underestimation.

In this thesis, a new approach for the determination of the characteristic in-situ concrete compressive strength was developed. Based on the sample size and the coefficient of variation, the new method distinguishes the modified methods A and B.

Additional, very important issues for the determination of the assessment value of the concrete compressive strength are the correlation between the compressive strength of concrete in structures and standard test specimens and long term effects on the compressive strength.

As a result of the investigations presented in this thesis, the correlation between the compressive strength of concrete in structures and standard test specimens can be described with the factor 0,85. Furthermore, also in case of determination of the in-situ concrete compressive strength on specimens, taken from the structure, long term effects have to be considered with the factor $\alpha_{cc} = 0,85$.

For some assessment scenarios, not only the compressive strength but also the tensile strength and the modulus of elasticity of historical concretes have to be considered. *DIN EN 1992-1-1:2011-01* normatively regulates the correlation between the compressive and tensile strength and between the compressive strength and the modulus of elasticity of concrete, produced according to *DIN EN 206-1:2001-07*.

Based on the results of the structural investigations, described in this thesis, just a rough estimation of the tensile strength of historical concretes is possible based on the correlation, given in *DIN EN 1992-1-1:2011-01*. In individual cases, a high degree of over- or underestimation can not be excluded.

Due to the major impact of the type of the aggregate, only a very vague estimation of the modulus of elasticity of historical concretes is possible based on the correlation, given in *DIN EN 1992-1-1:2011-01*.

Inhalt

Vorwort

Kurzfassung

Abstract

Inhalt		i
Formelzeichen und Variablen		xi
1 Einleitung		1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	4
1.3	Vorgehensweise	6
2 Grundlagen der Statistik für die Bewertung von Stichproben im Bauwesen		8
2.1	Allgemeines	8
2.2	Deskriptive Statistik	8
2.2.1	Allgemeines	8
2.2.2	Numerische Beschreibung der Lage	9
2.2.3	Numerische Beschreibung der Streuung	10
2.2.4	Grafische Zusammenfassungen	12
2.3	Inferentielle Statistik	16
2.3.1	Allgemeines	16
2.3.2	Schätzung von statistischen Parametern	17
2.3.2.1	Allgemeines	17
2.3.2.2	Kriterien für die Bestimmung der Schätzfunktion	18
2.3.3	Güte der Parameterschätzung	19
2.3.3.1	Allgemeines	19
2.3.3.2	Konfidenzzahlen und Konfidenzintervalle	20
2.3.3.3	Konfidenzintervalle für die Schätzung von Quantilen der Normalverteilung	22
2.3.4	Schätzung nach der Bayes'schen Methode	23
2.3.4.1	Allgemeines	23
2.3.4.2	Bestimmung von Quantilwerten bei Normalverteilung mit unbekanntem Parametern	25
2.4	Verteilungen	25
2.4.1	Allgemeines	25
2.4.2	Normalverteilung (NV)	26

2.4.3	Logarithmische Normalverteilung (LNV)	27
2.5	Sensitivitätskurve	29
3	Bestimmung mechanischer Eigenschaften von Bauwerkbeton	30
3.1	Allgemeines	30
3.2	Vorgehensweise	31
3.3	Festlegung von Prüfbereichen und Stichprobenumfang	32
3.3.1	Regelungen nach DIN EN 13791	32
3.3.2	Empfohlenes Vorgehen nach DAfStb 619	32
3.3.2.1	Prüfbereich	32
3.3.2.2	Stichprobenumfang	34
3.4	Bohrkernentnahme und Probekörpergeometrie	35
3.4.1	Allgemeines	35
3.4.2	Umrechnungsfaktoren	37
3.4.2.1	Allgemeines	37
3.4.2.2	Umrechnungsfaktoren – Probekörpergeometrie	37
3.4.2.3	Umrechnungsfaktoren – Lagerungsart	38
3.5	Vorbereitung der Probekörper	38
3.6	Prüfung der In-situ-Betonfestigkeit	39
3.6.1	Allgemeines	39
3.6.2	Druckfestigkeit	40
3.6.3	Spaltzugfestigkeit	40
3.6.4	Elastizitätsmodul	40
3.7	Bestehende Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Druckfestigkeit	41
3.7.1	Allgemeines	41
3.7.2	Vorgehen nach DIN EN 13791:2008	41
3.7.3	Vorgehen nach DIN EN 1990:2010	42
3.7.4	Vorgehen nach prEN 1990:2018	44
3.7.5	Vorgehen nach DIN ISO 16269-6	44
3.7.6	Vorgehen nach der Nachrechnungsrichtlinie	45
3.7.7	Vorgehen nach BAW Merkblatt	45
3.7.8	Vorgehen nach E DIN EN 13791:2018-06	46
4	Statistische Kenngrößen der Druckfestigkeit von Bestandsbetonen – Bauwerksuntersuchungen	47
4.1	Untersuchungen an Standardproben von Rüschi et al. nach DAfStb 206	47
4.1.1	Vorgehen und Ziel der Untersuchungen nach DAfStb 206	47
4.1.2	Bewertung der Verteilung der Betondruckfestigkeit	47
4.1.3	Ursachen für die Streuung der Betondruckfestigkeit	49
4.1.4	Aufbereitung des Datenmaterials	49

4.1.5	Zusammenhang zwischen Standardabweichung und mittlerer Betondruckfestigkeit _____	50
4.2	Eigene Untersuchungen an bestehenden Massivbauwerken _____	51
4.2.1	Allgemeines _____	51
4.2.2	Bewertung der Verteilung der In-situ-Betondruckfestigkeit _____	52
4.2.3	Streuung der In-situ-Betondruckfestigkeit _____	57
4.2.3.1	Allgemeines _____	57
4.2.3.2	Zusammenhang zwischen Standardabweichung und mittlerer In-situ- Betondruckfestigkeit _____	58
4.2.3.3	Zusammenhang zwischen Variationskoeffizient und mittlerer In-situ- Betondruckfestigkeit _____	59
4.2.3.4	Einfluss des Baujahrs und der zugehörigen Überwachung auf die Streuung der In-situ-Betondruckfestigkeit _____	60
4.2.3.5	Einfluss des Stichprobenumfangs auf den Rechenwert der Streuung der In-situ-Betondruckfestigkeit _____	63
4.2.3.6	Einfluss des Verhältnisses zwischen Bohrkern- und Größtkorndurchmesser auf die Streuung der In-situ- Betondruckfestigkeit _____	64
4.2.3.7	Einfluss der Bauwerksart auf die Streuung der In-situ- Betondruckfestigkeit _____	65
4.3	Zwischenfazit _____	66
5	Bewertung und Weiterentwicklung bestehender Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang _____	68
5.1	Bewertung des Konfidenzniveaus bei Bestimmung der charakteristischen In- situ-Betondruckfestigkeit nach DIN EN 1990 _____	68
5.1.1	Allgemeines _____	68
5.1.2	Untersuchungen zum Konfidenzniveau bei Anwendung von DIN EN 1990 nach Schäper _____	68
5.1.3	Zwischenfazit und Bewertung der Kritik von Schäper _____	72
5.2	Anwendbarkeit bestehender Verfahren nach DIN EN 1990, DIN EN 13791:2008 und DIN ISO 16269-6 – Aufbereitung verschiedener Forschungsarbeiten _____	73
5.2.1	Untersuchungen von Loch et al. zu DIN EN 13791:2008, DIN ISO 16269-6 und DIN EN 1990 _____	73
5.2.2	Untersuchungen von Knab u. Sodeikat zu DIN EN 13791:2008, DIN ISO 16269-6 und DIN EN 1990 _____	76
5.2.2.1	Allgemeines _____	76
5.2.2.2	Untersuchungen zum Auswerteverfahren nach DIN EN 13791:2008	77
5.2.2.3	Untersuchungen zum Auswerteverfahren nach DIN EN 1990 _____	80

5.2.2.4	Untersuchungen zum Auswerteverfahren nach DIN ISO 16269	82
5.2.3	Untersuchungen von Holický et al. zu EN 13791:2007 und EN 1990	85
5.2.4	Untersuchungen von Caspeele zu EN 13791:2007, ISO 16269-6 und EN 1990	88
5.2.4.1	Allgemeines	88
5.2.4.2	Untersuchungen zum Auswerteverfahren nach ISO 16269	89
5.2.4.3	Untersuchungen zum Auswerteverfahren nach EN 1990	92
5.2.4.4	Untersuchungen zum Auswerteverfahren nach EN 13791:2007	94
5.2.5	Zwischenfazit	97
5.3	Eigene Untersuchungen zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang durch Bohrkernentnahme an Bestandstragwerken	97
5.3.1	Vorgehen	97
5.3.2	Betrachtung bisher gebräuchlicher Verfahren nach DIN EN 1990 und DIN EN 13791:2008	100
5.3.2.1	Bestimmung von $f_{ck, is}$ nach DIN EN 1990 - Normalverteilung	100
5.3.2.2	Bestimmung von $f_{ck, is}$ nach DIN EN 1990 – Logarithmische Normalverteilung	104
5.3.2.3	Bestimmung von $f_{ck, is}$ nach DIN EN 13791:2008 – Ansatz B	109
5.3.3	Bauartenspezifische Verfahren nach BAW und Nachrechnungsrichtlinie	115
5.3.3.1	Bestimmung von $f_{ck, is}$ nach BAW	115
5.3.3.2	Bestimmung von $f_{ck, is}$ nach Nachrechnungsrichtlinie	120
5.3.4	Weiterentwicklung bestehender Verfahren	120
5.3.4.1	Allgemeines	120
5.3.4.2	Bestimmung von $f_{ck, is}$ nach DIN EN 1990 – NV mit $s_{x, min} = 3,0 \text{ N/mm}^2$	121
5.3.4.3	Bestimmung von $f_{ck, is}$ nach DIN EN 1990 – NV mit $v_{x, min}$ und $v_{x, max}$	126
5.4	Neuentwickeltes Verfahren zur Bestimmung von $f_{ck, is}$	131
5.5	Ausblick und Bewertung neuer Verfahren nach E DIN EN 13791:2018	139
5.6	Zwischenfazit	141
5.6.1	Bewertung des tatsächlichen Konfidenzniveaus bei Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit nach DIN EN 1990	141
5.6.2	Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang mit bestehenden Verfahren nach DIN EN 1990, DIN EN 13791:2008 und DIN ISO 16269-6	142
5.6.3	Bewertung des bauartenspezifischen Verfahrens nach BAW	143
5.6.4	Bewertung neuer europäischer Ansätze nach E DIN EN 13791:2018	143
5.6.5	Weiterentwicklung bestehender Verfahren und Anwendungsempfehlung	143

6	Ausreißertests bei der stichprobenartigen Bewertung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit	145
6.1	Allgemeines	145
6.2	Einfluss von Extremwerten auf Lage- und Streuungsparameter	146
6.2.1	Allgemeines	146
6.2.2	Lageparameter symmetrisch und nicht symmetrisch verteilter Daten	146
6.2.3	Sensitivitätskurven für Lage- und Streuungsparameter	148
6.3	Bestehende Ausreißertests	153
6.3.1	Ausreißertest nach David-Hartley-Pearson (zweiseitiges Konfidenzintervall)	153
6.3.2	Ausreißertest nach Grubbs (zweiseitiges Konfidenzintervall)	153
6.3.3	Ausreißertest nach Dixon (einseitiges Konfidenzintervall)	154
6.3.4	Ausreißertest nach BS 6089 (einseitig, nach unten begrenztes Konfidenzintervall)	155
6.4	Vergleich und Bewertung bestehender Ausreißertests	156
6.5	Entwicklung eines medianbasierten Ausreißertests	165
6.6	Bewertung realer Datensätze	173
6.6.1	Bewertung realer Datensätze mit $n = 5$	173
6.6.2	Bewertung realer Datensätze mit $n > 10$	177
6.7	Empfohlenes Vorgehen und Zwischenfazit	180
7	Korrelation der Druckfestigkeiten von Bohrkernen aus Bauwerkbeton und genormten Probekörpern	182
7.1	Einführung in die Thematik	182
7.2	Normative Regelungen für die Bestimmung des Bemessungswertes der Betondruckfestigkeit nach DIN EN 1992-1-1	183
7.3	Normative Regelungen für die Bewertung der Druckfestigkeit von Bauwerkbeton	184
7.3.1	Regelungen nach DIN 1048-2:1991	184
7.3.2	Regelungen nach DIN EN 13791:2008	184
7.3.3	Regelungen nach prEN 13791:2018	186
7.3.4	Regelungen nach ACI 214.4R-10	187
7.3.4.1	Allgemeines	187
7.3.4.2	Verdichtung	187
7.3.4.3	Nachbehandlung	188
7.3.4.4	Bluten	188
7.3.4.5	Mikrorissbildung	188
7.3.4.6	Einflüsse durch die Bohrkernentnahme	188
7.4	Aufarbeitung früherer Untersuchungen und Regelungen	189
7.4.1	Allgemeines	189

7.4.2	Untersuchungen der Concrete Society	189
7.4.3	Untersuchungen von Petersons	193
7.4.3.1	Allgemeines	193
7.4.3.2	Einfluss der Festigkeitsklasse	196
7.4.3.3	Einfluss der Nachbehandlung/Erhartungsbedingungen	197
7.4.3.4	Einfluss von Bauteiltyp und Abmessungen	198
7.4.3.5	Einfluss der Zementart	199
7.4.3.6	Einfluss der Verdichtung	199
7.4.3.7	Zwischenfazit	199
7.4.4	Untersuchungen von Rostasy	200
7.4.4.1	Allgemeines	200
7.4.4.2	Versuchsprogramm	200
7.4.4.3	Prüfergebnisse	202
7.4.4.4	Zwischenfazit	212
7.4.5	Untersuchungen von Bartlett und MacGregor	212
7.4.6	Untersuchungen von Lewandowski	215
7.4.6.1	Allgemeines	215
7.4.6.2	Literatúrauswertung	215
7.4.6.3	Ergebnisse von Routine-Untersuchungen der Materialprüfanstalt der TU Braunschweig	228
7.4.6.4	Von Lewandowski durchgeföhrté Untersuchungen	229
7.4.7	Zwischenfazit	232
7.5	Eigene experimentelle Untersuchungen	239
7.5.1	Versuchsprogramm	239
7.5.1.1	Allgemeines	239
7.5.1.2	Versuchsreihe 1 - Kleinprobekörper zur Entnahme von Bohrkernen	244
7.5.1.3	Versuchsreihe 2 – Wandartige Bauteile bei 28 d Laborlagerung	245
7.5.1.4	Versuchsreihe 3 – Wandartige Bauteile bei 365 d Lagerung im Freien	247
7.5.2	Versuchsergebnisse	250
7.5.2.1	Allgemeines	250
7.5.2.2	Streuung der Betondruckfestigkeit	250
7.5.2.3	Einfluss der Bohrkernentnahme	251
7.5.2.4	Festigkeitsverlauf über die Bauteilhöhe	253
7.5.2.5	Einfluss der Bohrkernentnahmerichtung in Bezug auf die Betonierichtung	254
7.5.2.6	Verhältnis der Druckfestigkeit von Bauwerkbeton und Laborprobekörpern im Alter von 28 Tagen	255
7.5.2.7	Verhältnis der Druckfestigkeit von Bauwerkbeton im Alter von 365 Tagen und Laborprobekörpern	258

7.6	Experimentelle Ermittlung der Korrelation des E-Moduls von Bohrkernen aus Bauwerkbeton und genormten Probekörpern _____	259
7.7	Zwischenfazit _____	260
7.7.1	Druckfestigkeit _____	260
7.7.2	Zugfestigkeit _____	263
7.7.3	E-Modul _____	264
8	Dauerstandseffekte bei der Bestimmung des Nachrechnungswertes der In-situ-Betondruckfestigkeit _____	265
8.1	Einführung in die Thematik _____	265
8.2	Normative Regelungen zur Berücksichtigung von Dauerstandseffekten nach DIN EN 1992-1-1 _____	265
8.3	Aufarbeitung früherer Untersuchungen und verschiedener Regelwerke ____	267
8.3.1	Untersuchungen von Rüsç et al. _____	267
8.3.1.1	Allgemeines _____	267
8.3.1.2	Belastungsart (Art der Lastaufbringung) _____	267
8.3.1.3	Belastungsniveau _____	268
8.3.1.4	Betonfestigkeitsklasse und Zusammensetzung _____	268
8.3.1.5	Nacherhärtung _____	269
8.3.1.6	Gefügelockerung _____	269
8.3.1.7	Überlagerung von Nacherhärtung und Gefügelockerung _____	269
8.3.2	DIN 1045:1972 _____	270
8.3.3	DIN 1045-1:2008 _____	271
8.3.4	<i>fib</i> Model Code for Concrete Structures 2010 (MC 2010) _____	271
8.3.5	Neuregelung nach prEN 1992-1-1:2017 _____	271
8.4	Eigene experimentelle Ermittlung der Dauerstandsfestigkeit von Bestandsbetonen _____	273
8.4.1	Ausgangslage _____	273
8.4.2	Versuchsprogramm _____	273
8.4.3	Versuchsdurchführung _____	275
8.4.4	Versuchsergebnisse _____	276
8.4.4.1	Allgemeines _____	276
8.4.4.2	Einfluss der Lagerungsart der Probekörper _____	279
8.4.4.3	Einfluss der Art der Vorbelastung _____	280
8.5	Zwischenfazit _____	281
9	Ableitung mechanischer Kennwerte von Bestandsbetonen aus der In-situ-Druckfestigkeit _____	284
9.1	Korrelation von Betondruck- und Zugfestigkeit _____	284
9.1.1	Allgemeines _____	284

9.1.2	Korrelation zwischen Druck- und Zugfestigkeit nach DIN EN 1992-1-1 und <i>fib</i> Model Code 2010	284
9.1.3	Frühere Untersuchungen und normative Regelungen	285
9.1.3.1	Historische Untersuchungen	285
9.1.3.2	Regelungen nach DIN 1045 bis 2001	287
9.1.4	Regelung nach BAW TbW	288
9.1.5	Experimentelle Untersuchungen an bestehenden Beton-, Stahlbeton- und Spannbetontragwerken	289
9.1.5.1	Versuchsprogramm	289
9.1.5.2	Bewertung der Versuchsergebnisse	290
9.1.5.3	Statistische Kenndaten der untersuchten Betone	290
9.1.6	Experimentell ermittelte Korrelation zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit	292
9.1.6.1	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse	292
9.1.6.2	Einfluss des Bauwerksalters auf den Zusammenhang zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit	295
9.1.6.3	Einfluss der Karbonatisierung auf den Zusammenhang zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit	297
9.1.7	Zwischenfazit	298
9.2	Korrelation von Betondruckfestigkeit und Elastizitätsmodul	299
9.2.1	Allgemeines	299
9.2.2	Korrelation zwischen Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul nach DIN EN 1992-1-1	300
9.2.3	Weitere normative Regelungen	300
9.2.3.1	Regelungen nach DIN 1045-1:2008	300
9.2.3.2	Regelungen nach DIN 1045-1:2001	301
9.2.3.3	Regelungen nach DIN 1045:1988	301
9.2.3.4	Regelungen nach DIN 1045:1978	302
9.2.3.5	Regelungen nach DIN 1045:1972	302
9.2.3.6	Regelungen nach DIN 1045:1959	302
9.2.3.7	Regelungen nach MC 2010	303
9.2.4	Eigene experimentelle Untersuchungen an bestehenden Beton-, Stahlbeton- und Spannbetontragwerken	304
9.2.4.1	Versuchsprogramm	304
9.2.4.2	Bewertung der Versuchsergebnisse	304
9.2.5	Experimentell ermittelte Korrelation zwischen Betondruckfestigkeit und Elastizitätsmodul	305
9.2.5.1	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse	305
9.2.5.2	Einfluss des Bauwerksalters auf den Zusammenhang zwischen Betondruckfestigkeit und Elastizitätsmodul	306

9.2.6 Zwischenfazit _____	307
10 Fazit und Ausblick _____	308
10.1 Zusammenfassung _____	308
10.1.1 Vorgehensweise und Zielsetzung _____	308
10.1.2 Statistische Kenngrößen und Verteilungsart von Bestandsbetonen ____	308
10.1.3 Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ- Betondruckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang _____	309
10.1.4 Anwendbarkeit von Ausreißertests bei der Bestimmung der In-situ- Betondruckfestigkeit _____	311
10.1.5 Zusammenhang der Druckfestigkeiten von Bohrkernen aus Bauwerkbeton und genormten Probekörpern _____	311
10.1.6 Dauerstandeffekte bei der Bestimmung des Nachrechnungswertes der In- situ-Betondruckfestigkeit _____	312
10.1.7 Ableitung mechanischer Kenngrößen aus der In-situ-Betondruckfestigkeit _____	312
10.2 Bestimmung des Nachrechnungswertes der Betondruckfestigkeit _____	313
10.3 Ausblick _____	314
11 Literatur _____	316
Anhang I Datenbank Bauwerksuntersuchungen zur Betondruckfestigkeit__ _____	331
Anhang II Statistische Simulationen zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang _____	443
Anhang III Ausreißertests _____	579
Anhang IV Vergleich der Druckfestigkeit von Bauwerkbeton und genormten Probekörpern – Prüfergebnisse _____	593
Anhang V Dauerstandeffekte – Prüfergebnisse _____	643
Anhang VI Datenbank Bauwerksuntersuchungen zur Betonzugfestigkeit und zum E-Modul _____	671
Lebenslauf _____	713

Formelzeichen und Variablen

Lateinische Buchstaben und Abkürzungen

a	Kantenlänge des Würfels
AK	Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten
B	Sollbetongüte
c	Koeffizient zur Bestimmung der Betonzugfestigkeit
C	Bohrkernfestigkeit
d	Bohrkern- oder Zylinderdurchmesser
D_I	Maß zur Beschreibung der Abweichung beim medianbasierten Ausreißertest, Stufe I
$D_{I,krit}$	kritischer Wert für den medianbasierten Ausreißertest, Stufe I
D_{II}	Maß zur Beschreibung der Abweichung beim medianbasierten Ausreißertest, Stufe II
$D_{II,krit}$	kritischer Wert für den medianbasierten Ausreißertest, Stufe II
E_b	Rechenwert des Elastizitätsmoduls von Beton
E_c	Elastizitätsmodul des Betons
E_{c0m}	mittlerer Tangentenmodul des Betons
E_{cm}	mittlerer Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) des Betons
F	Festigkeit des Normzylinders
F_1	Verhältnis zwischen der Druckfestigkeit des Laborzylinders und dem geforderten Wert
F_2	Verhältnis zwischen der Bauwerksdruckfestigkeit und der Druckfestigkeit des Normzylinders
f_{ca}	Nachrechnungswert der Betondruckfestigkeit (assessment value)
$f_{c,cube}$	Würfeldruckfestigkeit
$f_{c,cyl}$	Zylinderdruckfestigkeit
f_{cd}	Bemessungswert der Betondruckfestigkeit (design value)
$f_{c,dry}$	Betondruckfestigkeit bei Trockenlagerung nach Norm
f_{ck}	charakteristische Zylinderdruckfestigkeit des Betons nach 28 Tagen
$f_{ck,is}$	charakteristische In-situ-Betondruckfestigkeit
f_{cm}	Mittelwert der Betondruckfestigkeit
$f_{cm,is}$	Mittelwert der In-situ-Betondruckfestigkeit

Formelzeichen und Variablen

$f_{\text{ctk};0,05}$	5 %-Quantilwert der zentrischen Zugfestigkeit des Betons
$f_{\text{ctk};0,95}$	95 %-Quantilwert der zentrischen Zugfestigkeit des Betons
f_{ctm}	Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit des Betons
$f_{\text{ct,sp}}$	Spaltzugfestigkeit des Betons
$f_{\text{is,niedrigst}}$	niedrigstes Prüfergebnis der Druckfestigkeit des Bauwerkbetons
f_{min}	kleinster Einzelmesswert einer Stichprobe
$f_{\text{m}(n),\text{is}}$	Mittelwert von n Prüfergebnissen der Druckfestigkeit des Bauwerkbetons
$F_n(x)$	empirische Verteilungsfunktion
f_{pr}	Priorverteilung
f_{po}	Posteriorverteilung
f_x	Verteilungsdichtefunktion der Gesamtheit
F_x	Verteilungsfunktion der Gesamtheit
g	empirische Schiefe
h	Probekörperhöhe
k	Summand zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit
K	Zielwert der Betondruckfestigkeit
k_2	Koeffizient zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit
k_3	Faktor zur Bestimmung der unteren Grenze eines p -Quantils
K_b	Säulendruckfestigkeit
$k_{\text{cyl/cube}}$	Umrechnungsfaktor zwischen Zylinder- und Würfeldruckfestigkeit
k_L	Umrechnungsfaktor zur Berücksichtigung unterschiedlicher Lagerungsarten
k_n	Fraktilefaktor
k_{tc}	Beiwert zur Bestimmung des Bemessungswertes der Betondruckfestigkeit
LNV	logarithmische Normalverteilung
M	Spanne zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit
MAD	mittlere absolute Abweichung vom Median (Median Absolute Deviation)
med	empirischer Median (umgangssprachlich auch Zentralwert)

n	Stichprobenumfang
NV	Normalverteilung
P	Druckfestigkeit des Push-out-Zylinders
Q	Maß zur Beschreibung der Abweichung beim Ausreißertest nach David-Hartley-Pearson
Q_{krit}	kritischer Wert für den Ausreißertest nach David-Hartley-Pearson
R	Spannweite oder Range der Stichprobe
r_{ij}	Maß zur Beschreibung der Abweichung beim Ausreißertest nach Dixon
r_{krit}	kritischer Wert für den Ausreißertest nach Dixon
R_t	Maß zur Beschreibung der Abweichung beim Ausreißertest nach BS 6089
$R_{t,\text{krit}}$	kritischer Wert für den Ausreißertest nach BS 6089
s	Klassenanzahl
SC	Sensitivitätskurve (sensitivity curve)
s_x	empirische Standardabweichung oder Stichprobenstandardabweichung
s_x^2	empirische Varianz oder Stichprobenvarianz
$s_{x,\text{min}}$	Mindestwert der Standardabweichung
T_{krit}	kritischer Wert für den Ausreißertest nach Grubbs
T_n	Schätzfunktion
T_n	Maß zur Beschreibung der Abweichung beim Ausreißertest nach Grubbs
t_p	p -Quantil der Student- t -Verteilung
u_g	Parameter der Dichtefunktion
u_j	Schätzer eines Parameters
Var	Varianz
v_x	empirischer Variationskoeffizient
$v_{x,\text{max}}$	Höchstwert des Variationskoeffizienten
$v_{x,\text{min}}$	Mindestwert des Variationskoeffizienten
w	Gewichtsfunktion oder Kern
W_b	Würfeldruckfestigkeit
\bar{x}	Arithmetisches Mittel (umgangssprachlich auch Mittelwert oder Durchschnitt)

x_1	kleinster Einzelmesswert einer Stichprobe mit dem Umfang n
\bar{x}_γ	γ -getrimmter Mittelwert
x_i	Einzelmesswerte oder Realisierungen einer Zufallsvariable
x_k	charakteristischer Wert
x_n	größter Einzelmesswert einer Stichprobe mit dem Umfang n
x_p	p -Quantil der statistischen Verteilung

Griechische Buchstaben und Abkürzungen

α	Signifikanzzahl, -niveau oder -bereich
α_{cc}	Dauerstandsbeiwert der Betondruckfestigkeit
α_E	Beiwert zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls
α_i	Beiwert zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls
β_{Bau}	Bauwerksdruckfestigkeit
β_{bZ}	Biegezugfestigkeit
β_D	Druckfestigkeit (des eingebauten Bauwerkbetons)
β_{SZ}	Spaltzugfestigkeit
β_W	Druckfestigkeit des Laborprüfkörpers (Würfel)
β_R	Rechenwert der Betondruckfestigkeit
β_{wN}	Nennfestigkeit des Betons
β_Z	Zugfestigkeit
γ	Konfidenzzahl
γ_c	Teilsicherheitsbeiwert für Beton
γ_{conv}	Anteil des Teilsicherheitsbeiwertes für Beton zur Umrechnung zwischen Normprobekörper- und Bauwerksfestigkeit
Δ	Änderung
Δx	Klassenbreite
ζ^2	Parameter der logarithmischen Normalverteilung
η	Übertragungsfaktor zwischen Normprobekörper- und Bauwerksfestigkeit
λ	Parameter der logarithmischen Normalverteilung
λ	Probekörperschlankheit
μ	Erwartungswert einer Verteilung

σ^2	Varianz einer Verteilung
σ_{CUBE}	Druckfestigkeit des Laborprobekörpers (Würfel)
$\sigma_{\text{STRUCTURE}}$	Druckfestigkeit des Bauwerkbetons
σ_u	Säulendruckfestigkeit
σ_v	Vergleichsspannung

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Betrachtet man die Altersstruktur der bestehenden Bausubstanz in Deutschland, so kann ein großer Anteil an bestehenden Bauwerken verzeichnet werden. Nach Erhebungen des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) aus dem Jahr 2014 wurden ca. 64 % der derzeit in Deutschland bestehenden Wohngebäude bis zum Jahr 1978 erbaut (vgl. Abb. 1.1).

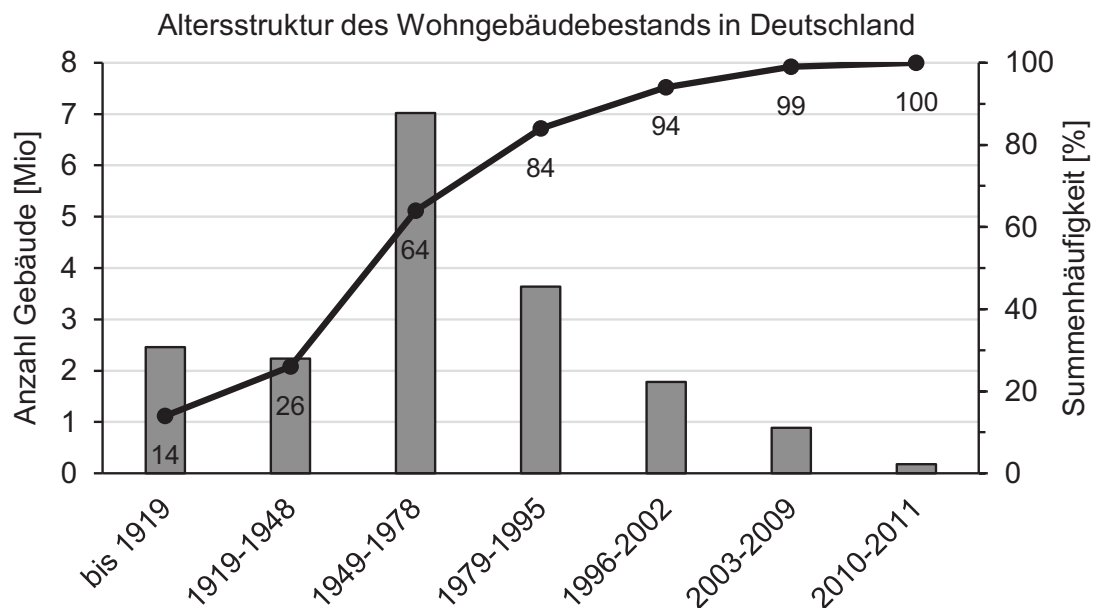


Abb. 1.1 Altersstruktur des Wohngebäudebestands in Deutschland (Stand Dezember 2014) nach BMWI 2014

Eine vergleichbare Altersstruktur liegt bei den Brücken an Bundesfernstraßen vor. Erhebungen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) aus dem Jahr 2018 zufolge, wurde ca. die Hälfte aller bestehenden Brücken in Deutschland bis zum Jahr 1979 erbaut (vgl. Abb. 1.2).

Werden im Rahmen von Umbau-, Ausbau- oder Sanierungsmaßnahmen baustatische Nachrechnungen erforderlich, so sind grundsätzlich die aktuell eingeführten technischen Baubestimmungen anzuwenden. Ausnahmen und Abweichungen hiervon können durch den Bestandsschutz oder den Denkmalschutz begründet werden. Der Grundsatz des Bestandsschutzes besagt dabei, dass ein Bauwerk, welches zum Zeitpunkt seiner Errichtung mit dem damals geltenden Recht in Einklang stand, in seinem bisherigen Bestand und seiner bisherigen Funktion fortgenutzt werden kann, auch wenn das Bauwerk nicht mehr dem aktuellen Bauordnungsrecht entspricht. Unter Wahrung des Bestandsschutzes dürfen jedoch nur solche Maßnahmen durchgeführt werden, welche die Standsicherheit des Bauwerks nicht gefährden.

Voraussetzung für die Geltendmachung des Bestandsschutzes sind die ursprüngliche Rechtmäßigkeit (Baugenehmigung), keine wesentlichen Änderungen der Nutzung und des Tragsystems, ein technischer Zustand der ursprünglich vorgesehen war, die vorhandene Standsicherheit und keine konkrete Gefahr, die vom Bestand ausgeht (Fingerloos et al. 2015).

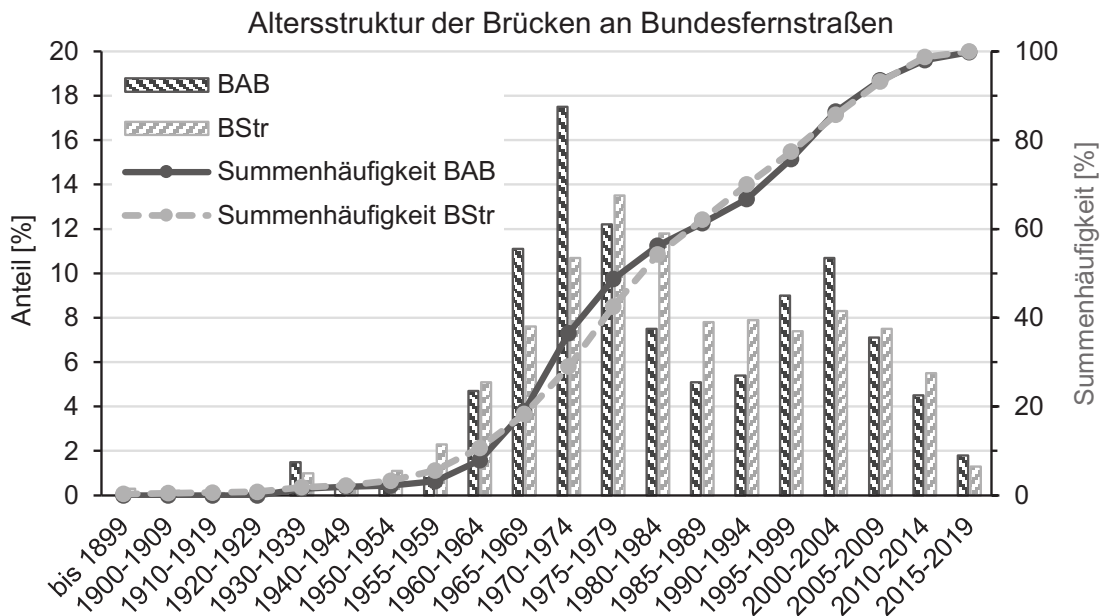


Abb. 1.2 Altersstruktur der Brücken (alle Bauarten) an Bundesfernstraßen nach Brückenflächen der Teilbauwerke in Prozent (Stand 01.09.2018) nach *BAST 2018*

Unter Berücksichtigung des stetig anwachsenden Güterverkehrsaufkommens und der Altersstruktur werden aktuell auch die Tragreserven oder –defizite bestehender Brücken bewertet, um erforderliche Maßnahmen zur Instandsetzung, Ertüchtigung oder Erneuerung rechtzeitig zu ermitteln. Eine hohe Anzahl an Brückenbauwerken wurde nicht gemäß den heute geltenden Vorschriften geplant und errichtet.

Auch die Nachrechnung der Brücken muss grundsätzlich auf Grundlage der Neubaunormen erfolgen. Durch die historische Entwicklung bestimmter Nachweise führt dies jedoch teilweise zu systematischen Überschreitungen, weshalb mit der *Nachrechnungsrichtlinie 2011* ein gesondertes, auf die Besonderheiten bestehender Brücken angepasstes, Verfahren entwickelt wurde.

Vor diesem Hintergrund gewinnt das Bauen im Bestand allgemein zunehmend an Bedeutung. Aufgrund des großen Marktanteils ist eine effiziente und nachhaltige Bewertung der bestehenden Bausubstanz nicht zuletzt auch von großem volkswirtschaftlichen Interesse.

Hierbei ist zu beachten, dass grundsätzlich für Bestandstragwerke jederzeit das gleiche Zuverlässigkeitsniveau gefordert werden muss, wie im Neubaufall. Vor diesem Hintergrund ist eine baustatische Nachrechnung, sofern keine Bestandsschutz geltend gemacht werden kann, nach aktuell bauaufsichtlich eingeführten Regelwerken zu führen (vgl. *ARGEBAU 2008*), welche sich teilweise erheblich von den der ursprünglichen Bemessung zugrunde liegenden Verfahren unterscheiden.

Insbesondere ist hier das semiprobabilistische Sicherheitskonzept der Eurocodes zu nennen, welches sich grundlegend von dem im Stahlbetonbau in Deutschland noch in *DIN 1045:1988-07* implementierten globalen Sicherheitskonzept unterscheidet.

Für die Anwendung der semiprobabilistischen Nachweisverfahren sind sog. charakteristische Materialkennwerte, welche als 5 %-Quantilwerte definiert sind, erforderlich. Bis zur Einführung der *DIN 1045:1972-01* wurde hingegen die in den Nachweisen anzusetzende Betondruckfestigkeit als Mittelwert definiert.

Die charakteristischen Werte der Festigkeiten können zum einen auf der Grundlage von aus der Herstellzeit überlieferten Dokumenten abgeleitet werden. Die grundlegenden Regeln, die hierbei zu beachten sind, sind in *DAfStb 616* zusammengefasst. Zum anderen können charakteristische Festigkeiten durch zerstörende Materialprüfungen an aus dem Bauwerk entnommenen Proben ermittelt werden, womit z. B. auch aus der Ausführung resultierende Unterschiede zwischen der geplanten Materialgüte und der tatsächlichen am Bauwerk vorliegenden Materialgüte sowie eventuelle Einflüsse aus Materialalterung erfasst werden.

Bei einer Bestimmung der Materialkennwerte am Bauwerk ist neben der Durchführung einer qualifizierten Bestandsaufnahme auch eine statistische Bewertung der als Stichprobe bezeichneten Einzelwerte erforderlich. Für die Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit (d. h. der am Bauwerk vorliegenden) existieren verschiedene, teils von der Bauteilart, teils vom Stichprobenumfang abhängige Verfahren, die jedoch fallweise zu einer fehlerhaften und in Hinblick auf die Bauwerkszuverlässigkeit auch kritischen Bewertung der In-situ-Betondruckfestigkeit führen können.

Darüber hinaus ist bei einer auf den aktuell bauaufsichtlich eingeführten Eurocodes fußenden Nachrechnung bestehender Massivbauwerke zu berücksichtigen, dass die dort implementierten Bemessungsgleichungen und die zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerte des semiprobabilistischen Sicherheitskonzeptes auf einer Definition der Betondruckfestigkeit am unter Normbedingungen gelagerten, 28 Tage alten Laborprobekörper beruhen. Der Bemessung im Neubaufall liegt die Annahme zugrunde, dass die tatsächlich am Bauwerk vorliegende In-situ-Betondruckfestigkeit lediglich ca. 85 % der zugehörigen Normprobekörperfestigkeit erreicht. Dieser Unterschied wird im Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_c = 1,50$ bei der Festlegung des Bemessungswertes der Betondruckfestigkeit im Neubaufall berücksichtigt.

Bei einer experimentellen Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit an aus dem Bauwerk entnommenen Probekörpern im Alter von mehr als 28 Tagen ist bisher ungeklärt, ob der vorgenannte Übertragungsfaktor $\eta = 0,85$ auch bei einer Miterfassung der über die 28 Tage-Festigkeit hinausgehenden Nacherhärtung das Verhältnis zwischen Bauwerks- und Normprobekörperfestigkeit mit hinreichender Genauigkeit beschreibt.

Weiterhin ist in Hinblick auf die Festlegung des Nachrechnungswertes der Betondruckfestigkeit die Übertragbarkeit des im Neubaufall bei der Bemessung von Stahlbetonbauteilen nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* anzuwendenden, als Dauerstandsbeiwert bezeichneten Faktors $\alpha_{cc} = 0,85$ bisher ungeklärt.

Insbesondere gilt es zu klären inwieweit eventuelle Auswirkungen von am Bestandstragwerk vorliegenden Dauerlasten im Rahmen einer experimentellen Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit an aus dem Bauwerk entnommenen Proben mit erfasst werden und somit der Ansatz des Dauerstandsbeiwertes $\alpha_{cc} = 0,85$ auch bei der Bestimmung des Nachrechnungswertes der In-situ-Betondruckfestigkeit gerechtfertigt ist.

Außerdem sind in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* Angaben zur Korrelation zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit sowie zwischen Betondruckfestigkeit und Elastizitätsmodul enthalten. Diese Regelungen sind jedoch ausschließlich für die im Neubaufall verwendeten Betone mit einer Definition der Festigkeit am 28 Tage alten Normprobekörper ausgelegt. Bedingt durch verschiedene last- und zeitabhängige Einflussgrößen können die vorgenannten Zusammenhänge nicht ohne weitere Überlegungen auch auf Bestandsbetone übertragen werden. U. a. ist bisher ungeklärt, ob sich eine Nacherhärtung sowie eine durch Eigenspannungen bedingte Mikrorissbildung in gleicher Form auf die Betondruck- und Zugfestigkeit sowie auf den Elastizitätsmodul auswirken.

In vielen Fällen sind aus einer auf den aktuell bauaufsichtlich eingeführten Eurocodes basierenden Nachrechnung resultierende rechnerische Tragfähigkeitsdefizite, abgesehen von Lasterhöhungen oder der Fortschreibung des anzusetzenden Zuverlässigkeitskonzeptes, auf eine nicht sachgerechte Ermittlung der tatsächlich am Bauwerk vorliegenden Materialkennwerte zurückzuführen. Insbesondere die bisher zur Verfügung stehenden statistischen Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit, bei experimenteller und zerstörender (direkter) Prüfung an aus dem Bauwerk entnommenen Proben (Bohrkerne), können teilweise zu einer fehlerhaften Einschätzung der tatsächlich am Bauwerk vorliegenden charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit führen.

1.2 Zielsetzung

Im Sinne einer qualifizierten und sachgerechten Nachrechnung bestehender Massivbauwerke werden in dieser Arbeit Verfahren zur Ermittlung mechanischer Kennwerte von Bestandsbetonen entwickelt (vgl. Abb. 1.3).

Insbesondere wird in dieser Arbeit ein Verfahren entwickelt, welches auch bei kleinem Stichprobenumfang eine zielsichere, d. h. im Hinblick auf die Tragwerkszuverlässigkeit unkritische aber auch wirtschaftliche Bewertung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit ermöglicht.

Auf nicht zerstörende, sog. indirekte Prüfverfahren (wie z. B. die Rückprallhammerprüfung) wird in dieser Arbeit nicht eingegangen, da sie lediglich für eine Abschätzung der oberflächennahen Festigkeit geeignet sind. Diese kann sich bei Bestandsbetonen durch verschiedene zeitabhängige Auswirkungen (wie z. B. Nacherhärtung und Karbonatisierung) teilweise erheblich von der im Bauteilinneren vorliegenden Druckfestigkeit unterscheiden. Infolgedessen wird lediglich ein ergänzender Einsatz indirekter Prüfverfahren, z. B. bei der Festlegung von Prüfbereichen, vorgeschlagen.

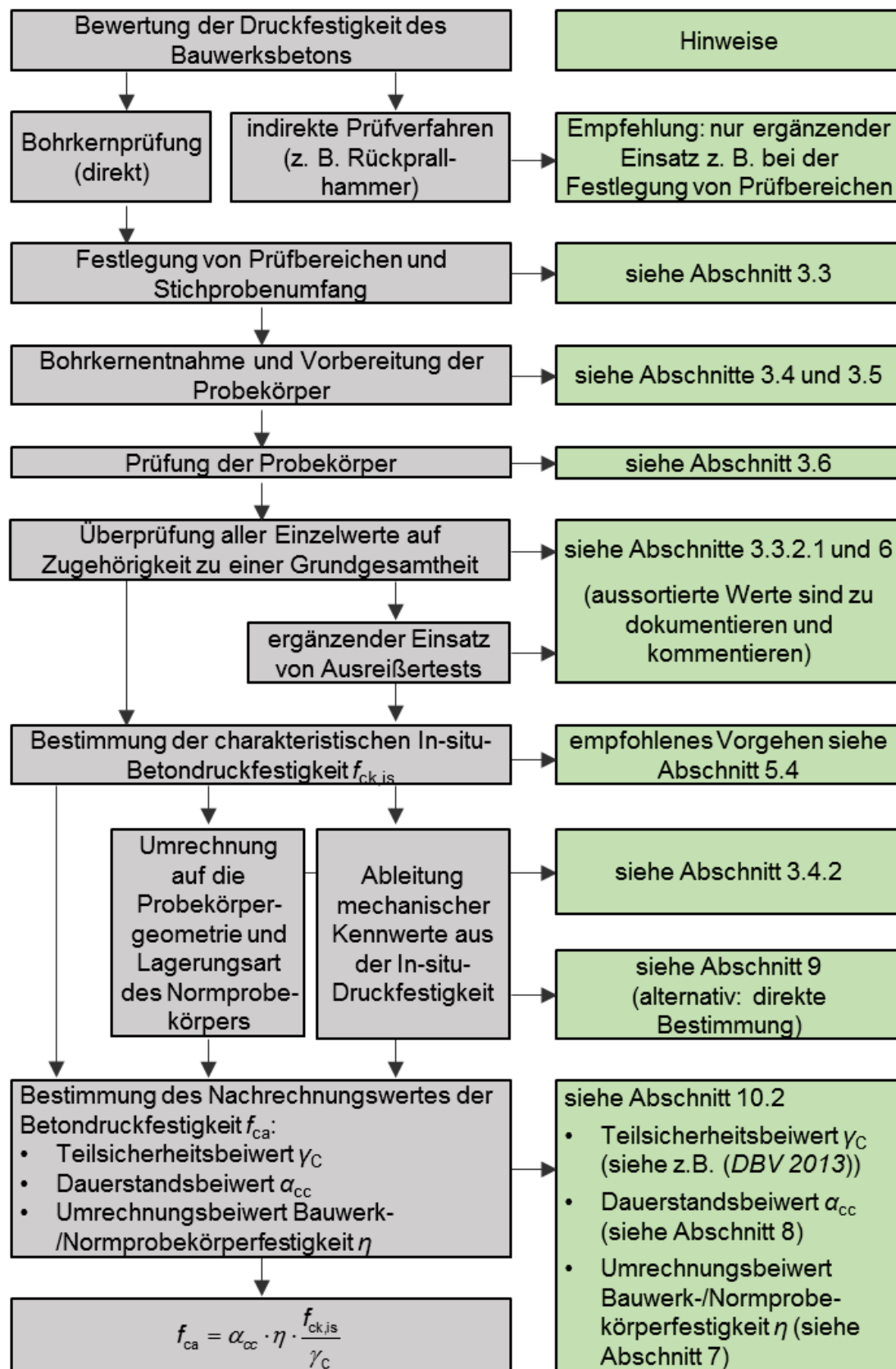


Abb. 1.3 Ermittlung mechanischer Kennwerte von Bestandsbetonen für die Nachrechnung

Durch die Untersuchung des Dauerstandsbeiwertes α_{cc} sowie des Zusammenhangs der tatsächlich am Bauwerk vorliegenden In-situ-Betondruckfestigkeit und der Druckfestigkeit des Normprobekörpers wird die Entwicklung einer abgesicherten Vorgehensweise zur Bestimmung des Nachrechnungswertes der Betondruckfestigkeit angestrebt.

Weiterhin soll in der vorliegenden Arbeit die Übertragbarkeit der in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* beschriebenen Zusammenhänge zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit sowie zwischen Betondruckfestigkeit und Elastizitätsmodul auf Bestandsbetone überprüft werden, um die Notwendigkeit einer experimentellen Ermittlung der Zugfestigkeit und des Elastizitätsmoduls zu bewerten. Dies gewinnt vor allem vor dem Hintergrund einer meist aus baustatischen oder wirtschaftlichen Gründen sowie zur Aufrechterhaltung der Gebrauchstauglichkeit begrenzten Probekörperanzahl an Bedeutung.

1.3 Vorgehensweise

In den letzten Jahren wurden auf nationaler und internationaler Ebene verschiedene Forschungsvorhaben und Untersuchungen durchgeführt, die sich mit der auf einer Bauwerksuntersuchung basierenden Bestimmung charakteristischer Materialkennwerte befassen (vgl. z. B. *Loch et al. 2011*, *Knab u. Sodeikat 2015*, *Holický et al. 2007* und *Caspeele 2010*). All diese auf theoretischen Überlegungen basierenden Forschungsvorhaben gleichen sich insofern, als hauptsächlich die Schwächen bisher bestehender Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit aufgezeigt werden. Aber besonders für in der Praxis meist vorliegende kleine Stichprobenumfänge existieren entweder keine Lösungsansätze oder solche sind nur bedingt praxistauglich.

Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegenden Arbeit ein praxistaugliches Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit bei experimenteller Untersuchung der Druckfestigkeit an aus dem Bauwerk entnommenen Proben ab einem Stichprobenumfang $n = 3$ entwickelt.

Im Mittelpunkt stehen dabei statistische Simulationen an realen umfangreichen Stichproben aus der experimentellen direkten Prüfung der In-situ-Betondruckfestigkeit an aus dem Bauwerk entnommenen Proben.

Nach der Erläuterung der erforderlichen statistischen Grundlagen werden zunächst die bisher zur Verfügung stehenden sowie die im Zuge der Überarbeitung verschiedener Regelwerke auf nationaler und europäischer Ebene diskutierten statistischen Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit beschrieben.

Darauf aufbauend werden verschiedene statistische Kenngrößen von Bestandsbetonen dargestellt sowie zugehörige Einflussgrößen untersucht, um Rahmenbedingungen für die Entwicklung eines statistischen Verfahrens zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit zu schaffen.

Als Grundlage der Entwicklung eines neuen statistischen Verfahrens zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit wird nach der Aufarbeitung bereits vorliegender Untersuchungen zunächst basierend auf statistischen Simulationen an

den in dieser Arbeit betrachteten umfangreichen Datensätzen die Anwendbarkeit bisheriger Verfahren bei kleinem Stichprobenumfang kritisch bewertet. Nach der Identifizierung der Anwendungsgrenzen der bisherigen Verfahren erfolgt auf Grundlage der vorliegenden Datensätze die Entwicklung eines neuen, praxistauglichen Verfahrens.

Die Bewertung von Dauerstandeffekten sowie des Zusammenhangs zwischen Bauwerks- und Normprobekörperfestigkeit bei der Bestimmung des Nachrechnungswertes der Betondruckfestigkeit erfolgt in dieser Arbeit ebenfalls auf experimenteller Basis durch Untersuchungen an aus dem Bauwerk entnommenen Proben. Entsprechendes gilt für den Zusammenhang zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit sowie zwischen Betondruckfestigkeit und Elastizitätsmodul von Bestandsbetonen.

2 Grundlagen der Statistik für die Bewertung von Stichproben im Bauwesen

2.1 Allgemeines

Nach *Plate 1993* stellt die Statistik ein Teilgebiet der Stochastik dar, welches sich allgemein mit der Analyse von Zufallsprozessen befasst. Die Statistik selbst ist weiter untergliedert in zwei Teilbereiche.

Der erste Teilbereich ist die beschreibende oder auch deskriptive Statistik. Er befasst sich im Wesentlichen mit der numerischen oder grafischen Beschreibung und Strukturierung stichprobenartiger Daten.

Der zweite Teilbereich wird als inferentielle, schließende oder auch induktive Statistik bezeichnet. Ziel der inferentiellen Statistik ist es, basierend auf Daten mit endlichem Umfang n Rückschlüsse auf die zugehörigen Zufallsmechanismen der zugehörigen Grundgesamtheit mit $n = \infty$ zu ziehen.

Als Grundgesamtheit oder Population wird hierbei nach *Henze 2008* die Menge aller Untersuchungseinheiten (z. B. Probewürfel aus einer Betoncharge), über die hinsichtlich eines oder mehrerer interessierender Merkmale (z. B. die Druckfestigkeit) eine Aussage gemacht werden soll, bezeichnet. Allgemein ist die Grundgesamtheit bei einer stichprobenartigen Bestimmung von Materialkennwerten durch Probeentnahme am Bestandstragwerk als unbekannt anzunehmen. Für die Bemessung oder Nachrechnung von Massivbauwerken werden jedoch charakteristische Materialkennwerte benötigt, die sich auf die Grundgesamtheit der betrachteten Werkstoffeigenschaft beziehen.

Eine Stichprobe stellt eine zufällig gewonnene, endliche Teilmenge mit Umfang n aus einer Grundgesamtheit dar. Die Messwerte oder Daten x_1, \dots, x_n werden als Realisierung der Zufallsvariablen X bezeichnet.

Da bei der Bestimmung von Materialkennwerten bestehender Massivbauwerke lediglich einzelne Merkmale (z. B. die In-situ-Druckfestigkeit) untersucht und statistisch bewertet werden, sind in den nachfolgenden Kapiteln lediglich Verfahren zur Bewertung eindimensionaler Daten erläutert.

Zur Bewertung des Einflusses von Extremwerten auf die aus der Stichprobe berechneten Parameter wird im vorliegenden Kapitel zusätzlich die Berechnung und Darstellung von Sensitivitätskurven erläutert. Der quantitative Einfluss von Extremwerten und Ausreißern wird in Kapitel 6 der vorliegenden Arbeit bewertet.

Die nachfolgenden Ausführungen basieren maßgeblich auf *Hartung 1993*, *Henze 2008*, *Plate 1993* und *Rooch 2014*.

2.2 Deskriptive Statistik

2.2.1 Allgemeines

Die deskriptive Statistik befasst sich allgemein mit der Beschreibung der wesentlichen Kenngrößen von Daten. Dabei werden entweder numerische Zusammenfassungen in

Form statistischer Maßzahlen zur Lage oder Streuung oder grafische Zusammenfassungen zur bildlichen Veranschaulichung der Daten verwendet.

Nachfolgend werden lediglich die numerischen oder grafischen Zusammenfassungen näher erläutert, die auch im weiteren Verlauf dieser Arbeit Verwendung finden.

2.2.2 Numerische Beschreibung der Lage

Arithmetisches Mittel

Das arithmetische Mittel \bar{x} nach Gleichung (2.1), welches umgangssprachlich auch als Mittelwert oder Durchschnitt der Daten bezeichnet wird, beschreibt physikalisch gesehen den Schwerpunkt der Daten der Stichprobe mit einem Stichprobenumfang n , bestehend aus den Einzelwerten x_i .

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.1)$$

Empirischer Median

Für die Bestimmung des empirischen Medianes med , welcher auch als Zentralwert bezeichnet wird, sind die Einzelwerte der Größe nach zu sortieren, sodass x_1 den kleinsten, x_j den j -kleinsten und x_n den größten Wert bezeichnet. Der so sortierte Datensatz heißt Ordnungsstatistik. Die Beobachtung x_i hat den Rang i .

Der Median med nach Gleichung (2.2) teilt die Daten in eine obere und eine untere Hälfte; d. h. 50 % der Prüfwerte sind kleiner oder gleich und 50 % sind größer oder gleich med .

$$med(x_1, \dots, x_n) = \tilde{x} = \begin{cases} x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)} & \text{falls } n \text{ ungerade} \\ \frac{1}{2} \left(x_{\left(\frac{n}{2}\right)} + x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)} \right) & \text{falls } n \text{ gerade} \end{cases} \quad (2.2)$$

Modalwert

Der Modalwert oder auch Modus beschreibt den Wert einer Stichprobe, der am häufigsten auftritt. Bei einer stetigen Zufallsvariablen beschreibt der Modalwert die Maximalstelle der Verteilungsdichte.

Getrimmter Mittelwert

Eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung der Lage ist der γ -getrimmte Mittelwert \bar{x}_γ nach Gleichung (2.3) und Gleichung (2.4).

$$\bar{x}_\gamma = \frac{1}{n-2k} \sum_{i=k+1}^{n-k} x_{(i)} \quad (2.3)$$

mit:

$$k = \lfloor \gamma \cdot n \rfloor \quad (2.4)$$

$\lfloor \]$ ganze Zahl die man durch Abrunden erhält

γ Faktor zur Beschreibung des von der Berechnung des Mittelwertes auszuschließenden Datenanteils

Bei der Berechnung des getrimmten Mittelwertes werden somit die k (siehe Gleichung (2.4)) kleinsten und k größten Werte der Daten ausgeschlossen.

Für $\gamma = 0$ entspricht der getrimmte Mittelwert dem arithmetischen Mittel.

Empirisches p -Quantil

Das p -Quantil x_p teilt die nach der Größe sortierten Daten in zwei Teile: $100 \cdot p$ % der Daten kleiner oder gleich und der Rest ($100 \cdot (1 - p)$ %) größer oder gleich x_p .

$$x_p = \begin{cases} x_{(\lfloor n \cdot p + 1 \rfloor)} & \text{falls } n \cdot p \text{ keine ganze Zahl ist} \\ \frac{1}{2} (x_{(n \cdot p)} + x_{(n \cdot p + 1)}) & \text{falls } n \cdot p \text{ eine ganze Zahl ist} \end{cases} \quad (2.5)$$

mit:

$\lfloor n \cdot p + 1 \rfloor$ größte ganze Zahl, die kleiner oder gleich der reellen Zahl $n \cdot p + 1$ ist

2.2.3 Numerische Beschreibung der Streuung

Spannweite

Die Spannweite R beschreibt den Wertebereich, in dem alle Einzelwerte der Stichprobe liegen. Sie ist somit über die Angabe des kleinsten und des größten Einzelwertes bestimmt. Die Spannweite wird auch als Breite des Streubereichs oder engl. "Range" bezeichnet. Die zugehörige Berechnung kann Gleichung (2.6) entnommen werden.

$$R = x_n - x_1 \quad (2.6)$$

Empirische Varianz oder Stichprobenvarianz

Die empirische Varianz s_x^2 nach Gleichung (2.7) ist ein Maß dafür, wie stark die Einzelwerte vom arithmetischen Mittelwert abweichen.

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.7)$$

Bei der Berechnung der empirischen Varianz werden durch das Quadrieren positive und negative Abweichungen der Einzelwerte vom arithmetischen Mittelwert in gleicher Weise berücksichtigt.

Durch die Division mit $(n - 1)$ kann die Varianz der Daten zutreffender beschrieben werden, d. h. die Wahrscheinlichkeit der Unterschätzung ist geringer, als bei einer Division durch n . Die Stichprobenvarianz s_x^2 ist ein erwartungstreuer Schätzer der Varianz (vgl. Abschnitt 2.3.2.2).

Empirische Standardabweichung oder Stichprobenstandardabweichung

Die Wurzel der empirischen Varianz oder Stichprobenvarianz beschreibt die empirische Standardabweichung oder auch Stichprobenstandardabweichung s_x .

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.8)$$

Empirischer Variationskoeffizient

Der Quotient aus empirischer Standardabweichung und arithmetischem Mittel wird nach Gleichung (2.9) als empirischer Variationskoeffizient v_x bezeichnet. Der Ausdruck ist lediglich für arithmetische Mittelwerte $\bar{x} \neq 0$ definiert.

$$v_x = \frac{s_x}{\bar{x}} \quad (2.9)$$

Der Variationskoeffizient ist ein von der Maßeinheit unabhängiges Maß zur Beschreibung der Stärke der relativen Streuung.

Median Absolute Deviation (MAD)

Die mittlere absolute Abweichung vom Median, welche meist als *MAD* (median absolute deviation) bezeichnet wird, ist ein Maß dafür, wie stark die Einzelwerte vom Median abweichen.

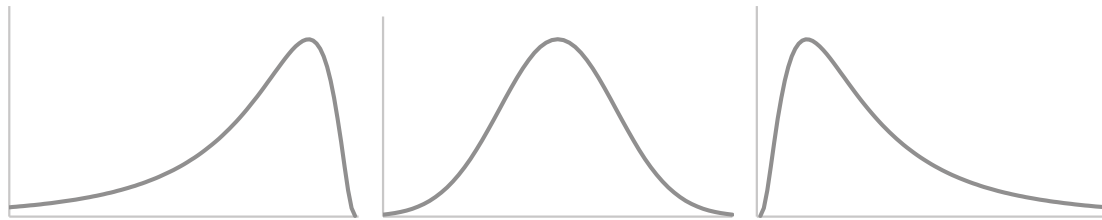
$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - med(x_1, \dots, x_n)| \quad (2.10)$$

Empirische Schiefe

Die Schiefe g ist eine Maßzahl, die beschreibt, in welche Richtung eine Verteilung schief ist. Darüber hinaus beschreibt der nach Gleichung (2.11) zu berechnende, erwartungstreue Wert neben der Richtung auch die Größenordnung der Schiefe.

$$g = \frac{n}{(n-1) \cdot (n-2)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (2.11)$$

Bei negativer Schiefe spricht man von einer linksschiefen oder rechtssteilen Verteilung – bei positiver Schiefe von einer rechtsschiefen oder linkssteilen Verteilung. Nimmt die Schiefe den Wert 0 an, so ist die Verteilung symmetrisch (vgl. Abb. 2.1).



a) linksschief: $g < 0$ b) symmetrisch: $g = 0$ c) rechtsschief: $g > 0$

Abb. 2.1 Linksschiefe, symmetrische und rechtsschiefe Verteilung

Eine Verwendung der Schiefe ist allgemein nur bei eingipfligen (unimodalen) Verteilungen (vgl. Abb. 2.2) sinnvoll.

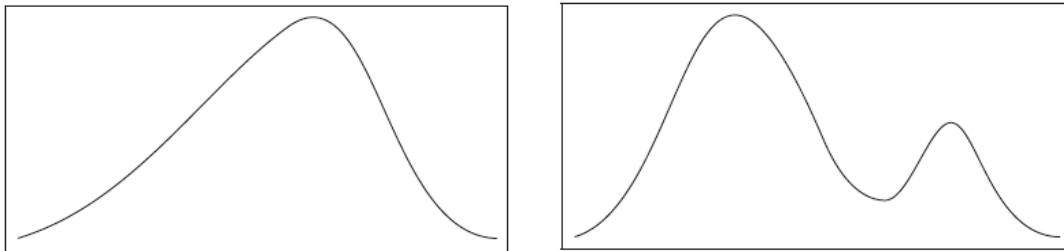


Abb. 2.2 Ein- und zweigipflige (uni- und bimodale) Verteilung nach *Toutenburg u. Heumann 2008*

2.2.4 Grafische Zusammenfassungen

Empirische Verteilungsfunktion

Die empirische Verteilungsfunktion einer Zufallsvariable kann entsprechend Gleichung (2.12) aus der Stichprobe mit dem Umfang n geschätzt werden. Die Daten x_1, \dots, x_n beschreiben dabei Realisierungen der Zufallsvariablen X . Sofern es sich bei den Daten um Realisierungen unabhängiger Zufallsvariablen handelt, stellt die empirische Verteilungsfunktion einen guten Schätzer der Verteilungsfunktion der Zufallsvariablen dar.

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n 1\{1 \leq i \leq n : x_i \leq x\} \quad (2.12)$$

mit:

$$1\{1 \leq i \leq n : x_i \leq x\} = 1, \text{ falls } x_i \leq x$$

$$1\{1 \leq i \leq n : x_i \leq x\} = 0, \text{ falls } x_i > x$$

$F_n(x)$ ist somit ein Maß dafür, welcher Anteil der Daten kleiner oder gleich x ist.

Liegen die Daten entsprechend der Ordnungsstatistik der Größe nach geordnet vor, d. h. x_1 beschreibt den kleinsten, x_j den j -kleinsten und x_n den größten Wert, so kann die empirische Verteilungsfunktion mit Gleichung (2.13) berechnet werden.

$$F_n(x_{(k)}) = \frac{k}{n} \quad (2.13)$$

mit:

k Rang der Beobachtung

Die Funktion bleibt bis zur nächsten Beobachtung x_{k+1} konstant, weshalb sich eine Treppenfunktion mit Sprungstellen an den Einzelwerten x_i ausbildet.

Durch lineare Interpolation zwischen den einzelnen Datenpunkten kann eine stetige empirische Verteilungsfunktion ermittelt werden.

Weitere Möglichkeiten zur Bestimmung der empirischen Verteilungsfunktion können z. B. *Hartung 1993* entnommen werden.

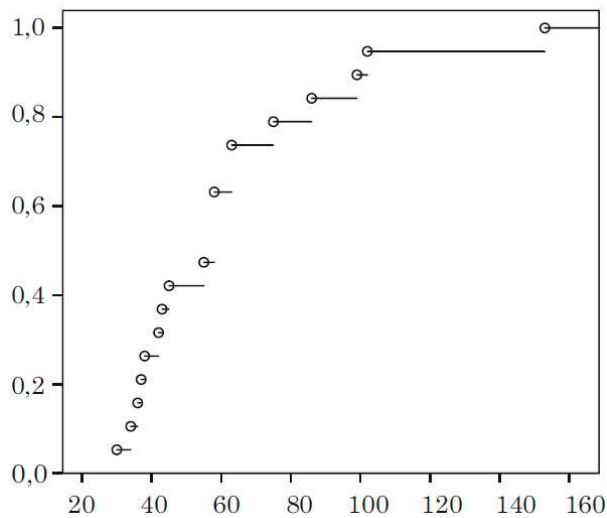


Abb. 2.3 Empirische Verteilungsfunktion nach *Rooch 2014*

Normiertes Histogramm

Für die Erstellung eines Histogramms werden die Stichprobenwerte x_1, \dots, x_n in einzelne Klassen eingeteilt. Als Klassen werden dabei je nach Definition halboffene Intervalle der Form $[a_j, a_{j+1})$ oder $(a_j, a_{j+1}]$ mit den Intervall- oder Trenngrenzen a_j und a_{j+1} verwendet. Folglich gilt je nach Definition der Intervallgrenzen im ersten Fall $a_j \leq x_i < a_{j+1}$ und im zweiten Fall $a_j < x_i \leq a_{j+1}$. Im Rahmen der folgenden Erläuterungen wird lediglich der Fall $[a_j, a_{j+1})$ betrachtet. Bei einer abweichenden Definition der Intervallgrenzen sind die Gleichungen entsprechend anzupassen.

Für die Intervallgrenzen gilt gemäß Gleichung (2.14):

$$-\infty < \dots < a_j < a_{j+1} < \dots < +\infty \tag{2.14}$$

Durch die Auftragung eines Rechtecks über jedem der Teilintervalle entsteht eine grafische Darstellung der Stichprobe in Form eines Histogramms. Die Fläche der einzelnen Rechtecke entspricht dabei der jeweils zugehörigen relativen Klassenhäufigkeit nach Gleichung (2.15). Innerhalb einer Klasse wird beim Histogramm von gleichverteilten Beobachtungswerten ausgegangen.

$$k_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \mathbf{1}\{a_j \leq x_i < a_{j+1}\} \tag{2.15}$$

mit:

$1\{a_j \leq x_i < a_{j+1}\} = 1$, falls x_i innerhalb der Intervallgrenzen a_j und a_{j+1} liegt

$1\{a_j \leq x_i < a_{j+1}\} = 0$, falls x_i außerhalb der Intervallgrenzen a_j und a_{j+1} liegt

Bei bekannter Intervallbreite kann die Höhe eines jeden Rechtecks mit Gleichung (2.16) berechnet werden.

$$d_j = \frac{k_j}{a_{j+1} - a_j} \quad (2.16)$$

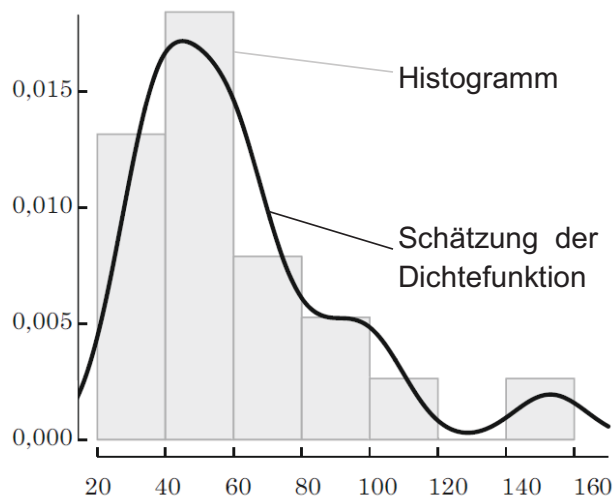


Abb. 2.4 Histogramm mit Schätzung der Dichtefunktion nach *Roach 2014*

Bei einer hinreichend feinen Klasseneinteilung, die jedoch auch einen ausreichend großen Stichprobenumfang erfordert, dient das Histogramm als Schätzer der Dichtefunktion. Verfahren zur Bestimmung der empirischen Dichtefunktion werden in Abschnitt 2.2.4.3 erläutert.

Für die Festlegung der Intervallbreite Δx oder Klassenanzahl, nachfolgend mit s bezeichnet, existieren keine allgemeingültigen Regeln, jedoch einige „Faustregeln“:

Klassenanzahl nach *Henze 2008*

$$s \approx \sqrt{n} \quad (2.17)$$

Klassenanzahl nach *Benjamin u. Cornell 1970*

$$s \approx 1 + 3,3 \cdot \log(n) \quad (2.18)$$

Klassenbreite nach *Scott 1979*

$$\Delta x \approx \frac{3,49 \cdot s_x}{\sqrt[3]{n}} \quad (2.19)$$

mit:

s_x an der Stichprobe geschätzte Standardabweichung

Die Summe aller Klassenhäufigkeiten und somit die Summe aller Rechteckflächen ist beim normierten Histogramm stets 1,0. Bei der Verwendung von Klassen gleicher Breite ist neben der Fläche auch die Höhe der Intervalle proportional zur jeweiligen Klassenhäufigkeit. Grundsätzlich werden in der Praxis verschiedene Arten von Histogrammen verwendet. Fälschlicherweise werden auch oft einfache Säulen- oder Balkendiagramme als Histogramm bezeichnet, obwohl die auf der y -Achse angetragenen Werte nicht wie in Gleichung (2.15) beschrieben normiert wurden, sondern einfach die absolute Anzahl abgetragen wird.

Empirische Dichtefunktion

Eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung der empirischen Dichte stellen neben dem Histogramm sog. Dichte- oder Kerndichteschätzer dar. Im Gegensatz zum Histogramm liefert der Kerndichteschätzer eine stetige Verteilung. Zur Bestimmung des Kerndichteschätzers wird innerhalb des Wertebereichs x_1, \dots, x_n , der durch die kleinste und größte Beobachtung einer Stichprobe definiert ist, an endlich vielen Stellen x der Wert der empirischen Dichte nach Gleichung (2.20) bestimmt.

$$f(x) = \frac{1}{b \cdot n} \sum_{i=1}^n w\left(\frac{x - x_i}{b}\right) \quad (2.20)$$

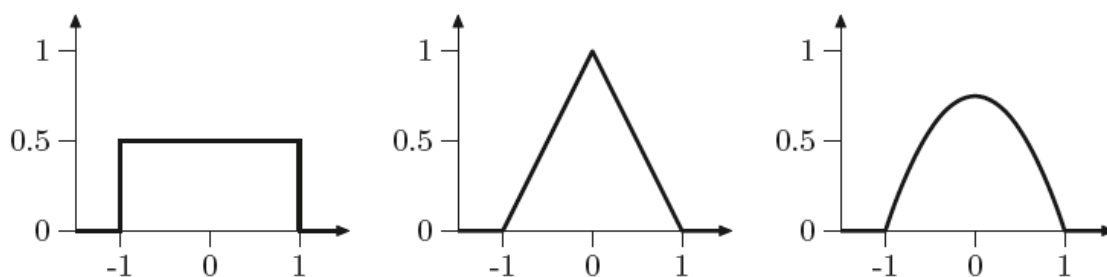
mit:

b frei wählbarer Parameter zur Beschreibung der Intervallbreite $[x - b, x + b]$

n Anzahl der Beobachtungen / Stichprobenumfang

w Gewichtsfunktion oder Kern

In Abb. 2.5 sind typische Kerne dargestellt.



a) Rechteckskern

b) Dreieckskern

c) Epanechnikov-Kern

Abb. 2.5 Rechteckskern, Dreieckskern und Epanechnikov-Kern nach *Toutenburg u. Heumann 2008*

Ein weiterer typischer Kern ist der Gauß-Kern, dessen Form der Gaußschen Glockenkurve (vgl. Abb. 2.12) entspricht. Es gelten:

Rechteckskern

$$w(x) = \begin{cases} 1/2 & -1 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.21)$$

Dreieckskern

$$w(x) = \begin{cases} 1-|x| & |x| < 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.22)$$

Epanechnikov-Kern

$$w(x) = \begin{cases} \frac{3}{4}(1-x^2) & |x| < 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.23)$$

Gauß-Kern

$$w(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right) \quad (2.24)$$

Es sind lediglich Beobachtungswerte x_i innerhalb des Intervalls $[x-b, x+b]$ maßgebend zur Berechnung der empirischen Dichte an der Stelle x .

Alle Funktionen, die als Kern verwendet werden, müssen symmetrisch um Null sein, stets Werte größer oder gleich Null annehmen und die Fläche unter der Funktion muss eins ergeben.

2.3 Inferentielle Statistik

2.3.1 Allgemeines

Bei der inferentiellen Statistik geht es darum, basierend auf Daten mit endlichem Umfang n Rückschlüsse auf die zugehörigen Zufallsmechanismen der zugehörigen Grundgesamtheit mit $n = \infty$ zu ziehen. Dieser Vorgang wird auch als Schätzen bezeichnet. Die Daten oder auch Einzelwerte beschreiben dabei Realisierungen von Zufallsvariablen mit unbekannter Verteilung.

Hauptaufgabe der inferentiellen Statistik ist somit das Schätzen der unbekanntes Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zur Beschreibung der funktionalen Form der Verteilung sowie der zugehörigen Parameter.

Über die reine Punktschätzung hinaus wird nachfolgend auch die zugehörige Güte sowie die Intervallschätzung betrachtet. All den nachfolgend erläuterten Verfahren liegt die Annahme zugrunde, dass keine Vorinformationen über die Wahrscheinlichkeitsstruktur der Grundgesamtheit vorliegen. Verfahren zur Schätzung der Form der Dichtefunktion werden hier nicht gesondert betrachtet. An dieser Stelle wird z. B. auf *Plate 1993* verwiesen. Über die rechnerische Schätzung der Form hinaus, besteht auch die Möglichkeit der optischen Bewertung der empirischen

Verteilungs- oder Dichtefunktion mit den entsprechenden Verläufen bekannter Verteilungsarten.

2.3.2 Schätzung von statistischen Parametern

2.3.2.1 Allgemeines

Die Schätzung eines statistischen Parameters u_g der unbekanntes Dichtefunktion f_x der Gesamtheit aller Realisierungen basiert auf einer Stichprobe mit n Elementen x_i , die bei den im Bauwesen gebräuchlichen Anwendungsfällen als stochastisch unabhängig betrachtet werden können.

Allgemein ist zu beachten, dass eine Grundgesamtheit in beliebig viele Stichproben mit dem Umfang n zerlegt werden kann. Für jede dieser Stichproben, deren Anzahl nachfolgend mit m beschrieben wird, kann eine Schätzung u_j für den Parameter u_g durchgeführt werden. Die Größe u_j beschreibt dabei die Schätzung an der j -ten Stichprobe. Mit wachsendem n nähert sich der Schätzer u_j immer mehr dem tatsächlichen Wert an.

Infolgedessen sind auch die an Stichproben mit dem Umfang n ermittelten Schätzungen u_j als Realisierung einer Zufallsvariable u mit eigener Verteilungsfunktion f_u , die durch den Mittelwert μ_u und die Varianz σ_u^2 definiert wird, zu betrachten. Die Größe μ_u beschreibt den Mittelwert der gemessenen Größen u_j . Im Einzelfall sind daher mehr oder weniger große Abweichungen des an der Stichprobe ermittelten Schätzers u_j vom zugehörigen Mittelwert möglich. Der Parameter u_g beschreibt den Wert der Gesamtheit.

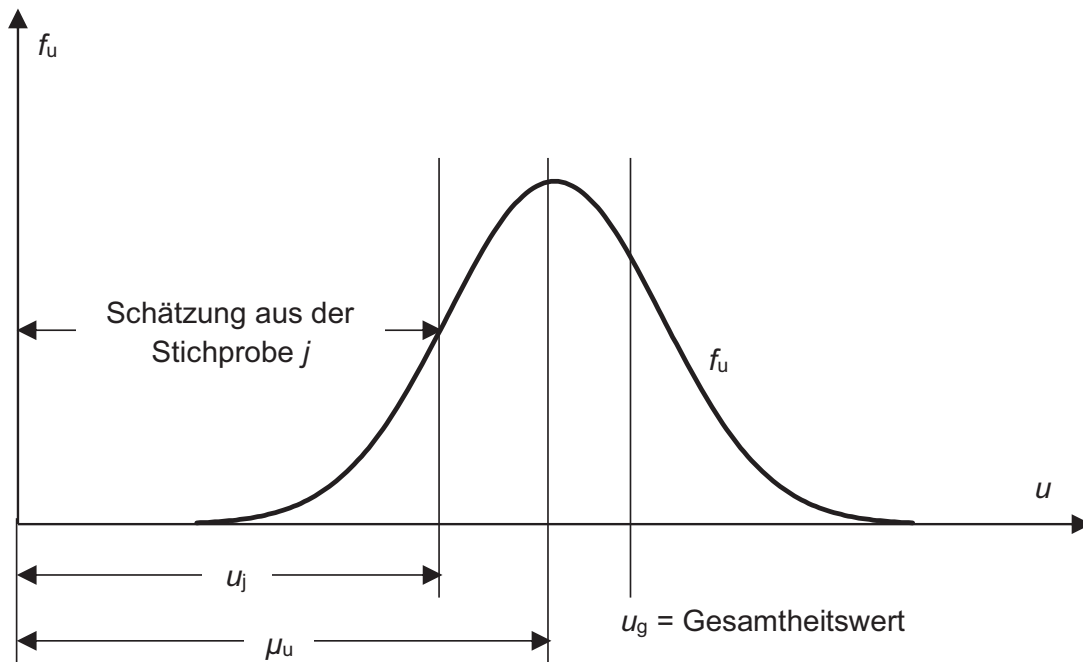


Abb. 2.6 Verteilung eines statistischen Parameters u in Anlehnung an *Plate 1993*

Für die Schätzung des Parameters u_g werden grundsätzlich zwei Methoden unterschieden: Die klassische Statistik und die Bayes'sche Statistik.

Die klassische Statistik basiert dabei auf der Annahme, dass u_g ein exakter und konstanter Wert ist. Infolgedessen ist der Wert erst exakt bekannt, wenn auch alle Realisierungen der Zufallsvariablen betrachtet werden. Ziel ist es, den Parameter u_j so zu bestimmen, dass er den entsprechenden Wert der Gesamtheit u_g möglichst genau beschreibt.

Im Unterschied zur klassischen Statistik geht die Bayes'sche Statistik davon aus, dass u_g kein exakter Wert, sondern eine Zufallsvariable ist. Ziel der Bayes'schen Statistik ist es den für die Verteilung der vorhandenen Stichprobe maßgebenden Parameter mit dem möglichst besten Wert zu schätzen.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen beiden Verfahren ist die Anwendbarkeit bereits vorliegender Information.

2.3.2.2 Kriterien für die Bestimmung der Schätzfunktion

Im Hinblick auf die Güte eines Schätzers u_j werden die folgenden Anforderungen gestellt:

- Bei Betrachtung vieler Stichproben muss der Schätzer u_j im Mittel zum exakten Wert u_g der Gesamtheit werden (Konsistenz).
- Die Abweichungen des Schätzers u_j zum exakten Wert u_g sollen möglichst gering sein (Asymptotische Verteilung).
- Für große Stichproben muss der Schätzer u_j asymptotisch den exakten Wert u_g annehmen (Konsistenz).
- Durch das Hinzufügen neuer Elemente darf er sich nur wenig ändern (Stetigkeit).

Bei der Bewertung der Güte eines Schätzers ist zu beachten, dass in der Regel nur eine Stichprobe mit dem Umfang n zur Verfügung steht. Deshalb wird nachfolgend davon ausgegangen, dass jedes Element x_i die Realisierung einer eigenen Zufallsvariablen ist. Folglich sind in einer Stichprobe vom Umfang n auch n Zufallsvariablen mit je einer Realisierung enthalten. Da alle Elemente der gleichen Gesamtheit zuzuordnen sind, sind auch alle Zufallsvariablen gleich, d. h. sie haben identische Erwartungswerte.

Nachfolgend werden verschiedene Arten von Schätzungen erläutert.

Erwartungstreue Schätzung

Ein Schätzer gilt als erwartungstreu, sofern sein Erwartungswert μ_u der theoretische Parameter u_g (vgl. Abb. 2.6) der Gesamtheit ist. Sofern $u_g - \mu_u \neq 0$ hat die Schätzung einen systematischen Fehler, einen sog. Bias. Das arithmetische Mittel der Stichprobe nach Gleichung (2.1) stellt einen erwartungstreuen Schätzer des Mittelwertes μ_x und die empirische Varianz s_x^2 nach Gleichung (2.7) einen erwartungstreuen Schätzer der Varianz σ_x^2 dar.

Wirksame oder effiziente Schätzung

Bei einer wirksamen oder effizienten Schätzung u_e nimmt die Summe der quadratischen Abweichungen der an allen m Stichproben bestimmten Schätzern wie in Gleichung (2.25) beschrieben ein Minimum an.

$$\sum_{j=1}^m (u_j - u_e)^2 \rightarrow \min \quad (2.25)$$

Der arithmetische Mittelwert nach Gleichung (2.1) ist ebenfalls ein wirksamer oder effizienter Schätzer. Allgemein jedoch ist ein erwartungstreuer Schätzer zwar biasfrei, hat jedoch nicht zwangsläufig auch eine kleinere Varianz als andere Schätzer. Ebenso hat ein wirksamer oder effizienter Schätzer zwar die kleinste Varianz, kann jedoch aber auch einen Bias haben.

Konsistente Schätzung

Ist eine Schätzung konsistent, so konvergiert diese für $n \rightarrow \infty$ gegen den wahren Wert des zu schätzenden Parameters der zugehörigen Gesamtheit.

Ausreichende Schätzung

Eine Schätzung ist ausreichend oder auch suffizient, sofern alle verfügbaren Informationen verwendet werden. Bei Stichproben ist dies z. B. der Fall, wenn alle verfügbaren Daten zur Schätzung des Parameters verwendet werden.

Robuste Schätzung

Als robust gilt eine Schätzung, wenn Änderungen der Stichprobe, wie z. B. eine Veränderung des Umfangs oder Einzelwerte die deutlich von der Masse der bisherigen Daten abweichen, nur einen kleinen Einfluss auf das Ergebnis der Schätzfunktion haben.

Für die Bestimmung von Schätzfunktionen existieren verschiedene Verfahren. Gängige Verfahren sind die Momentenmethode, die Maximum Likelihood Methode und das Bayes'sche Verfahren. Die wohl größte Bedeutung für das Bauwesen hat dabei das in *DIN EN 1990:2010-12* verwendete Bayes'sche Verfahren, welches es ermöglicht, Zusatzinformationen zu berücksichtigen, was bei anderen Verfahren nur eingeschränkt möglich ist.

Vor diesem Hintergrund wird folgend lediglich das Bayes'sche Verfahren, welches auf der Ermittlung der Dichte des zu schätzenden Parameters beruht, näher beschrieben. Die Momentenmethode und die Maximum Likelihood Methode, die sich beide mit der besten Schätzung eines konstanten Parameters befassen (Punktschätzung), werden z. B. in *Plate 1993* erläutert.

2.3.3 Güte der Parameterschätzung

2.3.3.1 Allgemeines

Per Definition wird bei der Parameterschätzung mit Verfahren der klassischen Statistik der Mittelwert μ_u eines Parameters der Gesamtheit nach Abb. 2.6 als Konstante angenommen. Die an den Stichproben vom Umfang n ermittelten Schätzer u_j sind somit Realisierungen einer Zufallsvariable u mit eigener Verteilungsfunktion f_u und dem Mittelwert μ_u und der Varianz σ_u^2 .

Zur Beurteilung der Güte der Schätzung der Verteilungsfunktion f_u wird angenommen, dass die Stichprobe zur Schätzung u_j einer Normalverteilung entstammt. Diese Annahme kann durch den zentralen Grenzwertsatz begründet werden, der besagt, dass die Summen stochastisch unabhängiger Variablen mit beliebiger, jedoch untereinander identischer Verteilung für $n \rightarrow \infty$ gegen die Standardnormalverteilung konvergieren. Die hier betrachteten Kenngrößen, die sog. Momente resultieren aus einer Summierung der Daten.

2.3.3.2 Konfidenzzahlen und Konfidenzintervalle

Die Bewertung der Güte einer Schätzung erfolgt nachfolgend, wie oben erläutert, für eine Stichprobe aus einer normalverteilten Gesamtheit mit der Dichtefunktion f_x und den Parametern μ_x und σ_x^2 . An der Stichprobe kann eine Schätzung u_j für den Parameter μ_u erfolgen.

Wie in Abb. 2.7 dargestellt, weichen die zu bewertenden Stichprobenparameter zufällig vom Mittelwert μ_u ab. Die einzelnen Schätzer u_j sind um den Mittelwert μ_u konzentriert.

Die Wahrscheinlichkeit, dass die Werte innerhalb eines Bereichs $u_{\min} < u < u_{\max}$ liegen, kann entsprechend Gleichung (2.26) berechnet werden.

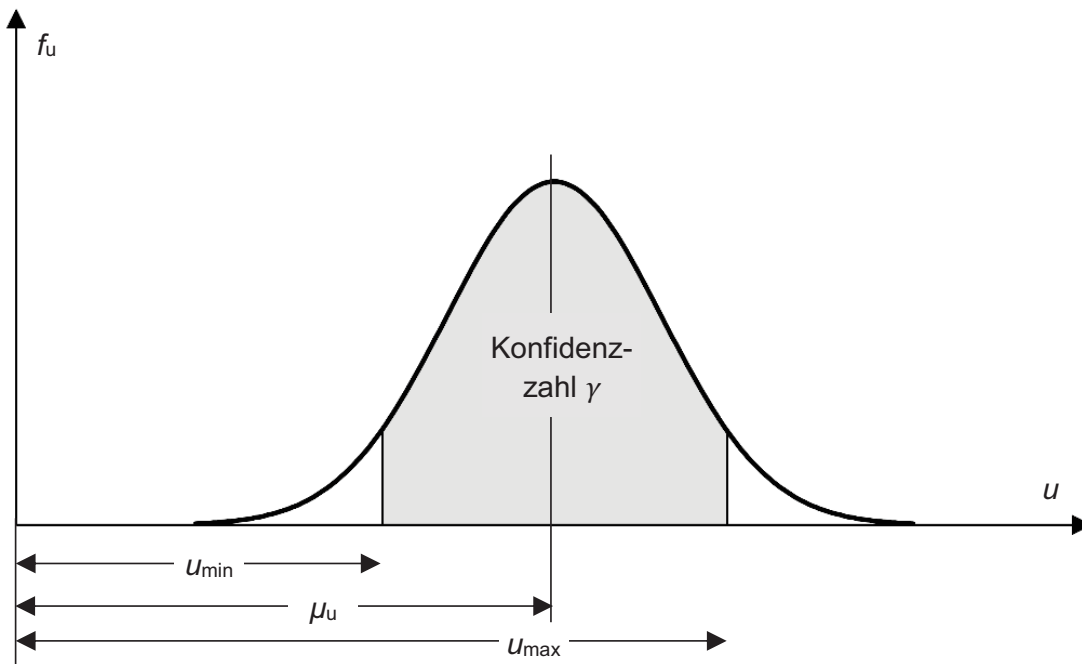


Abb. 2.7 Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung von u und Konfidenzniveau γ in Anlehnung an Plate 1993

$$D(\eta_\gamma) = \int_{u_{\min}}^{u_{\max}} f_u du \quad (2.26)$$

mit:

$$\eta_\gamma = \frac{u_j - \mu_u}{\sigma_u} \quad (2.27)$$

Die Größe $D(\eta_\gamma)$, welche auch als Konfidenzzahl γ bezeichnet wird, beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass die zu beobachtende Größe innerhalb des Bereichs $u_{\min} < u < u_{\max}$ liegt. Die Konfidenzzahl ist somit ein Maß für den Streubereich. Der Abstand zwischen u_{\min} und u_{\max} wird als Konfidenzintervall bezeichnet. Es gilt: Je höher die Konfidenzzahl, desto breiter das Konfidenzintervall und desto geringer die Güte der Vorhersage. In Tab. 2.1 ist für die Normalverteilung für verschiedene Konfidenzzahlen γ der gemäß Gleichung (2.27) definierte Wert η_γ zur Festlegung des Abstandes der Konfidenzgrenzen u_{\min} und u_{\max} vom Mittelwert, basierend auf der Standardnormalverteilung, dargestellt.

Tab. 2.1 Werte η_γ zur Festlegung von Konfidenzgrenzen für die Normalverteilung

γ	0,75	0,90	0,95	0,99	0,999
η_γ	1,150	1,645	1,960	2,576	3,291

Während die bisherigen Ausführungen zu Konfidenzzahlen und –intervallen auf einer bekannten Verteilung f_u basierten, sind bei praktischen Aufgabenstellungen die Parameter der Gesamtheit u_g unbekannt. Es sind lediglich die Stichprobenparameter u_j bekannt. Auf Grundlage der Annahme $u_g = \mu_u$ gilt es zunächst den Bereich $u_{\min} < \mu_u < u_{\max}$ festzulegen, in dem μ_u liegen kann. Da die Lage von u unbekannt ist, ist dieser Streubereich symmetrisch um den an der Stichprobe ermittelten Wert u_j anzuordnen, d. h. die Wahrscheinlichkeit, dass μ_u links oder rechts von u_j liegt, ist gleich groß.

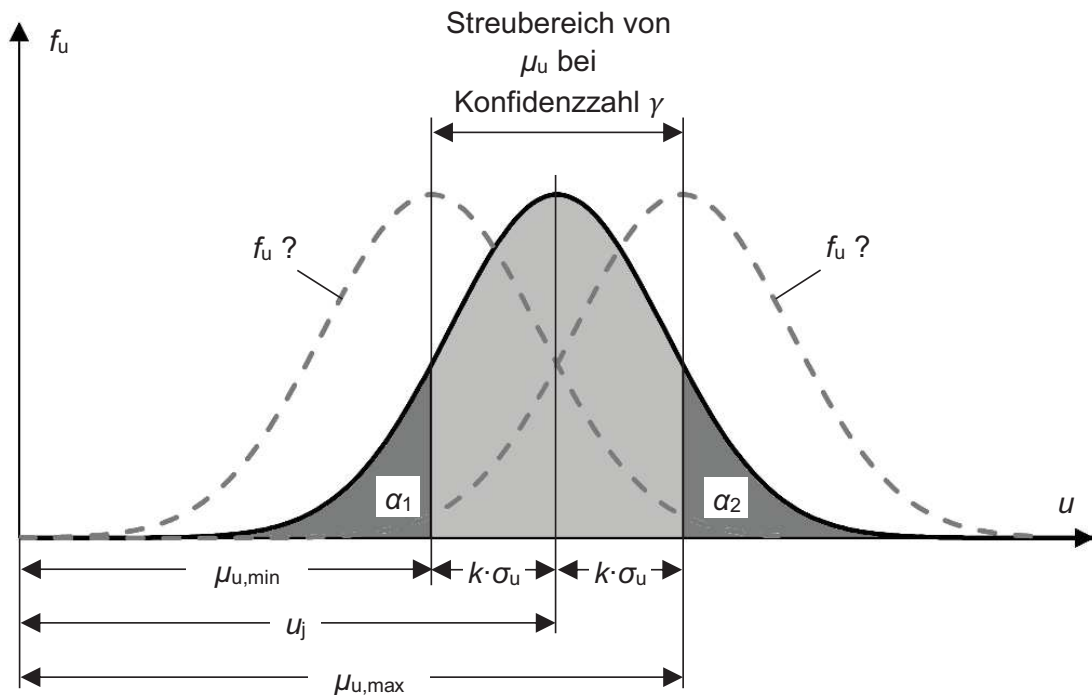


Abb. 2.8 Lage des Gesamtheitsmittels μ_u im Vergleich zur Lage des geschätzten Parameters u_j in Anlehnung an Plate 1993

Die in Abb. 2.8 mit α_1 und α_2 bezeichneten Bereiche außerhalb des Konfidenzbereichs werden als Signifikanzzahl oder Signifikanzbereich bezeichnet. Folglich gibt das Konfidenzintervall, welches auch als Vertrauensbereich bezeichnet wird, den möglichen Wertebereich eines Parameters mit der Wahrscheinlichkeit $\gamma = 1 - \alpha$ an. Umgekehrt beschreiben die Parameter α_i die Wahrscheinlichkeit, dass der gesuchte

Parameter nicht im Konfidenzintervall liegt. Diese Wahrscheinlichkeit wird auch als Irrtumswahrscheinlichkeit bezeichnet.

Bei der gleichzeitigen Verwendung der Grenzen u_{\min} und u_{\max} spricht man von einem beidseitigen Konfidenzintervall. Wird lediglich u_{\min} oder u_{\max} als Grenze verwendet, so spricht man von einem einseitig nach unten oder oben begrenzten Konfidenzintervall. Die entsprechenden Zusammenhänge sind in Abb. 2.9 dargestellt.

Über den zentralen Grenzwertsatz hinaus, wird folgend auch bei kleiner Stichprobenanzahl von einer normalverteilten Grundgesamtheit ausgegangen. Somit gilt es für die Normalverteilung die erwartungstreuen Schätzer μ_x und σ_x^2 zu bestimmen.

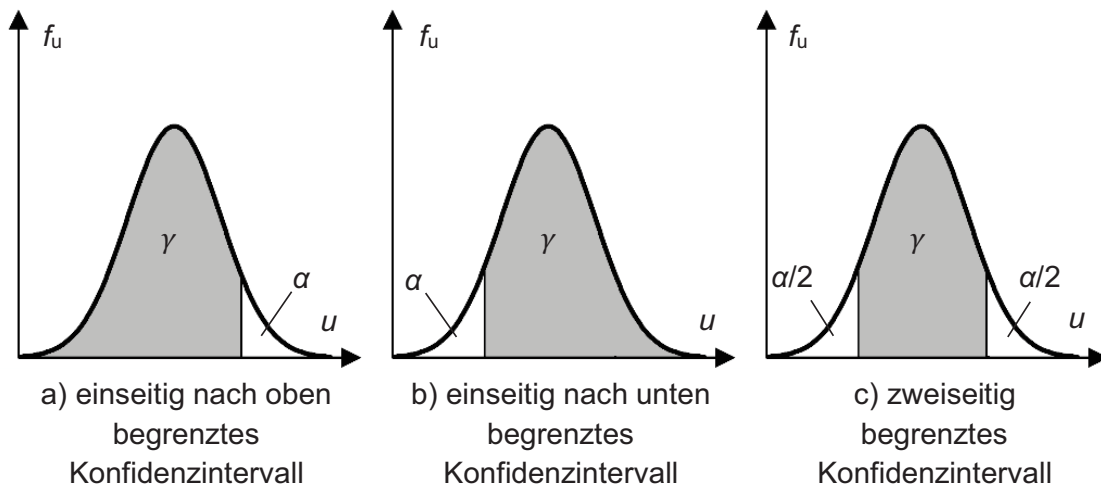


Abb. 2.9 Arten von Konfidenzintervallen

2.3.3.3 Konfidenzintervalle für die Schätzung von Quantilen der Normalverteilung

Allgemein können basierend auf Konfidenzintervallen über die Parameterschätzung hinaus auch Quantile x_p geschätzt werden. Da die Hauptaufgabe im Bauwesen in der Schätzung von Quantilwerten liegt, wird nachfolgend auch lediglich diese Form der Schätzung betrachtet. Hinweise zur reinen Parameterschätzung normalverteilter Gesamtheiten können z. B. *Plate 1993* entnommen werden.

Im Bauwesen ist, wie z. B. in *ISO 12491:1997*, *ACI 214.4R-10 2014* und *DIN EN 1990:2010-12* aufgeführt, ein einseitig nach unten begrenztes Konfidenzintervall mit dem Konfidenzniveau $\gamma = 1 - \alpha = 0,75$ gebräuchlich (vgl. Abb. 2.9). Der an der Stichprobe geschätzte Wert wird somit in 25 % der Fälle unter- und in 75 % der Fälle überschätzt. Die Irrtumswahrscheinlichkeit beträgt somit 25 %.

Nach *DIN ISO 16269-6:2009-10* kann die untere Konfidenzgrenze eines p -Quantils $x_{p,u}$ entsprechend Gleichung (2.28) aus den an der Stichprobe ermittelten Punktschätzern ermittelt werden. Die Varianz der Grundgesamtheit wird dabei als unbekannt angenommen.

$$x_{p,u} = \bar{x} - k_3(n; p; 1 - \alpha) \cdot s \quad (2.28)$$

mit:

k_3 Faktor zur Bestimmung der unteren Grenze eines p -Quantils in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang, der Unterschreitenswahrscheinlichkeit und dem Konfidenzniveau $\gamma = 1 - \alpha$

Der Faktor k_3 ist in *DIN ISO 16269-6:2009-10* für verschiedene Werte von n , p und α tabelliert. Für den im Bauwesen typischen Anwendungsfall $p = 0,05$ und $\gamma = 1 - \alpha = 0,75$ können die k_3 -Werte zusätzlich Tab. 3.6 der vorliegenden Arbeit entnommen werden.

2.3.4 Schätzung nach der Bayes'schen Methode

2.3.4.1 Allgemeines

Ein wesentlicher Unterschied zwischen der klassischen Statistik und der Bayes'schen Statistik besteht darin, dass u_g nach Abb. 2.6 kein exakter Wert, sondern eine Zufallsvariable mit einer eigenen Dichtefunktion ist. Ziel der Bayes'schen Statistik ist es, den für die Verteilung der vorhandenen Stichprobe maßgebenden Parameter mit dem möglichst besten Wert zu schätzen.

Bei Anwendung der Bayes'schen Methode besteht die Möglichkeit Vorinformationen über sog. Priorverteilungen f_{pr} einzubeziehen. Durch Überlagerung, auch als Updating bezeichnet, mit Daten aus aktuellen Stichproben geht die Priorverteilung in die Posteriorverteilung f_{po} über. Grundlage hierfür ist die in Gleichung (2.29) beschriebene Regel von Bayes.

$$P(A_i | B) = \frac{P(B | A_i)P(A_i)}{\sum_{k=1}^n P(B | A_k)P(A_k)} \quad (2.29)$$

mit:

A, B Ereignisse in einem Wahrscheinlichkeitsraum (siehe z. B. Henze 2008)

A_i Ereignisse, die eine disjunkte Zerlegung (d. h. die Mengen besitzen keine gemeinsamen Elemente) des Ergebnisraums bilden

$P(B/A)$ Wahrscheinlichkeit des Ereignisses B , unter der Bedingung, dass Ereignis A schon eingetreten ist (vgl. Gleichung (2.30))

$$P(B | A) = \frac{P(B \cap A)}{P(A)} \quad (2.30)$$

$P(B \cap A)$ Menge aller Elemente, die sowohl in A als auch in B liegen nach Abb. 2.10, d. h. die Ereignisse A und B sind eingetreten

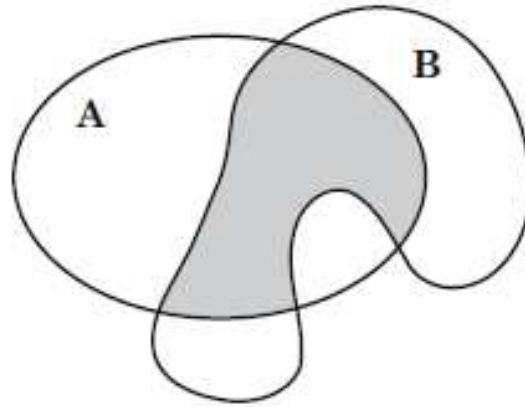


Abb. 2.10 Durchschnitt der Mengen B und A ($B \cap A$) nach *Roach 2014*

Vorausgesetzt die inverse Wahrscheinlichkeit $P(B/A_i)$ und die Wahrscheinlichkeit $P(A_k)$ für $k = 1, \dots, n$ sind bekannt, so kann die Wahrscheinlichkeit $P(A_i/B)$ berechnet werden.

Angepasst auf stetige Wahrscheinlichkeitsdichten kann Gleichung (2.29) wie folgt umgeschrieben werden:

$$f_{po}(u) = \frac{L(u) \cdot f_{pr}(u)}{\int_u L(u) \cdot f_{pr}(u) du} \quad (2.31)$$

Als Vorinformation können im Rahmen der Bayes'schen Methode über die Priorverteilung z. B. in Vorschriften definierte oder aus Erfahrung bekannte Informationen zur Dichtefunktion berücksichtigt werden. Die aus einer zusätzlichen Stichprobe vom Umfang n stammenden Resultate können mithilfe einer Likelihoodfunktion nach z. B. *Plate 1993* zur Verbesserung der Daten genutzt werden. Dabei stellt die Likelihoodfunktion L die bedingte Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Stichprobe x_1, \dots, x_n bei gegebenem Parameter u dar.

$$L(u) = f(x_1, x_2, \dots | u) \quad (2.32)$$

Durch Umwandlung von Gleichung (2.31) folgt die Dichte der Posteriorverteilung f_{po} mit der Priorverteilung f_{pr} und der Likelihoodfunktion L zu:

$$f_{po}(u) = f(u | x_1, x_2, \dots) = k \cdot L(u) \cdot f_{pr}(u) \quad (2.33)$$

Dabei dient der Faktor k , welcher dem Nenner von Gleichung (2.31) entspricht, zur Skalierung der Posteriorverteilung. Der Faktor k ist so zu bestimmen, dass das Integral der Posteriorverteilung über den zulässigen Wertebereich der Parameter u den Wert 1 annimmt.

Der Bayes Schätzer kann als Mittelwert der Posteriorverteilung beschrieben werden.

Grundsätzlich werden im Bauwesen zwei Fälle unterschieden. Entweder es liegen Vorinformationen zur betrachteten Kenngröße vor oder nicht. Bei fehlenden Vorinformationen ist auch von sog. diffusen Vorinformationen die Rede. Bei auf der Gaußverteilung beruhenden Verfahren führt die Bayes'sche Methode ohne

Vorinformationen zu annähernd gleichen Ergebnissen, wie die klassischen Statistischen Verfahren.

Im Nachfolgenden wird die Bestimmung von Quantilwerten für normalverteilte Zufallsvariablen mit unbekanntem Parametern beschrieben. Weitere Fälle können z. B. *Plate 1993; Rackwitz 1981, ISO 12491:1997* und *JCSS 2001* entnommen werden.

2.3.4.2 Bestimmung von Quantilwerten bei Normalverteilung mit unbekanntem Parametern

Die nachfolgenden Regelungen zur Bestimmung von Quantilwerten mit dem Bayesverfahren basieren auf den in *Rackwitz 1981, ISO 12491:1997* und *JCSS 2001* beschriebenen Ansätzen.

Allgemein kann bei Verwendung des Bayesverfahrens das p -Quantil einer normalverteilten Zufallsvariablen nach Gleichung (2.34) basierend auf der Inversen der t -Verteilung berechnet werden.

$$x_p = \bar{x} + t_{v,p} \cdot s \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \quad (2.34)$$

Die mit \bar{x} gekennzeichneten Parameter stellen dabei Größen der Posteriorverteilung dar. Bei dem im Bauwesen gebräuchlichen Anwendungsfall, wie z. B. bei der Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit, stehen jedoch lediglich die Daten der Stichprobe zur Verfügung. Die Vorinformationen sind als diffus einzustufen, was bedeutet, dass jeder mögliche Wert von u gleich wahrscheinlich auftritt, was einer Gleichverteilung entspricht. Die Posteriorparameter entsprechen unter der Bedingung $n' = v' = 0$ den Stichprobenparametern. Für das p -Quantil gilt somit:

$$x_p = \bar{x} + t_{v,p} \cdot s \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \quad (2.35)$$

Dieser Fall wird in *DIN EN 1990:2010-12* – Anhang D mit „Variationskoeffizient unbekannt“, bezeichnet. Das Produkt:

$$t_{v,p} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \quad (2.36)$$

wird dabei mit k_n zusammengefasst und ist in *DIN EN 1990:2010-12* für $n - 1$ Freiheitsgrade und $p = 0,05$ in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang n tabelliert.

2.4 Verteilungen

2.4.1 Allgemeines

Grundsätzlich können Zufallsvariablen durch eine Verteilungsfunktion charakterisiert werden. Dabei gibt die in Gleichung (2.37) in allgemeiner Form beschriebene Verteilungsfunktion F_x die Wahrscheinlichkeit an, dass die Zufallsvariable X einen

bestimmten Wert x nicht übersteigt. Gleichung (2.37) basiert dabei auf der Annahme, dass eine Dichtefunktion existiert.

$$F_x = F(x) = P(x \leq X) = \int_{-\infty}^x f(x) dx \quad (2.37)$$

Die Funktion $f(x)$, welche die erste Ableitung der Verteilungsfunktion beschreibt, wird als Verteilungsdichtefunktion oder kurz als Dichte bezeichnet. Somit gilt:

$$f_x = f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (2.38)$$

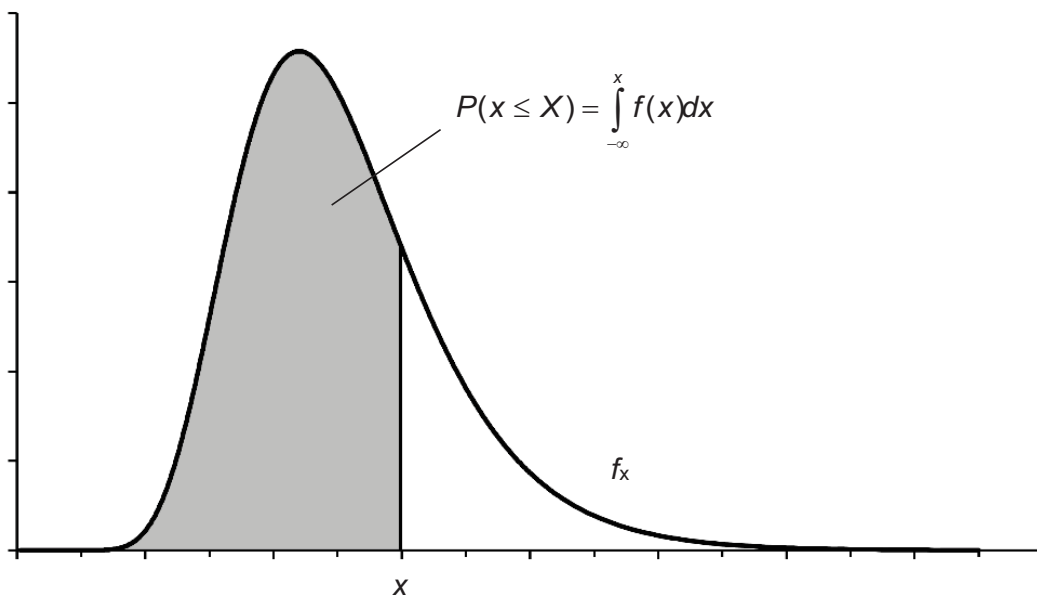


Abb. 2.11 Dichtefunktion der Zufallsvariablen X

Verteilungsdichte und Verteilungsfunktion haben die folgenden grundlegenden Eigenschaften:

- $f_x \geq 0$,
- $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$,
- $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$,
- $\lim_{x \rightarrow +\infty} F(x) = 1$.

Zur Beschreibung von Materialkennwerten werden im Bauwesen meist die Normalverteilung oder die logarithmische Normalverteilung verwendet, welche nachfolgend näher vorgestellt werden.

2.4.2 Normalverteilung (NV)

Die Normalverteilung oder auch Gaußverteilung oder Gauß'sche Glockenkurve stellt die am meisten verwendete Verteilungsart dar. Der Zentrale Grenzwertsatz besagt,

dass die Summe von n unabhängig identisch verteilten Zufallsvariablen annähernd einer Normalverteilung folgt. Die Normalverteilung wird durch den Erwartungswert μ und die Varianz σ^2 charakterisiert. Als Schreibweise wird auch $N(\mu, \sigma^2)$ verwendet.

Die Wahrscheinlichkeitsdichte- und die Verteilungsfunktion können wie folgt berechnet werden:

Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{2.39}$$

Verteilungsfunktion

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx \tag{2.40}$$

Die standardisierte Form der Normalverteilung mit $N(0, 1)$ wird als Standardnormalverteilung bezeichnet. Die zugehörige Dichte- und Verteilungsfunktion sind in Abb. 2.12 dargestellt.

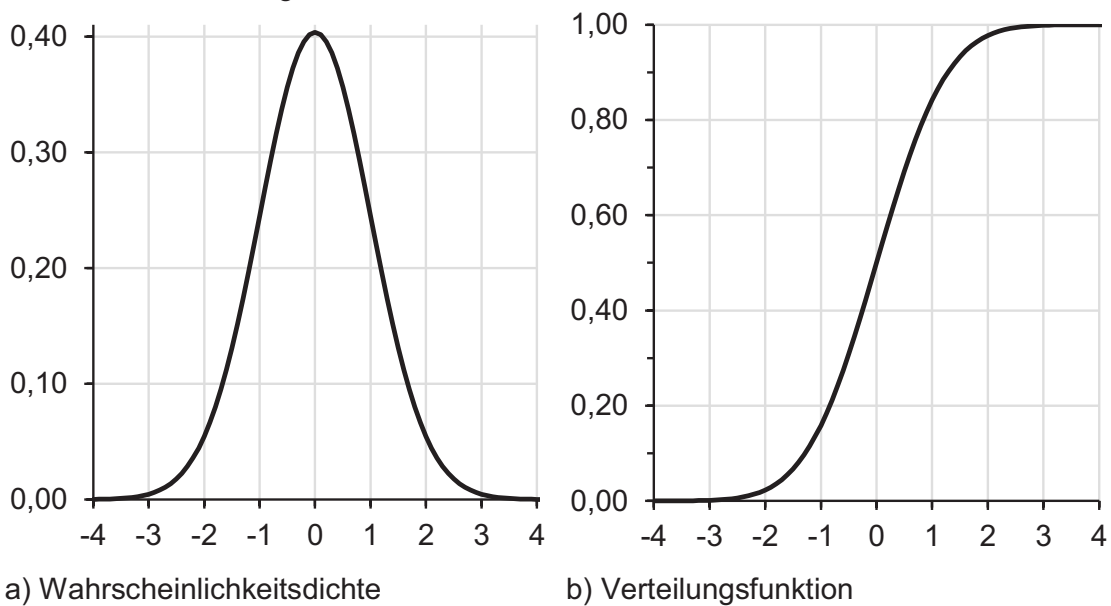


Abb. 2.12 Wahrscheinlichkeitsdichte und Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung

Die Normalverteilung ist beidseitig unbegrenzt und symmetrisch zu ihrem Mittelwert. Durch die beidseitige Unbegrenztheit sind auch physikalisch negative Realisierungen möglich.

2.4.3 Logarithmische Normalverteilung (LNV)

Im Gegensatz zur Normalverteilung ist die logarithmische Normalverteilung nur für positive Werte definiert. Eine Zufallsgröße X ist logarithmisch normalverteilt, sofern $Y = \ln(X)$ normverteilt ist.

Die logarithmische Normalverteilung wird durch die Parameter λ und ζ^2 charakterisiert. Als Schreibweise wird auch $LN(\lambda, \zeta^2)$ verwendet.

Die Wahrscheinlichkeitsdichte- und die Verteilungsfunktion können wie folgt berechnet werden:

Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \zeta \cdot x} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln(x) - \lambda)^2}{2\zeta^2}\right) \quad (2.41)$$

Verteilungsfunktion

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \zeta \cdot x} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln(x) - \lambda)^2}{2\zeta^2}\right) dx \quad (2.42)$$

Für die Parameter der logarithmischen Normalverteilung gilt:

$$\lambda = \mu_{\ln x} = \ln \mu_x - \frac{1}{2} \cdot \sigma_{\ln x}^2 \quad (2.43)$$

$$\zeta^2 = \sigma_{\ln x}^2 = \ln(1 + v_x^2) \quad (2.44)$$

Die logarithmische Normalverteilung verfügt über eine positive Schiefe. Der Verlauf der Verteilung ist somit rechtsschief (vgl. Abb. 2.1). Bei geringer Streuung nähert sich die logarithmische Normalverteilung der Normalverteilung an.

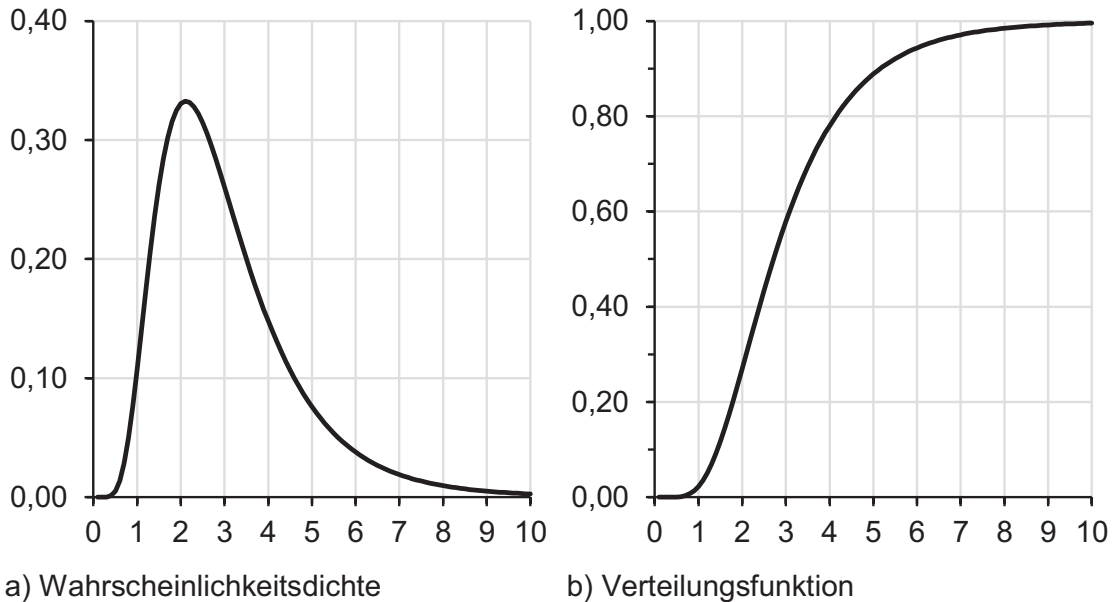


Abb. 2.13 Wahrscheinlichkeitsdichte und Verteilungsfunktion der logarithmischen Normalverteilung

2.5 Sensitivitätskurve

Die Robustheit eines Schätzverfahrens kann mit einer Sensitivitätskurve beschrieben werden. Schätzfunktionen werden nachfolgend allgemein mit T_n bezeichnet.

Für die Schätzfunktion $T_n = T_n(x_1, \dots, x_n)$, z. B. arithmetisches Mittel oder Median, kann die nicht normierte Sensitivitätskurve SC (sensitivity curve) gemäß Gleichung (2.45) berechnet werden.

$$SC(x; x_1, \dots, x_{n-1}, T_n) = (T_n(x_1, \dots, x_{n-1}, x) - T_{n-1}(x_1, \dots, x_{n-1})) \quad (2.45)$$

Die Sensitivitätskurve ist somit ein Maß zur Beschreibung der Reaktion einer Schätzfunktion, wenn zu einer Stichprobe noch ein zusätzlicher Wert x_{n+1} hinzukommt.

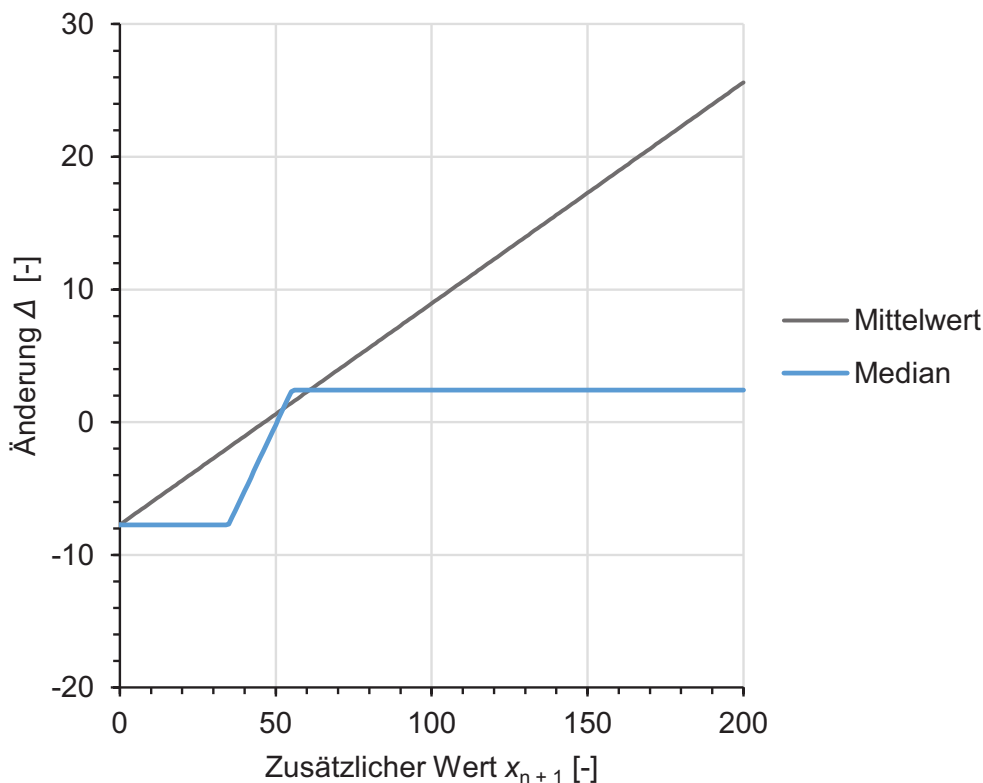


Abb. 2.14 Sensitivitätskurve für den Mittelwert und den Median einer fiktiven Stichprobe mit $n = 5$ und einem einem zusätzlichen Wert x_{n+1} zwischen 0 und 200

Exemplarisch sind in Abb. 2.14 die Sensitivitätskurven für den Mittelwert und den Median einer fiktiven Stichprobe mit $n = 5$ und einem einem zusätzlichen Wert x_{n+1} zwischen 0 und 200 dargestellt.

Ist der Verlauf der Funktion einer Sensitivitätskurve nicht beschränkt, so ist der zugehörige Schätzer auch nicht robust (vgl. Hampel 1986).

3 Bestimmung mechanischer Eigenschaften von Bauwerkbeton

3.1 Allgemeines

Zur Anwendung der Eurocodes mit ihrem semiprobabilistischen Zuverlässigkeitskonzept werden charakteristische Materialkennwerte benötigt. Anders als im Neubaufall, wo Bemessungswerte („design values“) gebildet werden, sind im Bestand Nachrechnungswerte („assessment values“) oder sog. „Bemessungswerte für die Nachrechnung“ anzusetzen.

Die Bemessungswerte für die Nachrechnung können, wie im „DAfStb-Sachstandbericht Bauen im Bestand – Teil I: Mechanische Kennwerte historischer Betone, Betonstähle und Spannstähle für die Nachrechnung von bestehenden Bauwerken“ (*DAfStb 616*) beschrieben, aus überlieferten Planungsdokumenten abgeleitet werden.

Liegen keine entsprechenden Dokumente vor oder bestehen Zweifel an der Übereinstimmung von geplanten und tatsächlich erreichten Materialeigenschaften, müssen die Nachrechnungswerte durch experimentelle Untersuchung am Bestandstragwerk ermittelt werden.

Für die zugehörige statistische Bewertung der Ergebnisse sind bisher, im Bauwesen gebräuchliche Verfahren in Deutschland in *DIN EN 1990:2010-12 – Anhang D* und *DIN EN 13791:2008-05* angegeben.

Allgemein empfiehlt sich zur Erzielung möglichst aussagekräftiger Ergebnisse mit geringer Abweichung zur tatsächlichen charakteristischen Betondruckfestigkeit des Bauwerkbetons die Verwendung einer hohen Probekörperanzahl.

Von der Bestimmung charakteristischer Betondruckfestigkeiten bestehender Massivbauwerke mit indirekten Prüfverfahren, wie z. B. der Rückprallhammerprüfung wird abgeraten, da durch indirekte Prüfverfahren lediglich die oberflächennahen Schichten bewertet werden können, deren Eigenschaften nicht ohne weitere Überlegungen auf den Beton im Bauteilinneren übertragen werden können. Hierzu ist exemplarisch in *Meiswinkel 2012* der Einfluss der Karbonatisierungstiefe auf die Spaltzugfestigkeit dargestellt. Je weiter die Karbonatisierung fortgeschritten ist, desto größer wird die Spaltzugfestigkeit (vgl. Abb. 3.1). Folglich hat die Karbonatisierung einen deutlichen Einfluss auf die Festigkeit des Betons. Dennoch können indirekte Prüfverfahren z. B. unterstützend für die Einteilung von Prüfbereichen verwendet werden. Jedoch ist zu beachten, dass deren Anwendung nach *DIN EN 13791/A20:2017-02* auf eine maximale Karbonatisierungstiefe von 5 mm begrenzt ist.

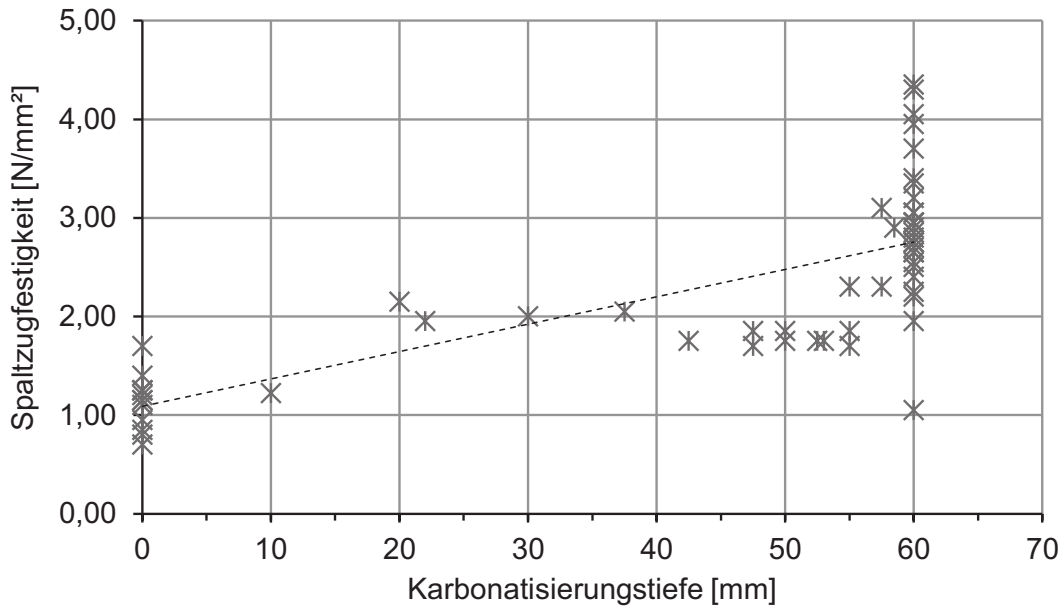


Abb. 3.1 Spaltzugfestigkeit in Abhängigkeit von der Karbonatisierungstiefe (Diagramm verändert nach Meiswinkel 2012)

3.2 Vorgehensweise

Für die Bestimmung der charakteristischen Betondruckfestigkeit auf Basis einer statistischen Auswertung von experimentell ermittelten Prüfergebnissen aus Druckfestigkeitsuntersuchungen wird in Übereinstimmung mit der „Nachrechnungsrichtlinie für Brücken“ (*Nachrechnungsrichtlinie 2011*) und dem DBV-Merkblatt „Modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für Stahlbetonbauteile“ (*DBV 2013*) die nachfolgend aufgeführte Vorgehensweise empfohlen:

- Festlegung von Prüfbereichen und Stichprobenumfang (Abschnitt 3.3),
- Einmessen der Bewehrung im Bereich der Bohrstellen mit zerstörungsfreien Prüfverfahren zur Vermeidung von Beschädigungen an der tragenden Bewehrung,
- Entnahme der Bohrkerne (Abschnitt 3.4),
- eindeutige Beschriftung der Bohrkerne (Lage im Bauteil, Position, Nr.) unmittelbar nach der Entnahme, damit diese später zweifelsfrei dem Entnahmeort zugeordnet werden können,
- Inaugenscheinnahme der Bohrkerne und qualitative Bewertung hinsichtlich Zusammensetzung und Betonqualität durch eine fachkundige Person,
- Vorbereitung der Bohrkerne für die Druckfestigkeitsprüfung (Abschnitt 3.5),
- Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit an den zuvor entnommenen Bohrkernen im Druckversuch nach *DIN EN 12390-3:2009-07*. Da der Feuchtegehalt der Proben direkt mit deren Druckfestigkeit korreliert, sind die Proben möglichst in einem dem Bauwerkbeton vergleichbaren Feuchtezustand zu prüfen,
- Untersuchung der vorliegenden Stichprobe auf Ausreißer bzw. Zugehörigkeit aller Einzelproben zu einer Grundgesamtheit (Abschnitt 3.3 und Abschnitt 6),

- je nach gewählter Bohrkerngeometrie und Lagerungsart: Umrechnung der ermittelten Bohrkernfestigkeit auf die für die Anwendung von *DIN EN 1992-1-1:2011-01* erforderliche Zylinderdruckfestigkeit nach *DIN EN 206-1:2001-07*,
- Ermittlung der Parameter der Stichprobe (arithmetisches Mittel, empirische Standardabweichung, empirischer Variationskoeffizient) (Abschnitt 2.2),
- Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit,
- Bestimmung des Nachrechnungswertes der Betondruckfestigkeit.

3.3 Festlegung von Prüfbereichen und Stichprobenumfang

3.3.1 Regelungen nach DIN EN 13791

Basierend auf vorliegenden Kenntnissen über die verwendeten Bauverfahren, Betonierabschnitte, Betonzusammensetzung, Materialgüten einzelner Bauteile oder Bauteilgruppen und einer visuellen Untersuchung kann das zu untersuchende Tragwerk in einzelne Prüfbereiche eingeteilt werden, von denen begründet angenommen werden kann, dass sie Beton nur einer Grundgesamtheit (vgl. Abschnitt 2.1) enthalten.

Nach *DIN EN 13791:2008-05* und *DIN EN 13791/A20:2017-02* soll sich die Anzahl der aus einem Prüfbereich zu entnehmenden Bohrkerne nach der Menge des Betons und dem Zweck der Bohrkernprüfung richten. Zur Erhöhung der statistischen Zuverlässigkeit sollen nach Norm so viele Bohrkerne wie zweckmäßigerweise möglich entnommen werden, jedoch mindestens drei Bohrkerne mit einem Mindestdurchmesser von 100 mm je Prüfbereich. Für Bohrkerndurchmesser kleiner als 100 mm sollte die Mindestanzahl der Bohrkerne nach Nationalem Anhang zu *DIN EN 13791:2008-05* erhöht werden. Demnach sollte bei einem Durchmesser < 100 mm und einem Größtkorn der Gesteinskörnung ≤ 16 mm die Mindestanzahl der Probekörper um 50 % (d. h. auf mindestens fünf Bohrkerne) erhöht werden. Bei einem Durchmesser der Bohrkerne < 100 mm und einem Größtkorn der Gesteinskörnung > 16 mm sollte mindestens die doppelte Anzahl an Probekörpern (d. h. mindestens sechs Bohrkerne) entnommen werden.

3.3.2 Empfohlenes Vorgehen nach DAfStb 619

3.3.2.1 Prüfbereich

Der Beprobung vorangestellt ist eine Einteilung des Tragwerks in einzelne Prüfbereiche. Neben der Inaugenscheinnahme des Bauwerks und Kenntnissen über Betonierabschnitte und Bauablauf können auch ergänzend indirekte Prüfverfahren, wie z. B. die Rückprallhammerprüfung eingesetzt werden, welche nach *DIN EN 13791/A20:2017-02* jedoch auf eine maximale Karbonatisierungstiefe von 5 mm begrenzt ist. Ziel der Einteilung in definierte Prüfbereiche ist es demnach, eine Vermischung verschiedener Grundgesamtheiten zu vermeiden, denn dies führt meist zu einer erhöhten Streuung der Stichprobe, was sich in einer teilweise deutlichen Fehleinschätzung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit der jeweiligen Grundgesamtheit niederschlägt.

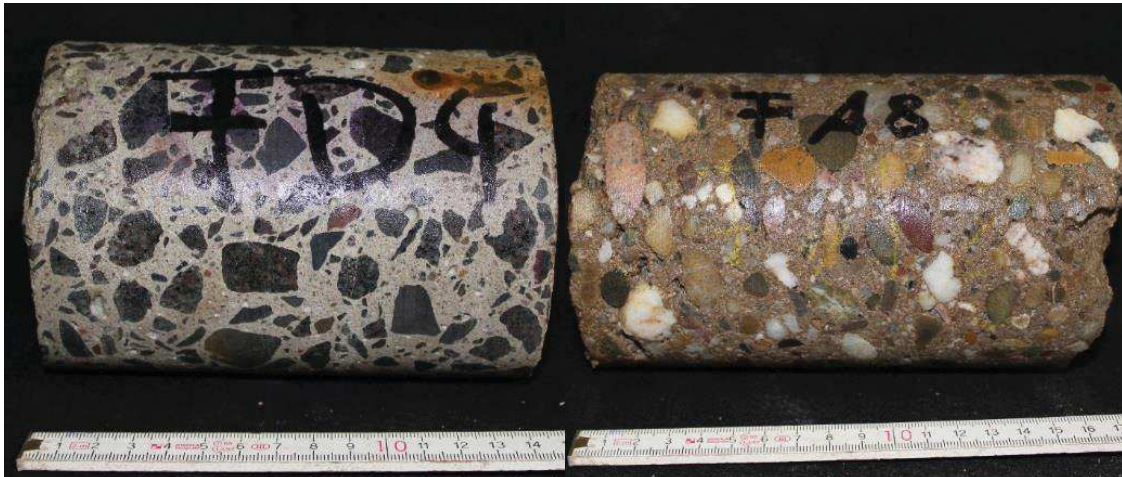


Abb. 3.2 Visuell feststellbare Unterschiede bzgl. der Betonzusammensetzung

Nach Entnahme aller Bohrkern einer Stichprobe sind diese zunächst auf Zugehörigkeit zu einer Grundgesamtheit zu prüfen. Visuell können dabei die Art der Gesteinskörnung, der Größtkorndurchmesser, die Kornabstufung, die Färbung, die Oberflächenbeschaffenheit, das Saugverhalten, das Betongefüge (vgl. Abb. 3.2 und Abb. 3.3) und ein eventueller Schichtaufbau untersucht werden. Nicht visuell, teils zerstörend können die Einzelwerte der Druckfestigkeitsprüfung, die Abreißfestigkeit, das Porengefüge, die Rohdichte, die Wasseraufnahmefähigkeit sowie die Karbonatisierungstiefe geprüft werden (vgl. Tab. 3.1).

Tab. 3.1 Auflistung nicht visueller Prüfverfahren und zugehörige Regelwerke

	Prüfverfahren	Regelwerk
1	Druckfestigkeitsprüfung	<i>DIN EN 12390-3:2009-07</i>
2	Abreißfestigkeit	<i>DIN EN 1542:1999</i>
3	Gesamtporosität	<i>DIN 52103:1988</i>
4	Rohdichte	<i>DIN EN 12390-7:2009-07</i>
5	Karbonatisierungstiefe	<i>DIN EN 14630:2007</i>
6	Rückprallhammer	<i>DIN EN 13791/A20:2017-02</i>

Bei Feststellung von Inhomogenitäten ist gegebenenfalls die Stichprobe zu unterteilen, sofern nicht alle Bohrkern einer Grundgesamtheit zugeordnet werden können.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die Einzelwerte der Druckfestigkeit mit statistischen Ausreißertests (vgl. Kapitel 6) zu überprüfen. Auffällige oder unerwartete Messwerte sollten jedoch keinesfalls leichtfertig ohne weitere Überlegungen als Ausreißer deklariert werden.

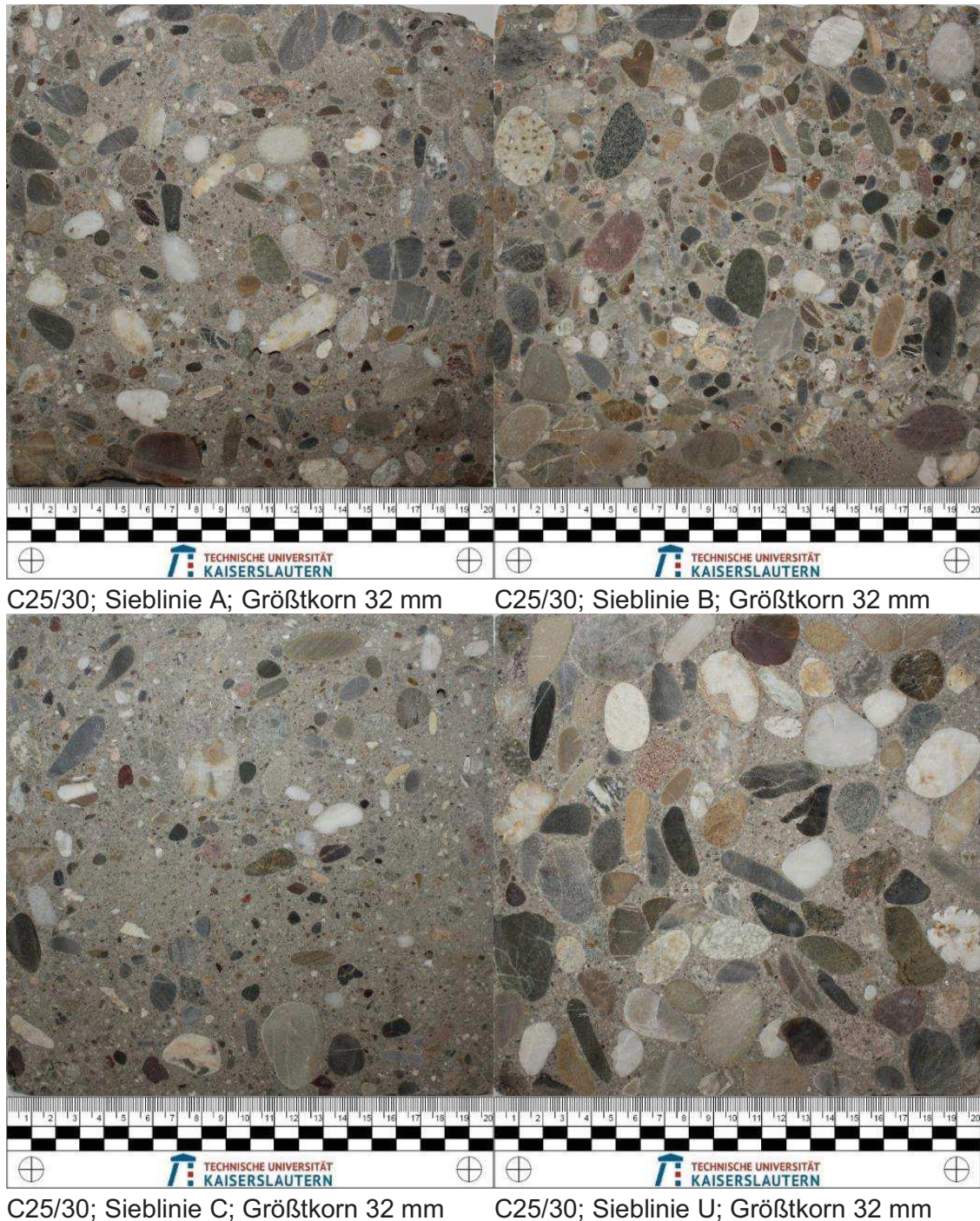


Abb. 3.3 Abschätzung der Kornabstufung an geschnittenen Oberflächen

3.3.2.2 Stichprobenumfang

In Abb. 3.4 ist das Verhältnis zwischen 5 %-Quantilwert und Mittelwert der Stichprobe für verschiedene Variationskoeffizienten in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang n abgebildet. Dabei wurde der 5 %-Quantilwert nach *DIN EN 1990:2010-12* ohne Vorinformationen über den Variationskoeffizienten, d. h. alle Werte sind aus der Stichprobe zu schätzen, bestimmt. Von Vorinformationen dürfte nur ausgegangen werden, wenn von einer konkreten Betonmischung die Streuung bekannt ist. Bei konstantem Variationskoeffizienten v_x wird mit steigendem Umfang n der Stichprobe ein zunehmend günstiges Verhältnis zwischen 5 %-Quantilwert und Mittelwert erreicht

(vgl. Abb. 3.4). Besonders bei kleinem Stichprobenumfang zwischen drei und acht Einzelwerten kann eine Steigerung des Stichprobenumfangs zu einer erheblichen Verbesserung des Verhältnisses zwischen 5 %-Quantilwert und Mittelwert führen.

Zur Beschränkung der Abminderung infolge des statistischen Auswerteprozesses wird bei der Bestimmung der charakteristischen Betonfestigkeit mittels statistischer Verfahren ein Stichprobenumfang von $n \geq 9$ empfohlen. Bautechnische Gründe, wie z. B. ein erhöhtes Schädigungspotenzial durch die Bohrkernentnahme können auch einen kleineren Umfang der Stichprobe rechtfertigen.

Allgemein ist zu beachten, dass mit sinkendem Stichprobenumfang die statistische Aussagekraft der Stichprobe abnimmt.

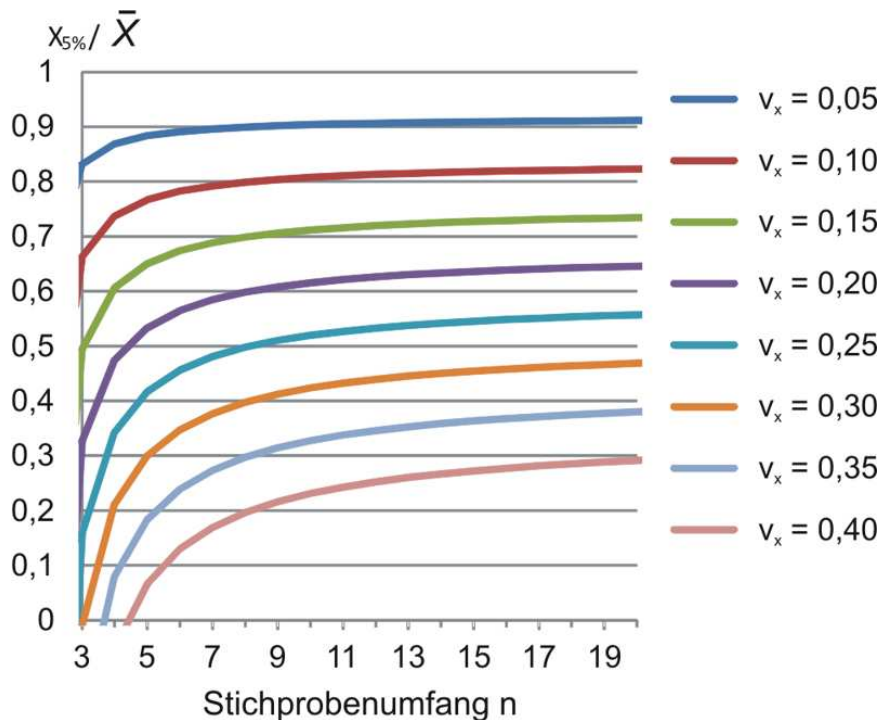


Abb. 3.4 Verhältnis zwischen 5 %-Quantilwert $x_{5\%}$ und Stichprobenmittelwert \bar{x} in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang n für verschiedene Variationskoeffizienten v_x nach Loch et al. 2011

3.4 Bohrkernentnahme und Probekörpergeometrie

3.4.1 Allgemeines

Die Entnahme der Bohrkernentnahme ist entsprechend den Regelungen in *DIN EN 12504-1:2009-07* durchzuführen. Dabei sollte das Verhältnis des Größtkorns der Gesteinskörnung im Beton zum Bohrkerndurchmesser einen Wert von 1:3 nicht übersteigen. Wird dieses Verhältnis überschritten, ist im Allgemeinen mit einer großen, aus der Prüfung resultierenden Streuung der Werte der Betondruckfestigkeit und damit mit einem niedrigen Rechenwert der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit zu rechnen.

Um eine Beschädigung der Bohrkernentnahme durch das Bohren möglichst zu vermeiden, dürfen die Kerne nur durch Nassbohren entnommen werden.



Abb. 3.5 „Ausmuscheln“ angeschnittener Gesteinskörnung

Durch teilweises Ausbrechen („Ausmuscheln“) angeschnittener Gesteinskörnung (vgl. Abb. 3.5) kann die Streuung der Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen auf ein für Bestandsbetone unrealistisch hohes Maß ansteigen, was zu einer Abnahme des charakteristischen Wertes der Betondruckfestigkeit führt. Bei Bohrkernen mit ausbrechender angeschnittener Gesteinskörnung ist das Ergebnis der Druckfestigkeitsprüfung im Einzelfall kritisch zu prüfen. Werden bestimmte Einzelwerte ausgeschlossen, ist dies zu dokumentieren.

Vor dem Bohren sind die Bohrstellen unter Berücksichtigung einer möglichst geringen konstruktiven Beeinträchtigung des Tragwerks so festzulegen, dass die Standsicherheit des Tragwerks keinesfalls gefährdet wird. Allgemein sollten Bohrkern vorzugsweise nicht in der Nähe von Bauteilrändern, sondern an Stellen mit geringer oder ohne Bewehrung entnommen werden.

Vorhandene Bewehrung ist mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren zu orten und einzumessen, um einerseits Beschädigungen an der tragenden Bewehrung zu vermeiden, aber auch um Bohrkern möglichst frei von Bewehrung entnehmen zu können. Für die Bestimmung der Druckfestigkeit dürfen Bohrkern keine Bewehrungsstäbe in oder nahe der Richtung ihrer Längsachse enthalten. Bei Bohrkernen, die Querbewehrung enthalten, ist Lage und Durchmesser der Bewehrung aufzuzeichnen und das Ergebnis der Druckfestigkeitsprüfung im Einzelfall kritisch zu prüfen (vgl. *DIN EN 12504-1:2009-07*).

Die Bohrkern sind möglichst senkrecht zur Oberfläche zu entnehmen. Die Bohrkronen sind während des Bohrens fest zu führen. Eine nicht fachgerechte Entnahme der Bohrkern mit einem z. B. nicht ausreichend befestigtem Bohrständler kann zu einer Vorschädigung der Bohrkern führen.

Die Länge der Bohrkern ist so zu wählen, dass Probekörper mit einer Schlankheit von mindestens $\lambda = h/d = 1,0$ zur Verfügung stehen. Es sind Längenverluste durch die Vorbereitung der Proben für die Druckfestigkeitsprüfung zu berücksichtigen.

3.4.2 Umrechnungsfaktoren

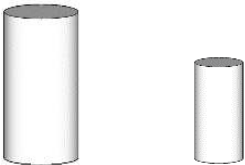


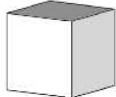
3.4.2.1 Allgemeines

Die charakteristische Betondruckfestigkeit f_{ck} nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* bezieht sich auf die charakteristische Zylinderdruckfestigkeit $f_{ck,cyl}$ des Betons im Alter von 28 Tagen, geprüft am Normzylinder mit Höhe/Durchmesser = 300/150 mm, wie sie in *DIN EN 206-1:2001-07* definiert ist. Bei abweichender Probekörpergeometrie ist die am Bohrkern ermittelte Betondruckfestigkeit mit Umrechnungsfaktoren auf die charakteristische Zylinderdruckfestigkeit umzurechnen. Eine Anpassung für unterschiedliche Lagerungsarten ist meist nicht erforderlich. Da der Feuchtegehalt der Proben direkt mit deren Druckfestigkeit korreliert, sind die Proben möglichst in einem dem Bauwerkbeton vergleichbaren Feuchtezustand zu prüfen. Ist dennoch eine Umrechnung infolge unterschiedlicher Lagerungsarten erforderlich, so kann diese mit dem in *DIN 1045-2:2008-08* angegebenen Umrechnungsfaktor erfolgen.

3.4.2.2 Umrechnungsfaktoren – Probekörpergeometrie

Nach *DIN EN 13791/A20:2017-02* kann die Druckfestigkeit, geprüft am Bohrkern mit einem Nenndurchmesser von 50 mm, 100 mm bzw. 150 mm und einem Verhältnis von Höhe/Durchmesser von 1,0 mit der am wassergelagerten Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm geprüften Druckfestigkeit gleichgesetzt werden. Bei einem Verhältnis von Höhe/Durchmesser von 2,0 entspricht die am Bohrkern geprüfte Druckfestigkeit der am Normzylinder ermittelten Druckfestigkeit.

Tab. 3.2 Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Probekörperschlankheit (Darstellung nach *Weber et al. 2015*)

Bohrkern	Vergleichsfestigkeit
<p>Ø 50 -150 mm; $\lambda = 2,0$</p> 	<p>$f_{c,cyl}$</p> <p>$h/\varnothing = 300/150$ mm $\lambda = 2,0$</p> 
<p>Ø 50 -150 mm; $\lambda = 1,0$</p> 	<p>$f_{c,cube150}$</p> <p>$a = 150$ mm</p> 

Der Umrechnungsfaktor $k_{cyl/cube}$ zwischen Würfelproben mit 150 mm Kantenlänge und Zylinderproben mit 150 mm Durchmesser und 300 mm Höhe liegt nach *DIN EN 206-1:2001-07* für normalfeste Betone im Mittel bei 0,81 und für höherfeste Betone bei 0,84. Vereinfachend wird für alle Druckfestigkeiten in Anlehnung an *DIN EN 206-1:2001-07* nach Gleichung (3.1) ein konstanter Faktor von 0,82 gewählt.

$$\frac{f_{c,cyl}}{f_{c,cube150}} = k_{cyl/cube} = 0,82 \quad (3.1)$$

mit:

$f_{c,cyl}$ Betondruckfestigkeit eines Zylinders ($h/d = 300/150$ mm)

$f_{c,cube150}$ Betondruckfestigkeit eines Würfels ($a = 150$ mm)

3.4.2.3 Umrechnungsfaktoren – Lagerungsart

Die Berücksichtigung unterschiedlicher Lagerungsarten kann mit Hilfe des in Gleichung (3.2) beschriebenen Umrechnungsfaktors k_L erfolgen.

$$\frac{f_{c,cube150}}{f_{c,dry}} = k_L = 0,92 \quad (3.2)$$

mit:

$f_{c,cube150}$ Betondruckfestigkeit eines wassergelagerten Würfels ($a = 150$ mm)

$f_{c,dry}$ Betondruckfestigkeit eines Würfels mit 150 mm Kantenlänge bei Trockenlagerung (*DIN EN 12390-2:2009-08*: 1 Tag Schalung, 6 Tage im Wasserbad bzw. einer Feuchtekammer mit $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ und > 95 % relative Luftfeuchtigkeit, anschließend bis zur Prüfung in einem geschlossenen Raum mit $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von (65 ± 5) %)

3.5 Vorbereitung der Probekörper

Nach der Entnahme der Bohrkerne sind diese durch Nassschneiden zunächst auf Probekörper mit der gewünschten Schlankheit $\lambda = h/d$ abzulängen. Vorzugsweise sollten Probekörper mit einer Schlankheit von $h/d = 2,0$ verwendet werden, um direkt die für die Anwendung von *DIN EN 1992-1-1:2011-01* erforderliche Zylinderdruckfestigkeit zu erhalten. Alternativ können auch Probekörper mit einer Schlankheit von $h/d = 1,0$ entnommen und anschließend mit dem in Abschnitt 3.4.2.2 beschriebenen Umrechnungsfaktor auf die Zylinderdruckfestigkeit umgerechnet werden.

Vor der zerstörenden Prüfung der Probekörper sind die Bohrkerne visuell zu begutachten, um eventuelle Unregelmäßigkeiten wie z. B. Fehlstellen oder Bewehrungseinschlüsse feststellen zu können. Weiterhin sind nach *DIN EN 12504-1:2009-07* paarweise Messungen des Bohrkerndurchmessers im rechten Winkel, um eventuelle Abweichungen oder Fehler bei der Bohrkernentnahme zu erfassen, an den halben und an den äußeren Viertelpunkten der Bohrkernlänge durchzuführen. Die Enden der Bohrkerne sind nach Anhang A von *DIN EN 12390-3:2009-07* durch Schleifen oder Abgleichen vorzubereiten. Zum Erhalt planparalleler Druckflächen und zur Einhaltung der Rechtwinkligkeit ist die Verwendung einer Schleifmaschine mit Drehvorrichtung, mit der der Bohrkern zum beidseitigen Schleifen der Druckflächen im eingebauten Zustand gedreht werden kann, sehr empfehlenswert. Für die Ermittlung der Dichte nach *DIN EN 12390-7:2009-07* dürfen nur Bohrkerne ohne

Ausgleichsschicht verwendet werden. Während hingegen bei einer Vorbereitung der Bohrkernenden durch Schleifen das Volumen direkt berechnet werden kann, ist bei ungeschliffenen Bohrkernenden das Volumen durch Wasserverdrängung nach *DIN EN 12390-7:2009-07* zu bestimmen. Der Feuchtigkeitszustand des Probekörpers bei der Bestimmung der Dichte ist zu dokumentieren.

Bei zylinderförmigen Probekörpern sind nach *DIN EN 12390-1:2012-12* nach der Probenvorbereitung folgende Toleranzgrenzen einzuhalten:

- zulässige Abweichung der Ebenheit der Lasteinleitungsfläche: $0,0006 d$ (d in mm),
- zulässige Abweichung der Rechtwinkligkeit der Mantelflächen in Bezug auf die Grundfläche: $0,007 d$ (d in mm),
- zulässige Abweichung der Höhe (bei $h = 2,0 d$): 5 %,
- zulässige Geradheitsabweichung der Mantellinie von Zylindern zur Verwendung für Spaltzugprüfungen: 0,2 mm.

Das jeweilige Vorgehen zur Beurteilung der Toleranzgrenzen ist in *DIN EN 12390-1:2012-12* beschrieben.

Die Probekörper sollten grundsätzlich möglichst mit dem im Bauwerk vorliegenden Feuchtezustand geprüft werden. Bei der Entnahme aus weitgehend trockenen Bauteilen mit anschließendem Nasssägen oder -schleifen sind die Bohrkern vor der Prüfung nach *DIN EN 13791/A20:2017-02* mindestens 12 h im Laborklima zu lagern. Falls eine Prüfung der Probekörper im gesättigten Zustand erforderlich ist, sind die Probekörper nach *DIN EN 12504-1:2009-07* vor der Prüfung mindestens 48 h bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ in Wasser zu lagern. Die Lagerungsverhältnisse der Bohrkern sind zu dokumentieren. Aus der Lagerungsart resultierende Umrechnungsfaktoren sind entsprechend Gleichung (3.2) zu berücksichtigen.

3.6 Prüfung der In-situ-Betonfestigkeit

3.6.1 Allgemeines

Die Prüfung von Bohrkernen ist in der Normenreihe *DIN EN 12390*, welche die Prüfung von Festbeton beschreibt, geregelt. Die Prüfung der Druckfestigkeit ist in *DIN EN 12390-3:2009-07*, die Prüfung der Spaltzugfestigkeit in *DIN EN 12390-6:2010-09* und die Prüfung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung in *DIN EN 12390-13:2014-06* beschrieben.

Wegen einer im Vergleich zur Spaltzugfestigkeit zu großen Fehleranfälligkeit wird von einer experimentellen Bestimmung der zentrischen Betonzugfestigkeit abgeraten. Stattdessen wird empfohlen, die tatsächlich am Bauwerk vorliegende zentrische Betonzugfestigkeit durch experimentelle Prüfung der Spaltzugfestigkeit und anschließender Umrechnung zu bestimmen.

3.6.2 Druckfestigkeit

Die Probekörper werden nach *DIN EN 12390-3:2009-07* in einer Druckprüfmaschine bis zum Bruch belastet. Die erreichte Höchstlast wird aufgezeichnet und daraus die Druckfestigkeit des vorliegenden Betons nach Gleichung (3.3) berechnet.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.3)$$

mit:

f_c Druckfestigkeit, in N/mm²

F Höchstkraft beim Bruch, in N

A_c Fläche des Probenquerschnitts, auf den die Druckbeanspruchung wirkt, in mm², berechnet aus Messungen am Probekörper

Die berechnete Druckfestigkeit ist auf 0,1 N/mm² genau anzugeben.

3.6.3 Spaltzugfestigkeit

Die Probekörper werden einer Druckkraft ausgesetzt, die auf schmale Streifen entlang der Längsachse des Probekörpers aufgebracht wird. Die sich ergebende orthogonale Zugkraft führt zum Bruch des Probekörpers unter Zugspannung. Die erreichte Höchstkraft wird aufgezeichnet und daraus nach *DIN EN 12390-6:2010-09* die Spaltzugfestigkeit des vorliegenden Betons nach Gleichung (3.4) berechnet.

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d} \quad (3.4)$$

mit:

$f_{ct,sp}$ Spaltzugfestigkeit, in N/mm²

F Höchstkraft beim Bruch, in N

L Länge der Kontaktlinie des Probekörpers, in mm

d angegebenes Querschnittsmaß, in mm

Die berechnete Spaltzugfestigkeit ist auf 0,05 N/mm² genau anzugeben.

3.6.4 Elastizitätsmodul

Der experimentellen Ermittlung des Elastizitätsmoduls vorangestellt ist an zusätzlichen Probekörpern die Druckfestigkeit zu bestimmen. Für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls werden die Probekörper nach *DIN EN 12390-13:2014-06* einer einachsialen Druckbelastung ausgesetzt. Durch die Aufzeichnung von Spannungen und Dehnungen kann aus dem Anstieg der Spannungs-Dehnungs-Kurve der Elastizitätsmodul als Sekantenmodul entsprechend Gleichung (3.5) bestimmt werden.

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_s} \quad (3.5)$$

3.7 Bestehende Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Druckfestigkeit

3.7.1 Allgemeines

Da zur Nachrechnung eines Tragwerks nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* charakteristische Werte der Materialeigenschaften benötigt werden, ist eine statistische Bewertung der Versuchsergebnisse erforderlich. Bisher im Bauwesen gebräuchliche Verfahren zur statistischen Bewertung von Versuchsergebnissen sind in Deutschland in *DIN EN 1990:2010-12* – Anhang D und *DIN EN 13791:2008-05* angegeben. Wie aus *Loch et al. 2011*, *Steenbergen u. Vervuurt 2012*, *Weber et al. 2016* und *Knab u. Sodeikat 2015* zu entnehmen, kann eine Bestimmung der charakteristischen Betonfestigkeit nach dem in *DIN EN 13791:2008-05* angegebenen Verfahren bei kleinem Stichprobenumfang n jedoch zu einer kritischen Überschätzung der tatsächlichen charakteristischen Betondruckfestigkeit der untersuchten Grundgesamtheit führen. Eine mögliche Ursache hierfür liegt darin, dass die in *DIN EN 13791:2008-05* enthaltenen Verfahren für die Anwendung bei Zweifel hinsichtlich der Konformität einer verbauten Festigkeitsklasse nach *DIN EN 206-1:2001-07* konzipiert wurden, womit die im Bestand oft vorliegenden großen Streuungen nicht erfasst werden. Für die Nachrechnung bestehender Massivbauwerke ist nicht der Nachweis einer bestimmten Betonfestigkeitsklasse sondern die Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit für ein definiertes Konfidenzniveau (vgl. Abschnitt 2.3.3) entscheidend.

Weitere allgemeingültige Ansätze für die statistische Auswertung von Daten sind in *DIN ISO 16269-6:2009-10* enthalten. Darüber hinaus sind in der Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (*Nachrechnungsrichtlinie 2011*) und im Merkblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (*BAW 2016*) bauartspezifische Verfahren aufgeführt.

Die Bewertung bisheriger Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Druckfestigkeit erfolgt in Kapitel 5.

3.7.2 Vorgehen nach DIN EN 13791:2008

In Abhängigkeit vom Umfang n der Stichprobe enthält *DIN EN 13791:2008-05* zwei verschiedene Verfahren zur Bewertung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit.

Ansatz A ist in denjenigen Fällen anzuwenden, in denen mindestens 15 Prüfergebnisse zur Verfügung stehen. Die geschätzte charakteristische In-situ-Druckfestigkeit $f_{ck, is}$ ergibt sich aus dem niedrigeren der beiden folgenden Werte:

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - k_2 \cdot s \quad (3.6)$$

$$f_{ck, is} = f_{is, niedrigst} + 4 \text{ N/mm}^2 \quad (3.7)$$

mit:

$f_{m(n), is}$ Mittelwert von n Prüfergebnissen der Druckfestigkeit des Bauwerkbetons

$f_{is,niedrigst}$ niedrigstes Prüfergebnis der Druckfestigkeit des Bauwerkbetons

s Standardabweichung der Prüfergebnisse nach Gleichung (2.8) mit einem Mindestwert von 2 N/mm²

k_2 Koeffizient nach nationalen Regelungen, in Deutschland $k_2 = 1,48$

Sofern nur 3 bis 14 Bohrkerne zur Verfügung stehen ist Ansatz B zur Bestimmung der charakteristischen Betondruckfestigkeit anzuwenden. Die geschätzte charakteristische Druckfestigkeit $f_{ck,is}$ ergibt sich dann aus dem niedrigeren der folgenden beiden Werte:

$$f_{ck,is} = f_{m(n),is} - k \quad (3.8)$$

$$f_{ck,is} = f_{is,niedrigst} + 4 \text{ N/mm}^2 \quad (3.9)$$

Der Summand k ist nach *DIN EN 13791:2008-05* in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang in Tab. 3.3 angegeben.

Tab. 3.3 k -Werte zur Berechnung von $f_{ck,is}$ nach Ansatz B nach *DIN EN 13791:2008-05*

n	k [N/mm ²]
10 bis 14	5
7 bis 9	6
3 bis 6	7

3.7.3 Vorgehen nach DIN EN 1990:2010

In *DIN EN 1990:2010-12* – Anhang D ist mit dem Bayes'schen Verfahren, basierend auf vagen Prior-/Vorverteilungen (vgl. Abschnitt 2.3.4), ein weiteres Verfahren zur Bestimmung charakteristischer Materialkennwerte beschrieben. Bei jeder aus einer Grundgesamtheit entnommenen neuen Stichprobe können der arithmetische Mittelwert und die empirische Standardabweichung von den an einer zuvor entnommenen Stichprobe ermittelten Werten abweichen.

Zunächst ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung des untersuchten Bauwerkbetons anzunehmen oder anhand der grafischen Darstellung der empirischen Dichte- oder Verteilungsfunktion (vgl. Abschnitt 2.2.4) oder auch mithilfe von Wahrscheinlichkeitspapier nach *DIN ISO 5479:2004-01* zu prüfen. Für die weitere Auswertung ist in *DIN EN 1990:2010-12* sowohl das Vorgehen für eine Normalverteilung als auch für eine logarithmische Normalverteilung beschrieben.

Die Wahl der Verteilungsfunktion der Grundgesamtheit kann nach *Schäper 2010* in Abhängigkeit vom Variationskoeffizienten v_x der Stichprobe getroffen werden. Bei kleinen Stichprobenumfängen n oder bei Variationskoeffizienten $v_x > 0,20$ wird die Anwendung einer logarithmischen Normalverteilung empfohlen. Dies ist sinnvoll, da die logarithmische Normalverteilung keine negativen Werte annehmen kann. Bei $v_x \leq 0,20$ liefern logarithmische Normalverteilung und Normalverteilung annähernd gleiche charakteristische Werte.

Nach der Festlegung der Verteilungsfunktion können die maßgebenden Parameter aus den Parametern der Stichprobe nach den in Abschnitt 2.2 angegebenen Gleichungen geschätzt werden.

Bei vorliegender Normalverteilung ergibt sich der charakteristische Wert (5 %-Quantil) x_k nach *DIN EN 1990:2010-12* zu:

$$x_k = \bar{x} \cdot (1 - k_n \cdot v_x) \quad (3.10)$$

mit:

\bar{x} Mittelwert nach Gleichung (2.1)

v_x Variationskoeffizient nach Gleichung (2.9)

Für die logarithmische Normalverteilung berechnet sich der charakteristische Wert (5 %-Quantil) x_k nach *DIN EN 1990:2010-12* zu:

$$x_k = e^{(\mu_y - k_n \cdot \sigma_y)} \quad (3.11)$$

mit:

μ_y Mittelwert der logarithmierten Einzelwerte nach Gleichung (3.12)

$$\mu_y = \frac{1}{n} \sum \ln(x_i) \quad (3.12)$$

σ_y Standardabweichung der logarithmierten Einzelwerte nach Gleichung (3.13)

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\ln x_i - \mu_y)^2} \quad (3.13)$$

Der Faktor k_n ist dabei in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang n unter der Annahme, dass keine Vorinformationen über den Variationskoeffizienten vorliegen, nach Tab. 3.4 zu bestimmen. Der in Gleichung (3.14) beschriebene Faktor k_n berücksichtigt durch die Verwendung der Student- t -Verteilung die Unsicherheiten bei der Schätzung der Standardabweichung und mittels $(1 + 1/n)^{0,5}$ die Unsicherheiten in Hinblick auf den Mittelwert. Mit ansteigendem Stichprobenumfang nimmt die zu berücksichtigende Unsicherheit immer weiter ab, was in kleineren k_n -Werten resultiert.

Tab. 3.4 Werte k_n für die Berechnung charakteristischer Festigkeiten (5 %-Quantile) ohne Vorinformationen nach *DIN EN 1990:2010-12*

n	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30	∞
k_n	3,37	2,63	2,33	2,18	2,08	2,00	1,96	1,92	1,82	1,76	1,73	1,64

Zwischenwerte dürfen nach Gleichung (3.14) berechnet oder linear interpoliert werden.

$$k_n = \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \cdot t_{5\%,n-1} \quad (3.14)$$

mit:

$t_{5\%,n-1}$ 5 %-Quantile der Student-*t*-Verteilung mit $n-1$ Freiheitsgraden

Der in *DIN EN 1990:2010-12* empfohlene Mindestwert des Variationskoeffizienten von 0,10 wird in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt, da es sich um eine materialübergreifende Empfehlung handelt, die nicht ohne weitere Überlegungen auf alle Werkstoffe und Prüfungen übertragen werden kann.

Bei vorliegenden Vorinformationen nimmt der Faktor k_n nach *DIN EN 1990:2010-12* deutlich kleinere Werte an (vgl. Tab. 3.5).

Tab. 3.5 Werte k_n für die Berechnung charakteristischer Festigkeiten (5 %-Quantile) mit Vorinformationen nach *DIN EN 1990:2010-12*

n	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30	∞
k_n	1,89	1,83	1,80	1,77	-	1,74	-	1,72	-	1,68	1,67	1,64

3.7.4 Vorgehen nach prEN 1990:2018

Im Rahmen der Erarbeitung der neuen Generation der Eurocodes auf europäischer Ebene ist auch im aktuellen Entwurf *prEN 1990:2018-04*, welcher als Ersatz für *EN 1990:2002-04* geplant ist, ein Verfahren zur Bestimmung charakteristischer Werte basierend auf einer Stichprobe enthalten. Das in *prEN 1990:2018-04* enthaltene Verfahren entspricht in unveränderter Form dem bereits in *EN 1990:2002-04* und *DIN EN 1990:2010-12* enthaltenen Bayes'schen Verfahren, welches bereits in Abschnitt 3.7.3 der vorliegenden Arbeit erläutert wurde.

3.7.5 Vorgehen nach DIN ISO 16269-6

Ein weiteres Verfahren zur Bestimmung charakteristischer Materialkennwerte ist in *DIN ISO 16269-6:2009-10* enthalten. Das dort beschriebene Vorgehen basiert auf klassischen statistischen Verfahren, welche in Kapitel 2 näher erläutert sind.

Wie bereits bei einer Auswertung mit dem Bayes'schen Verfahren ist auch bei *DIN ISO 16269-6:2009-10* zunächst die Verteilungsfunktion anzunehmen und zu überprüfen. Im Anschluss können die maßgebenden Parameter, wie in Kapitel 2 beschrieben, aus den Parametern der Stichprobe geschätzt werden.

Für eine normalverteilte Grundgesamtheit mit unbekannter Standardabweichung und unbekanntem Erwartungswert der Grundgesamtheit kann der charakteristische Wert (5 %-Quantil) x_k nach *DIN ISO 16269-6:2009-10* bei einseitig nach unten begrenztem statistischen Anteilsbereich entsprechend Gleichung (3.15) bestimmt werden.

$$x_L = \bar{x} - k_3(n, p, 1 - \alpha) \cdot s \quad (3.15)$$

mit:

\bar{x} Mittelwert nach Gleichung (2.1)

k_3 Faktor zur Ermittlung von x_L bei unbekannter Standardabweichung s , der vom Stichprobenumfang n , der Wahrscheinlichkeit p des gesuchten Quantils und dem Vertrauensniveau $(1 - \alpha)$ abhängt

s Stichprobenstandardabweichung nach Gleichung (2.8)

Der Faktor k_3 ist in *DIN ISO 16269-6:2009-10* für unterschiedliche p -Quantile und Vertrauensniveaus (vgl. Abschnitt 2.3.3) tabelliert. In Tab. 3.6 sind die bei der Bewertung der In-situ-Betondruckfestigkeit gebräuchlichen Werte von k_3 für ein 5 %-Quantilwert bei einseitigem Vertrauensniveau $(1 - \alpha) = 0,75$ in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang n dargestellt.

Tab. 3.6 Faktoren $k_3(n; p = 0,95; (1 - \alpha) = 0,75)$ für einseitig begrenzten statistischen Anteilbereich nach *DIN ISO 16269-6:2009-10*

n	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30	∞
k_3	3,152	2,681	2,464	2,336	2,251	2,189	2,142	2,104	1,991	1,932	1,869	1,645

Bei bekannter Standardabweichung sind die Werte k_3 durch die Reduzierung der zu berücksichtigenden Unsicherheiten nach *DIN ISO 16269-6:2009-10* deutlich niedriger. Schließlich führt ein Anstieg des Vertrauensniveaus zu einem Anstieg des Faktors k_3 .

Für die logarithmische Normalverteilung berechnet sich der charakteristische Wert (5 %-Quantil) x_L nach *DIN ISO 16269-6:2009-10* zu:

$$x_L = e^{(\bar{x}_{\ln x} - k_3(n, p, 1 - \alpha) \cdot s_{\ln x})} \quad (3.16)$$

mit:

$\bar{x}_{\ln x}$ Mittelwert der logarithmierten Einzelwerte nach Gleichung (3.12)

$s_{\ln x}$ Standardabweichung der logarithmierten Einzelwerte nach Gleichung (3.13)

Der Faktor k_3 ist dabei nach *Zupan et al. 2007* wie bei Anwendung einer Normalverteilung nach Tab. 3.6 zu wählen.

3.7.6 Vorgehen nach der Nachrechnungsrichtlinie

Für die Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit wird in *Nachrechnungsrichtlinie 2011* je Grundgesamtheit ein Mindeststichprobenumfang $n = 5$ genannt. Die beschriebenen statistischen Verfahren beruhen auf einer Normalverteilung. Die charakteristischen Materialkennwerte sind mit dem in Gleichung (3.10) nach *DIN EN 1990:2010-12* beschriebenen Zusammenhang zu bestimmen. Der hierfür erforderliche Faktor k_n ist entsprechend *DIN EN 1990:2010-12* zu wählen, wobei die beiden Fälle „ v_x bekannt“ und „ v_x unbekannt“ zulässig sind.

3.7.7 Vorgehen nach BAW Merkblatt

Das in *BAW 2016* beschriebene Vorgehen zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit von massiven Wasserbauwerken basiert auf der Annahme einer logarithmischen Normalverteilung. Je Prüfziel sind im Regelfall aus jedem Prüfbereich mindestens acht Probekörper zu entnehmen.

Für die Bestimmung des charakteristischen Wertes der In-situ-Betondruckfestigkeit wird das in *DIN EN 1990:2010-12* für eine logarithmische Normalverteilung beschriebene Vorgehen entsprechend Gleichung (3.11) genannt.

Abweichend von den in *DIN EN 1990:2010-12* enthaltenen Werten wird der Faktor k_n in *BAW 2016* jedoch für ein 95 %-Vertrauensintervall mit der Annahme, dass keine Vorinformationen über den Variationskoeffizienten vorliegen, ausgewiesen. Die genannten Werte sind in Tab. 3.7 dargestellt.

Tab. 3.7 Werte k_n für die Berechnung charakteristischer Festigkeiten (5 %-Quantile) für ein 95 %-Vertrauensintervall und „Standardabweichung unbekannt“ nach *BAW 2016*

n	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30	∞
k_n	6,36	4,65	3,94	3,54	3,28	3,10	2,96	2,86	2,54	2,38	2,21	1,64

3.7.8 Vorgehen nach E DIN EN 13791:2018-06

Neben verschiedenen Verfahren, welche direkte und indirekte Prüfmethode kombinieren, ist in *E DIN EN 13791:2018-06* auch ein Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit ausschließlich basierend auf Daten aus der Prüfung von Bohrkernen enthalten. Grundsätzlich müssen für die Anwendung des Verfahrens mindestens acht gültige Prüfergebnisse aus der Prüfung von Bohrkernen mit einem Durchmesser ≥ 75 mm zur Verfügung stehen. Bei einem Bohrkerndurchmesser von 50 mm und einem Größtkorndurchmesser ≤ 16 mm erhöht sich die Mindestbohrkernanzahl auf zwölf. Die geschätzte charakteristische In-situ-Druckfestigkeit $f_{ck, is}$ ergibt sich aus dem niedrigeren der folgenden beiden Werte:

$$f_{ck, is} = f_{c, m(n), is} - k_n \cdot s \quad (3.17)$$

$$f_{ck, is} = f_{c, is, Tiefstwert} + M \quad (3.18)$$

mit:

$f_{c, m(n), is}$ Mittelwert von n Prüfergebnissen der Druckfestigkeit des Bauwerkbetons

$f_{c, is, Tiefstwert}$ niedrigstes Prüfergebnis der Druckfestigkeit des Bauwerkbetons

s Standardabweichung der Prüfergebnisse nach Gleichung (2.8) mit einem Mindestwert nach Gleichung (3.19), der aus einem Variationskoeffizienten von 8 % resultiert

$$s_{min} = f_{c, m(n), is} \cdot 0,08 \quad (3.19)$$

k_n Faktor für die Berechnung charakteristischer Festigkeiten (5 %-Quantile) nach *DIN EN 1990:2010-12* (vgl. Tab. 3.4 und Gleichung (3.14))

M Spanne zur Anwendung von Gleichung (3.18) nach Tab. 3.8

Tab. 3.8 Spanne M nach *E DIN EN 13791:2018-06*

$f_{c, is, Tiefstwert}$ [N/mm ²]	Spanne M [N/mm ²]
≥ 20	4
$\geq 16; < 20$	3
$\geq 12; < 16$	2
< 12	1

Alternativ darf die logarithmische Normalverteilung angewendet werden.

4 Statistische Kenngrößen der Druckfestigkeit von Bestandsbetonen – Bauwerksuntersuchungen

4.1 Untersuchungen an Standardproben von Rüscher et al. nach DAfStb 206

4.1.1 Vorgehen und Ziel der Untersuchungen nach DAfStb 206

Zur statistischen Analyse der Betondruckfestigkeit wurde von Rüscher et al. im Jahr 1963 eine internationale Umfrage zur Streuung der Betonfestigkeit bei den für die Betonprüfung verwendeten Standardproben durchgeführt. Die Ergebnisse der Auswertung dieser Umfrage sind in *DAfStb 206* beschrieben.

Da lediglich Standardproben betrachtet wurden, können die Einflüsse des Einbaus des Betons in das Bauwerk sowie mögliche Alterungseinflüsse anhand seiner Untersuchungen nicht beurteilt werden. Einflüsse aus Art der Verdichtung, Bauteilabmessungen, Lage beim Betonieren, Abstand der Bewehrung und klimatische Einflüsse bleiben ebenfalls unberücksichtigt.

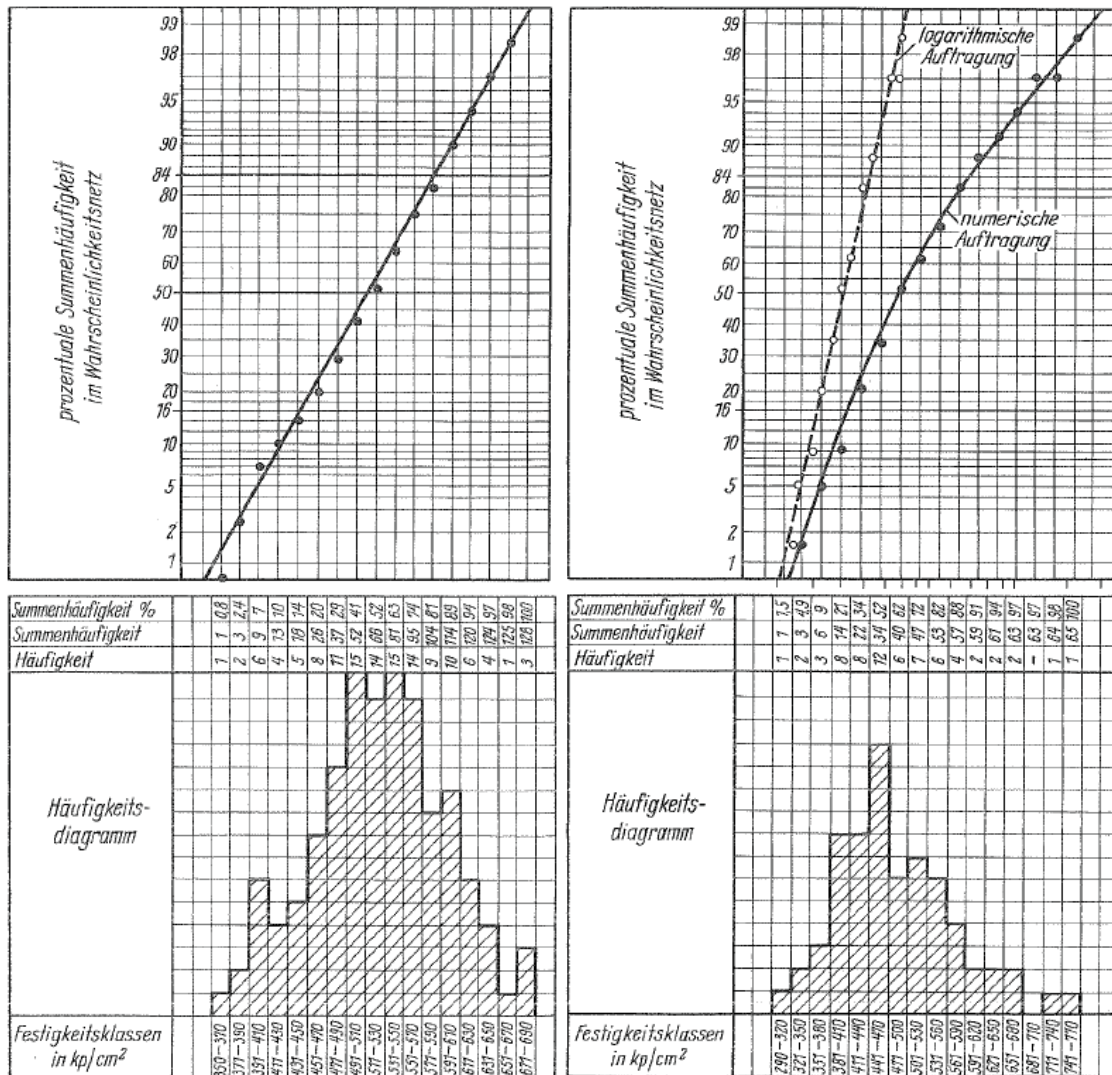
Als Bezugsgröße wurde für die in *DAfStb 206* beschriebenen Untersuchungen die Druckfestigkeit eines Würfels mit einer Kantenlänge von 20 cm verwendet. Die an Probekörpern mit abweichender Geometrie bestimmte Betondruckfestigkeit wurde mittels Umrechnungsfaktoren auf die Festigkeit des Bezugsprobekörpers umgerechnet. Auf die Lagerungsart der Würfel wird nicht gesondert eingegangen.

Insgesamt resultierten aus der Umfrage ca. 2.500 Datensätze, wovon jedoch nur 499 als geeignet eingestuft wurden. Voraussetzung für die Eignung war dabei eine annähernde Normalverteilung der Stichproben. Außerdem mussten für jeden Datensatz das Verfahren der Probenherstellung, die Probekörperform, die Art der Baustelle bekannt sein sowie alle Einzelwerte einer einheitlichen Betonart entstammen. Zusätzlich wurden nur Datensätze mit mindestens 20 Einzelwerten berücksichtigt, um eine ausreichende Aussagewahrscheinlichkeit sicherzustellen.

Als Ziel der Untersuchungen sollte zunächst geklärt werden, ob die Normalverteilung zur statistischen Beschreibung der Betondruckfestigkeit geeignet ist. Sofern dies der Fall war, sollte der Zusammenhang zwischen Standardabweichung und Mittelwert der Betondruckfestigkeit bewertet werden. Darüber hinaus sollte der Einfluss von Bauwerkstyp und Kontrolle auf die Standardabweichung untersucht werden.

4.1.2 Bewertung der Verteilung der Betondruckfestigkeit

Zur Bewertung der Verteilung der betrachteten Datensätze wurden die im Rahmen der in *DAfStb 206* beschriebenen Untersuchungen vorliegenden Stichproben in normalem Wahrscheinlichkeitsnetz (Wahrscheinlichkeitspapier) abgetragen. Die Abweichung der Stichprobe von der Normalverteilung kann somit an dem Kurvenzug der Summenhäufigkeit abgelesen werden. Liegt eine Normalverteilung vor, so müssen die einzelnen Versuchspunkte annähernd auf einer Geraden liegen. Bei einer logarithmischen Normalverteilung müssten entsprechend die logarithmierten Einzelwerte auf einer Geraden liegen.



a) normalverteilte Stichprobe

b) Verteilung mit positiver Schiefe

Abb. 4.1 Histogramm und Summenhäufigkeit der Betondruckfestigkeit nach DAfStb 206

In Abb. 4.1 a ist das Histogramm und die Summenhäufigkeit für eine annähernd normalverteilte Stichprobe dargestellt. Die entsprechende Darstellung für eine Stichprobe mit rechtsschiefer Verteilung, wie z. B. bei der logarithmischen Normalverteilung, ist Abb. 4.1 b zu entnehmen. Weiterhin konnten linkschiefe Verteilungen oder Mischverteilungen (multimodal) beobachtet werden.

Die absolute und relative Aufteilung der betrachteten Stichproben auf die vier genannten Verteilungstypen können Tab. 4.1 entnommen werden. Insgesamt wurden in DAfStb 206 die Verteilung von 829 Stichproben bewertet.

Basierend auf den in DAfStb 206 beschriebenen Untersuchungen kann somit ein Großteil der betrachteten Stichproben durch eine Normalverteilung beschrieben werden. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass in DAfStb 206 keine Kriterien für die Einstufung genannt werden. Die Einstufung basiert offensichtlich rein auf einer optischen, qualitativen Bewertung der Histogramme und Summenhäufigkeiten.

Tab. 4.1 Verteilungsformen nach *DAfStb 206*

	normal	linksschief	rechtsschief	multimodal
Anzahl	799	14	26	20
%	92,8	1,7	3,1	2,4

4.1.3 Ursachen für die Streuung der Betondruckfestigkeit

In *DAfStb 206* werden als Ursache für die Streuung der Betondruckfestigkeit von Standardproben die in Tab. 4.2 aufgeführten Einflussgrößen genannt. Allgemein wird dabei in Einfluss der Rohstoffe, der Mischungs- und der Prüfstreuung unterschieden.

Tab. 4.2 Ursachen für die Streuung der Betondruckfestigkeit nach *DAfStb 206*

Eigenschaften der Rohstoffe	
Streuung der Zementfestigkeit	
Streuung der Festigkeit der Zuschläge	
wechselnde Kornzusammensetzung	
Mischungsstreuung	
Mischungszusammensetzung	Mischen, Fördern, Verarbeiten
Ungenauigkeiten bei der Zementzugabe	unvollkommene Durchmischung
Ungenauigkeiten bei der Wasserzugabe	Entmischung beim Transport
wechselnde Eigenfeuchtigkeit der Zuschläge	mangelhafte Verdichtung der Prüfkörper
Ungenauigkeiten bei der Zugabe der Zuschläge	
vereinzelter Einsatz von Zusatzmitteln	
Prüfstreuung	
Einflüsse auf den erhärtenden Probekörper	Einflüsse während der Prüfung
variierende Erhärtungstemperatur	Unebenheiten der Druckflächen
unterschiedliche Austrocknung	Beinhalten unerwartet großer Zuschlagkörner
unterschiedliche Aufbewahrungsart	unvollkommene Zentrierung
	Abweichung der Prüfungsgeschwindigkeit
	Ablesefehler
	Einflüsse der Prüfmaschine

4.1.4 Aufbereitung des Datenmaterials

Für die statistische Bewertung wurden in *DAfStb 206* lediglich die normalverteilten Stichproben herangezogen. Alle anderen Datensätze wurden von der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Somit können Mittelwert und Standardabweichung mit den in Gleichung (2.1) und (2.8) beschriebenen Zusammenhängen aus der Stichprobe geschätzt werden.

Um einen Vergleich der Ergebnisse zu ermöglichen, wurden die aus einer unterschiedlichen Probekörperform resultierenden Abweichungen mittels den in Tab.

4.3 dargestellten Umrechnungsfaktoren auf die Festigkeit eines Würfels mit der Kantenlänge 20 cm angepasst. Dabei wurde angenommen, dass die in Tab. 4.3 aufgelisteten Umrechnungsfaktoren sowohl für den Mittelwert als auch gleichermaßen für die Standardabweichung zutreffen. Eine Literaturstelle, die diese Annahme belegt, wird nicht aufgeführt.

Tab. 4.3 Umrechnungsfaktoren für verschiedene Probekörperformen nach DAfStb 206

Probekörperform	Abmessungen [cm]	Umrechnungsfaktor β_{w20/β_i}
Würfel 20 cm	20/20/20	1,00
Würfel 30 cm	30/30/30	1,11
Würfel 10 cm	10/10/10	0,87
Zylinder	15/30	1,15
Prismen	-	1,20
Zylinder	45/30	1,185
Würfel 15 cm	15/15/15	0,95

4.1.5 Zusammenhang zwischen Standardabweichung und mittlerer Betondruckfestigkeit

In Abb. 4.2 ist für die betrachteten Standardproben der Zusammenhang zwischen der Standardabweichung und der mittleren Druckfestigkeit aufgetragen. Die mittlere Lage der Punkte kann dabei annähernd durch eine Gerade beschrieben werden. Lediglich im Bereich kleiner Würfelfestigkeiten sinkt deren Verlauf gegen Null ab. Mathematisch kann der Zusammenhang nach DAfStb 206 mit Gleichung (4.1) beschrieben werden.

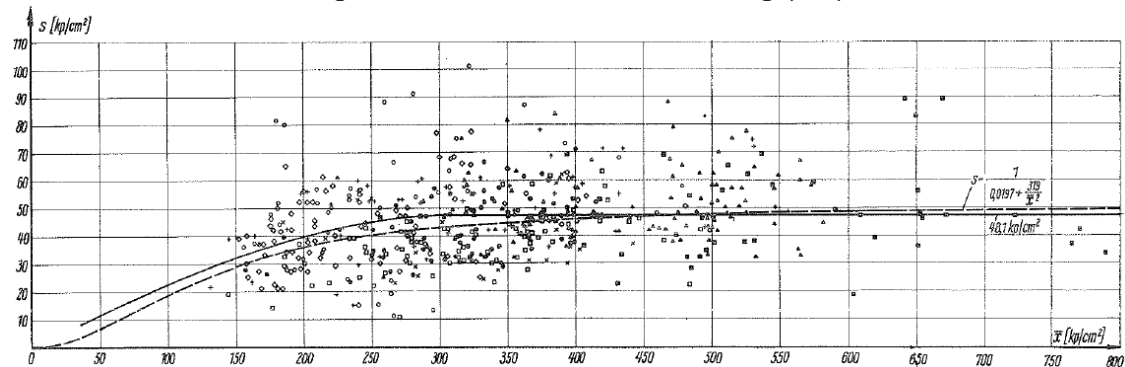


Abb. 4.2 Zusammenhang zwischen Standardabweichung und mittlerer Betondruckfestigkeit nach DAfStb 206

$$s = \frac{1}{0,0197 + \frac{319}{\bar{x}^2}} \quad (4.1)$$

mit:

s empirische Standardabweichung nach Gleichung (2.8)

\bar{x} arithmetische Mittel nach Gleichung (2.1)

Dabei ist zu beachten, dass Gleichung (4.1) für Größen mit der Einheit kp/cm^2 ausgelegt wurde. Die Umrechnung in die heute gebräuchliche Einheit N/mm^2 kann mit Gleichung (4.2) erfolgen.

$$10 \text{ kp} / \text{cm}^2 = 1 \text{ N} / \text{mm}^2 \quad (4.2)$$

4.2 Eigene Untersuchungen an bestehenden Massivbauwerken

4.2.1 Allgemeines

Bei der statistischen Bewertung der Druckfestigkeit von Bestandsbetonen sind über die bereits in Abschnitt 4.1 erläuterten Einflüsse aus Eigenschaften der Rohstoffe, Mischungsstreuung und Prüfstreuung hinaus noch weitere Einflussgrößen zu berücksichtigen. Insbesondere wirken sich bei einer experimentellen Bestimmung der In-situ-Betondruckfestigkeit durch Probeentnahme am Bestandstragwerk die Art des Einbaus des Betons in das Bauwerk, Alterungseinflüsse, die Art der Verdichtung, mögliche Bauteilabmessungen, die Lage beim Betonieren sowie klimatische Einflüsse auf die Streuung aus.

Da bisher nur vereinzelte Untersuchungen zu den statistischen Kenngrößen von Bestandsbetonen vorliegen, wird im Rahmen dieser Arbeit die In-situ-Betondruckfestigkeit von 44 Bestandstragwerken des üblichen Hoch- und Ingenieurbaus untersucht. Dabei wurden 25 der 44 Untersuchungen selbst durchgeführt. Die verbleibenden 19 Untersuchungen entstammen der Literatur und einer Anfrage auf nationaler Ebene. Die Prüfung der selbst durchgeführten Untersuchungen erfolgte im Materialprüfamt der Technischen Universität Kaiserslautern. Die aus der Literatur oder der Anfrage stammenden Datensätze wurden an unterschiedlichen Stellen geprüft. Durch die Vermischung verschiedener Prüfstellen kann somit auch ein dominierender, prüfbedingter Einfluss ausgeschlossen werden. Alle Bauwerke stehen oder standen auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland.

Die Untersuchungen wurden im Zuge des AiF/IGF-Projektes (Nr. 19346 N) „Ermittlung der charakteristischen Betondruckfestigkeit im Bestand bei geringem Stichprobenumfang“ (vgl. *Weber et al. 2019d*) durchgeführt.

Alle Untersuchungen basieren ausschließlich auf einer experimentellen Bewertung der In-situ-Betondruckfestigkeit durch Bohrkernentnahme und anschließende Druckfestigkeitsprüfung auf Grundlage der in Kapitel 3 beschriebenen Vorgehensweise. Indirekte Prüfverfahren wurden lediglich vereinzelt ergänzend bei der Einteilung von Prüfbereichen verwendet.

Für die Einteilung der Prüfbereiche wurden über indirekte Prüfverfahren hinaus auch, sofern vorliegend, Bestandsunterlagen aus der Zeit der Errichtung des Tragwerks verwendet. Die Prüfbereiche wurden so gewählt, dass angenommen werden kann, dass alle Probekörper einer Grundgesamtheit (vgl. Abschnitt 2.1) zugeordnet werden können.

Zur Sicherstellung der statistischen Belastbarkeit, jedoch auch unter Berücksichtigung des schädigenden Einflusses der Bohrkernentnahme, wurde ein

Mindeststichprobenumfang von $n = 10$ gefordert. Dieser wurde jedoch im Rahmen der betrachteten Untersuchungen im Mittel mit $n = 21,4$ weit übertroffen. Lediglich bei zwei Datensätzen wird der geforderte Mindeststichprobenumfang mit $n = 7$ und $n = 8$ unterschritten. Insgesamt liegen die Werte im Bereich $7 \leq n \leq 63$.

Um eventuelle Einflüsse aus der Bohrkernentnahme auf das Ergebnis der Druckfestigkeitsprüfung zu minimieren, kam ausschließlich das Nassbohrverfahren zum Einsatz. Die Bohrkern wurden nach der Entnahme durch Nassschneiden und Schleifen für die Prüfung der Druckfestigkeit vorbereitet. Für die Prüfung wurden ausschließlich Probekörper mit einer Schlankheit $\lambda = h/d = 1,0$ oder $2,0$ verwendet. Nach der Vorbereitung wurden die Probekörper entweder in einem der Bauwerksfeuchte ähnlichen Zustand geprüft oder bei größerem zeitlichem Abstand zwischen Vorbereitung und Prüfung, zur Vermeidung einer fortschreitenden Karbonatisierung bis zur Prüfung unter Wasser gelagert. In Abhängigkeit der Porosität der Probekörper kann bei Luftlagerung ein rascher Anstieg der Karbonatisierungstiefe nicht ausgeschlossen werden.

Die in Anhang I angegebene Karbonatisierungstiefe beschreibt die Dicke der karbonatisierten Randschicht in Bohrkernentnahmerichtung. Um einen Einfluss der Karbonatisierung auszuschließen, wurde diese Schicht bei der Vorbereitung der Probekörper abgetrennt. Die aufgelisteten Prüfergebnisse der In-situ-Betondruckfestigkeit wurden nicht mit einem Ausreißertest, wie z. B. in Kapitel 6 beschrieben, bewertet.

Die Ergebnisse der Bauwerksuntersuchungen sind in Anhang I zusammengefasst. Über verschiedene Kenngrößen des jeweils betrachteten Bauwerkbetons hinaus sind dort auch sämtliche Einzelprüfwerte, die Parameter der Stichprobe sowie eine statistische Bewertung der Stichprobe basierend auf einer logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12*, welche wie in Abschnitt 3.7.3 beschrieben auch bei Variationskoeffizienten $v_x > 0,20$ eine realistische Bewertung der Daten ermöglicht, dargestellt. Zusätzlich ist für jede Stichprobe zur Beschreibung der empirischen Dichtefunktion ein Kerndichteschätzer, berechnet mit der Software RStudio, Version 1.1.456 (*Horton u. Kleinman 2015*), dargestellt. Weiterhin sind die Schiefe der Stichprobe sowie zur Überprüfung, ob die Grundgesamtheit einer Stichprobe einer Normalverteilung folgt, das Ergebnis des Shapiro-Wilk-Tests (siehe *Hartung 1993*) beschrieben.

4.2.2 Bewertung der Verteilung der In-situ-Betondruckfestigkeit

Zur Bewertung der Verteilung der in Anhang I.1 genannten Stichproben ist in Anhang I.2 für jeden Datensatz die mit einem Kerndichteschätzer mit Gauß-Kern nach Abschnitt 2.2.4.3 ermittelte empirische Dichtefunktion dargestellt. Darüber hinaus sind in Abb. I.6 bis I.47 die mit den aus den Stichproben ermittelten Parametern bestimmten Normalverteilungen und logarithmische Normalverteilungen abgebildet (exemplarische Darstellung siehe Abb. 4.3). Hiermit kann die Abweichung zwischen der Normalverteilung oder logarithmischen Normalverteilung und der empirischen Dichtefunktion für jede Stichprobe optisch bewertet werden.

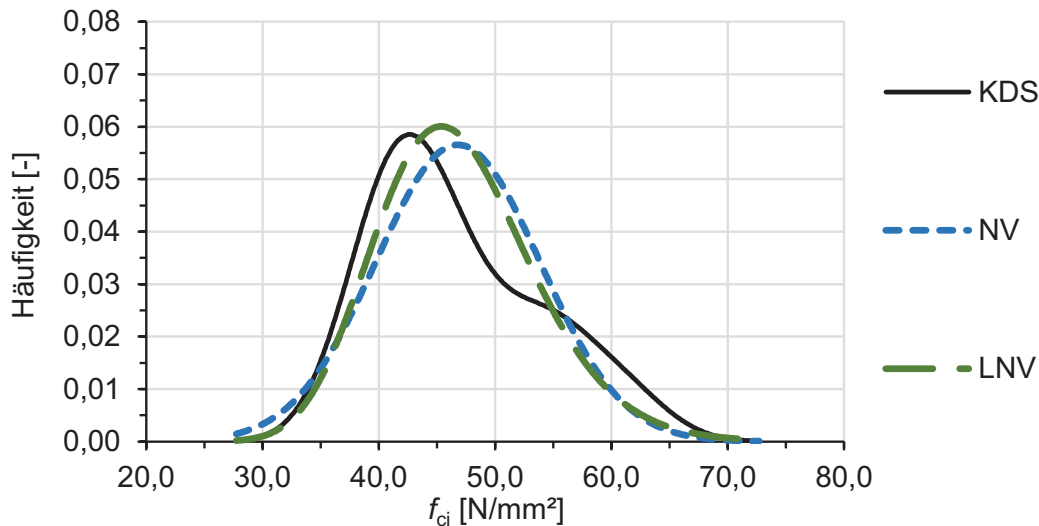


Abb. 4.3 Balkonplatte Altersheim, Schifferstadt – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Es wird angenommen, dass die In-situ-Betondruckfestigkeit allgemein einer Normal- oder einer logarithmischen Normalverteilung folgt. Weitere Verteilungsarten werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet. Über die grafische Darstellung der Dichtefunktionen hinaus sind in Anhang I.2 (Tab I.90 bis Tab. I.131) die 5 %-Quantilwerte für Kerndichteschätzer, Normal- und logarithmische Normalverteilung sowie die empirische Schiefe und die Ergebnisse der Überprüfung auf Normalverteilung mit dem Shapiro-Wilk-Test angegeben.

Die empirische Dichtefunktion deutet in 15 der 44 betrachteten Fälle auf eine bi- oder multimodale Verteilungsdichte hin. Hierbei wurden alle Verteilungsdichten mit zwei oder mehreren Modi (vgl. Abschnitt 2.2.3.6) als multimodal eingestuft. Um mögliche Ursachen zu identifizieren, sind in Tab. 4.4 verschiedene Parameter der Stichproben mit multimodaler empirischer Verteilungsdichtefunktion dargestellt. Stichproben mit einem Umfang kleiner als 20 und einer Spannweite mit $x_n > 2 \cdot x_1$ sind farbig gekennzeichnet.

Nach Tab. 4.4 liegt in 13 der 15 betrachteten Fälle mit multimodaler Verteilungsdichtefunktion ein Stichprobenumfang $n < 20$ oder eine Spannweite mit $x_n > 2 \cdot x_1$ vor. Bei vier Datensätzen können sowohl ein kleiner Stichprobenumfang als auch eine große Spannweite beobachtet werden. Eine mögliche Ursache für die Multimodalität der Stichproben ist somit in den meisten Fällen, hier bei 87 %, eine große Spannweite oder ein sehr kleiner Stichprobenumfang, was die Schätzung der Dichtefunktion erschwert. Auch bei den in Tab. 4.4 genannten Stichproben, bei denen weder ein besonders kleiner Stichprobenumfang noch eine große Streubreite vorliegt, ist zu beachten, dass die betrachteten Stichproben allgemein recht klein sind.

Weitere mögliche Ursachen sind die Vermischung verschiedener Grundgesamtheiten und systematische Fehler bei der Beprobung. Beides kann jedoch durch eine Überprüfung der Prüfergebnisse mit den in Abschnitt 3.3 beschriebenen Verfahren ausgeschlossen werden.

Tab. 4.4 Parameter der Stichproben mit multimodaler Verteilungsdichtefunktion

Bauwerk	\bar{x}	s_x	v_x	x_1	x_n	n
	Mittelwert	Standardabw.	Variationskoef.	Min	Max	Anzahl
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]
Schergewichtswand, Dormagen	16,6	4,30	0,26	10,3	28,3	31
Weserbrücke, Hannoversch Münden	72,9	13,1	0,18	47,8	95,8	20
Lautertalbrücke Pfeiler C, Kaiserslautern	23,8	8,99	0,38	10,0	42,0	20
Lautertalbrücke Pfeiler D, Kaiserslautern	22,5	11,8	0,53	5,0	59,0	23
Lautertalbrücke Pfeiler E, Kaiserslautern	20,6	8,44	0,41	6,0	40,0	22
Gewölbebogen, Zwickau	15,1	7,92	0,53	7,4	34,9	12
Pfeiler Brücke B270, Langweiler	60,6	17,3	0,29	37,8	103,3	12
Deckenplatte Altersheim, Schifferstadt	40,6	5,86	0,14	31,5	49,2	19
Stütze Altersheim, Schifferstadt	52,0	2,47	0,05	48,4	55,7	7
Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D)	32,0	6,11	0,19	19,9	42,6	20
Unterführung A6 Biberach-N. (504 E-H)	39,5	2,74	0,07	34,0	45,2	25
Bauwerk 2	48,3	13,1	0,27	28,3	77,0	13
Bauwerk 4	47,4	4,80	0,10	37,3	57,1	44
Kühlturm, DBV fc(12)	86,1	7,82	0,09	78,0	101,5	10
Flachdecke, DBV fc(70)	25,4	5,65	0,22	17,8	34,8	10

Infolgedessen kann davon ausgegangen werden, dass die tatsächliche Verteilungsdichtefunktion der Grundgesamtheiten einer unimodalen Verteilung, wie z. B. die Normal- oder logarithmische Normalverteilung, folgt. Die hier beobachteten Multimodalitäten sind offensichtlich maßgeblich durch die vorliegenden Rahmenbedingungen verursacht.

Im Hinblick auf die Wahl der Verteilungsfunktion und die Bestimmung des 5 %-Quantilwertes kann besonders für Stichproben mit kleinem Mittelwert ein teilweise deutlicher Unterschied zwischen Normal- und logarithmischer Normalverteilung beobachtet werden (vgl. z. B. Abb. I.18 oder Abb. I.19). Bei Annahme einer Normalverteilung ist die Auftretenswahrscheinlichkeit sehr kleiner Werte viel größer als bei Verwendung einer logarithmischen Normalverteilung. In Tab. 4.5 sind für die

betroffenen Stichproben die wesentlichen Parameter der Stichprobe zusammengefasst.

Tab. 4.5 Parameter der Stichproben mit deutlichem Unterschied zwischen Normal- und logarithmischer Normalverteilung

Bauwerk	\bar{x}	s_x	v_x	g
	Mittelwert	Standardabw.	Variationskoef.	Schiefe
	[N/mm²]	[N/mm²]	[-]	[-]
Lautertalbrücke Pfeiler B, Kaiserslautern	23,1	7,95	0,34	0,612
Lautertalbrücke Pfeiler C, Kaiserslautern	23,8	8,99	0,38	0,356
Lautertalbrücke Pfeiler D, Kaiserslautern	22,5	11,8	0,53	1,472
Lautertalbrücke Pfeiler E, Kaiserslautern	20,6	8,44	0,41	0,880
Gewölbebogen	15,1	7,92	0,53	1,597

Die in Tab. 4.5 zusammengefassten Kennwerte zeigen, dass bei allen Stichproben, bei denen ein deutlicher Unterschied zwischen Normal- und logarithmischer Normalverteilung speziell im Hinblick auf die Bestimmung des 5 %-Quantilwertes beobachtet werden konnte, ein großer Variationskoeffizient und eine positive empirische Schiefe vorliegt. Die positive empirische Schiefe deutet darauf hin, dass in diesen Fällen die logarithmische Normalverteilung besser geeignet ist, um die zu der Stichprobe gehörende Grundgesamtheit zu beschreiben. Die Normalverteilung nimmt teilweise sogar Werte im negativen Bereich an, welche bei der hier vorliegenden Betrachtung der In-situ-Betondruckfestigkeit mechanisch nicht begründbar sind. Dieser Unterschied spiegelt sich auch in den in Tab. I.90 bis Tab. I.131 dargestellten 5 %-Quantilwerten für Kerndichteschätzer, Normal- und logarithmische Normalverteilung wider. Bei Stichproben mit größerem Mittelwert und geringer Streuung sind die Unterschiede zwischen Normal- und logarithmischer Normalverteilung geringer.

Zur allgemeinen Beurteilung der Kerndichteschätzer ist in Abb. 4.4 für jede Stichprobe die empirische Schiefe in Abhängigkeit von der mittleren In-situ-Betondruckfestigkeit abgetragen. Bei der Bewertung ist zu beachten, dass die Berechnung der Schiefe nach Abschnitt 2.2.3.6 eigentlich nur für unimodale Verteilungen empfohlen wird.

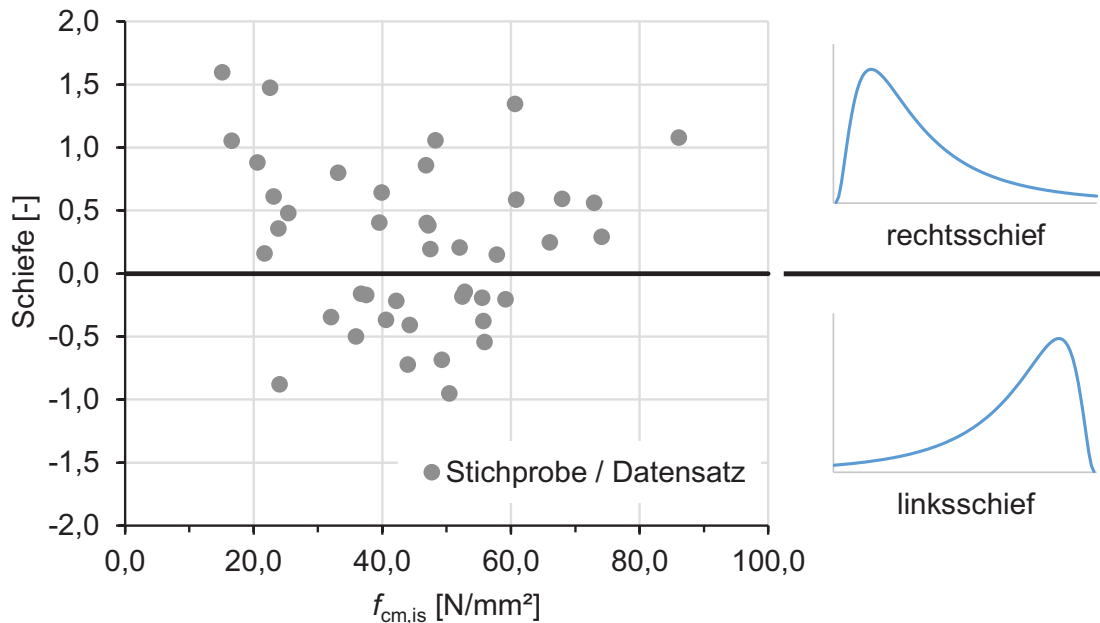


Abb. 4.4 Empirische Schiefe der In-situ-Betondruckfestigkeit

Eine Schiefe $g = 0$ bedeutet, dass die Verteilungsdichtefunktion symmetrisch ist. Die in Abb. 4.4 abgebildeten Werte der empirischen Schiefe liegen überwiegend in einem Wertebereich von -1 bis $+1$ (die geschätzte Dichtefunktion sowie die zugehörige Schiefe aller Stichproben ist in Anhang I dargestellt). Folglich ist in vielen Fällen eine Beschreibung der Grundgesamtheit der In-situ-Betondruckfestigkeit mit einer Normalverteilung ausreichend. Dennoch konnten sowohl positive als auch negative Werte für die Schiefe beobachtet werden, die deutlich von der symmetrischen Verteilung abweichen. Die größten positiven Werte der Schiefe können bei kleiner mittlerer In-situ-Betondruckfestigkeit beobachtet werden, was die zuvor erläuterten Unterschiede zwischen Normal- und logarithmischer Normalverteilung bestätigt. Betragsmäßig große negative Werte der Schiefe konnten mit einer Ausnahme von einem Datensatz hauptsächlich bei großer mittlerer In-situ-Betondruckfestigkeit beobachtet werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Beurteilung der Art der Verteilungsdichte stellen statistische Signifikanztests dar. Die hier betrachteten Stichproben wurden mithilfe des Shapiro-Wilk-Tests bewertet. Dieser überprüft, ob es sich bei der zu der Stichprobe gehörenden Grundgesamtheit um eine Normalverteilung handelt. Ist der an der Stichprobe ermittelte p -Wert größer als das festzulegende Signifikanzniveau α , so kann angenommen werden, dass eine Normalverteilung vorliegt. Für p -Werte kleiner als das definierte Signifikanzniveau α wird angenommen, dass keine Normalverteilung vorliegt. Allgemein beschreibt der p -Wert, welche Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann, die Auftretenswahrscheinlichkeit der betrachteten Stichprobe bei angenommener normalverteilter Grundgesamtheit. Je kleiner der p -Wert, desto kleiner ist die Wahrscheinlichkeit, dass die zu der betrachteten Stichprobe gehörende Grundgesamtheit normalverteilt ist.

In Abb. 4.5 sind für die in Anhang I.1 genannten Stichproben die mit dem Shapiro-Wilk-Test ermittelten p -Werte in Abhängigkeit von der mittleren In-situ-

Betondruckfestigkeit aufgetragen. Zusätzlich ist zur Orientierung ein frei gewähltes Signifikanzniveau von 0,05 eingetragen.

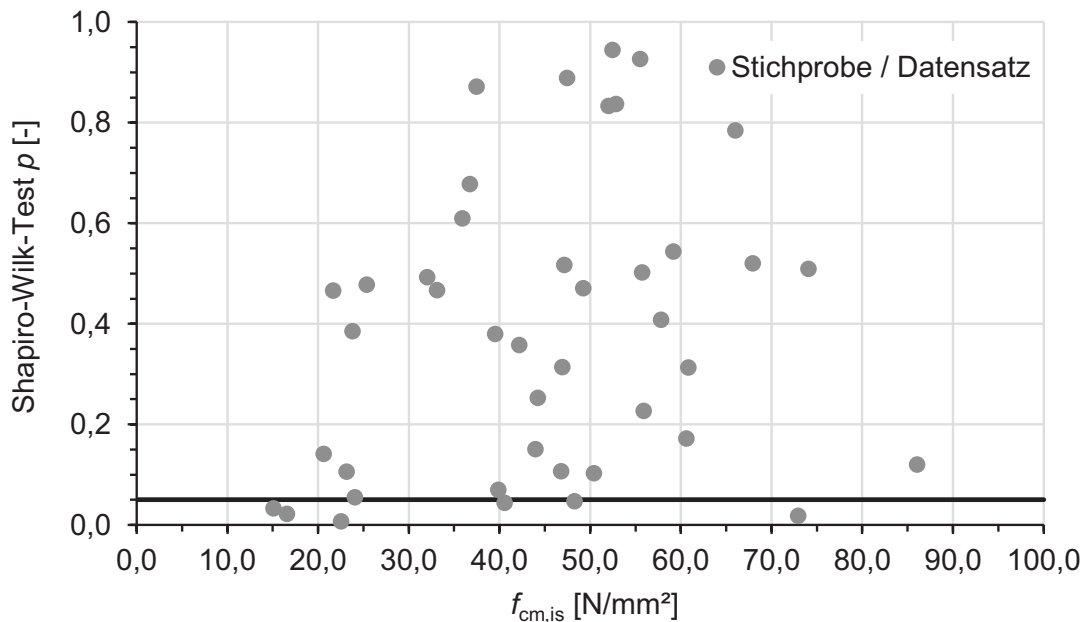


Abb. 4.5 Bewertung von Stichproben zur Untersuchung der In-situ-Betondruckfestigkeit mit dem Shapiro-Wilk-Test

Nur in wenigen Fällen wird mit dem Shapiro-Wilk-Test die Annahme einer Normalverteilung für ein Signifikanzniveau von 0,05 verworfen. Umgekehrt wird auch in keinem Fall die Normalverteilung zu 100 % bestätigt. Allgemein kann eine recht gleichmäßige Verteilung der ermittelten p -Werte beobachtet werden. Eine eindeutige Bestätigung oder Ablehnung der Normalverteilung ist mit dem Shapiro-Wilk-Test (siehe *Hartung 1993*) nur in wenigen Fällen möglich, da die errechneten p -Werte oftmals Werte zwischen ca. 0,2 und 0,8 annehmen.

Die zuvor beschriebene Wahl der Verteilung, basierend auf einem optischen Vergleich der empirischen Dichtefunktion mit der Normal- und logarithmischen Normalverteilung unter Berücksichtigung der empirischen Schiefe der Stichprobe, liefert bessere Ergebnisse als die Bewertung mit einem statistischen Signifikanztest, wie z. B. dem Shapiro-Wilk-Test.

4.2.3 Streuung der In-situ-Betondruckfestigkeit

4.2.3.1 Allgemeines

Zur Beschreibung der Streuung der In-situ-Betondruckfestigkeit werden nachfolgend die Zusammenhänge zwischen Standardabweichung oder Variationskoeffizient und der mittleren In-situ-Betondruckfestigkeit betrachtet. Dabei werden u. a. Einflüsse aus dem Zeitpunkt der Errichtung des Bauwerks, dem Stichprobenumfang, dem Verhältnis zwischen Bohrkern- und Größtkorndurchmesser und der Bauwerksart auf die Streuung gesondert untersucht.

Mit einer Ausnahme von zwei Stichproben wurde die Betondruckfestigkeiten ausschließlich an Probekörpern mit einer Schlankheit $\lambda = h/d = 1,0$ geprüft, d. h. die

ermittelte Druckfestigkeit kann nach *DIN EN 13791/A20:2017-02* mit der Druckfestigkeit, geprüft am Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm, gleichgesetzt werden. An den verbleibenden zwei Stichproben wurde die Druckfestigkeit an Probekörpern mit einer Schlankheit $\lambda = h/d = 2,0$ geprüft, welche gemäß Abschnitt 3.4.2.2 mit der Druckfestigkeit des Normzylinders gleichgesetzt werden kann. Hinweise zur Lagerung der Probekörper sind Anhang I zu entnehmen.

Für die Bewertung des Zusammenhangs zwischen Standardabweichung oder Variationskoeffizient und der mittleren In-situ-Betondruckfestigkeit wurden alle Prüfwerte auf die Druckfestigkeit von Bohrkernen mit einer Schlankheit $\lambda = h/d = 1,0$ umgerechnet. Die Umrechnung der Druckfestigkeit erfolgte dabei mithilfe des in Gleichung (3.1) beschriebenen Zusammenhangs. Die Gültigkeit der in Gleichung (3.1) beschriebenen Beziehung wurde auch für die Standardabweichung angenommen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der Einfluss der Probekörperform auf die Streuung der In-situ-Betondruckfestigkeit im Rahmen dieser Arbeit nicht gesondert betrachtet wurde. Da auch in der Literatur hierzu keine abschließenden Erkenntnisse vorliegen, sind diesbezgl. weitere Untersuchungen erforderlich.

4.2.3.2 Zusammenhang zwischen Standardabweichung und mittlerer In-situ-Betondruckfestigkeit

In Abb. 4.6 ist die an den in Anhang I.1 aufgelisteten Stichproben ermittelte empirische Standardabweichung in Abhängigkeit von der mittleren In-situ-Betondruckfestigkeit aufgetragen.

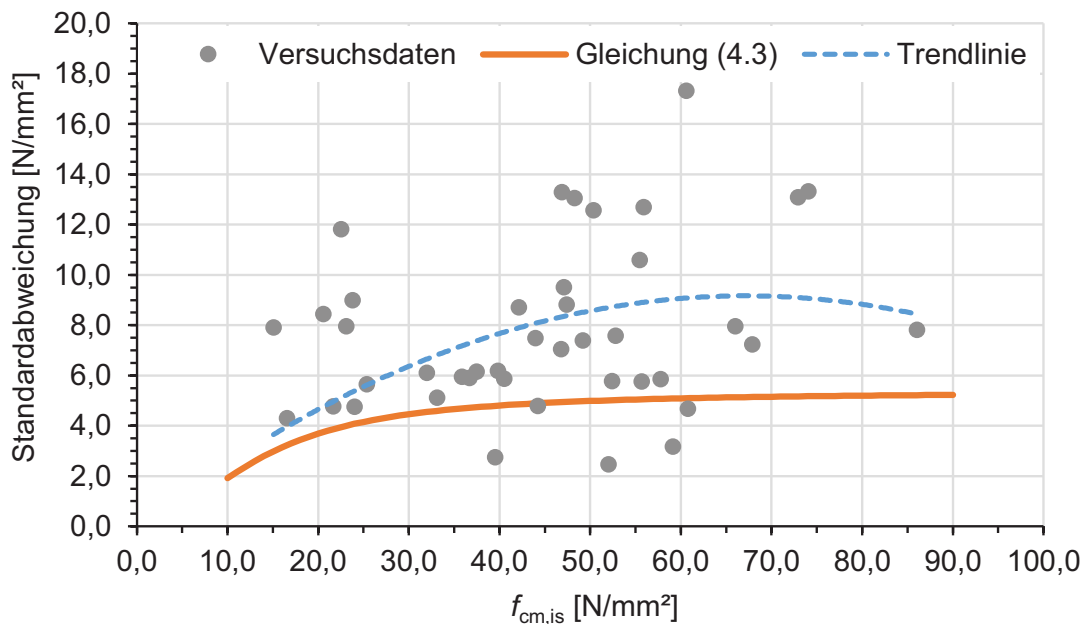


Abb. 4.6 Zusammenhang zwischen Standardabweichung und mittlerer In-situ-Betondruckfestigkeit

Als Bezugsgröße wurden Bohrkern mit einem Durchmesser zwischen 50 und 150 mm und einer Schlankheit $\lambda = h/d = 1,0$ verwendet. Zusätzlich ist der in Gleichung (4.3) beschriebene Zusammenhang, welcher aus Gleichung (4.1) unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Probekörpergeometrie (vgl. Tab. 4.3) und

Einheit (siehe Gleichung 4.2) resultiert, dargestellt. Dabei wird angenommen, dass der in Tab. 4.3 genannte Umrechnungsfaktor 0,95 zwischen der Druckfestigkeit eines Würfels mit einer Kantenlänge von 200 mm und eines Würfels mit einer Kantenlänge von 150 mm ebenfalls für die empirische Standardabweichung gilt. Zusätzlich ist als Ergebnis einer Regressionsanalyse (siehe *Roach 2014*) die Trendlinie, basierend auf einem Polynom zweiten Grades mit Verlauf durch den Ursprung, dargestellt. Der leichte Abwärtstrend der Trendlinie ab einer mittleren In-situ-Betondruckfestigkeit von ca. 70 N/mm² ist auf die geringe Datenbasis in diesem Bereich zurückzuführen.

Allgemein kann eine sehr große Streubreite der empirischen Standardabweichung der In-situ-Betondruckfestigkeit festgestellt werden. Es konnten Werte in einem Bereich zwischen 2,47 N/mm² und 17,32 N/mm² beobachtet werden. Der Mittelwert der empirischen Standardabweichungen liegt bei 7,65 N/mm². Tendenziell steigt mit zunehmendem Mittelwert der In-situ-Betondruckfestigkeit auch der Mittelwert der empirischen Standardabweichungen leicht an, wobei im Bereich niedriger Festigkeiten ein größerer Anstieg der Standardabweichung zu verzeichnen ist, als im Bereich hoher Festigkeiten. Die empirische Standardabweichung der In-situ-Betondruckfestigkeit ist somit keine konstante, von der mittleren In-situ-Betondruckfestigkeit unabhängige Größe.

$$s = \frac{1}{0,95 \cdot 10 \cdot 0,0197 + \frac{319}{(\bar{x} \cdot 0,95 \cdot 10)^2}} \quad (4.3)$$

Im Vergleich zu den mit Gleichung (4.3) berechneten Werten der Standardabweichung konnten bei den Versuchen meist größere Werte festgestellt werden, was dadurch begründet werden kann, dass Gleichung (4.3) nach *DAfStb 206* für Standardproben ermittelt wurde. Bei der Untersuchung von Bestandsbetonen werden über die in *DAfStb 206* genannten Einflussgrößen hinaus noch weitere Effekte mit erfasst. U. a. sind dabei die Art des Einbaus des Betons in das Bauwerk, Alterungseinflüsse, die Art der Verdichtung, mögliche Bauteilabmessungen, die Lage beim Betonieren sowie klimatische Einflüsse zu nennen.

4.2.3.3 Zusammenhang zwischen Variationskoeffizient und mittlerer In-situ-Betondruckfestigkeit

In Abb. 4.7 ist der Zusammenhang zwischen dem empirischen Variationskoeffizienten und der mittleren In-situ-Betondruckfestigkeit aufgetragen. Zusätzlich ist der einer Bemessung nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* zugrunde liegende Variationskoeffizient der Betondruckfestigkeit von 0,15 dargestellt. Weiterhin ist die Trendlinie, basierend auf einer Potenzfunktion angegeben.

Wie schon bei der Standardabweichung kann auch für den empirischen Variationskoeffizienten der In-situ-Betondruckfestigkeit eine recht große Streubreite festgestellt werden. Die beobachteten Werte liegen in einem Bereich von 0,05 bis 0,53. Der Mittelwert beträgt 0,19.

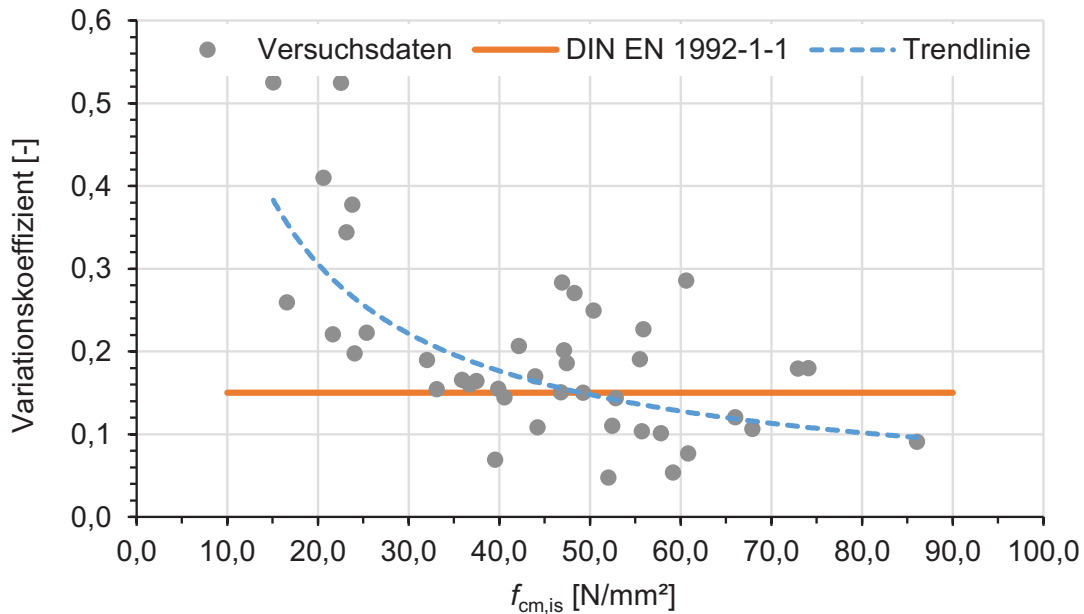


Abb. 4.7 Zusammenhang zwischen Variationskoeffizient und mittlerer In-situ-Betondruckfestigkeit

Allgemein kann ein deutlicher Einfluss der mittleren In-situ-Betondruckfestigkeit auf den empirischen Variationskoeffizienten festgestellt werden. Mit zunehmendem Mittelwert der In-situ-Betondruckfestigkeit ist eine Abnahme des empirischen Variationskoeffizienten zu verzeichnen. Bei großen Festigkeiten sind vermehrt auch Variationskoeffizienten kleiner als der der Bemessung nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* zugrunde liegende Wert von 0,15 möglich. Dies ist insbesondere für eine Nachrechnung mit modifizierten Teilsicherheitsbeiwerten nach z. B. *DBV 2013* und *Stauder 2015* von Bedeutung.

4.2.3.4 Einfluss des Baujahrs und der zugehörigen Überwachung auf die Streuung der In-situ-Betondruckfestigkeit

Historischer Abriss (*DAfStb 616*)

Die in Anhang I.1 dargestellten Bauwerke wurden zwischen 1905 und 2017 errichtet. Entsprechend war die zum Herstellzeitpunkt durchzuführende Betonüberwachung nicht für alle Bauwerke hinsichtlich der Art und des Umfangs vergleichbar.

Nach *DAfStb 616* ist die Forderung durch Materialprüfungen nachzuweisen, dass der verwendete Beton die in der Planung angesetzte Druckfestigkeit aufweist, bereits in den „Vorläufigen Leitsätzen für die Vorbereitung, Ausführung und Prüfung von Eisenbetonbauteilen“ *VDAIV u. DBV 1904* aus dem Jahr 1904 enthalten. Aus den 1907 erschienenen preußischen „Bestimmungen für die Ausführung von Konstruktion aus Eisenbeton“ *KPM 1907* wurde diese Forderung 1916 auch in die ersten deutschlandweit einheitlichen „Bestimmungen für Ausführung von Bauwerken aus Eisenbeton“ des Deutschen Ausschusses für Eisenbeton *DAfEb 1916* übernommen. In den folgenden Regelwerken wurde die Betonüberwachung bis heute immer genauer und ausführlicher festgelegt. Der Grundsatz, dass letztlich der Verwender des Betons

sicherstellen muss, dass die geforderten Betoneigenschaften eingehalten sind und dies auch prüfbar dokumentiert wird, gilt bis heute.

Im Zuge der vermehrten Verwendung von Transportbeton und Fertigteilen sind bestimmte Verantwortlichkeiten jedoch konsequenterweise vom Verwender auf den Hersteller übergegangen. Dies zeigt sich für die Bundesrepublik Deutschland erstmals in der Neufassung der *DIN 1045:1972-01*, die in Verbindung mit der im Jahr 1978 neu eingeführten Normenreihe DIN 1084 „Güteüberwachung im Beton- und Stahlbetonbau“ getrennte Anforderungen für die Überwachung von Baustellenbeton BII sowie von Transportbeton und Beton für Fertigteile beinhaltet. Die heute für Beton verbindliche Fremdüberwachung der Betonherstellung durch anerkannte Überwachungsstellen wurde in der Bundesrepublik Deutschland ebenfalls 1972 eingeführt.

Im vorherigen Zeitraum fand die Betonüberwachung als Eigenüberwachung durch den Unternehmer statt, die so zu dokumentieren war, dass sie durch die Bauaufsichtsbehörden (Baupolizei) kontrolliert werden konnte. Eine Kopplung des Überwachungsaufwands an die Dauerhaftigkeitsanforderungen (beziehungsweise die Expositionsklasse) war vor der Einführung der auf den Eurocodes basierenden Normengeneration nicht festgeschrieben.

In der Bundesrepublik Deutschland und in der Deutschen Demokratischen Republik war das Konzept der Betongüteprüfung bis zur Einführung der *TGL 0-1045:1963-04*, die erstmals DDR-spezifische Besonderheiten enthielt, identisch. Als Verwender waren in der Regel die „Volkseigenen Baubetriebe“ angesprochen und als das wesentliche Überwachungsorgan wurde die Technische Kontrollorganisation (TKO) für die betriebliche Gütekontrolle (Eigenüberwachung) etabliert. Qualifizierte Stellen zur Prüfung der Betondruckfestigkeit wurden vom Deutschen Amt für Material- und Warenprüfung (DAMW, ab 1973 ASMW: Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung) benannt. Mit der Überarbeitung der *TGL 0-1045* von 1973 wurde ein statistischer Gütenachweis nach der Vorschrift *Warenprüfung DAMW 968:1969* eingeführt (für $\geq B 450$ obligatorisch). Mit der Einführung des ETV Beton ab 1980 wurde dort im Teilkomplex C die Prüfung und Kontrolle des Betons geregelt (z. B. *TGL 33433:1979-06*). In der *TGL 33431:1980-09* „Betriebliche Qualitätssicherung und –kontrolle im Betonbau“ wurde für die Herstellung von Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonerzeugnissen das innerbetriebliche Qualitätssicherungssystem weiter entwickelt (Prüfpläne, Nachweisführung, Auswertung, Freigabe).

In den Fertigteilwerken oblag der TKO die Kontrolle des Betonfestigkeitsnachweises. Die Ergebnisse der Qualitätsprüfungen im Rahmen der (Eigen-) Überwachung durch die TKO mussten für die Abnahmen der Bauaufsicht bereitliegen. Neben der Staatlichen Bauaufsicht (Rechtsnachfolger der früheren Baupolizeibehörden) gab es in der DDR bis in die 1970er Jahre weitere Bauaufsichten in den Kombinat für Wohnungs- und Gesellschaftsbau. Ab 1980 wurden alle Bauaufsichtsdienststellen in Behörden des Ministeriums für Bauwesen der DDR umstrukturiert.

Die wesentlichen Rahmenbedingungen der Überwachung der Betondruckfestigkeit sind in *DAfStb 616* für den Zeitraum ab 1916 abschnittsweise zusammengefasst. Anhand dieser Informationen kann eine erste Einschätzung dazu erfolgen, welcher Qualitätssicherung der damals verwendete Beton unterlag.

Neben der Überwachung der Druckfestigkeit wurden auch weitere Anforderungen an die Ausgangsstoffe sowie die Frischbetoneigenschaften gestellt, die hier nicht näher betrachtet werden. Für weiterführende Informationen wird auf die damals gültigen Normenreihen für die Bemessung von Konstruktionsbeton (insbesondere DIN 1045 und DIN 4227), die Betonprüfung (insbesondere DIN 1048) und die Güteüberwachung (insbesondere DIN 1084) sowie zusätzliche Fachliteratur (z. B. Klose 1973) verwiesen.

Eine ausführliche Beschreibung des heutigen Vorgehens bei der Überwachung von Beton kann *Biscopig u. Pickhardt 2014* entnommen werden. Die Notwendigkeit zur Überarbeitung des Vorgehens nach DIN 1045 und DIN 1084 ergab sich aus den Vorgaben der Europäischen Bauproduktenrichtlinie *Richtlinie 89/106/EWG 1988*, die mit dem Ziel der Beseitigung der technischen Handelshemmnisse auf dem Bauproduktsektor im Binnenmarkt eingeführt wurde.

Überprüfung des Einflusses der Überwachung durch Untersuchungen am Bauwerk

Zur Überprüfung des Einflusses der Überwachung der Bauausführung auf die Streuung der In-situ-Betondruckfestigkeit ist in Abb. 4.8 der empirische Variationskoeffizient der In-situ-Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit vom Baujahr des jeweils betrachteten Untersuchungsobjekts dargestellt. Es wurden lediglich die Bauwerke aus Anhang I berücksichtigt, bei denen das genaue Baujahr bekannt war. Die Größe des Bauvorhabens und deren eventueller Einfluss auf die durchzuführende Überwachung wurden nicht gesondert berücksichtigt.

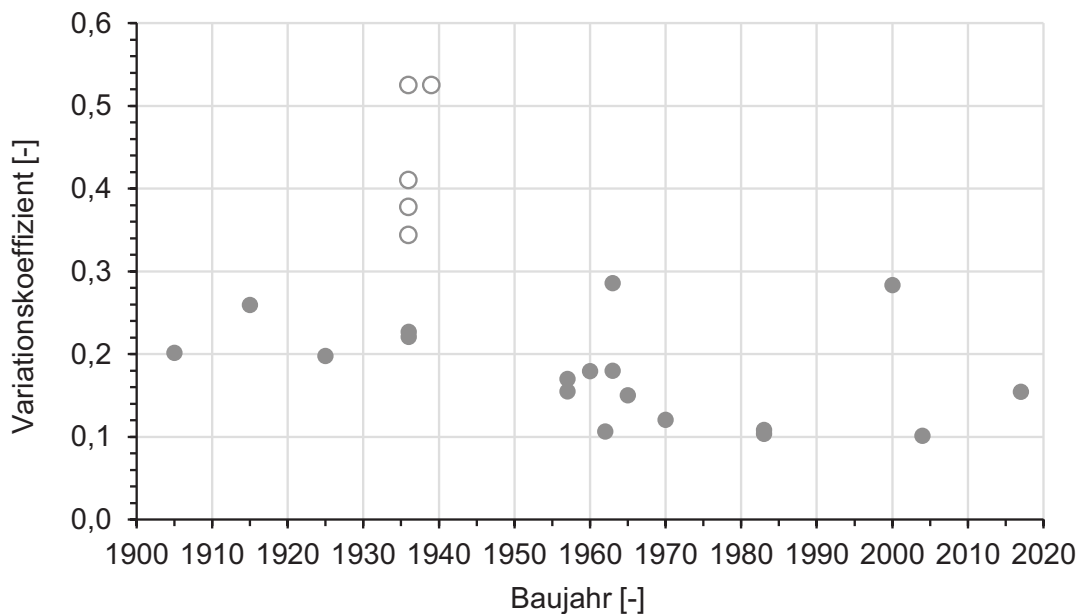


Abb. 4.8 Einfluss des Baujahrs auf die Streuung der In-situ-Betondruckfestigkeit

Zunächst ist auffällig, dass bei fünf zwischen 1930 und 1940 errichteten Bauwerken ein Variationskoeffizient $> 0,3$ vorliegt. Bei den fünf Bauwerken handelt es sich um Pfeiler einer Brücke und um einen Gewölbebogen. Alle fünf Bauwerke wurden als Massenbeton in Stampfbetonbauweise hergestellt. Die Ursache der großen Streuung

liegt daher nicht in einer schlechten oder mangelhaften Überwachung der Bauausführung, sondern eher in der verwendeten Bauweise.

Massige Bauteile, hergestellt in Stampfbetonbauweise, sollten daher gesondert statistisch bewertet werden. Ggf. sind für die Untersuchung der In-situ-Betondruckfestigkeit Probekörper mit größeren Abmessungen als den in Abschnitt 3.4 empfohlenen Werten zu verwenden, um eventuelle Effekte aus Umlagerungen erfassen zu können (vgl. auch Abschnitt 4.2.3.6). Da hierzu bisher keine Erkenntnisse vorliegen, werden Untersuchungen auf diesem Gebiet angeraten.

Vernachlässigt man die fünf zwischen 1930 und 1940 errichteten Bauwerke mit $v_x > 0,30$ aus oben genannten Gründen, so kann für die verbleibenden Bauwerke kein eindeutiger Einfluss des Baujahrs auf die empirischen Variationskoeffizienten festgestellt werden. Allgemein kann somit gefolgert werden, dass das Baujahr und damit unmittelbar verbunden die während der Ausführung vorgeschriebene Überwachung keinen erkennbaren Schluss auf die zu erwartende Streuung der In-situ-Betondruckfestigkeit zulassen.

4.2.3.5 Einfluss des Stichprobenumfangs auf den Rechenwert der Streuung der In-situ-Betondruckfestigkeit

In Abb. 4.9 ist der empirische Variationskoeffizient der In-situ-Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit vom jeweiligen Stichprobenumfang dargestellt.

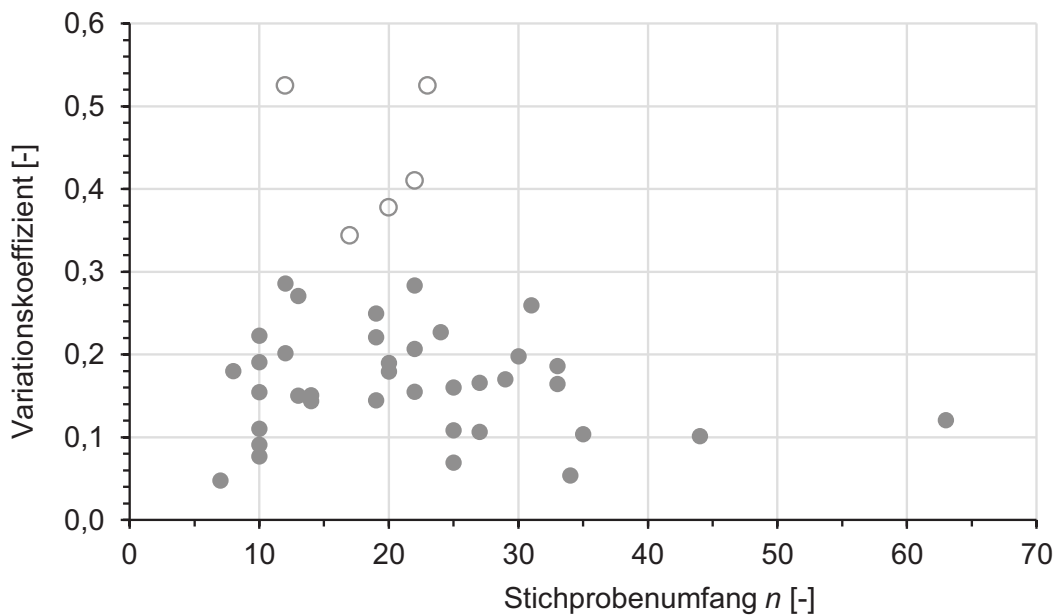


Abb. 4.9 Einfluss des Stichprobenumfangs auf den Rechenwert des Variationskoeffizienten der In-situ-Betondruckfestigkeit

Zunächst ist auffällig, dass bei kleinem Stichprobenumfang sowohl sehr kleine Werte als auch sehr große Werte des empirischen Variationskoeffizienten auftreten. Auch hier ist wieder zu beachten, dass die fünf Stichproben mit $v_x > 0,30$ aus in Stampfbetonbauweise ausgeführten Massenbetonen entstammen.

Bei sehr großem Stichprobenumfang liegen zwar wesentlich weniger Datensätze vor, jedoch kann an den vorliegenden Daten ein deutlich geringerer empirischer Variationskoeffizient festgestellt werden.

Allgemein stellt eine Stichprobe eine zufällige Auswahl aus einer Grundgesamtheit dar. Mit zunehmendem Umfang der Stichprobe kann der betrachtete Parameter der Grundgesamtheit - wie in Kapitel 2 beschrieben - immer genauer bestimmt werden. Umgekehrt ist durch die zufällige Auswahl der Stichprobe bei kleinem Stichprobenumfang auch eine größere Spannweite der Ergebnisse möglich.

Im Sinne einer genauen Beschreibung der Grundgesamtheit ist somit stets eine Stichprobe mit möglichst großem Umfang empfehlenswert.

4.2.3.6 Einfluss des Verhältnisses zwischen Bohrkern- und Größtkorndurchmesser auf die Streuung der In-situ-Betondruckfestigkeit

In Abb. 4.10 ist der Zusammenhang zwischen dem Verhältnis von Bohrkern- zu Größtkorndurchmesser und dem empirischen Variationskoeffizienten der In-situ-Betondruckfestigkeit dargestellt. Der Größtkorndurchmesser wurde dabei entsprechend Abschnitt 3.3.2 an der Bohrkernoberfläche abgeschätzt. Es sind lediglich diejenigen Datensätze aus Anhang I dargestellt, bei denen der Größtkorndurchmesser im Rahmen der Bauwerksuntersuchung miterfasst wurde.

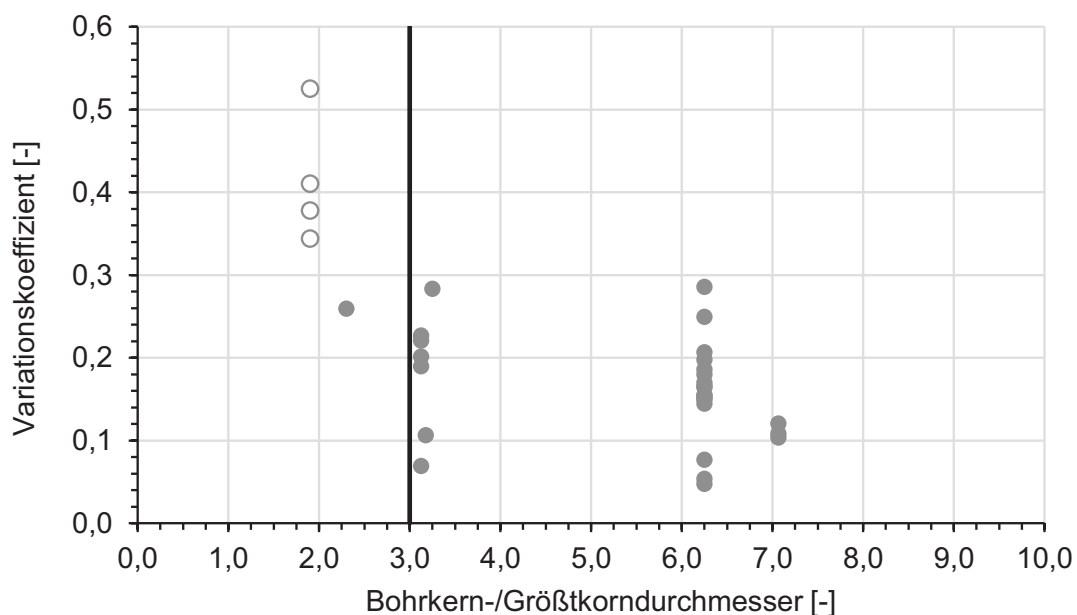


Abb. 4.10 Einfluss des Verhältnisses zwischen Bohrkern- und Größtkorndurchmesser auf den Rechenwert der Streuung der In-situ-Betondruckfestigkeit

Die Verteilung der einzelnen Datenpunkte in Abb. 4.10 zeigt deutlich, dass bei Unterschreitung des in *DIN EN 12504-1:2009-07* empfohlenen Mindestwertes des Verhältnisses von Bohrkern- zu Größtkorndurchmesser von 3,0 mit einem deutlichen Anstieg der Streuung, hier beschrieben durch den empirischen Variationskoeffizienten, zu rechnen ist. Bei Einhaltung des empfohlenen Mindestwertes des Verhältnisses von Bohrkern- zu Größtkorndurchmesser von 3,0 kann bei den in der vorliegenden Arbeit

betrachteten Bestandsbetonen kein weiterer Rückgang der Streuung beobachtet werden.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass bei allen Bestandsbetonen mit einem empirischen Variationskoeffizienten der In-situ-Betondruckfestigkeit größer als 0,30 nicht nur der empfohlene Mindestwert des Verhältnisses von Bohrkern- zu Größtkorndurchmesser von 3,0 unterschritten wurde, sondern auch alle betrachteten Betone als Massenbetone in Stampfbetonbauweise hergestellt wurden. Herstellungsbedingte Einflüsse auf die Streuung können somit nicht ausgeschlossen werden. Dennoch ist davon auszugehen, dass bei einem Bohrkerndurchmesser $> 3 d_g$ durch die Miterfassung von Umlagerungseffekten auch bei in Stampfbetonbauweise hergestellten Betonen eine geringere Streuung zu erwarten ist.

4.2.3.7 Einfluss der Bauwerksart auf die Streuung der In-situ-Betondruckfestigkeit

In Abb. 4.11 ist der Zusammenhang zwischen dem empirischen Variationskoeffizienten und dem Mittelwert der In-situ-Betondruckfestigkeit getrennt nach verschiedenen Bauwerksarten dargestellt.

Es werden die Bauwerksarten massige Bauteile (kleinste Abmessung größer als 0,80 m (DAfStb 2010)), Brücken (Lager und Überbauten), Deckenplatten, Wandscheiben, Hochbaustützen und Bodenplatten unterschieden. Die Einstufung eines jeden Untersuchungsobjektes in die vorgenannten Bauwerksarten ist Anhang I.1 zu entnehmen. Hierbei ist zu beachten, dass mit der Bauwerksart Brücken Untersuchungen an verschiedensten Bestandteilen einer Brücke, wie z. B. Widerlager, Pfeiler, Hohlkastenwände und –decken sowie Kappen zusammengefasst werden.

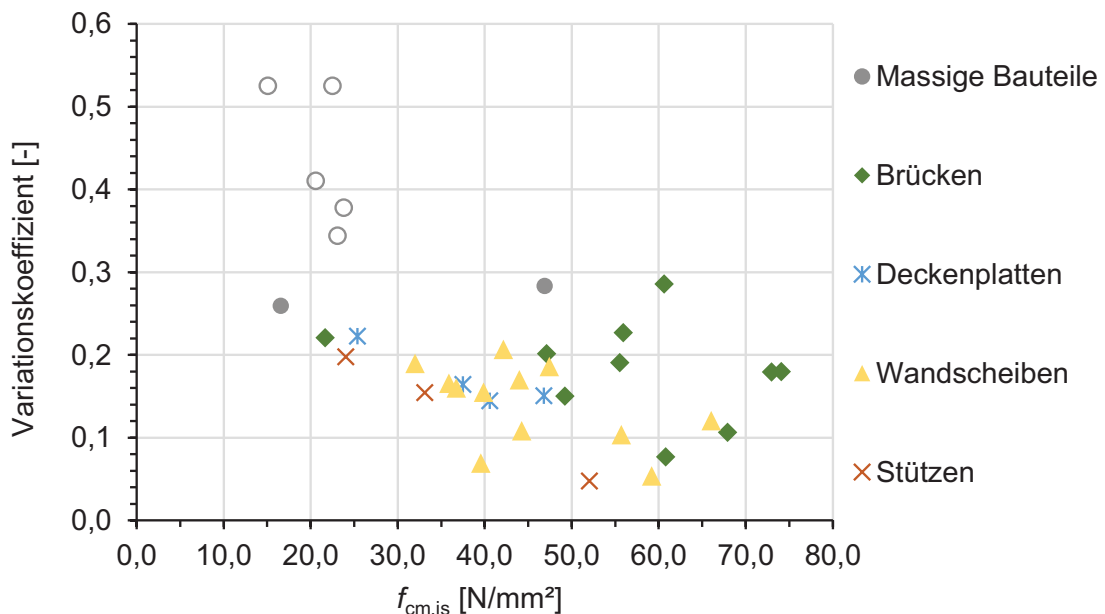


Abb. 4.11 Zusammenhang zwischen Bauwerksart und Streuung des Rechenwertes der In-situ-Betondruckfestigkeit

Allgemein werden in Abb. 4.11 lediglich die eindeutig einzustufenden Bauwerke betrachtet. Außerdem sind nur diejenigen Bauwerksarten dargestellt, für die mindestens drei Untersuchungsobjekte vorliegen.

Die Verteilung der in Abb. 4.11 beschriebenen Ergebnisse zeigt deutlich, dass ein empirischer Variationskoeffizient größer als 0,30 nur bei massigen Bauteilen auftritt. Bei allen sonstigen Bauwerksarten ist der Variationskoeffizient stets kleiner als 0,30. Für Brücken liegt der empirische Variationskoeffizient recht gleichmäßig verteilt zwischen 0,08 und 0,29, wobei jedoch zu berücksichtigen ist, dass wie zuvor erläutert, unter der Bauwerksart Brücken verschiedenste Bauteile einer Brücke zusammengefasst sind. Eine weitere Unterteilung ist aufgrund der zu geringen Anzahl an vorliegenden Untersuchungsobjekten nur wenig aussagekräftig. Für im Hoch- und Ingenieurbau gebräuchliche Elemente wie Deckenplatten, Wandscheiben und Stützen konnte mit Ausnahme der Untersuchungen an einer Deckenplatte, bei der keine Auffälligkeiten beobachtet werden konnten, stets ein empirischer Variationskoeffizient der In-situ-Betondruckfestigkeit $v_x \leq 0,20$ festgestellt werden.

4.3 Zwischenfazit

Untersuchungen von Rüschi aus den 1960er Jahren konnten bereits einen nicht-linearen Zusammenhang zwischen dem Mittelwert und der Standardabweichung der Betondruckfestigkeit aufzeigen. Hierbei ist zu beachten, dass Rüschi ausschließlich Normprobekörper betrachtete, womit die tatsächliche Streuung des Bauwerkbetons, welche u. a. durch die Art des Einbaus des Betons in das Bauwerk, Alterungseinflüsse, die Art der Verdichtung, mögliche Bauteilabmessungen, die Lage beim Betonieren sowie klimatische Einflüsse beeinflusst wird, unberücksichtigt bleibt.

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit durch experimentelle Untersuchungen mittels Bohrkernentnahme an 44 Bestands-tragwerken die In-situ-Betondruckfestigkeit untersucht. Der mittlere Stichprobenumfang der betrachteten Datensätze liegt bei $n = 21,4$.

Die Bewertung der Datensätze zeigt, dass in vielen Fällen die Verteilung der In-situ-Betondruckfestigkeit durch eine Normalverteilung mit ausreichender Genauigkeit beschrieben werden kann. Lediglich bei kleinem Stichprobenumfang in Kombination mit einer großen Streuung können durch die Anwendung der logarithmischen Normalverteilung mechanisch unplausible, negative Werte der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit vermieden werden.

Wie bereits bei den Untersuchungen von Rüschi an Normprobekörpern, konnte auch an den selbst durchgeführten Untersuchungen der In-situ-Betondruckfestigkeit kein linearer Zusammenhang zwischen dem Mittelwert und der Standardabweichung festgestellt werden. Insbesondere im Bereich kleiner Festigkeiten steigt mit zunehmendem Mittelwert die Standardabweichung stark an. Die Standardabweichung der betrachteten Bauwerkbetone liegt mit einem Mittelwert von $7,65 \text{ N/mm}^2$ deutlich über den von Rüschi für Normprobekörper ermittelten Werten.

Entsprechend konnte an den betrachteten Bauwerkbetonen mit einem Anstieg des Mittelwertes der In-situ-Betondruckfestigkeit ein leichter Rückgang des

Variationskoeffizienten beobachtet werden. Der Mittelwert des Variationskoeffizienten der betrachteten Bauwerkbetone beträgt 0,19.

Als weitere, mögliche Einflussgrößen wurden das Baujahr, der Stichprobenumfang, das Verhältnis von Größtkorn- zu Bohrkerndurchmesser sowie die Bauwerksart betrachtet.

Während mit zunehmendem Stichprobenumfang ein Rückgang des an der Stichprobe geschätzten Wertes der Streuung der In-situ-Betondruckfestigkeit festgestellt werden konnte, hat das Baujahr und die damit während der Bauausführung durchzuführende Überwachung offensichtlich keinen Einfluss auf die Streuung.

Im Hinblick auf die Wahl des Bohrkerndurchmessers zeigen die durchgeführten Untersuchungen, dass bei Unterschreitung des in *DIN EN 12504-1:2009-07* empfohlenen Mindestwertes des Verhältnisses von Bohrkern- zu Größtkorndurchmesser von 3,0 mit einem deutlichen Anstieg der Streuung zu rechnen ist.

Im Vergleich der unterschiedlichen Bauwerksarten zeigen die durchgeführten Untersuchungen, dass ein empirischer Variationskoeffizient größer als 0,30 überwiegend bei massigen Bauteilen auftritt. Für im Hoch- und Ingenieurbau gebräuchliche Elemente wie Deckenplatten, Wandscheiben und Stützen nimmt der empirische Variationskoeffizient der In-situ-Betondruckfestigkeit meist Werte $v_x \leq 0,20$ an.

5 Bewertung und Weiterentwicklung bestehender Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

5.1 Bewertung des Konfidenzniveaus bei Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit nach DIN EN 1990

5.1.1 Allgemeines

Bei der Parameterschätzung aus Stichproben mit klassischen statistischen Verfahren wird, wie in Kapitel 2 beschrieben, das Maß der zulässigen Abweichung vom tatsächlichen Wert über die Konfidenzzahl und das zugehörige Konfidenzintervall geregelt. Im Bauwesen ist ein einseitig nach unten begrenztes Konfidenzintervall mit dem Konfidenzniveau $\gamma = 1 - \alpha = 0,75$ gebräuchlich, jedoch nicht normativ festgelegt.

Im Unterschied zu den klassischen statistischen Verfahren basiert eine Parameterschätzung mit der Bayes'sche Methode wie in Abschnitt 2.3.4 erläutert nicht auf Konfidenzzahlen. In *DIN EN 1990:2010-12* wird darauf hingewiesen, dass die dort angegebene Bayes'sche Methode mit unsicheren Vorverteilungen etwa zu den gleichen Ergebnissen wie klassische, statistische Methoden mit einem Konfidenzniveau von 75 % führt. Es wird jedoch an keiner Stelle von *DIN EN 1990:2010-12* ein einzuhaltender Mindestwert des Konfidenzniveaus von 75 % gefordert.

Im Neuentwurf der *EN 1990:2002-04*, der *prEN 1990:2018-04* ist kein entsprechender Hinweis auf das bei Anwendung der Bayes'schen Methode erreichte Konfidenzniveau enthalten. In Untersuchungen von *Schäper 2010* wird das bei Anwendung von *DIN EN 1990:2010-12* tatsächlich erreichte Konfidenzniveau überprüft.

5.1.2 Untersuchungen zum Konfidenzniveau bei Anwendung von DIN EN 1990 nach Schäper

Nach *Schäper 2010* resultiert die Anwendung der logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* gegenüber einem Vertrauensniveau von 75 % in zu günstigen, d. h. zu großen charakteristischen Werten. Als Ursache wird die Nicht-Berücksichtigung der Schiefe der Verteilung genannt.

Der Abstand zwischen dem charakteristischen Wert einer Baustoffeigenschaft f_k und dem Mittelwert \bar{x} einer Stichprobe vom Umfang n wird nach *Schäper 2010* bei einer Normalverteilung über einen Nachweis der Toleranzgrenze, was dem Vorgehen bei Anwendung klassischer statistischer Verfahren nach z. B. *DIN ISO 16269-6:2009-10* entspricht, berechnet (vgl. Abb. 5.1). Auf Grundlage des zentralen Grenzwertsatzes gilt, dass bei normalverteilten Einzelwerten x die Mittelwerte aus je n Stichproben ebenfalls normalverteilt sind.

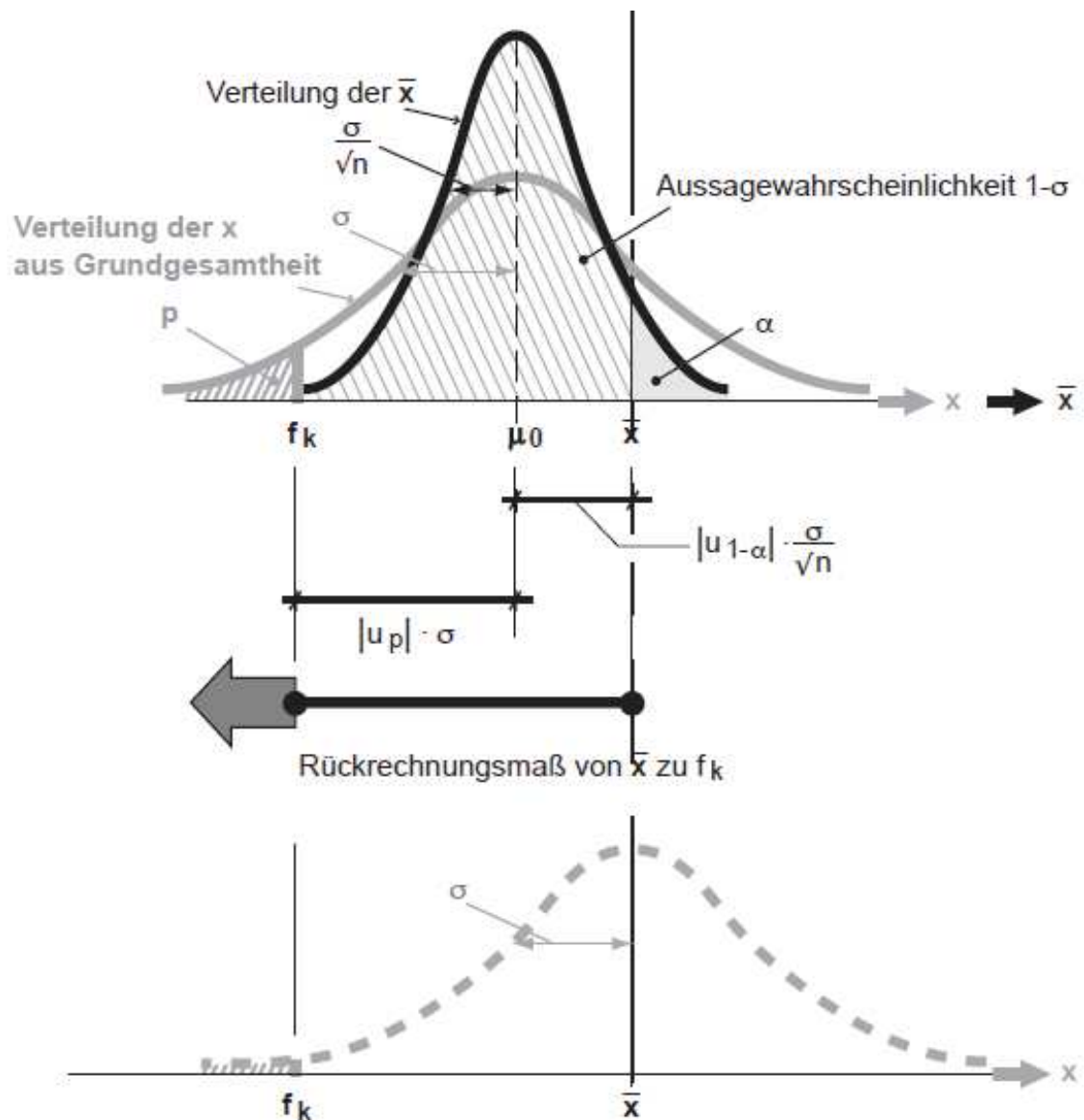


Abb. 5.1 Nachweis der Toleranzgrenze bei Normalverteilung aus Schäper 2010

Das Rückrechnungsmaß setzt sich somit aus den beiden Summanden u_p und $u_{1-\alpha}$ zur Berücksichtigung der gewünschten Aussagewahrscheinlichkeit und des zu bestimmenden p -Quantils zusammen. Vereinfacht beschreibt somit das Rückrechnungsmaß den Quantilbeiwert der mit μ nach \bar{x} verschobenen Grundgesamtheit (vgl. Abb. 5.1). Dieses Vorgehen ist jedoch nach Schäper 2010 lediglich für die Normalverteilung denkbar.

Bei der logarithmischen Normalverteilung unterscheiden sich hingegen die Verteilungen der Einzelwerte x und der Mittelwerte \bar{x} , womit das in Abb. 5.1 beschriebene Vorgehen, wie in Schäper 2010 erläutert, nicht zulässig ist. Die beiden Summanden u_p und $u_{1-\alpha}$ müssen getrennt betrachtet werden. Bei einer Zusammenfassung der beiden Summanden führt die Anwendung der logarithmischen Normalverteilung mit den in DIN EN 1990:2010-12 aufgeführten k_n -Faktoren zu falschen Werten, die tatsächlich einem Konfidenzniveau von ca. $(1 - \alpha) = 0,50$ entsprechen.

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Zur Verdeutlichung des Fehlers wird nachfolgend ein in *Schäper 2010* enthaltenes Beispiel zur Untersuchung von Mauermörtel wiedergegeben. Dabei wird angenommen, dass die Standardabweichung bereits aus Vorinformationen bekannt ist. Ziel ist es, einen charakteristischen Wert mit $p = 0,05$ und $(1 - \alpha) = 0,90$ zu bestimmen. Es gilt $\mu_x = 2,0 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_x = 1,262 \text{ N/mm}^2$ und entsprechend $\mu_y = 0,526$ und $\sigma_y = 0,579$. Die zugehörigen Einzelwerte können *Schäper 2010* entnommen werden.

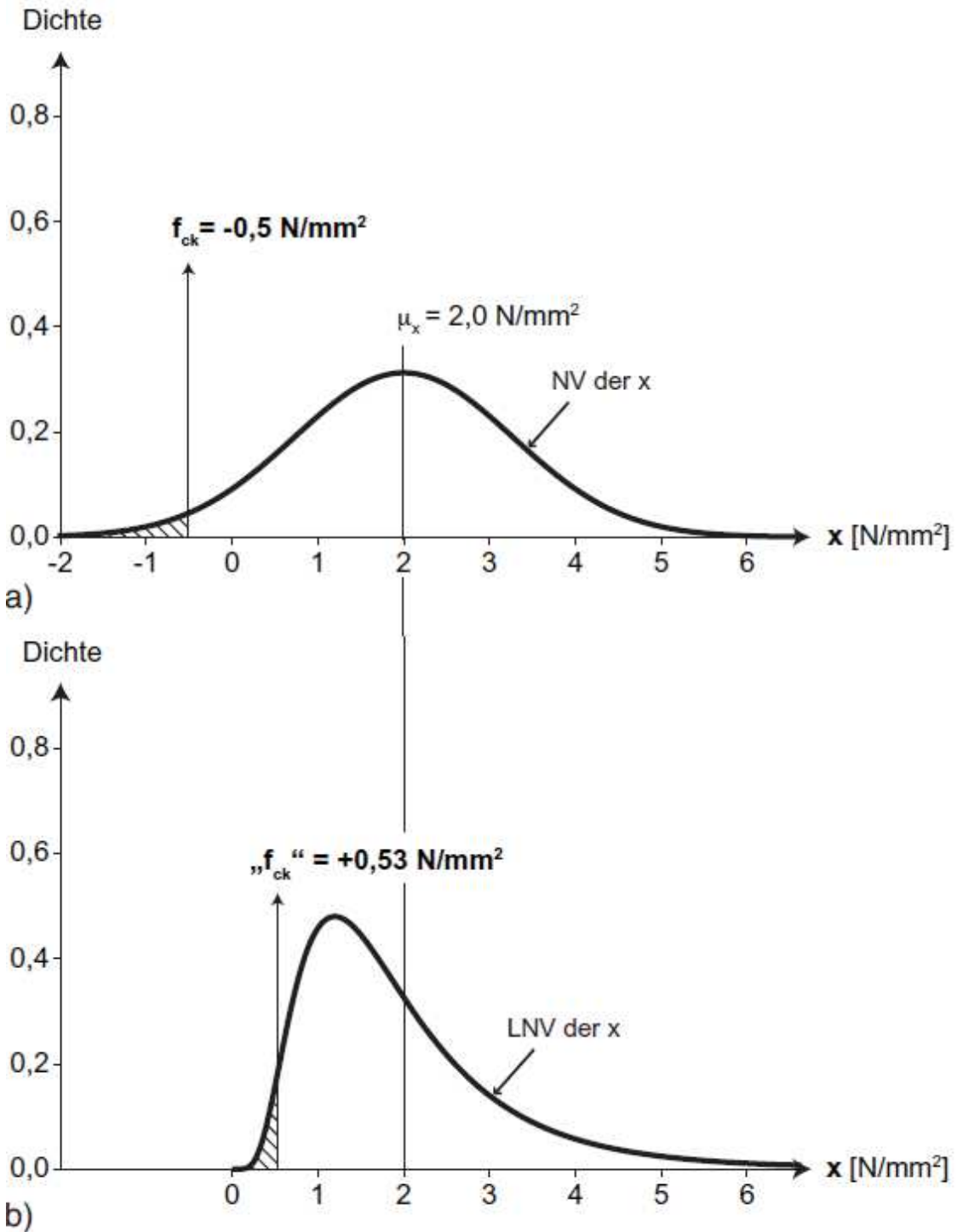


Abb. 5.2 Bestimmung von f_{ck} für $p = 0,05$ und $(1 - \alpha) = 0,90$ für a) NV und b) „falschen“ Gebrauch der LNV aus *Schäper 2010*

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Die Anwendung einer Normalverteilung führt zu einem charakteristischen Wert $f_{ck} = -0,5 \text{ N/mm}^2$ gemäß Abb. 5.2. Die „falsche“ Anwendung der LNV führt zu $f_{ck} = 0,53 \text{ N/mm}^2$.

Die „richtige“ Anwendung der logarithmischen Normalverteilung in zwei Schritten führt hingegen zu $f_{ck} = 0,36 \text{ N/mm}^2$ (vgl. Abb. 5.3).

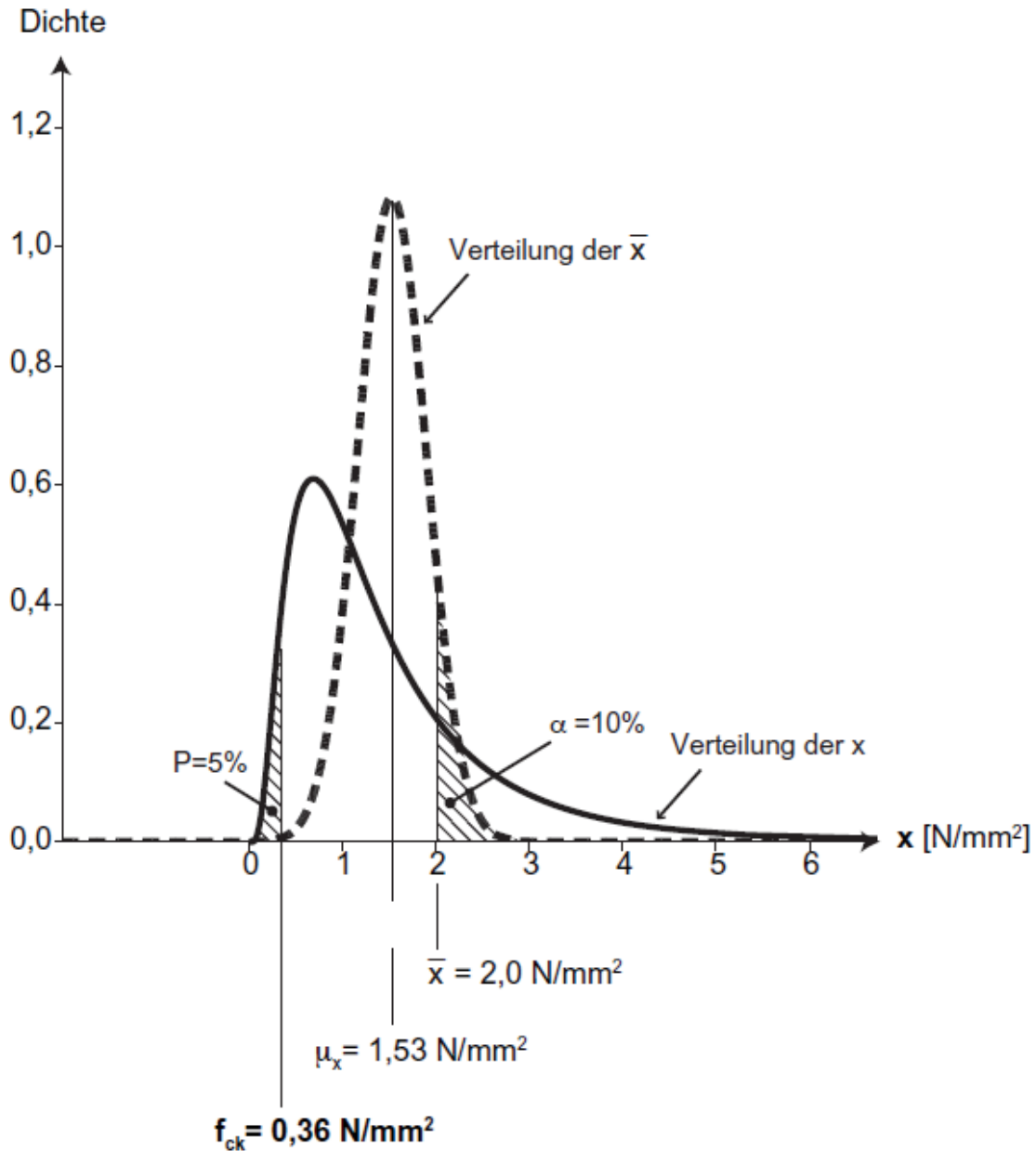


Abb. 5.3 Bestimmung von f_{ck} für $p = 0,05$ und $(1 - \alpha) = 0,90$ für richtigen, zweischrittigen Gebrauch der LNV aus Schäper 2010

Im ersten Schritt wird an den als normalverteilt angenommenen Mittelwerten von dem an der Stichprobe ermittelten Wert \bar{x} auf den zugehörigen Wert der Grundgesamtheit μ_x geschlossen, womit das gewünschte Konfidenzniveau $(1 - \alpha) = 0,90$ berücksichtigt wird.

Im zweiten Schritt wird an den mit dem Mittelwert μ_x logarithmisch normalverteilten Einzelwerten der gesuchte Quantilwert berechnet.

Weitere Vergleichsrechnungen von *Schäper 2010* zeigen, dass die „falsche“ Anwendung der logarithmischen Normalverteilung mit Quantilfaktoren für $(1 - \alpha) = 0,90$ etwa zu den gleichen Werten führt wie die „richtige“ Anwendung der LNV bei $(1 - \alpha) = 0,75$.

Bei der Bewertung der In-situ-Betondruckfestigkeit ist im Unterschied zu dem vorgenannten Beispiel die Standardabweichung der Grundgesamtheit jedoch nicht bekannt. Stattdessen müssen diese Werte aus der Stichprobe geschätzt werden. Infolgedessen ist eine getrennte Berechnung der beiden Summanden u_p und $u_{1-\alpha}$ nicht möglich. Die erforderlichen Quantilfaktoren k können lediglich in geschlossener Form in Abhängigkeit von der t -Verteilung (siehe z. B. *Rooch 2014*) bestimmt werden.

Da dies nach *Schäper 2010* für den Anwender nicht möglich ist, wird die „falsche“ Anwendung der LNV mit Quantilfaktoren für $(1 - \alpha) = 0,90$ empfohlen, was zu vergleichbaren Werten führt, wie die „richtige“ Anwendung der LNV mit $(1 - \alpha) = 0,75$.

5.1.3 Zwischenfazit und Bewertung der Kritik von Schäper

Die in *Schäper 2010* enthaltene Kritik an der Anwendung der logarithmischen Normalverteilung nach *DIN ISO 16269-6:2009-10* bei der Bestimmung charakteristischer Materialkennwerte kann aus mathematischer Sicht bestätigt werden. Im Unterschied zu klassischen statistischen Verfahren wird bei der in *DIN EN 1990:2010-12* erläuterten Bayes'sche Methode jedoch kein Konfidenzniveau verwendet. Die Unsicherheiten werden dort über sog. Vorverteilungen berücksichtigt. Folglich kann die in *DIN EN 1990:2010-12* enthaltene Formulierung, dass die dort angegebene Bayes'sche Methode mit unsicheren Vorverteilungen etwa zu den gleichen Ergebnissen wie klassische, statistische Methoden mit einem Konfidenzniveau von 75 % führt lediglich als Orientierung und keinesfalls als unbedingt einzuhaltender Wert eingestuft werden. Im überarbeiteten Entwurf der *EN 1990:2002-04 (prEN 1990:2018-04)* ist kein entsprechender Hinweis auf das Konfidenzniveau enthalten.

Die in dieser Arbeit durchgeführten statistischen Simulationen für die in der Praxis gebräuchlichen Stichprobenumfänge $n = 3$, $n = 5$ und $n = 8$ zeigen, dass die Anwendung der Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* zu einer Unterschreitungswahrscheinlichkeit der tatsächlichen charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit, welche aufgrund der großen Stichprobenanzahl als Maß für das Konfidenzniveau verwendet werden kann, von im Mittel 77 % (vgl. Abb. 5.35) führt. Für die logarithmische Normalverteilung konnte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen eine mittlere Unterschreitungswahrscheinlichkeit von 68 % festgestellt werden (vgl. Abb. 5.45), womit der in *Schäper 2010* postulierte Wert von 50 % deutlich überstiegen wird. Eine mögliche Ursache hierfür ist, dass in *Schäper 2010* lediglich zwei Datensätze mit $n = 12$ von Mauer Mörteluntersuchungen mit den Variationskoeffizienten $v_x = 0,25$ und $v_x = 0,63$ betrachtet werden. Im Vergleich zu den in Abb. 4.7 dargestellten Streuungen der In-situ-Betondruckfestigkeiten übersteigen beide Werte den für Bestandsbetone gebräuchlichen Wertebereich. Folglich sind die von *Schäper 2010* durchgeführten Untersuchungen nur bedingt auf die Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit übertragbar.

Darüber hinaus zeigen die in Anhang I dargestellten Kerndichteschätzer, dass sowohl die Normalverteilung als auch die logarithmische Normalverteilung lediglich eine Näherung der tatsächlichen Verteilung darstellen. Teilweise konnten über die rechtsschiefe LNV hinaus auch linksschiefe Verteilungsdichten beobachtet werden (vgl. Abb. 4.4).

Weiterhin werden in Anhang I.2 für jeden Datensatz der am Kerndichteschätzer, der mit einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* und der mit einer logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* bestimmte 5 % Quantilwert angegeben. Aufgrund des großen Stichprobenumfangs kann der direkt am Kerndichteschätzer bestimmte Quantilwert als realitätsnaher und folglich als „richtiger“ Wert betrachtet werden. Die in Anhang I.2 beschriebenen Untersuchungen zeigen, dass die Berechnung des 5 %-Quantilwertes mit dem Bayes'schen Verfahren (NV und LNV) im Mittel Ergebnisse liefert, die nur geringfügig vom tatsächlichen Wert abweichen. Es gibt zu etwa gleichen Anteilen Datensätze bei denen die mit *DIN EN 1990:2010-12* (NV und LNV) bestimmten charakteristischen Werte niedriger sind, als der am Kerndichteschätzer bestimmte Wert, und somit theoretisch ein höheres Konfidenzniveau erfüllen, aber auch solche, bei denen die charakteristischen Werte größer sind und entsprechend theoretisch ein niedrigeres Konfidenzniveau erfüllen.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigen somit, dass die von *Schäper 2010* durchgeführten Untersuchungen aus mathematischer Sicht zwar als richtig einzustufen sind, jedoch aufgrund dessen, dass lediglich zwei Beispiele betrachtet wurden, keine Allgemeingültigkeit unterstellt werden sollte. Zudem beziehen sich die Untersuchungen von *Schäper* auf Mauermörtelproben, deren statistischen Parameter keinesfalls denen von Bestandsbetonen entsprechen. Die Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit mit einer Normalverteilung oder logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* kann zu einer Überschreitungswahrscheinlichkeit sowohl größer als auch kleiner als 0,75 führen.

Das in *Schäper 2010* empfohlene Vorgehen, den Zielwert des Konfidenzniveaus auf 0,90 zu erhöhen erscheint somit nur wenig zielführend, zumal der in *DIN EN 1990:2010-12* genannte Wert von 0,75 lediglich als Orientierungswert einzustufen ist.

5.2 Anwendbarkeit bestehender Verfahren nach DIN EN 1990, DIN EN 13791:2008 und DIN ISO 16269-6 – Aufbereitung verschiedener Forschungsarbeiten

5.2.1 Untersuchungen von Loch et al. zu DIN EN 13791:2008, DIN ISO 16269-6 und DIN EN 1990

Bereits *Loch et al. 2011* führten theoretische Vergleichsuntersuchungen an verschiedenen Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit durch. Im Einzelnen wurden die in Abschnitt 3.7 beschriebenen Verfahren nach *DIN EN 13791:2008-05*, *DIN ISO 16269-6:2009-10* und *DIN EN 1990:2010-12* betrachtet.

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Ein grundlegender, in *Loch et al. 2011* zur Auswertung nach *DIN EN 13791:2008-05* aufgeführter Kritikpunkt ist, dass zur Abschätzung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit die kleinste Bohrkernfestigkeit herangezogen wird, welche die kleinste Festigkeit im betrachteten Bauteil repräsentieren soll. In der Regel kann jedoch keinesfalls sichergestellt werden, dass die kleinste am Bohrkern ermittelte Druckfestigkeit auch der kleinsten Festigkeit des Bauwerkbetons insgesamt entspricht.

Für die Bestimmung der charakteristischen In-situ-Druckfestigkeit mit statistischen Verfahren nach *DIN EN 1990:2010-12* oder *DIN ISO 16269-6:2009-10* wird in *Loch et al. 2011* ein Mindeststichprobenumfang von $n = 8$ empfohlen, um die Verluste aus dem statistischen Auswerteprozess auf ein akzeptables Niveau zu beschränken. Besonders bei weniger als acht Einzelprüfwerten in Kombination mit einer großen Streuung können sehr kleine Werte für das Verhältnis zwischen 5 %-Quantil- und Mittelwert resultieren (vgl. Abb. 3.4).

Zum Vergleich der vorgenannten Verfahren werden in *Loch et al. 2011* die Ergebnisse einer Auswertung nach *DIN EN 13791:2008-05* sowie *DIN ISO 16269-6:2009-10* den Ergebnissen einer Auswertung nach *DIN EN 1990:2010-12*, basierend auf einer Normalverteilung, gegenübergestellt. Da im Rahmen des Vergleichs lediglich die Abweichungen bei der Bestimmung des charakteristischen Wertes betrachtet werden, sind die Ergebnisse unabhängig vom Mittelwert der In-situ-Betondruckfestigkeit und werden lediglich vom Stichprobenumfang und der zugehörigen Standardabweichung beeinflusst. Bei der Auswertung nach *DIN EN 13791:2008-05* wurde sowohl bei Ansatz A als auch bei Ansatz B das Mindestwertkriterium (vgl. Gleichung (3.7) und Gleichung (3.9)) nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse der Untersuchungen von *Loch et al. 2011* sind in den Abb. 5.4 und Abb. 5.5 dargestellt. Eine positive Abweichung bedeutet, dass die an der Stichprobe ermittelte In-situ-Betondruckfestigkeit bei Anwendung des genannten Verfahrens höher als bei Anwendung einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* eingeschätzt wird.

Ein Vergleich mit dem tatsächlichen Wert der In-situ-Betondruckfestigkeit der betrachteten Grundgesamtheit ist nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Der in Abb. 5.4 beschriebene Vergleich zwischen *DIN ISO 16269-6:2009-10* und *DIN EN 1990:2010-12* zeigt, dass ab einem Stichprobenumfang $n = 4$ mit dem klassischen statistischen Verfahren nach *DIN ISO 16269-6:2009-10* kleinere charakteristische Werte der In-situ-Betondruckfestigkeit ermittelt werden als mit *DIN EN 1990:2010-12*. Selbst bei großer Standardabweichung liegen die Abweichungen jedoch unter 3 N/mm^2 und können somit als vernachlässigbar eingestuft werden.

Bei der Bewertung der in Abb. 5.4 und Abb. 5.5 dargestellten Verläufe ist zu beachten, dass lediglich die Abweichung der mit den beiden genannten Verfahren bestimmten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeiten dargestellt ist, womit der Mittelwert keinen Einfluss hat und sich bei der Berechnung herauskürzt.

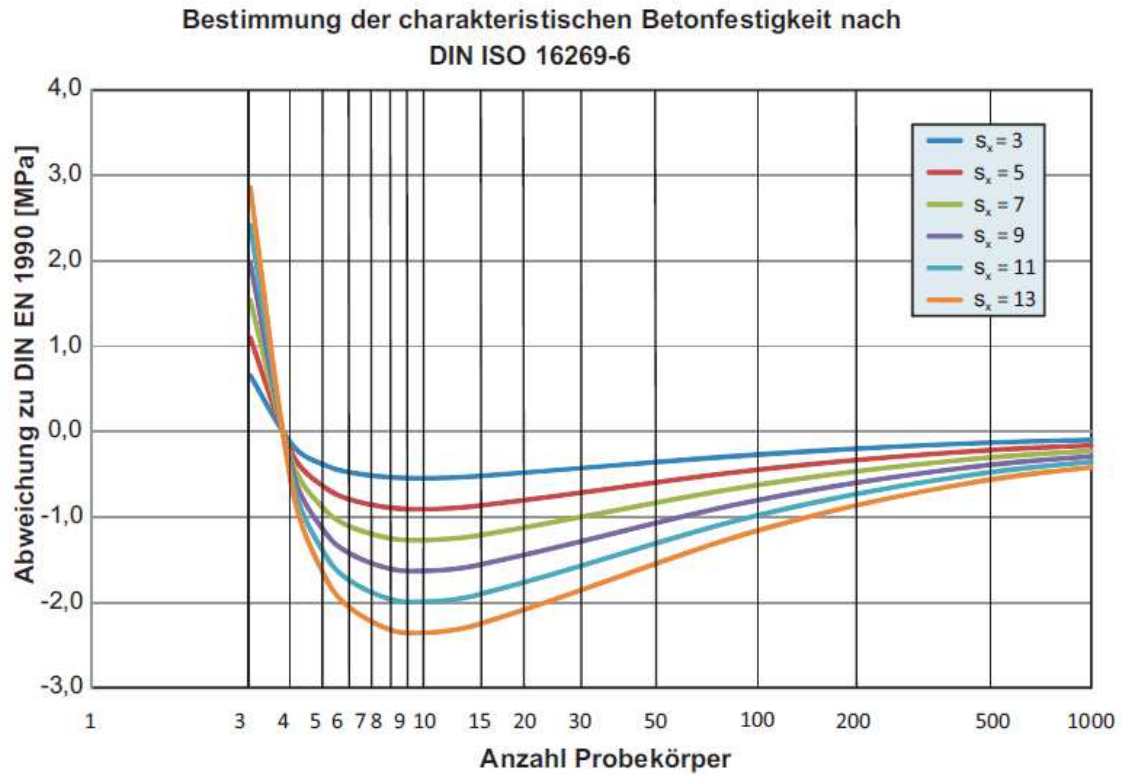


Abb. 5.4 Abweichung bei der Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit nach DIN ISO 16269-6 mit $(1 - \alpha) = 0,75$ und DIN EN 1990 – Normalverteilung aus Loch et al. 2011

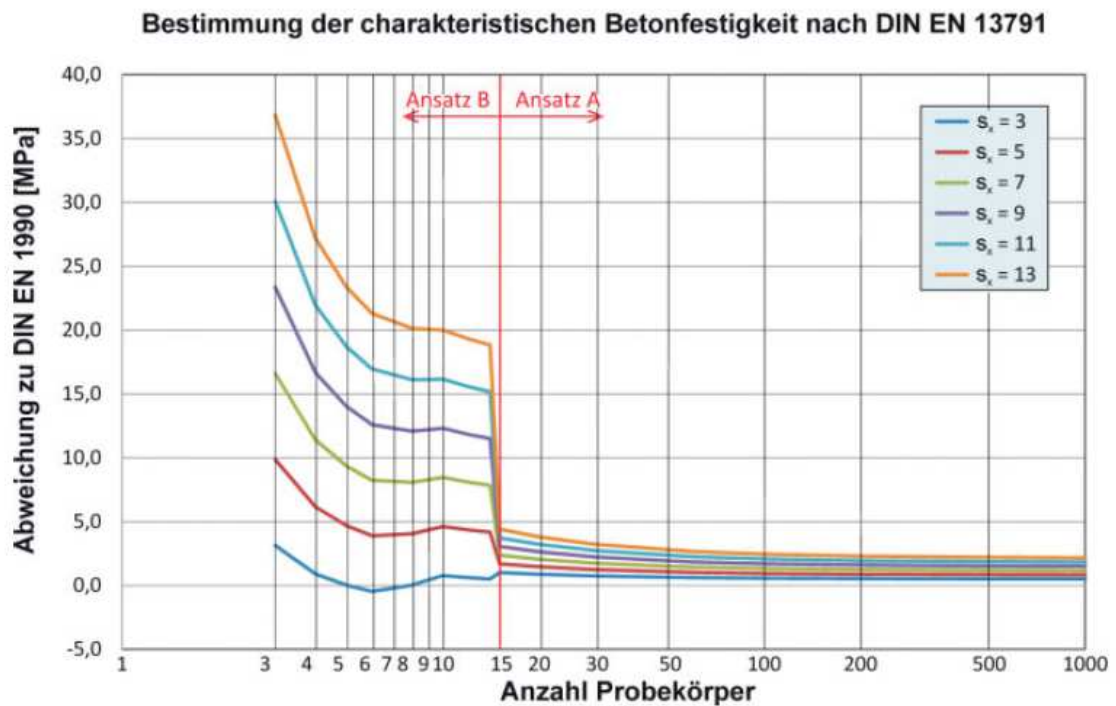


Abb. 5.5 Abweichung bei der Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit nach DIN EN 13791:2008 und DIN EN 1990 – Normalverteilung aus Loch et al. 2011

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Bei dem in Abb. 5.5 beschriebenen Vergleich zwischen *DIN EN 13791:2008-05* und *DIN EN 1990:2010-12* können hingegen viel größere Abweichungen beobachtet werden, die nicht mehr vernachlässigt werden können. Alle nach *DIN EN 13791:2008-05* ermittelten Werte der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit sind größer als die nach *DIN EN 1990:2010-12* berechneten Werte und liegen somit tendenziell auf der unsicheren Seite. Bei kleinem Stichprobenumfang und großer Standardabweichung können teilweise Abweichungen von über 30 N/mm² festgestellt werden. Ab einem Stichprobenumfang von $n = 15$, d. h. bei Anwendung von Ansatz A, liegen die Abweichungen in einem akzeptablen Bereich.

Vor diesem Hintergrund wird in *Loch et al. 2011* von einer Bestimmung charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeiten für die baustatische Nachrechnung nach *DIN EN 13791:2008-05* abgeraten. Stattdessen wird eine Bewertung der Stichprobe nach *DIN EN 1990:2010-12* in Kombination mit einem Mindeststichprobenumfang $n = 8$ empfohlen.

5.2.2 Untersuchungen von Knab u. Sodeikat zu DIN EN 13791:2008, DIN ISO 16269-6 und DIN EN 1990

5.2.2.1 Allgemeines

Auch *Knab u. Sodeikat 2015* führten basierend auf statistischen Simulationsrechnungen Untersuchungen zum Vergleich verschiedener Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit durch. Im Einzelnen wurden die in Abschnitt 3.7 beschriebenen Verfahren nach *DIN EN 13791:2008-05*, *DIN ISO 16269-6:2009-10* mit einem Konfidenzniveau $(1 - \alpha) = 0,75$ und *DIN EN 1990:2010-12* betrachtet. Bei der Bewertung der postulierten Erkenntnisse ist grundsätzlich zu beachten, dass bei Anwendung von *DIN EN 1990:2010-12* der dort materialübergreifend empfohlene Mindestwert des Variationskoeffizienten $v_{x,\min} = 0,10$ verwendet wurde.

Zum Vergleich der Verfahren wurden wie auch in *Caspeele 2010* (vgl. Abschnitt 5.2.4) statistische Simulationen durch Erzeugung großer Mengen zufälliger Ergebnisse durchgeführt. Im Detail wurden für verschiedene charakteristische Betondruckfestigkeiten und realistische Standardabweichungen jeweils 25.000 Stichproben mit $n = 15$ erzeugt. Als Verteilung wurde dabei eine logarithmische Normalverteilung angenommen. Darüber hinaus wurden von jeder Stichprobe die ersten 3, 5, 7, 10 und 15 Einzelwerte ausgewählt um auch den Einfluss des Stichprobenumfangs erfassen zu können. Im Einzelnen wurden Simulationen für Betone mit einer charakteristischen Druckfestigkeit von 15 bis 50 N/mm² und einer Standardabweichung von 3 bis 9 N/mm² durchgeführt.

Die Untersuchungen zeigen zunächst, dass mit abnehmendem Stichprobenumfang die Streuung der Mittelwerte und Standardabweichungen der Stichproben ansteigt.

Für die Bewertung der Anwendbarkeit der vorgenannten Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang wurde für jede der simulierten Konstellationen aus gegebener charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit und Standardabweichung der betrachteten Grundgesamtheit

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

und Stichprobenumfang n die erreichte Aussagesicherheit, der mittlere Schätzwert und der maximal aufgetretene Schätzwert bestimmt. Die erreichte Aussagesicherheit wird durch den Anteil der Schätzungen für die charakteristische In-situ-Betondruckfestigkeit beschrieben, die kleiner oder gleich dem gegebenen Wert sind. Aufgrund der hohen Anzahl der aus einer Grundgesamtheit vorliegenden Stichproben entspricht dieser Wert praktisch dem Konfidenzniveau der Schätzung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit.

Die Ergebnisse der Simulationen werden für die Konstellationen $f_{ck, is} = 37 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$ sowie für $f_{ck, is} = 20 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 7 \text{ N/mm}^2$ in detaillierter Form sowie für alle Simulationen in zusammengefasster Form durch das Verhältnis des mittleren Schätzwertes zum gegebenen Sollwert angegeben.

Bei der Bewertung der durchgeführten Untersuchungen ist grundsätzlich zu berücksichtigen, dass im Rahmen der durchgeführten Simulationen stets alle erzeugten Einzelwerte immer der angenommenen Verteilungsfunktion entstammen. Eine Berücksichtigung von im Rahmen einer Bauwerksuntersuchung möglicherweise auftretenden einzelnen Extremwerten oder gar Ausreißern sowie einer unbemerkten Vermischung verschiedener Grundgesamtheiten ist mit dem von Knab u. Sodeikat 2015 gewählten Vorgehen nicht möglich.

5.2.2.2 Untersuchungen zum Auswerteverfahren nach DIN EN 13791:2008

Bei Bewertung der Stichproben aus den Simulationen zu $f_{ck, is} = 37 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$ sowie für $f_{ck, is} = 20 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 7 \text{ N/mm}^2$ mit den in DIN EN 13791:2008-05 enthaltenen Verfahren konnte die in Abb. 5.6 und Abb. 5.7 dargestellte Verteilung der aus den Stichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeiten ermittelt werden.

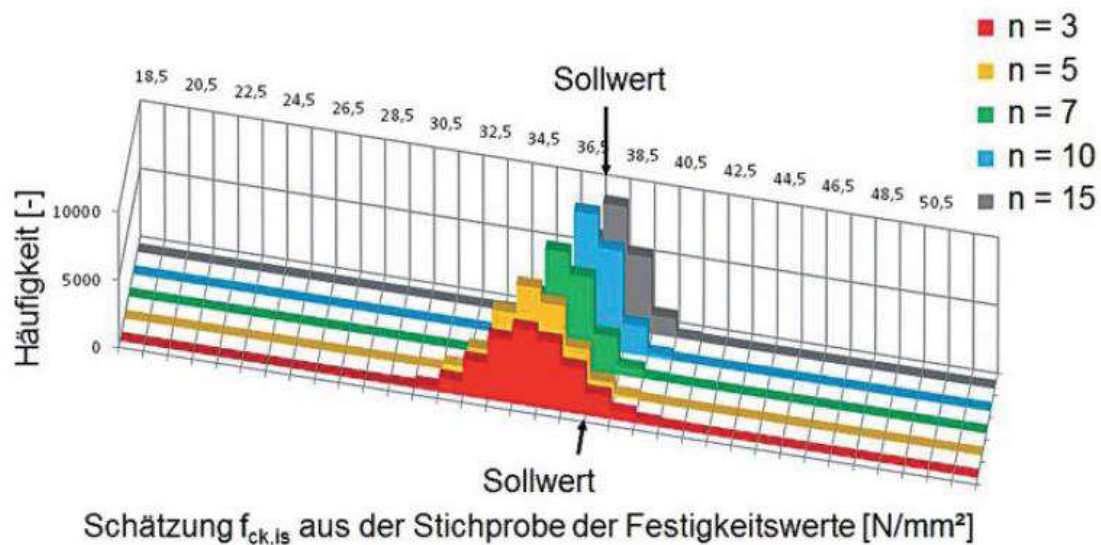


Abb. 5.6 Histogramme der aus den Stichproben mit DIN EN 13791:2008-07 geschätzten charakteristischen Druckfestigkeiten für eine Grundgesamtheit mit $f_{ck, is} = 37 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$ aus Knab u. Sodeikat 2015

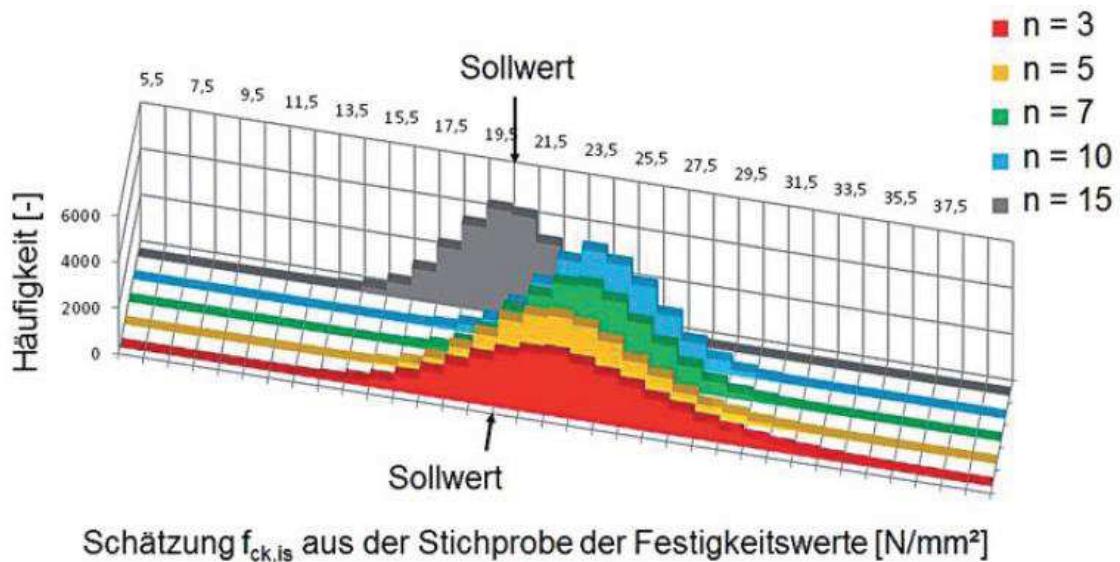


Abb. 5.7 Histogramme der aus den Stichproben mit DIN EN 13791:2008-07 geschätzten charakteristischen Druckfestigkeiten für eine Grundgesamtheit mit $f_{ck, is} = 20 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 7 \text{ N/mm}^2$ aus Knab u. Sodeikat 2015

Die in Abb. 5.6 und Abb. 5.7 beschriebene Bewertung der Stichproben aus den Simulationen zu $f_{ck, is} = 37 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$ sowie $f_{ck, is} = 20 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 7 \text{ N/mm}^2$ zeigt deutlich, dass das Verfahren nach DIN EN 13791:2008-05 bei kleiner Standardabweichung recht gut funktioniert. Der mittlere Schätzwert liegt nach Tab. 5.1 in Abhängigkeit vom Umfang der Stichprobe zwischen 94 und 101 % des Sollwertes. Der maximale Schätzwert erreicht Werte zwischen 108 und 113 % des Sollwertes. Auch die erreichte Aussagesicherheit (vgl. Konfidenzniveau) liegt zumindest für einen Stichprobenumfang von $n = 3$ bis $n = 10$ zwischen 90 und 61 % und somit in einen akzeptablen Bereich. Für $n = 15$ wird, bedingt durch den Wechsel von Ansatz B zu Ansatz A, eine Aussagesicherheit von lediglich 36 % erreicht.

Tab. 5.1 Ergebnisse der Simulationen zu $f_{ck, is} = 37 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$ sowie für $f_{ck, is} = 20 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 7 \text{ N/mm}^2$ bei Auswertung mit DIN EN 13791:2008-07 nach Knab u. Sodeikat 2015

		$n = 3$	$n = 5$	$n = 7$	$n = 10$	$n = 15$
Simulationen zu $f_{ck, is} = 37 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$						
Mittlerer Schätzwert / Sollwert	[%]	94	94	97	99	101
Max. Schätzwert / Sollwert	[%]	113	108	111	111	113
Aussagesicherheit	[%]	90	95	86	61	36
Simulationen zu $f_{ck, is} = 20 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 7 \text{ N/mm}^2$						
Mittlerer Schätzwert / Sollwert	[%]	114	114	117	119	99
Max. Schätzwert / Sollwert	[%]	217	194	178	171	145
Aussagesicherheit	[%]	24	18	8	5	52

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

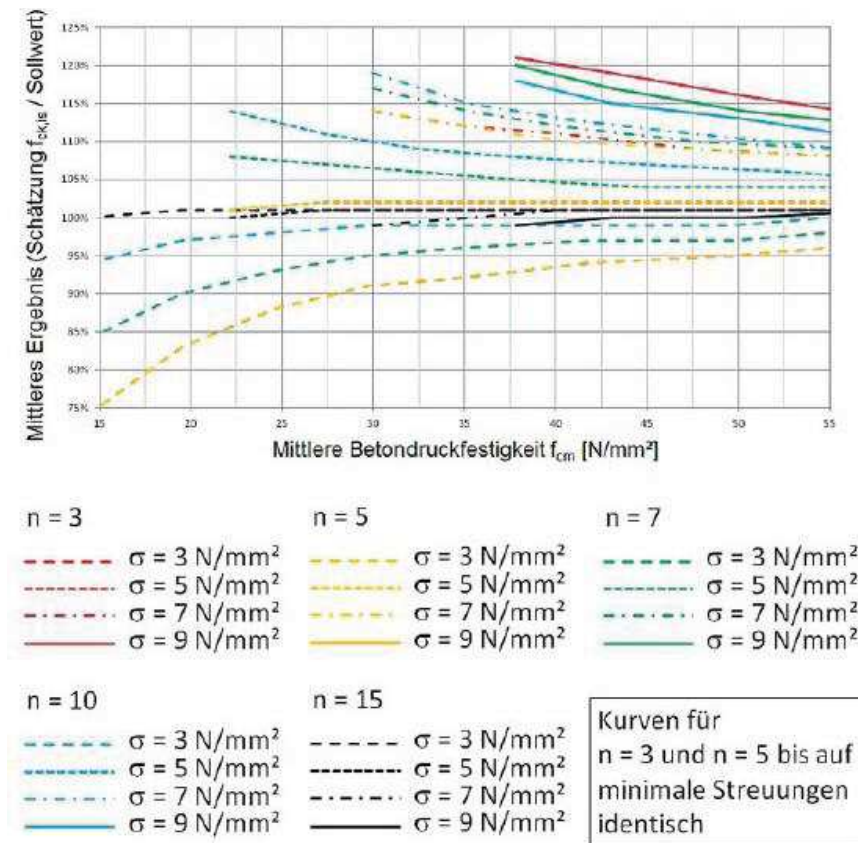


Abb. 5.8 Verhältnis der mittleren aus den Stichproben mit DIN EN 13791:2008-07 geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit zum Sollwert der Grundgesamtheit aus Knab u. Sodeikat 2015

Bei großer Standardabweichung offenbart das Verfahren nach *DIN EN 13791:2008-05* wie in Abb. 5.7 und Tab. 5.1 beschrieben jedoch deutliche Schwächen. Der mittlere Schätzwert liegt nach Tab. 5.1 in Abhängigkeit vom Umfang der Stichprobe zwischen 99 und 119 % des Sollwertes. Der maximale Schätzwert erreicht Werte zwischen 145 und 217 % des Sollwertes wodurch schwerwiegende Fehleinschätzungen möglich sind. Darüber hinaus wird mit 5 bis 52 % nur eine sehr niedrige Aussagesicherheit erreicht, wobei die Aussagesicherheit von 52 % bei $n = 15$, d. h. bei Verwendung von Ansatz A erreicht wird. Für Ansatz B liegen die Werte zwischen 5 und 24 %.

Die in Abb. 5.8 dargestellte Zusammenfassung der durchgeführten Untersuchungen zum Auswerteverfahren nach *DIN EN 13791:2008-05* bestätigen die vorgenannten Beobachtungen in allgemeingültiger Form. Mit zunehmender Standardabweichung steigt das Verhältnis der mittleren, aus den Stichproben mit *DIN EN 13791:2008-05* geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit zum Sollwert an. Lediglich bei der von Knab u. Sodeikat 2015 betrachteten Standardabweichung $\sigma = 3$ N/mm² sind die geschätzten charakteristischen Werte der In-situ-Betondruckfestigkeit im Mittel kleiner als der Sollwert. Für die weiteren betrachteten Werte der Standardabweichungen $\sigma = 5$ N/mm², $\sigma = 7$ N/mm² und $\sigma = 9$ N/mm² sind die geschätzten charakteristischen Werte der In-situ-Betondruckfestigkeit im Mittel bis zu 20 % größer als der Sollwert. Mit zunehmendem Mittelwert der In-situ-Betondruckfestigkeit der jeweils betrachteten Stichprobe nimmt die Abweichung bei gleichbleibendem Stichprobenumfang und gleichbleibender Standardabweichung ab.

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Die Ursache hierfür liegt weniger in der besseren Eignung des Auswerteverfahrens nach *DIN EN 13791:2008-05* für Stichproben mit hohem Mittelwert der In-situ-Betondruckfestigkeit, als viel mehr in den von *Knab u. Sodeikat 2015* für die statistischen Simulationen gewählten Randbedingungen. Durch die konstante Standardabweichung sinkt mit zunehmendem Mittelwert der In-situ-Betondruckfestigkeit das absolute Maß der Streuung, welches z. B. durch den empirischen Variationskoeffizienten als Verhältnis von Standardabweichung zu Mittelwert beschrieben werden kann.

Weitere Angaben zum maximalen Schätzwert sowie zur Streubreite sind über die in Abb. 5.6, Abb. 5.7 und Tab. 5.1 dargestellten Ergebnisse nicht enthalten.

5.2.2.3 Untersuchungen zum Auswerteverfahren nach DIN EN 1990

Bei der Bewertung der Stichproben aus den Simulationen zu $f_{ck, is} = 37 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$ sowie für $f_{ck, is} = 20 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 7 \text{ N/mm}^2$ mit dem in *DIN EN 1990:2010-12* enthaltenen Verfahren konnte die in Abb. 5.9 und Abb. 5.10 dargestellte Verteilung der aus den Stichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeiten ermittelt werden.

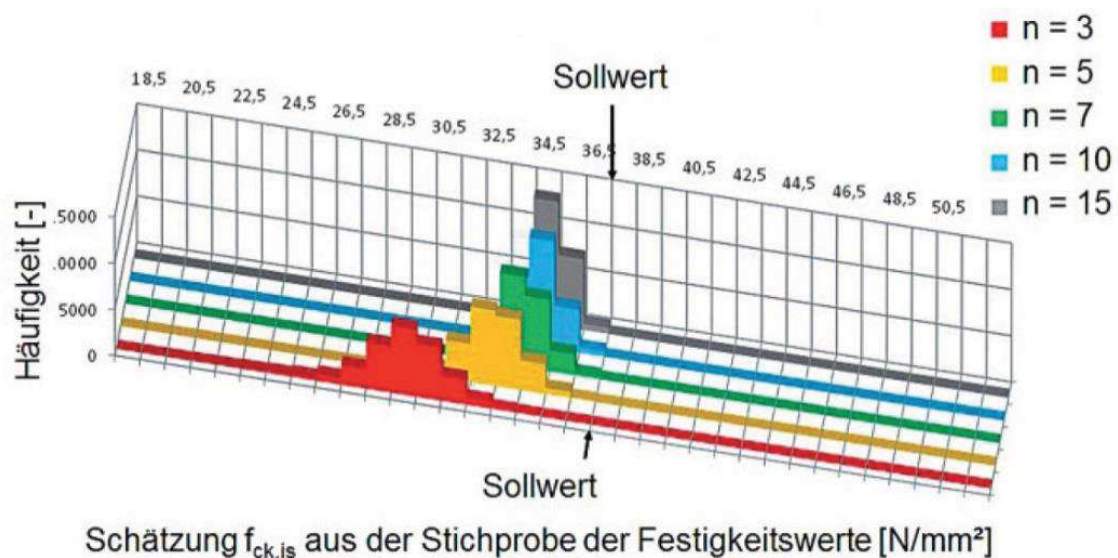


Abb. 5.9 Histogramme der aus den Stichproben mit DIN EN 1990:2010-12 geschätzten charakteristischen Druckfestigkeiten für eine Grundgesamtheit mit $f_{ck, is} = 37 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$ aus *Knab u. Sodeikat 2015*

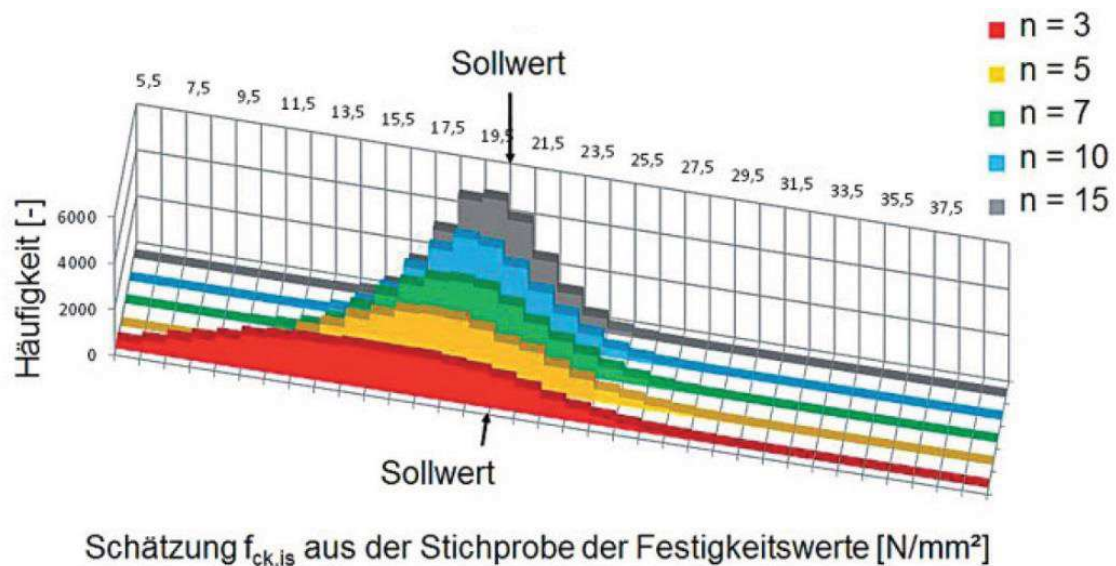


Abb. 5.10 Histogramme der aus den Stichproben mit DIN EN 1990:2010-12 geschätzten charakteristischen Druckfestigkeiten für eine Grundgesamtheit mit $f_{ck, is} = 20 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 7 \text{ N/mm}^2$ aus Knab u. Sodeikat 2015

Tab. 5.2 Ergebnisse der Simulationen zu $f_{ck, is} = 37 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$ sowie für $f_{ck, is} = 20 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 7 \text{ N/mm}^2$ bei Auswertung mit DIN EN 1990:2010-12 nach Knab u. Sodeikat 2015

		$n = 3$	$n = 5$	$n = 7$	$n = 10$	$n = 15$
Simulationen zu $f_{ck, is} = 37 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$						
Mittlerer Schätzwert / Sollwert	[%]	80	89	91	93	94
Max. Schätzwert / Sollwert	[%]	94	101	103	103	101
Aussagesicherheit	[%]	> 99	> 99	> 99	> 99	> 99
Simulationen zu $f_{ck, is} = 20 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 7 \text{ N/mm}^2$						
Mittlerer Schätzwert / Sollwert	[%]	76	90	93	96	97
Max. Schätzwert / Sollwert	[%]	175	160	153	146	145
Aussagesicherheit	[%]	82	72	68	65	63

Im Unterschied zu einer Bewertung der Stichproben mit *DIN EN 13791:2008-05* liegt eine Bewertung mit *DIN EN 1990:2010-12* insgesamt weiter auf der sicheren Seite. Für $f_{ck, is} = 37 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$ beträgt der mittlere Schätzwert nach Tab. 5.2 in Abhängigkeit vom Umfang der Stichprobe 80 bis 94 % des Sollwertes. Der maximale Schätzwert erreicht Werte zwischen 94 und 103 % des Sollwertes. Die erreichte Aussagesicherheit liegt mit > 99 % in einem unkritischen Bereich.

Für $f_{ck, is} = 20 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 7 \text{ N/mm}^2$ liegt der mittlere Schätzwert nach Tab. 5.2 in Abhängigkeit vom Umfang der Stichprobe zwischen 76 und 97 % des Sollwertes. Der maximale Schätzwert erreicht Werte zwischen 145 und 175 % des Sollwertes. Die erreichte Aussagesicherheit (vgl. Konfidenzniveau) liegt mit Werten zwischen 63 und 82 % in einem unkritischen Bereich.

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Das Risiko kritischer Fehleinschätzungen, kann somit auch bei einer Auswertung nach *DIN EN 1990:2010-12* nicht vollständig ausgeschlossen werden, ist jedoch aufgrund der großen Aussagesicherheit deutlich geringer als bei *DIN EN 13791:2008-05*.

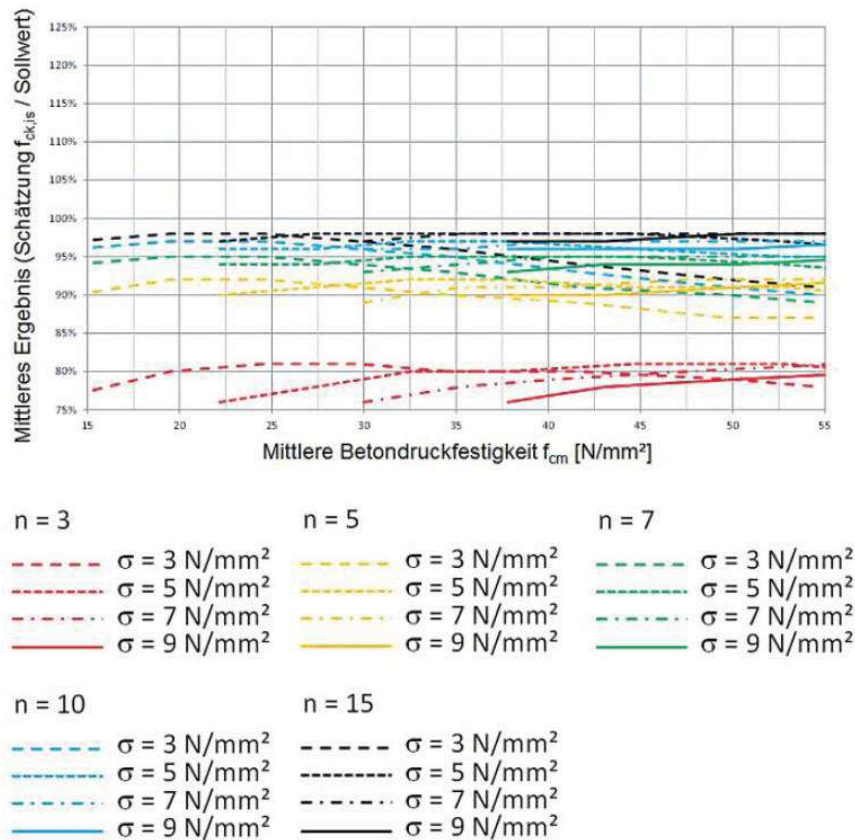


Abb. 5.11 Verhältnis der mittleren aus den Stichproben mit *DIN EN 1990:2010-12* geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit zum Sollwert der Grundgesamtheit aus *Knab u. Sodeikat 2015*

Die in Abb. 5.11 dargestellte Zusammenfassung der von *Knab u. Sodeikat 2015* durchgeführten Untersuchungen zum Auswerteverfahren nach *DIN EN 1990:2010-12* bestätigen die vorgenannten Beobachtungen in allgemeingültiger Form. Für keine der von *Knab u. Sodeikat 2015* betrachteten Konstellationen konnte ein Verhältnis der mittleren, aus den Stichproben mit *DIN EN 1990:2010-12* geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit zum Sollwert $> 100\%$ beobachtet werden, wobei mit zunehmendem Umfang der Stichprobe der Abstand zum Sollwert immer weiter abnimmt.

Weitere Angaben zum maximalen Schätzwert sowie zur Streubreite sind über die in Abb. 5.9, Abb. 5.10 und Tab. 5.2 dargestellten Ergebnisse in *Knab u. Sodeikat 2015* nicht enthalten.

5.2.2.4 Untersuchungen zum Auswerteverfahren nach *DIN ISO 16269*

Bei Bewertung der Stichproben aus den Simulationen zu $f_{ck, is} = 37 N/mm^2$ und $\sigma = 3 N/mm^2$ sowie für $f_{ck, is} = 20 N/mm^2$ und $\sigma = 7 N/mm^2$ mit dem in *DIN ISO 16269-6:2009-10* enthaltenen Verfahren konnte die in Abb. 5.12 und Abb. 5.13 dargestellte

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Verteilung der aus den Stichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeiten ermittelt werden.

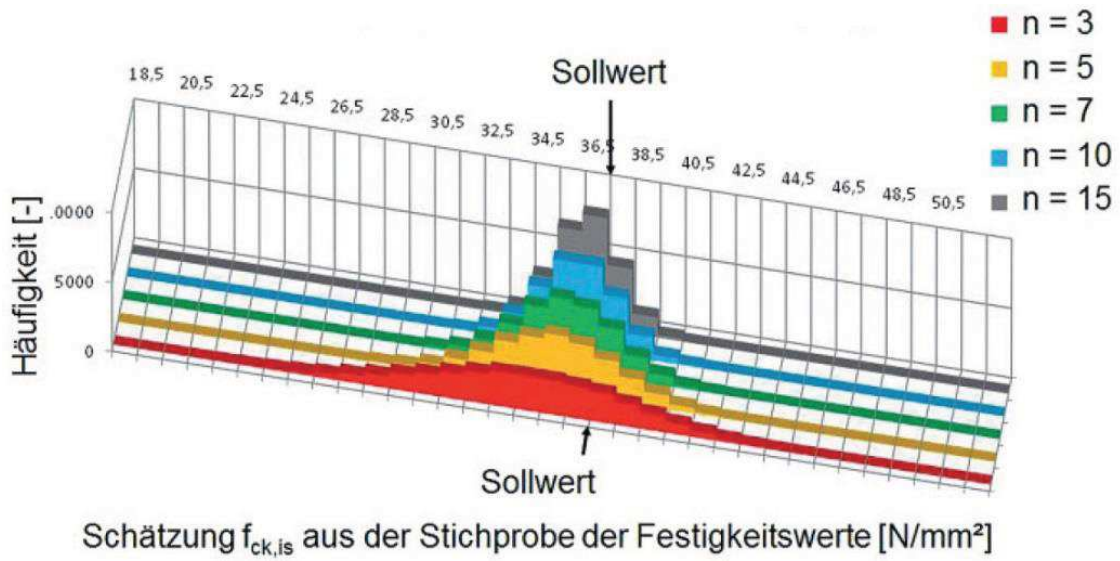


Abb. 5.12 Histogramme der aus den Stichproben mit DIN ISO 16269-6:2009-10 geschätzten charakteristischen Druckfestigkeiten für eine Grundgesamtheit mit $f_{ck, is} = 37$ N/mm² und $\sigma = 3$ N/mm² aus Knab u. Sodeikat 2015

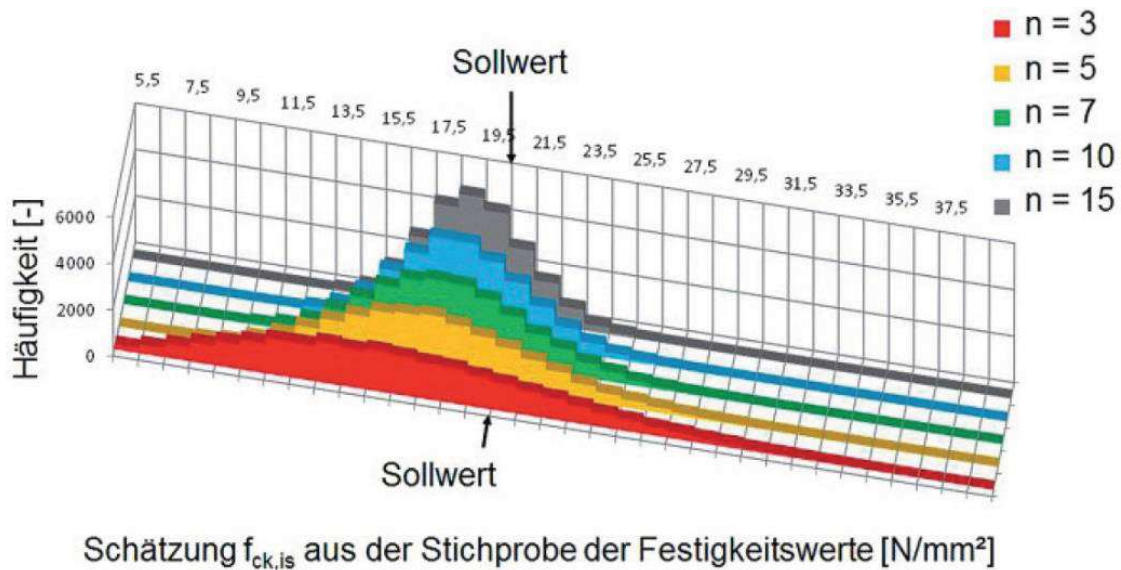


Abb. 5.13 Histogramme der aus den Stichproben mit DIN ISO 16269-6:2009-10 geschätzten charakteristischen Druckfestigkeiten für eine Grundgesamtheit mit $f_{ck, is} = 20$ N/mm² und $\sigma = 7$ N/mm² aus Knab u. Sodeikat 2015

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Tab. 5.3 Ergebnisse der Simulationen zu $f_{ck, is} = 37 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$ sowie für $f_{ck, is} = 20 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 7 \text{ N/mm}^2$ bei Auswertung mit DIN ISO 16269-6:2009-10 nach Knab u. Sodeikat 2015

		$n = 3$	$n = 5$	$n = 7$	$n = 10$	$n = 15$
Simulationen zu $f_{ck, is} = 37 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$						
Mittlerer Schätzwert / Sollwert	[%]	93	96	97	97	98
Max. Schätzwert / Sollwert	[%]	126	120	115	115	112
Aussagesicherheit	[%]	75	75	75	75	75
Simulationen zu $f_{ck, is} = 20 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 7 \text{ N/mm}^2$						
Mittlerer Schätzwert / Sollwert	[%]	81	88	90	92	94
Max. Schätzwert / Sollwert	[%]	209	175	159	155	142
Aussagesicherheit	[%]	75	75	75	75	75

Ähnlich wie *DIN EN 1990:2010-12* liefert auch eine Auswertung nach *DIN ISO 16269-6:2009-10* im Vergleich zu einer Auswertung nach *DIN EN 13791:2008-05* insgesamt auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse. Für $f_{ck, is} = 37 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$ liegt der mittlere Schätzwert nach Tab. 5.3 in Abhängigkeit vom Umfang der Stichprobe zwischen 93 und 98 % des Sollwertes. Der maximale Schätzwert erreicht Werte zwischen 112 und 126 % des Sollwertes. Die erreichte Aussagesicherheit (vgl. Konfidenzniveau) entspricht aufgrund der großen Stichprobenanzahl exakt dem angenommenen Wert des Konfidenzniveaus von 75 %.

Für $f_{ck, is} = 20 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma = 7 \text{ N/mm}^2$ liegt der mittlere Schätzwert nach Tab. 5.3 in Abhängigkeit vom Umfang der Stichprobe zwischen 81 und 94 % des Sollwertes. Der maximale Schätzwert erreicht Werte zwischen 142 und 209 % des Sollwertes. Die erreichte Aussagesicherheit entspricht wieder dem angenommenen Wert des Konfidenzniveaus von 75 %.

Das Risiko kritischer Fehleinschätzungen kann somit auch bei einer Auswertung nach *DIN ISO 16269-6:2009-10* nicht vollständig ausgeschlossen werden, ist jedoch aufgrund der großen Aussagesicherheit deutlich geringer als bei *DIN EN 13791:2008-05*.

Der wesentliche Unterschied zwischen einer Bewertung nach *DIN EN 1990:2010-12* und *DIN ISO 16269-6:2009-10* wird bei Betrachtung der maximalen Schätzwerte der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit deutlich. Die Verwendung des Mindestvariationskoeffizienten $v_{x, min} = 0,10$ bei Anwendung von *DIN EN 1990:2010-12* wirkt sich günstig auf den maximalen Schätzwert aus, welcher nach *DIN EN 1990:2010-12* bei den in Tab. 5.2 beschriebenen Simulationen Werte bis zu 175 % des Sollwertes erreicht. Im Gegensatz hierzu treten für *DIN ISO 16269-6:2009-10* in den in Tab. 5.3 beschriebenen Simulationen Werte bis zu 209 % auf.

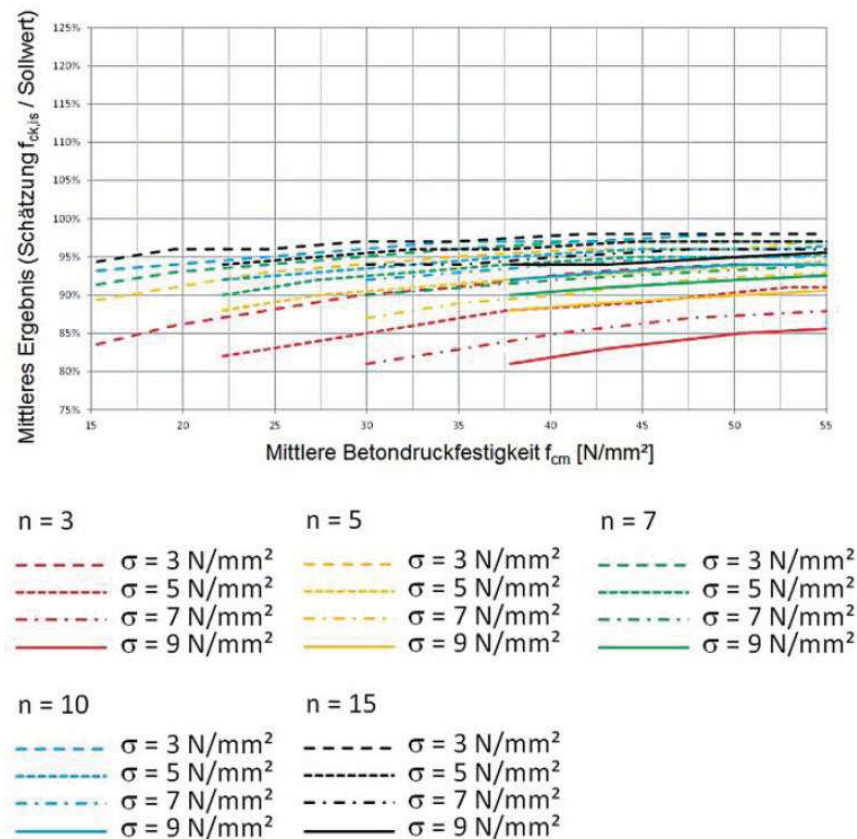


Abb. 5.14 Verhältnis der mittleren aus den Stichproben mit DIN ISO 16269-9:2009-10 geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit zum Sollwert der Grundgesamtheit aus *Knab u. Sodeikat 2015*

Wie in Abb. 5.14 zusammenfassend dargestellt, konnte bei keiner der von *Knab u. Sodeikat 2015* betrachteten Konstellationen ein Verhältnis der mittleren, aus den Stichproben mit *DIN ISO 16269-6:2009-10* geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit zum Sollwert $> 100\%$ beobachtet werden, wobei mit zunehmendem Umfang der Stichprobe der mittlere Schätzwert immer näher beim Istwert liegt.

Weitere Angaben zum maximalen Schätzwert sowie zur Streubreite sind über die in Abb. 5.12, Abb. 5.13 und Tab. 5.3 dargestellten Ergebnisse in *Knab u. Sodeikat 2015* nicht enthalten.

5.2.3 Untersuchungen von Holický et al. zu EN 13791:2007 und EN 1990

Bereits mit dem Erscheinen der europäischen Norm *EN 13791:2007* wurden von *Holícký et al. 2007* Untersuchungen zur Bewertung der Anwendbarkeit für die Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit zur Nachrechnung bestehender Massivbauwerke durchgeführt. Als Vergleichsgröße wurden dabei die mit *EN 1990:2002-04* ermittelten charakteristischen Materialkennwerte verwendet.

Um die Abweichung zwischen *EN 13791:2007* und *EN 1990:2002-04* zu bewerten, wurden statistische Simulationen an einer normalverteilten Grundgesamtheit durchgeführt, für die ein Mittelwert von 30 N/mm² und eine Standardabweichung von 5 N/mm² angenommen wurde.

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Die in *EN 1990:2002-04* und *EN 13791:2007* enthaltenen Verfahren zur Bestimmung charakteristischer Betondruckfestigkeiten entsprechen den in Abschnitt 3.7.3 und 3.7.2 der vorliegenden Arbeit beschriebenen Verfahren nach *DIN EN 1990:2010-12* und *DIN EN 13791:2008-05*. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurde lediglich die Normalverteilung betrachtet.

Zur Bewertung der „Approach B“ nach *EN 13791:2007* wurden aus einer normalverteilten Grundgesamtheit mit einem Mittelwert von 30 N/mm^2 und einer Standardabweichung von 5 N/mm^2 100 verschiedene Stichproben mit einem Umfang $n = 7$ generiert. In Abb. 5.15 sind für alle 100 Stichproben sowohl die nach *EN 1990:2002-04* und *EN 13791:2007* ermittelten Werte der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit, als auch die resultierende Abweichung zwischen beiden Verfahren dargestellt. Für die betrachtete normalverteilte Grundgesamtheit mit einem Mittelwert von 30 N/mm^2 und einer Standardabweichung von 5 N/mm^2 liefert „Approach B“ nach *EN 13791:2007* bei einem Stichprobenumfang $n = 7$ im Mittel charakteristische Werte der In-situ-Betondruckfestigkeit, die die nach *EN 1990:2002-04* bestimmten Werte im Mittel um $4,02 \text{ N/mm}^2$ übersteigen.

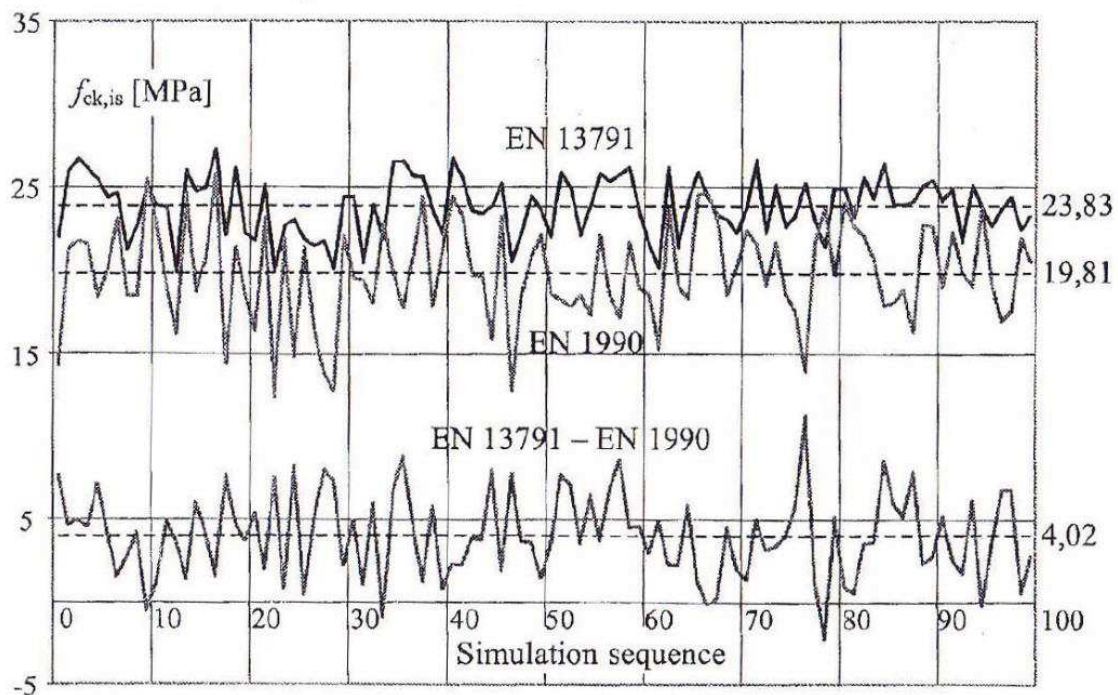


Abb. 5.15 Charakteristische In-situ-Betondruckfestigkeit nach *EN 1990:2002-04* und *EN 13791:2007* für stochastisch generierte Stichproben mit $n = 7$ aus einer normalverteilten Grundgesamtheit mit einem Mittelwert von 30 N/mm^2 und einer Standardabweichung von 5 N/mm^2 aus *Holický et al. 2007*

Darüber hinaus wurde der Einfluss des Stichprobenumfangs auf die Bewertung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit nach *EN 1990:2002-04* und *EN 13791:2007* betrachtet. Auch hierfür wurden wieder aus der normalverteilten Grundgesamtheit mit einem Mittelwert von 30 N/mm^2 und einer Standardabweichung von 5 N/mm^2 Stichproben mit einem Umfang von $n = 3$ bis $n = 30$ generiert. Für jeden Stichprobenumfang wurden dabei zwischen 1.000 und 10.000 Datensätze erzeugt. In Abb. 5.16 ist das Ergebnis der Bewertung der Stichproben mit den in *EN 1990:2002-*

04 und EN 13791:2007 enthaltenen Verfahren, einschließlich der Abweichung zwischen beiden Verfahren $E(\Delta f_{ck, is})$ dargestellt. Ab einem Stichprobenumfang $n = 15$ wurde, entsprechend dem definierten Anwendungsbereich, „Approach A“ nach EN 13791:2007 verwendet. Über die vorgenannten Methoden hinaus, ist in Abb. 5.16 zusätzlich die mit Verfahren der klassischen Statistik, wie in Abschnitt 3.7.5 der vorliegenden Arbeit beschrieben, an den Stichproben ermittelte charakteristische In-situ-Betondruckfestigkeit für ein Konfidenzniveau von 0,75 und 0,90 dargestellt. Außerdem ist der charakteristische Wert der In-situ-Betondruckfestigkeit der den Simulationen zugrunde liegenden Grundgesamtheit, welcher infolgedessen auch als richtiger Wert betrachtet werden kann, aufgetragen.

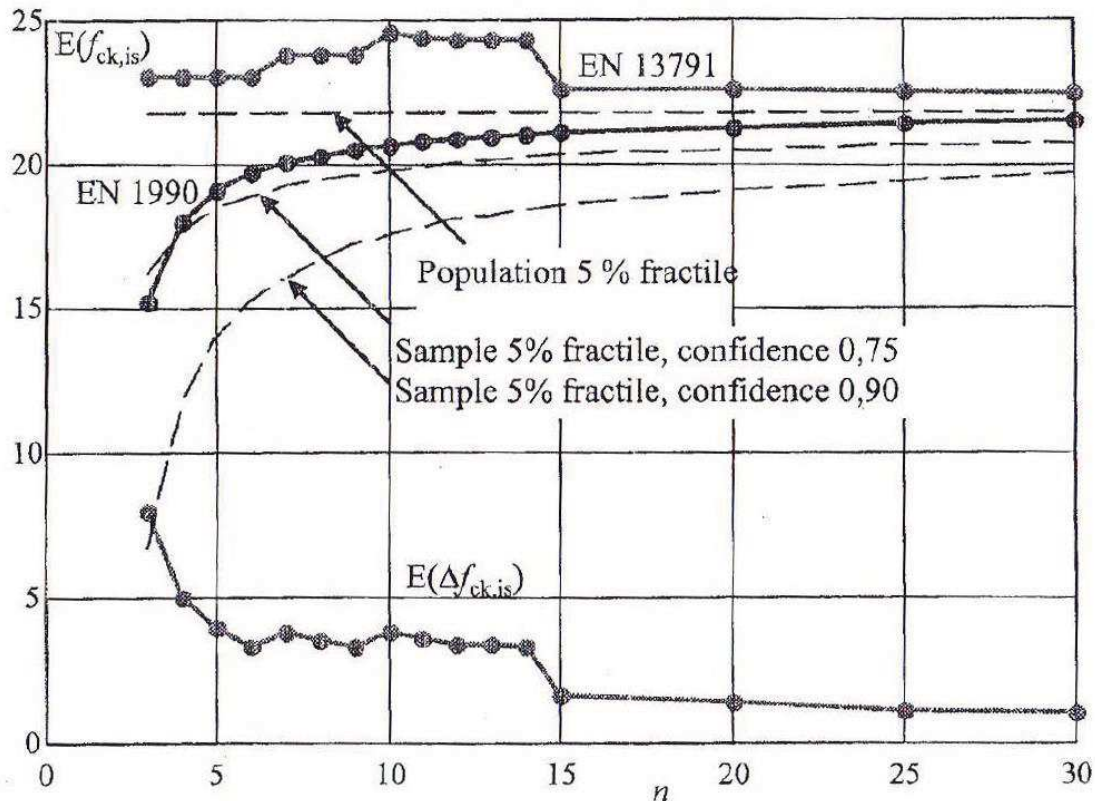


Abb. 5.16 Einfluss des Stichprobenumfangs auf die charakteristische In-situ-Betondruckfestigkeit nach EN 1990:2002-04 und EN 13791:2007 für stochastisch generierte Stichproben aus einer normalverteilten Grundgesamtheit mit einem Mittelwert von 30 N/mm² und einer Standardabweichung von 5 N/mm² aus Holický et al. 2007

Die mit EN 13791:2007 ermittelten Werte der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit übersteigen bei der betrachteten Grundgesamtheit für alle untersuchten Werte des Stichprobenumfangs n sowohl die nach EN 1990:2002-04 bestimmten Werte als auch den Wert der zugehörigen Grundgesamtheit.

Mit abnehmendem Umfang der Stichprobe kann die Abweichung zwischen beiden Verfahren für die betrachtete Grundgesamtheit Werte von bis zu 8 N/mm² erreichen.

Außerdem zeigen die in Abb. 5.16 dargestellten Ergebnisse, dass bei einer normalverteilten Grundgesamtheit eine Bewertung nach EN 1990:2002-04 im Mittel etwa die gleichen Ergebnisse wie klassische statistische Verfahren mit einem

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Konfidenzniveau von 0,75 liefert. Während für $n = 3$ noch ein Konfidenzniveau größer als 0,75 erreicht wird, fällt ab $n = 5$ bei einer Auswertung nach *EN 1990:2002-04* das erreichte Konfidenzniveau leicht ab.

Grundsätzlich ist bei der Bewertung der Untersuchungen zu beachten, dass lediglich Simulationen für eine normalverteilte Grundgesamtheit mit einem Mittelwert von 30 N/mm^2 und einer Standardabweichung von 5 N/mm^2 durchgeführt wurden. Im Rahmen von Bauwerksuntersuchungen nicht auszuschließende einzelne Extremwerte oder gar Ausreißer sowie eine unbemerkte Vermischung verschiedener Grundgesamtheiten finden hier keine Berücksichtigung. Die Ergebnisse sollten somit lediglich als Orientierung verwendet werden. Eine Verallgemeinerung ist nur nach weiteren Untersuchungen möglich.

5.2.4 Untersuchungen von Caspeele zu EN 13791:2007, ISO 16269-6 und EN 1990

5.2.4.1 Allgemeines

Caspeele führte ebenfalls, basierend auf statistischen Simulationsrechnungen, Untersuchungen zum Vergleich verschiedener Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit durch. Im Einzelnen wurden die in Abschnitt 3.7 beschriebenen Verfahren nach *EN 13791:2007 (DIN EN 13791:2008-05)*, *ISO 16269-6:2005 (DIN ISO 16269-6:2009-10)* mit einem Konfidenzniveau $(1 - \alpha) = 0,75$ und *EN 1990:2002-04 (DIN EN 1990:2010-12)* betrachtet.

Zum Vergleich der Verfahren wurden statistische Simulationen durch Erzeugung großer Mengen zufälliger Ergebnisse durchgeführt. Im Detail wurden aus Grundgesamtheiten mit unterschiedlichen Standardabweichungen von 3 bis 8 N/mm^2 ($1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MPa}$) für verschiedene Stichprobenumfänge n jeweils 10.000 Datensätze stochastisch generiert. Als Verteilung wurde dabei eine Normalverteilung angenommen. Somit basieren die Untersuchungen für jede Konstellation aus gewählter Standardabweichung der Grundgesamtheit und Stichprobenumfang auch auf 10.000 Schätzwerten der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit.

Für die Bewertung der Anwendbarkeit der vorgenannten Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang wurde für jede der generierten Konstellationen aus gegebener Standardabweichung der betrachteten Grundgesamtheit und Stichprobenumfang n zunächst die Wahrscheinlichkeit P bestimmt, dass der tatsächliche Wert der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit der Grundgesamtheit $f_{ck, is}$ überschätzt wird. Dieser Wert wird durch den Anteil der geschätzten Werte, welche größer sind als $f_{ck, is}$, beschrieben. Aufgrund der hohen Anzahl der aus einer Grundgesamtheit vorliegenden Stichproben kann aus diesem Wert auf das Konfidenzniveau der Schätzung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit geschlossen werden. Außerdem wurde für jede Konstellation die mittlere Abweichung, normiert durch die der Simulation zugrunde liegenden Standardabweichung der Grundgesamtheit nach Gleichung (5.1), ermittelt. Eine positive mittlere Abweichung bedeutet dabei, dass die an den Stichproben ermittelten charakteristischen Werte der In-situ-Betondruckfestigkeit im Mittel kleiner sind, als der tatsächliche Wert der betrachteten Grundgesamtheit.

$$\frac{f_{ck, is} - E[\hat{f}_{ck, is}]}{\sigma} \quad (5.1)$$

mit:

$f_{ck, is}$ charakteristischer Wert der In-situ-Betondruckfestigkeit der Grundgesamtheit

$\hat{f}_{ck, is}$ aus der Stichprobe geschätzter charakteristischer Wert der In-situ-Betondruckfestigkeit

$E[\hat{f}_{ck, is}]$ Mittelwert der aus den Stichproben geschätzten charakteristischen Werte der In-situ-Betondruckfestigkeit

Darüber hinaus wird für jede Konstellation auch noch der Variationskoeffizient der aus den Stichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeiten, welcher mit Gleichung (5.2) berechnet wurde, angegeben.

$$\frac{\sqrt{\text{Var}[\hat{f}_{ck, is}]}}{E[\hat{f}_{ck, is}]} \quad (5.2)$$

mit:

$\text{Var}[\hat{f}_{ck, is}]$ Varianz der aus den Stichproben geschätzten charakteristischen Werte der In-situ-Betondruckfestigkeit

Allgemein wird neben der Annahme unabhängiger Beobachtungen („independent observations“) auch noch der Sonderfall autokorrelierter Beobachtungen („autocorrelated observations“) betrachtet. Einzelne Beobachtungen wie z. B. hier der Betondruckfestigkeit sind in diesem Fall untereinander korreliert und abhängig. Weitere Hinweise zur Durchführung der statistischen Simulationen mit autokorrelierten Daten können z. B. *Taerwe 1985* entnommen werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird lediglich der gebräuchliche Fall unabhängiger Beobachtungen betrachtet. Bei der Bewertung der durchgeführten Untersuchungen ist grundsätzlich zu berücksichtigen, dass im Rahmen der durchgeführten Simulationen stets alle erzeugten Einzelwerte immer der angenommenen Verteilungsfunktion entstammen. Eine Berücksichtigung einzelner Extremwerte oder gar Ausreißer sowie einer unbemerkten Vermischung verschiedener Grundgesamtheiten, wie sie im Rahmen von Bauwerksuntersuchungen auftreten können, ist mit dem gewählten Vorgehen nicht möglich.

5.2.4.2 Untersuchungen zum Auswerteverfahren nach ISO 16269

Für die Untersuchungen zur klassischen Statistik wurde in *Caspeele 2010* bei der Bewertung der Stichproben eine Normalverteilung mit unbekanntem Variationskoeffizienten der Stichprobe und ein Konfidenzintervall $(1 - \alpha) = 0,75$ verwendet.

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

In Abb. 5.17 ist zunächst die Wahrscheinlichkeit, dass der an der Stichprobe geschätzte Wert der In-situ-Betondruckfestigkeit den tatsächlichen Wert der betrachteten Grundgesamtheit übersteigt, in Abhängigkeit von der Standardabweichung der Grundgesamtheit dargestellt. Im Fall unabhängiger Beobachtungen entspricht der beobachtete Wert aufgrund der großen Stichprobenanzahl exakt dem der Auswertung zugrunde liegenden Wert $\alpha = 0,25$.

In Abb. 5.18 ist die mittlere, durch die Standardabweichung normierte Abweichung der an den Stichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang dargestellt. Für alle betrachteten Stichprobenumfänge konnte eine positive normierte Abweichung festgestellt werden, was bedeutet, dass die an der Stichprobe geschätzte charakteristische In-situ-Betondruckfestigkeit bei einer Auswertung nach *ISO 16269-6:2005* im Mittel niedriger ist, als der tatsächliche Wert der betrachteten Grundgesamtheit. Mit ansteigendem Umfang der Stichprobe reduziert sich die Abweichung.

Zur Beschreibung der Streuung der aus den Stichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit ist in Abb. 5.19 der Variationskoeffizient der aus den Stichproben ermittelten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeiten in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang für verschiedene Standardabweichungen der Grundgesamtheit dargestellt. Der Variationskoeffizient wird maßgeblich von der Standardabweichung der betrachteten Grundgesamtheit und dem Stichprobenumfang beeinflusst. Mit ansteigendem Stichprobenumfang und kleiner werdender Standardabweichung reduziert sich der Variationskoeffizient.

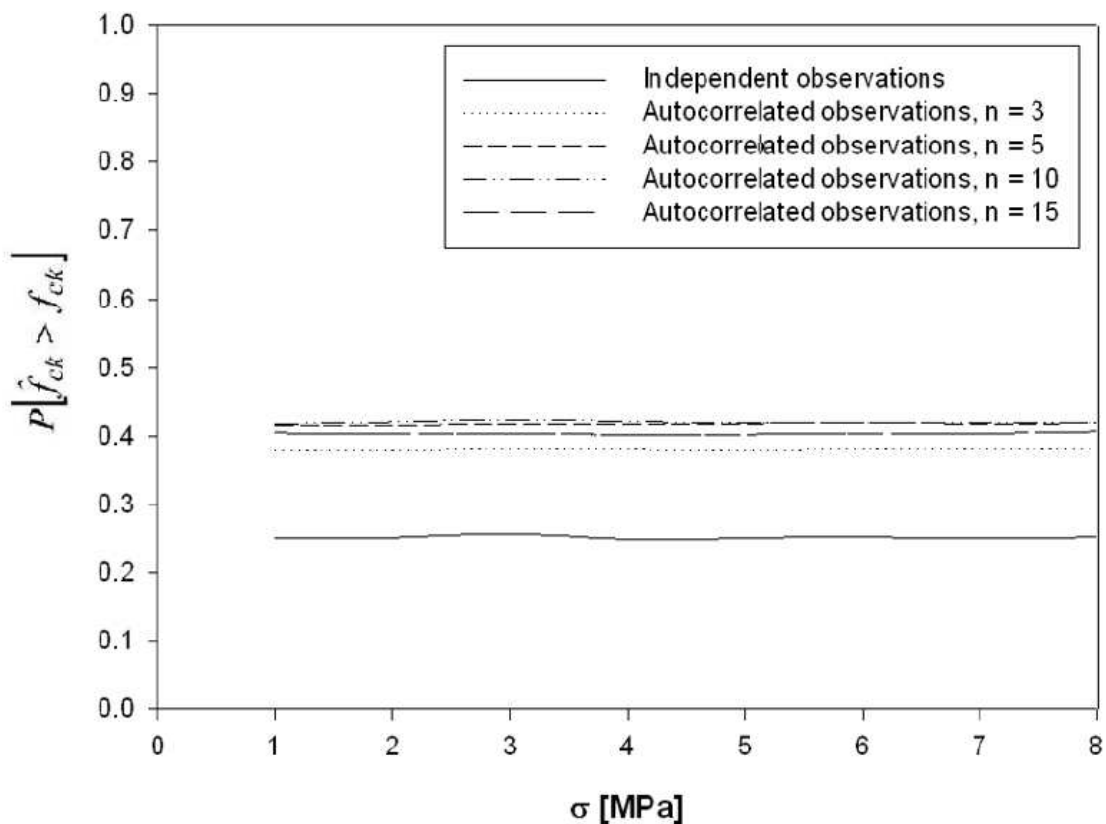


Abb. 5.17 Überschreitungswahrscheinlichkeit von $f_{ck, is}$ bei einer Bewertung der Stichproben mit einer Normalverteilung nach *ISO 16269-6:2005* aus *Caspeele 2010*

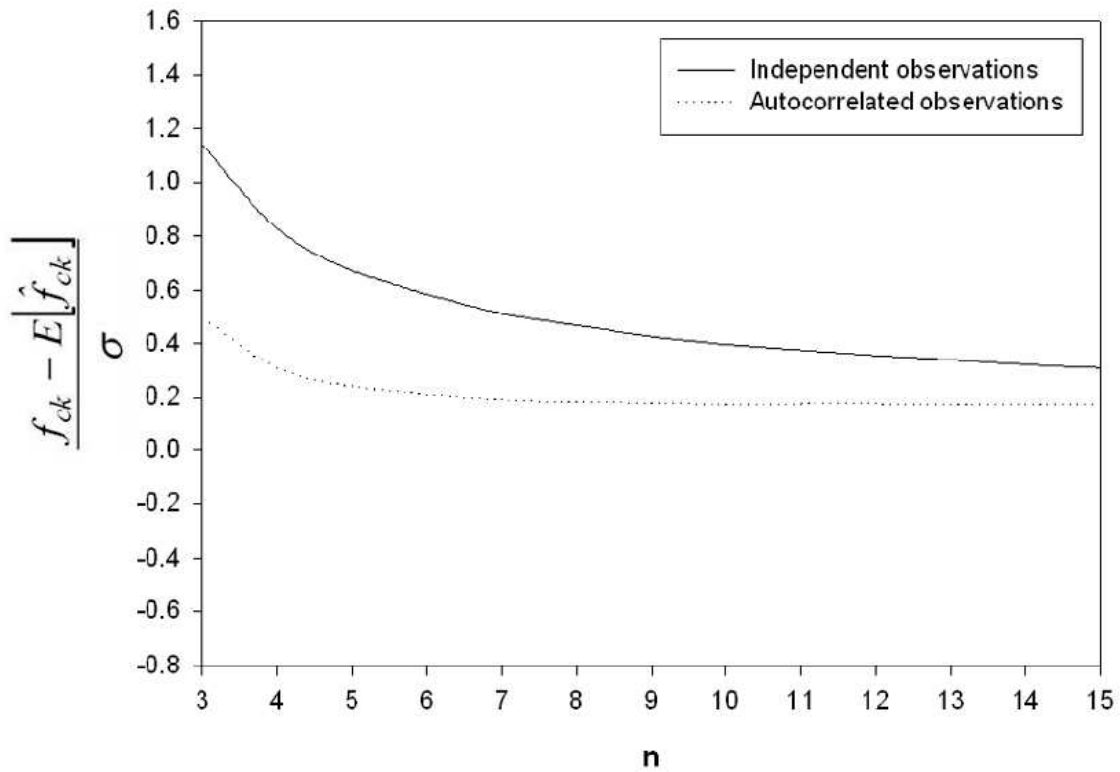


Abb. 5.18 Mittlere normierte Abweichung der an den Stichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit nach ISO 16269-6:2005 aus Caspeele 2010

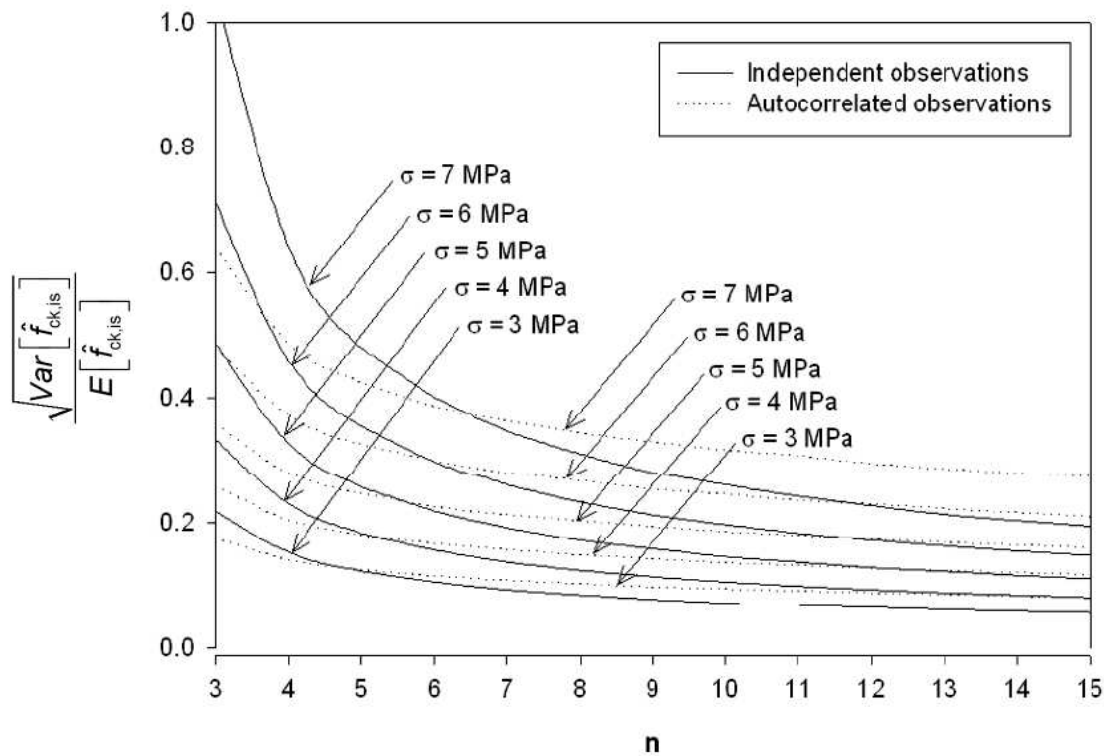


Abb. 5.19 Variationskoeffizient der aus den Stichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeiten nach ISO 16269-6:2005 (verändert gegenüber Caspeele 2010)

5.2.4.3 Untersuchungen zum Auswerteverfahren nach EN 1990

Für die Untersuchungen zum Auswerteverfahren nach *EN 1990:2002-04* wurde in *Caspeele 2010* bei der Bewertung der Stichproben eine Normalverteilung mit unbekanntem Variationskoeffizienten der Stichprobe verwendet.

Wie bereits für die Auswertung nach *ISO 16269-6:2005* ist in Abb. 5.20 die Wahrscheinlichkeit, dass der an der Stichprobe geschätzte Wert der In-situ-Betondruckfestigkeit den tatsächlichen Wert der betrachteten Grundgesamtheit überschätzt, in Abhängigkeit von der Standardabweichung der Grundgesamtheit dargestellt. Auch hier ist die Überschreitungswahrscheinlichkeit unabhängig von der Standardabweichung der betrachteten Grundgesamtheit. Die Werte liegen in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang n leicht oberhalb von dem der Auswertung nach *ISO 16269-6:2005* mit einem Konfidenzniveau von 0,75 zugrunde liegenden Wert von 0,25. Mit ansteigendem Stichprobenumfang nimmt die Überschreitungswahrscheinlichkeit zu. Bei den von *Caspeele 2010* durchgeführten Untersuchungen ist die Wahrscheinlichkeit bei unabhängigen Beobachtungen stets kleiner als 0,40.

Im Vergleich zur Bewertung der Stichproben nach *ISO 16269-6:2005* ist der Bias (vgl. Abschnitt 2.3.2.2) des Erwartungswertes der an den Stichproben mit *EN 1990:2002-04* ermittelten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeiten geringer.

Wie bereits für eine Auswertung nach *ISO 16269-6:2005* konnte auch für eine Auswertung nach *EN 1990:2002-04* für alle betrachteten Stichprobenumfänge eine positive normierte Abweichung festgestellt werden, was bedeutet, dass die an der Stichprobe geschätzte charakteristische In-situ-Betondruckfestigkeit im Mittel niedriger ist, als der tatsächliche Wert der betrachteten Grundgesamtheit. Mit ansteigendem Umfang der Stichprobe reduziert sich die Abweichung.

Der in Abb. 5.22 für verschiedene Standardabweichungen der Grundgesamtheit in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang dargestellte Variationskoeffizient der aus den Stichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeiten wird maßgeblich von der Standardabweichung der betrachteten Grundgesamtheit und dem Stichprobenumfang beeinflusst. Mit ansteigendem Stichprobenumfang und kleiner werdender Standardabweichung reduziert sich der Variationskoeffizient.

Die von *Caspeele 2010* ermittelten Erkenntnisse zur Bewertung kleiner Stichproben mit dem in *EN 1990:2002-04* beschriebenen Verfahren unterscheiden sich somit nur geringfügig von der Auswertung nach *ISO 16269-6:2005* mit einem Konfidenzniveau $(1 - \alpha) = 0,75$.

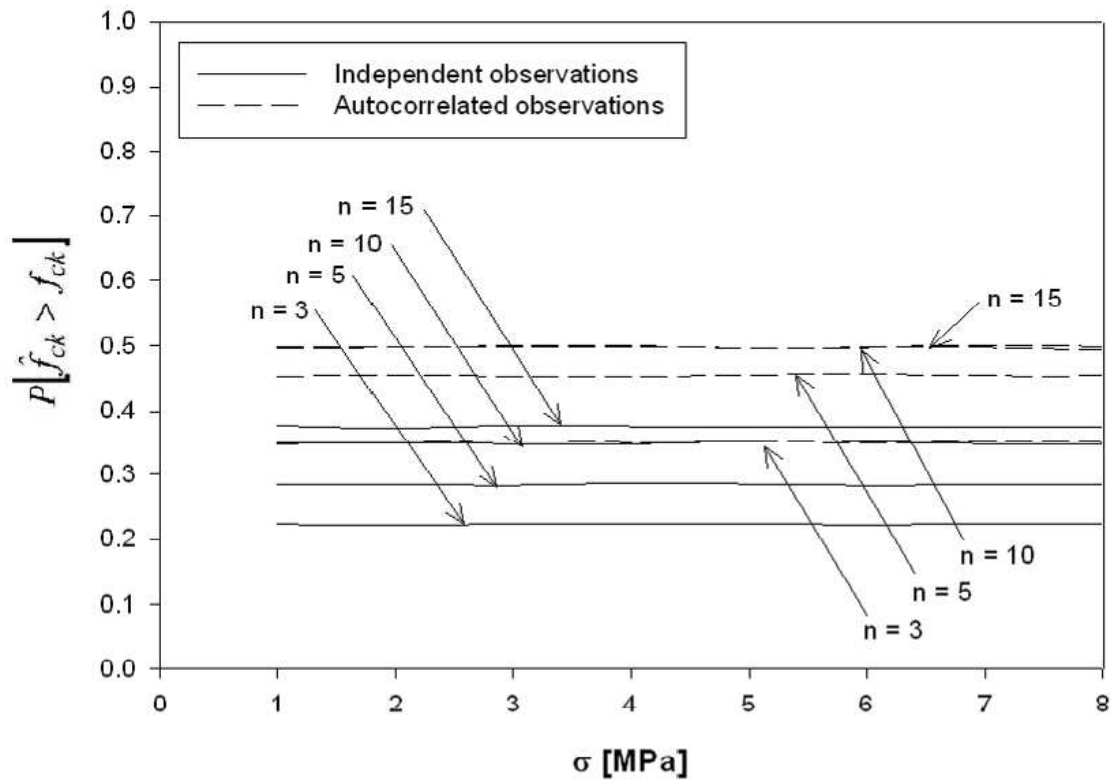


Abb. 5.20 Überschreitungswahrscheinlichkeit von $f_{ck, is}$ bei einer Bewertung der Stichproben mit einer Normalverteilung nach EN 1990:2002-04 aus Caspeele 2010

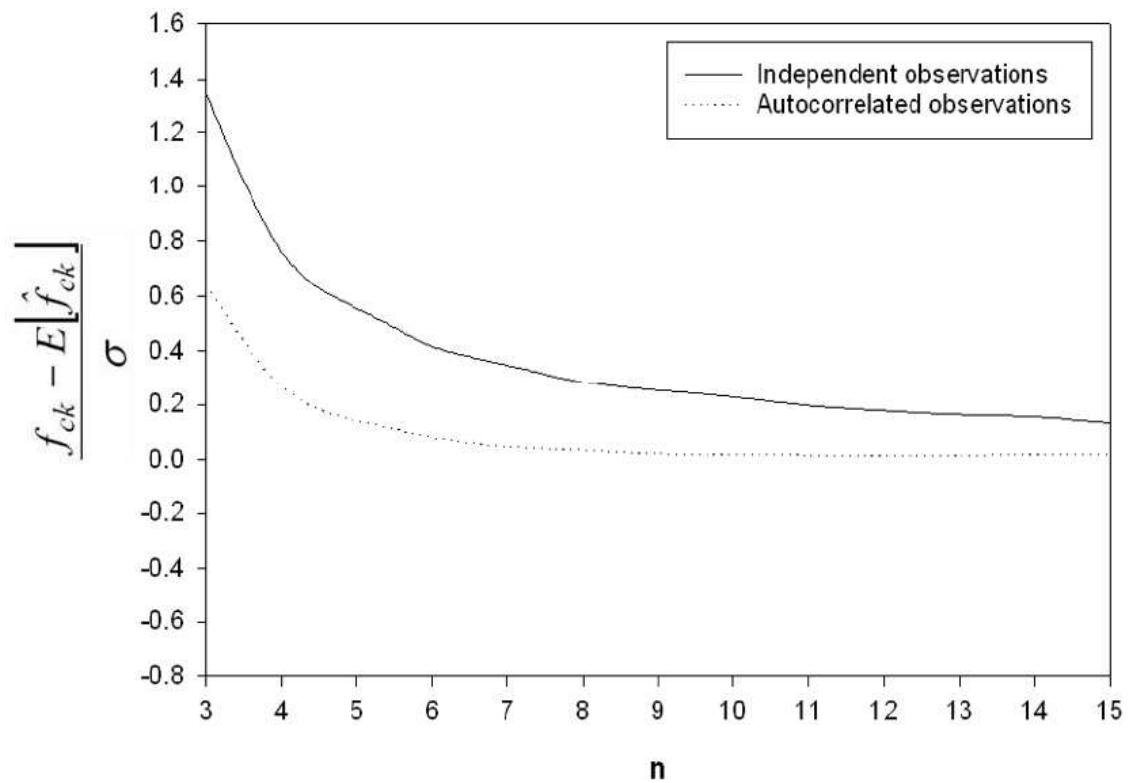


Abb. 5.21 Mittlere normierte Abweichung der an den Stichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit nach EN 1990:2002-04 aus Caspeele 2010

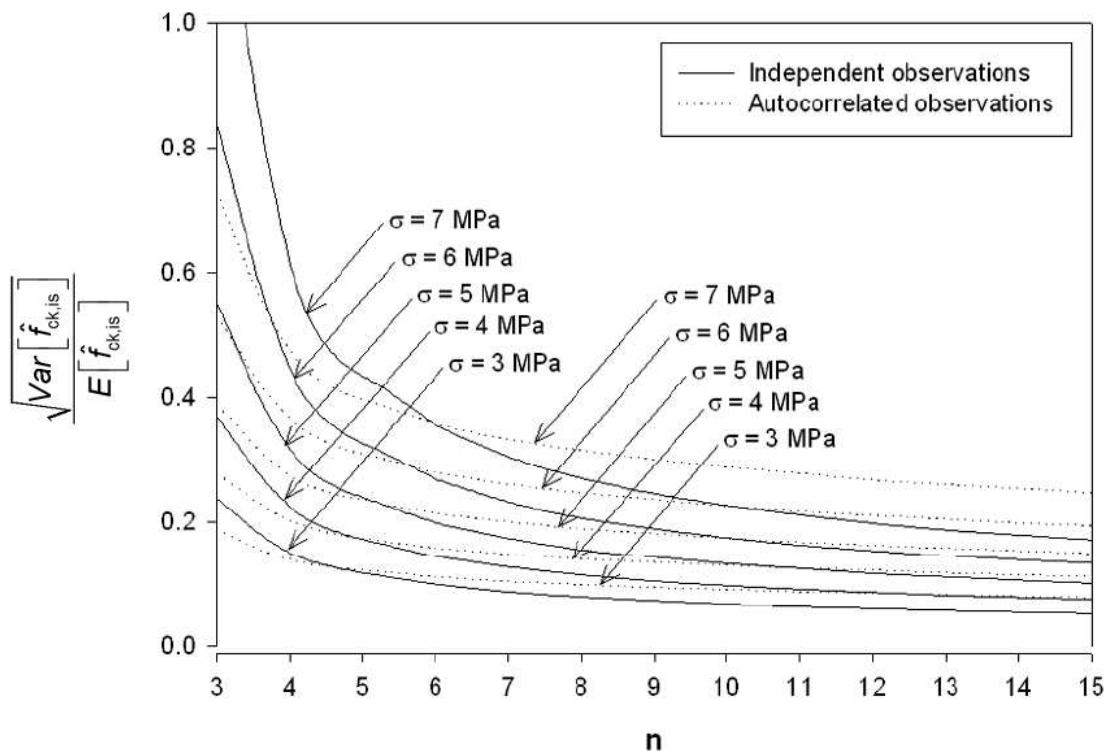


Abb. 5.22 Variationskoeffizient der aus den Stichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeiten nach *EN 1990:2002-04* (verändert gegenüber *Caspeele 2010*)

5.2.4.4 Untersuchungen zum Auswerteverfahren nach *EN 13791:2007*

Entsprechend der Definition des Anwendungsbereiches wurden bei den Untersuchungen zum Auswerteverfahren nach *EN 13791:2007* Stichproben mit einem Umfang $3 \leq n \leq 14$ mit dem Ansatz B bewertet. Ab einem Stichprobenumfang $n = 15$ erfolgte eine Bewertung mit dem Ansatz A.

In Abb. 5.23 ist die Wahrscheinlichkeit, dass der an der Stichprobe geschätzte Wert der In-situ-Betondruckfestigkeit den tatsächlichen Wert der betrachteten Grundgesamtheit überschätzt, in Abhängigkeit von der Standardabweichung der Grundgesamtheit dargestellt. Allgemein kann im Unterschied zu den zuvor betrachteten Verfahren eine Abhängigkeit von der Standardabweichung der Grundgesamtheit verzeichnet werden. Die Begründung hierfür liegt darin, dass die Spanne k nach *EN 13791:2007* für Ansatz B, unabhängig von der Standardabweichung, lediglich in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang zu wählen ist. Für die mit Ansatz B bewerteten Stichproben konnte lediglich bei kleiner Standardabweichung der Grundgesamtheit eine akzeptable Überschreitungswahrscheinlichkeit ermittelt werden. Bei großer Standardabweichung liegt die Überschreitungswahrscheinlichkeit zwischen 80 und 90 %.

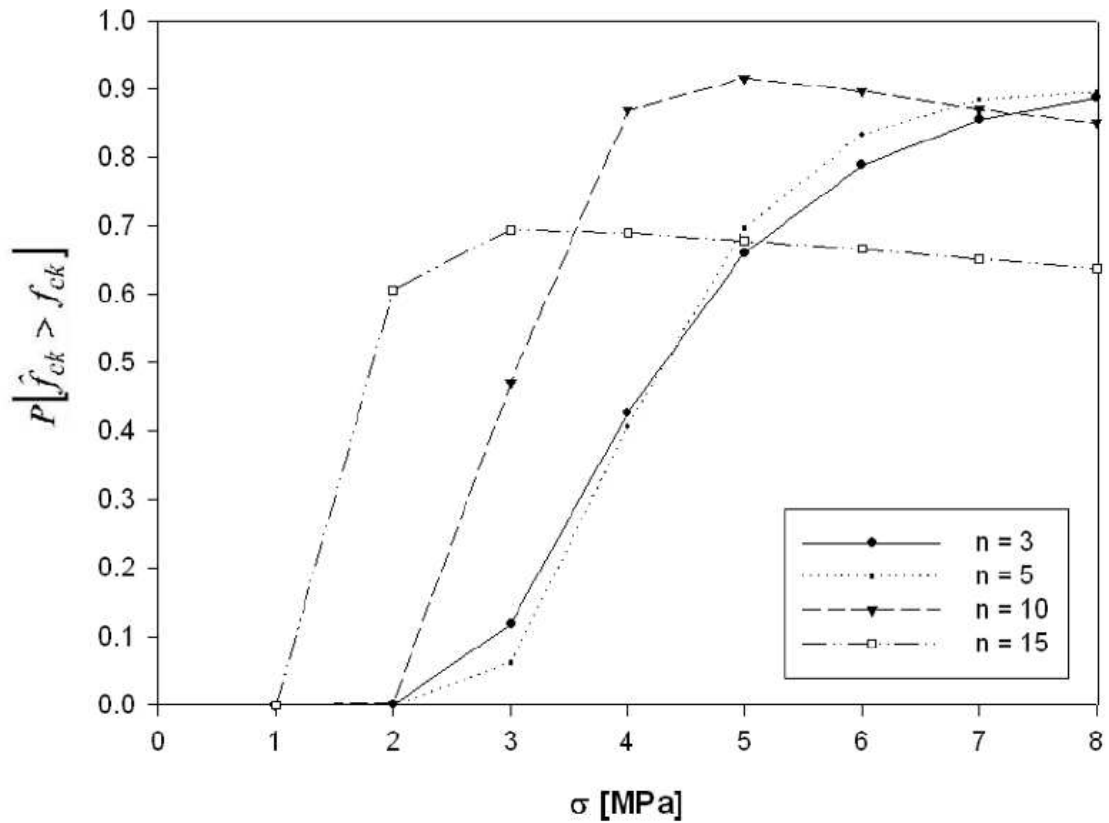


Abb. 5.23 Überschreitungswahrscheinlichkeit von $f_{ck, is}$ bei einer Bewertung der Stichproben nach EN 13791:2007 für unabhängige Beobachtungen aus Caspeele 2010

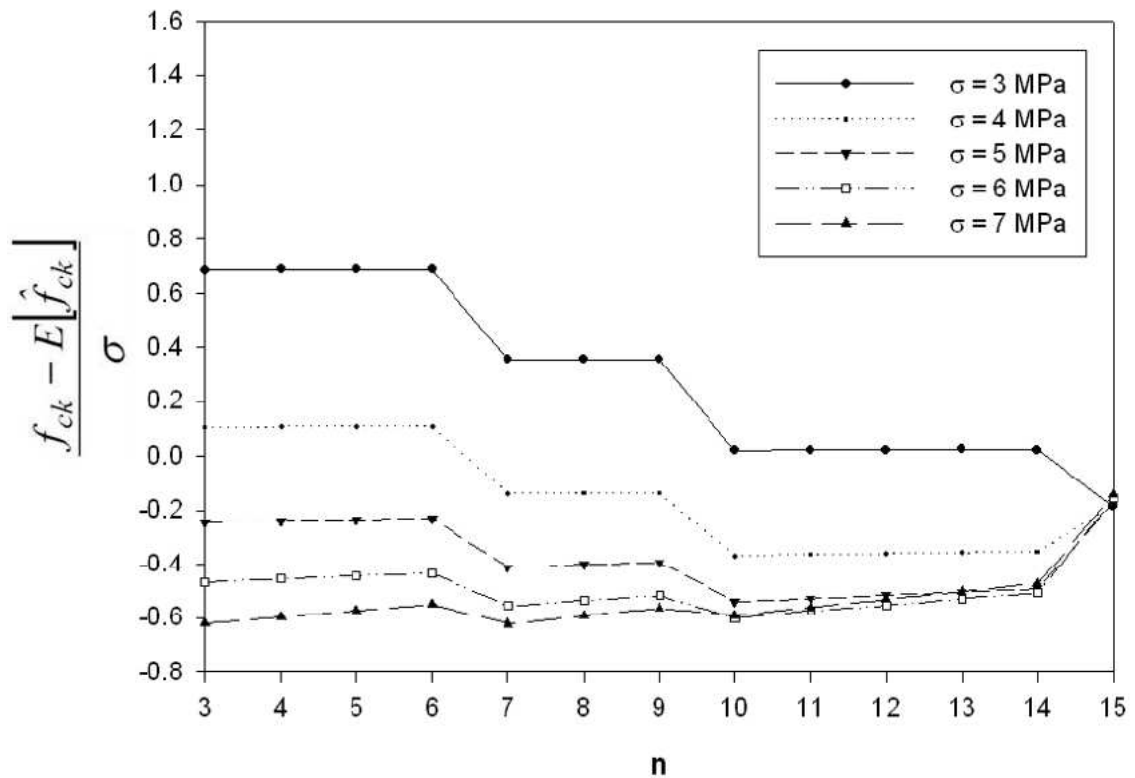


Abb. 5.24 Mittlere normierte Abweichung der an den Stichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit nach EN 13791:2007 für unabhängige Beobachtungen aus Caspeele 2010

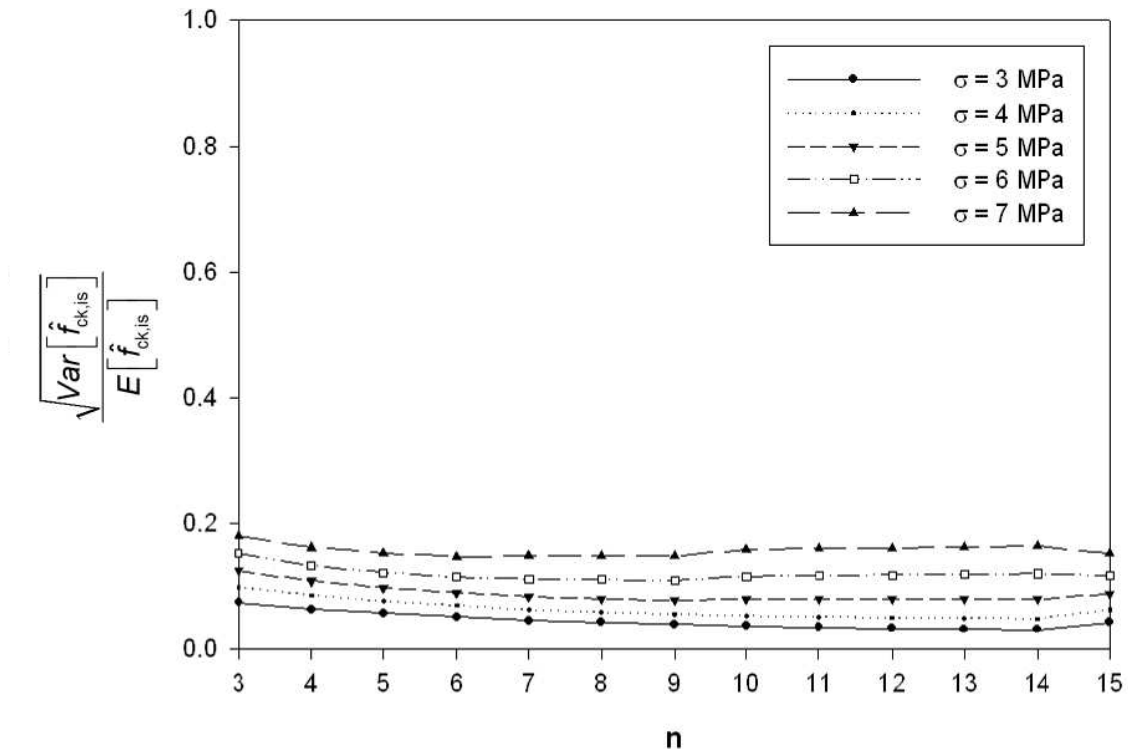


Abb. 5.25 Variationskoeffizient der aus den Stichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeiten nach EN 13791:2007 für unabhängige Beobachtungen (verändert gegenüber Caspeele 2010)

Die mit Ansatz A bewerteten Datensätze (Stichproben mit $n \geq 15$) weisen ein grundsätzlich anderes Verhalten auf. Während im Vergleich zu den mit Ansatz B bewerteten Stichproben die Überschreitungswahrscheinlichkeit zwar geringer ist, können aufgrund des mit $1,48 \text{ N/mm}^2$ konstant gewählten Faktors k_2 (vgl. Abschnitt 3.7.2) bezogen auf die Auswertungen nach ISO 16269-6:2005 und EN 1990:2002-04 ab einer Standardabweichung der Grundgesamtheit von 2 N/mm^2 durchweg höhere Werte der Überschreitungswahrscheinlichkeit beobachtet werden. Lediglich für die von Caspeele 2010 betrachtete Konstellation mit einer Standardabweichung der Grundgesamtheit von 1 N/mm^2 konnte eine geringere Überschreitungswahrscheinlichkeit festgestellt werden. Die Ursache hierfür liegt in dem anzusetzenden Mindestwert der Standardabweichung der Stichprobe von 2 N/mm^2 .

In Abb. 5.24 ist die mittlere durch die Standardabweichung normierte Abweichung der an den Stichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang für unabhängige Beobachtungen dargestellt. Die deutlich erkennbaren Sprünge im Verlauf basieren auf den in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang abschnittsweise konstant gewählten Werten der Spanne k (vgl. Tab. 3.3). In den meisten Fällen übersteigt die an den Stichproben mit Ansatz B nach EN 13791:2007 bestimmte mittlere charakteristische In-situ-Betondruckfestigkeit den tatsächlichen Wert, was sich in den negativen Werten der mittleren normierten Abweichung in Abb. 5.24 widerspiegelt. Die Werte liegen somit auf der unsicheren Seite. Lediglich bei den von Caspeele 2010 betrachteten Grundgesamtheiten mit einer Standardabweichung von 3 oder 4 N/mm^2 konnten zumindest teilweise noch positive Werte beobachtet werden.

Der in Abb. 5.25 für unabhängige Beobachtungen dargestellte Variationskoeffizient der aus den Stichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeiten wird im Unterscheid zu den zuvor betrachteten Verfahren nach *ISO 16269-6:2005* und *EN 1990:2002-04* nur geringfügig vom Stichprobenumfang beeinflusst und nimmt durchweg sehr kleine Werte an. Die Ursache für die sehr geringe Streuung der möglichen Werte der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit bei einer Bewertung mit Ansatz B nach *EN 13791:2007* liegt darin, dass lediglich der Mittelwert der Stichprobe und eine von der Standardabweichung unabhängige Spanne k verwendet werden.

5.2.5 Zwischenfazit

Alle vorgenannten Untersuchungen basieren auf einer rein theoretischen Betrachtung der In-situ-Betondruckfestigkeit an stochastisch generierten Daten. Das tatsächlich vorliegende Streuverhalten von Bestandsbetonen sowie das Auftreten einzelner Extremwerte kann nur durch eine Untersuchung am Bestandstragwerk erfasst werden.

Darüber hinaus wird meist angenommen, dass *DIN EN 1990:2010-12* unabhängig vom Stichprobenumfang die richtigen Werte der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit liefert, ohne dies jedoch näher zu überprüfen.

5.3 Eigene Untersuchungen zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang durch Bohrkernentnahme an Bestandstragwerken

5.3.1 Vorgehen

Die in Abschnitt 5.2 zusammengefassten Untersuchungen beschreiben theoretische Einflüsse bei der Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit mit Verfahren nach *DIN EN 1990:2010-12*, *DIN ISO 16269-6:2009-10* und *DIN EN 13791:2008-05* in umfassender Form. Im Rahmen einer tatsächlichen Bauwerksuntersuchung nicht auszuschließende einzelne Extremwerte oder gar Ausreißer können jedoch mittels Untersuchungen an stochastisch generierten Daten nicht erfasst werden. Vor diesem Hintergrund wurden Untersuchungen an realen, umfangreichen Datensätzen aus der experimentellen Bestimmung der In-situ-Betondruckfestigkeit an Bohrkernen aus bestehenden Massivbauwerken durchgeführt.

Um eine abgesicherte und statistisch belastbare Schätzung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit, welche den tatsächlichen Wert der betrachteten Grundgesamtheit möglichst genau beschreibt, d. h. deren Bias gering ist, zu erhalten, wurden verschiedene Bauwerke auf Grundlage des in Kapitel 3 beschriebenen Vorgehens durch eine umfangreiche Bohrkernentnahme untersucht. Zusätzlich wurden basierend auf einer Anfrage weitere Datensätze ermittelt. Der Stichprobenumfang der in Anhang I der vorliegenden Arbeit aufgelisteten Untersuchungen liegt zwischen 8 und 63 Einzelwerten.

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Entscheidend für die Güte eines statistischen Verfahrens oder auch Näherungsverfahrens zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit ist die Abweichung des auf Grundlage einer Stichprobe mit beschränktem Umfang n bestimmten charakteristischen Wertes im Vergleich zum tatsächlichen charakteristischen Wert der untersuchten Grundgesamtheit.

Basierend auf der Gesamtstichprobe wurde der charakteristische Wert x_k der In-situ-Betondruckfestigkeit, welcher in den in Anhang II enthaltenen Abbildungen als grüne Linie dargestellt ist, unter Annahme einer logarithmischen Normalverteilung nach Gleichung (3.11) berechnet. Aufgrund des großen Umfangs der Gesamtstichprobe kann der ermittelte 5 %-Quantilwert mit ausreichender Genauigkeit mit dem tatsächlichen 5 %-Quantilwert der Grundgesamtheit gleichgesetzt werden.

Zur Bewertung der Anwendbarkeit der verschiedenen Auswerteverfahren bei kleinem Stichprobenumfang wurden für eine Auswahl der in Anhang I beschriebenen Untersuchungen jeweils aus der Gesamtstichprobe alle möglichen Kombinationen (Teilstichproben) mit $n = 3$, $n = 5$ und $n = 8$ Prüfergebnissen ohne Doppelnennung gebildet.

Von den in Anhang I genannten Untersuchungen wurden lediglich die Datensätze mit einem Stichprobenumfang $n \geq 12$ und, in Anlehnung an die in Kapitel 4 beschriebenen Kenngrößen von Bestandsbetonen, einem Variationskoeffizienten $v_x < 0,30$ verwendet. Die Einzelwerte wurden mit den in Kapitel 3 beschriebenen Verfahren auf Zugehörigkeit zu einer Grundgesamtheit überprüft. Die Anwendbarkeit von mathematischen Ausreißertests wird in Kapitel 6 gesondert betrachtet.

Als Gesamtstichprobe wurden dabei jeweils maximal 23 Prüfwerte verwendet, um den mathematischen Aufwand zu reduzieren. Bei Stichproben mit einem Umfang größer als 23 wurden jeweils zufällig 23 Einzelwerte ausgewählt. Aufgrund des weiterhin großen Umfangs der Gesamtstichprobe kann der Einfluss durch das Reduzieren des Stichprobenumfangs auf 23 als gering eingestuft werden.

Bei einem Umfang der Gesamtstichprobe von $n = 23$ entspricht dies nach Gleichung (5.3) bei einem Umfang der Teilstichprobe von $n = 3$ insgesamt 1.771; bei einem Umfang der Teilstichprobe von $n = 5$ insgesamt 33.649 und bei einem Umfang der Teilstichprobe von $n = 8$ insgesamt 490.314 Kombinationsmöglichkeiten AK .

$$AK = \frac{n!}{(n-k)!k!} \quad (5.3)$$

Anschließend wurde an allen Teilstichproben mit den in Abschnitt 3.7 beschriebenen Verfahren der charakteristische Wert der In-situ-Druckfestigkeit bestimmt.

In Anhang II sind je Bauwerk und Auswerteverfahren für jeweils 500 zufällig ausgewählte Teilstichproben, wodurch das betrachtete statistische Auswerte- oder Näherungsverfahren mit hinreichender Genauigkeit beschrieben wird, die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt. Zusätzlich sind die zugehörigen empirischen Dichtefunktionen abgebildet, um die Verteilung der Ergebnisse zu verdeutlichen.

Zur Bewertung des bisher gebräuchlichen Vorgehens bei der Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit sind nachfolgend zunächst die

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Ergebnisse der Bewertung der Teilstichproben mit einer Normal- oder logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* und Ansatz B nach *DIN EN 13791:2008-05* dargestellt. Das in *DIN ISO 16269-6:2009-10* beschriebene Verfahren wird nicht gesondert betrachtet, da es wie zuvor beschrieben weitestgehend dem in *DIN EN 1990:2010-12* enthaltenen Verfahren gleicht. Außerdem sind die Ergebnisse der Bewertung der Teilstichproben mit den Verfahren nach *BAW 2016* und *E DIN EN 13791:2018-06*, welche für die Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit ausschließlich durch Untersuchungen an Bohrkernen lediglich für einen Stichprobenumfang ab $n = 8$ ausgelegt ist, dargestellt. Darüber hinaus wird der Einfluss einer Beschränkung der Streuung durch einen Mindestwert der Standardabweichung oder durch einen Mindest- und Maximalwert des Variationskoeffizienten betrachtet. Die Ergebnisse der Auswertung nach *Nachrechnungsrichtlinie 2011* sind nicht gesondert dargestellt (vgl. Abschnitt 5.3.3.2).

Basierend auf den Erkenntnissen der Auswertung mit den vorgenannten Verfahren wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein neuer, in Abschnitt 5.3.4.4 erläuteter Ansatz zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit entwickelt, welcher inzwischen bereits in *DIN EN 13791/A20:2017-02* enthalten ist. Die Ergebnisse der Auswertung mit dem neu entwickelten Ansatz sind ebenfalls dargestellt.

Die Ergebnisse werden nachfolgend in zusammengefasster Form beschrieben. Für jedes Auswerteverfahren werden in Abhängigkeit vom Umfang der Teilstichprobe zunächst der Mindest-, Mittel- und Maximalwert der an den Teilstichproben bestimmten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeiten für jedes Verfahren in Abhängigkeit vom Variationskoeffizienten der Gesamtstichprobe dargestellt.

Der Mindestwert beschreibt dabei den kleinsten mit einem statistischen Auswerte- oder Näherungsverfahren an allen Teilstichproben des betrachteten Bauwerkbetons ermittelten Wert der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit. Entsprechend beschreibt der Maximalwert den größten Wert. Beide Größen stellen somit das Ergebnis der Betrachtung einer einzelnen Teilstichprobe dar. Darüber hinaus beschreibt der Mittelwert der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit aller Teilstichproben gleichen Umfangs die Lage der möglichen Werte. Mindest-, Mittel- und Maximalwert werden dabei zunächst als relative Größe, bezogen auf die charakteristische In-situ-Betondruckfestigkeit der jeweiligen Gesamtstichprobe $f_{ck, is, Grundgesamtheit}$, angegeben.

Um auch den Absolutbetrag der Abweichung zu beurteilen, sind zusätzlich für die verschiedenen Verfahren die Abweichungen zwischen Mindest-, Mittel- und Maximalwert, bezogen auf den an der Gesamtstichprobe ermittelten Wert der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit $f_{ck, is, Grundgesamtheit}$, in Abhängigkeit vom Variationskoeffizienten sowie vom Mittelwert der Gesamtstichprobe dargestellt.

Zur Bewertung der Aussagesicherheit wird weiterhin die Wahrscheinlichkeit, dass der an der Teilstichprobe ermittelte Wert der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit kleiner ist als die der betrachteten Gesamtstichprobe, in Abhängigkeit vom Variationskoeffizienten der Gesamtstichprobe aufgeführt. Der Wahrscheinlichkeit liegt dabei das Verhältnis der Anzahl der Teilstichproben mit einer

charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit kleiner als die der Grundgesamtheit zur Anzahl der Teilstichproben zugrunde.

5.3.2 Betrachtung bisher gebräuchlicher Verfahren nach DIN EN 1990 und DIN EN 13791:2008

5.3.2.1 Bestimmung von $f_{ck, is}$ nach DIN EN 1990 - Normalverteilung

In Abb. 5.26 bis Abb. 5.35 sind die Ergebnisse der Bewertung der Teilstichproben mit einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* entsprechend Abschnitt 3.7.3 dargestellt.

Die in Abb. 5.26 bis Abb. 5.28 aufgeführten Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Anwendung einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* zu einer sehr großen Streubreite der möglichen Ergebnisse führt. Bei einem Stichprobenumfang $n = 3$ streut das Verhältnis $f_{ck, is} / f_{ck, is, Grundgesamtheit}$ in einem Intervall von ca. – 210 % bis + 205 %. Mechanisch unplausible negative Werte können nicht ausgeschlossen werden. Im Rahmen der hier betrachteten Untersuchungen können erst bei einem Stichprobenumfang $n = 8$ keine negativen Werte mehr beobachtet werden. Eine Erhöhung des Stichprobenumfangs führt zwar zu einer Reduzierung der Streubreite, dennoch streuen auch bei $n = 8$ die möglichen Ergebnisse noch in einem Intervall von ca. + 20 % bis + 190 %. Somit wirkt sich eine Erhöhung des Stichprobenumfangs besonders auf die jeweiligen Mindestwerte aus, während der Einfluss auf die Maximalwerte als gering eingestuft werden kann (vgl. Abb. 5.26 bis Abb. 5.28).

Darüber hinaus kann eine deutliche Abhängigkeit zwischen der Streubreite der möglichen Ergebnisse und dem Variationskoeffizienten der betrachteten Gesamtstichprobe festgestellt werden. Mit zunehmender Streuung der Gesamtstichprobe steigt die Streubreite der an den Teilstichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit stets an.

Im Mittel liegt das Verhältnis $f_{ck, is} / f_{ck, is, Grundgesamtheit}$ in einem Intervall von ca. + 25 % bis + 100 %. Mit ansteigendem Variationskoeffizienten der Gesamtstichprobe nimmt der Wert immer weiter ab. Umgekehrt liegen die Werte des Verhältnisses bei größerem Stichprobenumfang immer näher an dem tatsächlichen Wert.

Der in Abb. 5.29 bis Abb. 5.31 dargestellte Absolutwert der Abweichung zeigt ein ähnliches Verhalten. Auch hier führen eine Zunahme des Variationskoeffizienten der Gesamtstichprobe und eine Reduzierung des Stichprobenumfangs zu einem deutlichen Anstieg der möglichen Abweichungen. Bei $n = 3$ liegen die Abweichungen in einem Intervall von ca. – 100 N/mm² bis + 45 N/mm² und bei $n = 8$ in einem Intervall von ca. – 25 N/mm² bis + 25 N/mm². Im Mittel wird der tatsächliche Wert der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit bei $n = 3$ um bis zu – 25 N/mm² und bei $n = 8$ um bis zu – 10 N/mm² unterschätzt.

Weiterhin zeigen die in Abb. 5.32 bis Abb. 5.34 in Abhängigkeit vom Mittelwert der In-situ-Betondruckfestigkeit der Gesamtstichprobe aufgetragenen Abweichungen, dass große Differenzen tendenziell eher bei großem Mittelwert der In-situ-Betondruckfestigkeit auftreten.

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

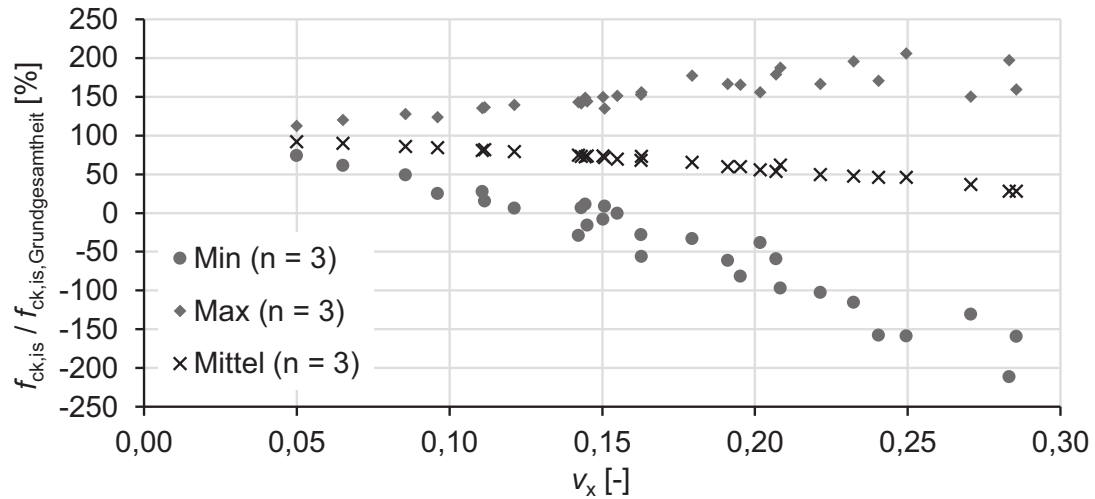


Abb. 5.26 Verhältnis zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – NV und $n = 3$

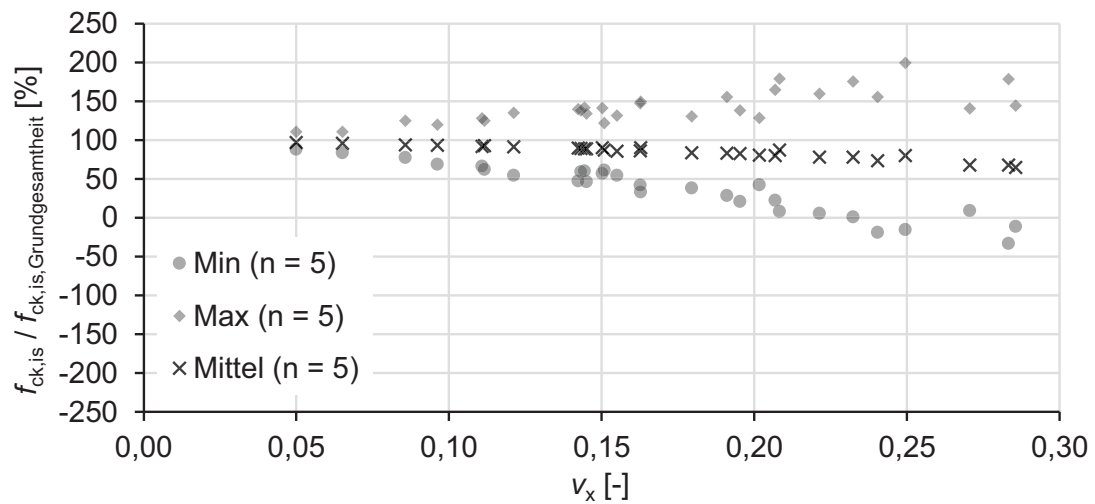


Abb. 5.27 Verhältnis zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – NV und $n = 5$

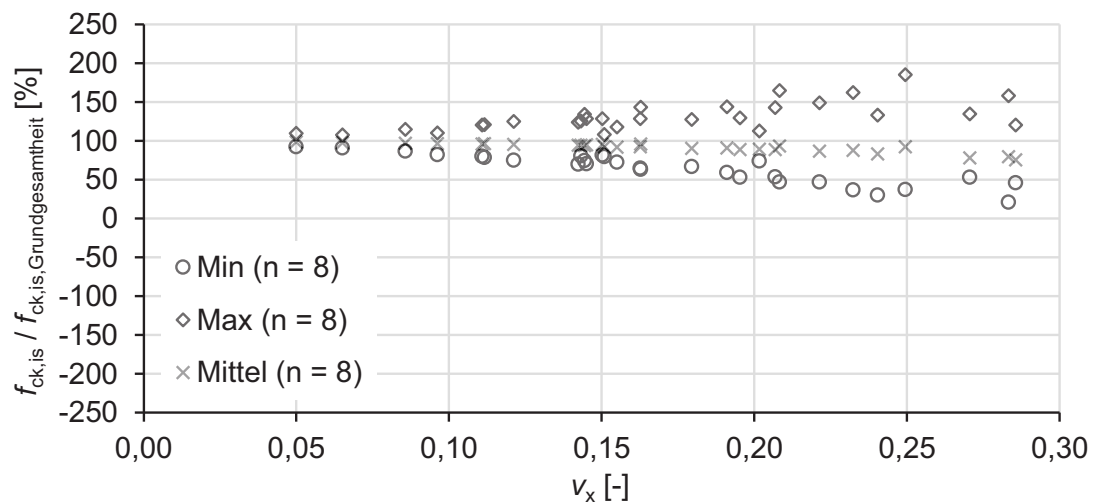


Abb. 5.28 Verhältnis zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – NV und $n = 8$

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

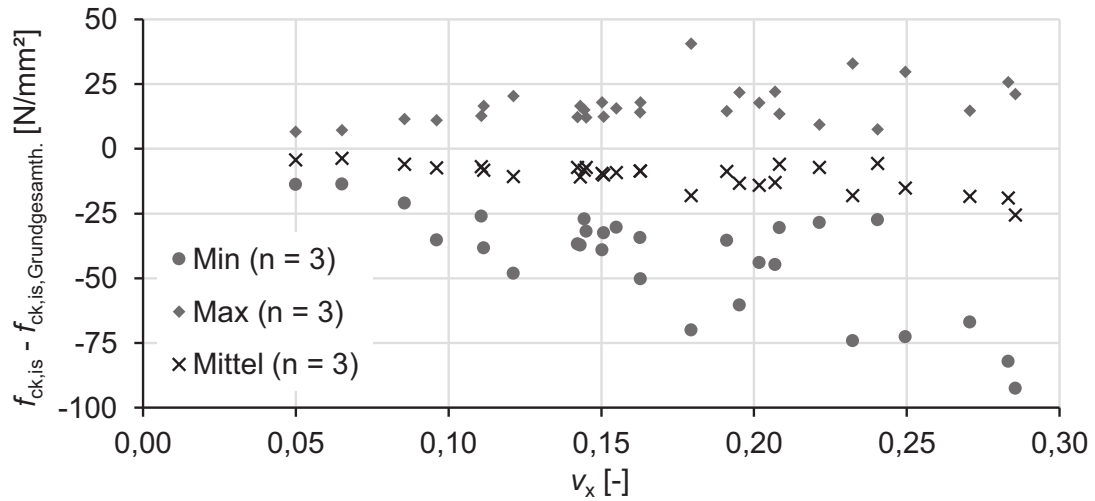


Abb. 5.29 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – NV und $n = 3$ in Abhängigkeit von v_x

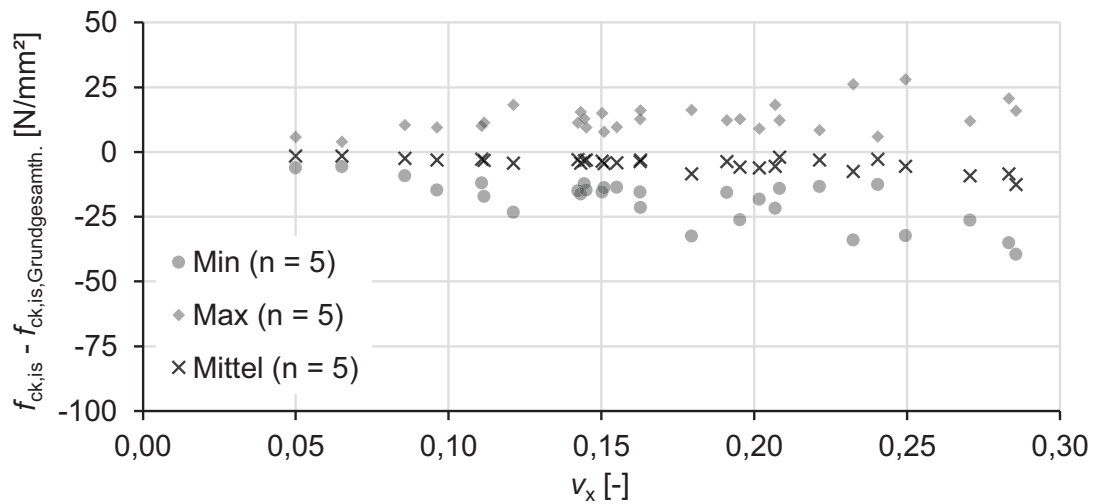


Abb. 5.30 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – NV und $n = 5$ in Abhängigkeit von v_x

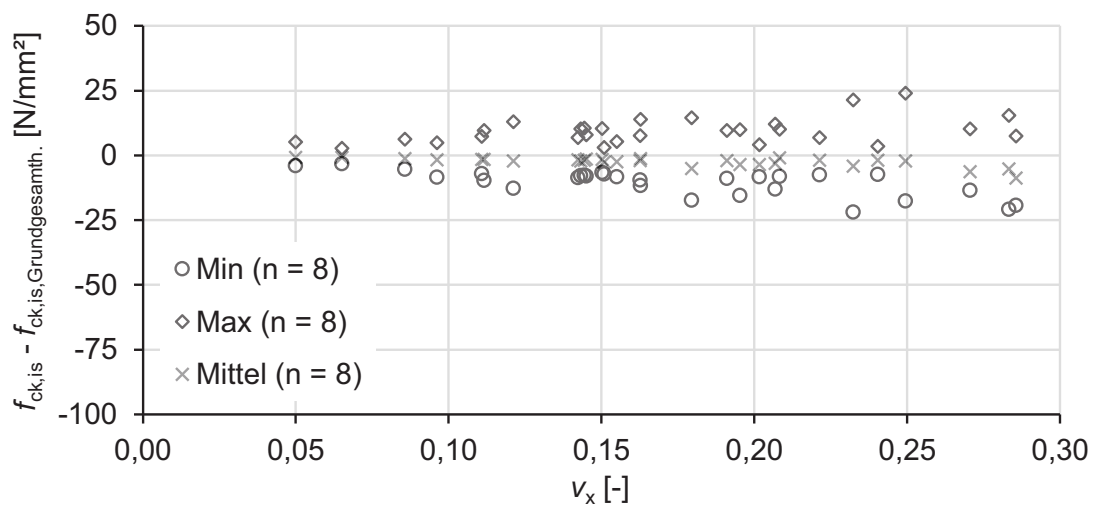


Abb. 5.31 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – NV und $n = 8$ in Abhängigkeit von v_x

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

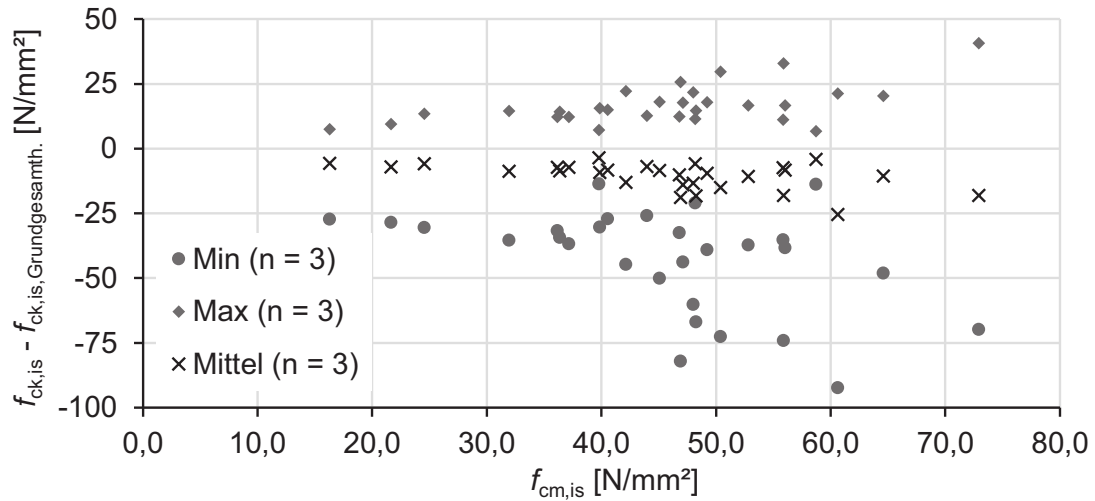


Abb. 5.32 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – NV und $n = 3$ in Abhängigkeit von $f_{cm, is}$

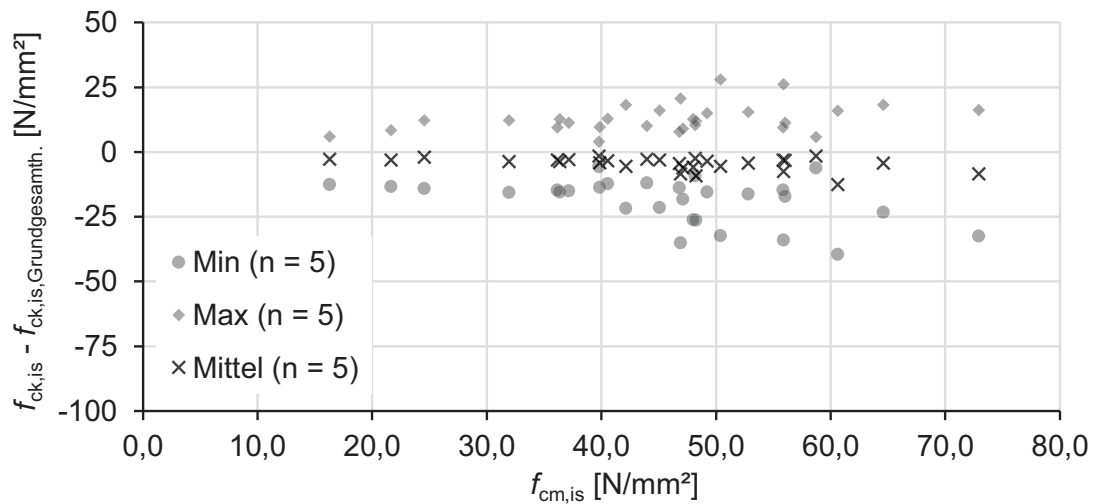


Abb. 5.33 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – NV und $n = 5$ in Abhängigkeit von $f_{cm, is}$

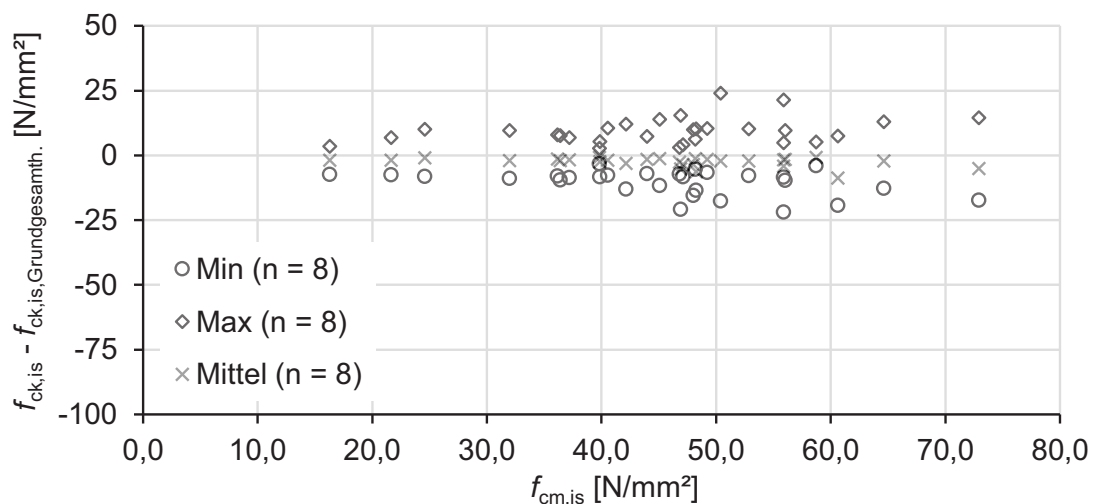


Abb. 5.34 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – NV und $n = 8$ in Abhängigkeit von $f_{cm, is}$

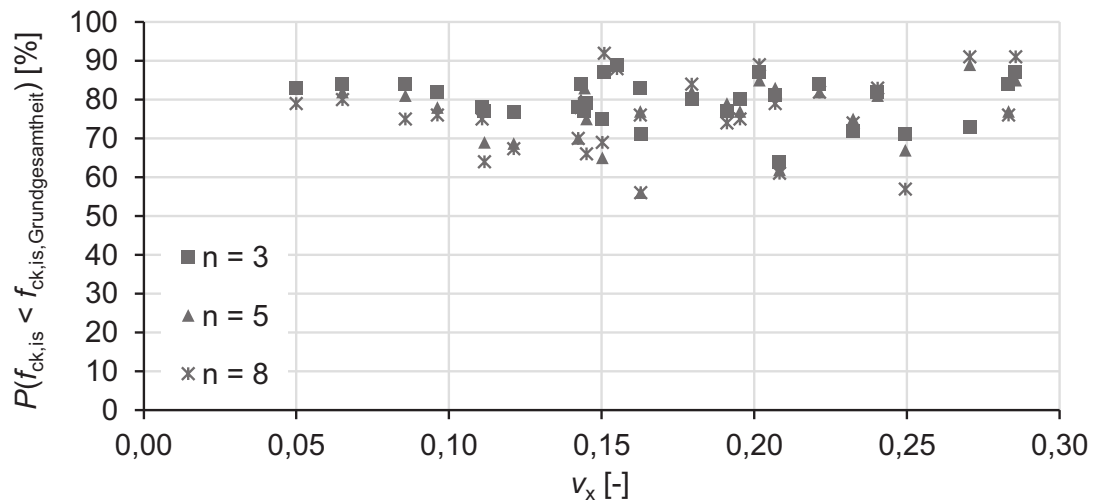


Abb. 5.35 Unterschreitungswahrscheinlichkeit bei Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit nach DIN EN 1990 – NV

Wie die in Abb. 5.35 dargestellte Ergebnisverteilung zeigt, kann im Rahmen der hier betrachteten Untersuchungen weder dem Variationskoeffizienten der Gesamtstichprobe noch dem Stichprobenumfang ein maßgeblicher Einfluss auf die Unterschreitungswahrscheinlichkeit zugemessen werden. Die Werte liegen allgemein in einem Intervall von ca. 55 % bis 95 % und im Mittel bei ca. 77 %. Aufgrund der jeweils sehr großen Stichprobenanzahl kann dieser Wert mit dem Konfidenzniveau gleichgesetzt werden. Somit kann bestätigt werden, dass eine Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* etwa zu den gleichen Werten führt wie eine Auswertung mit klassischen statistischen Verfahren und einem Konfidenzniveau $(1 - \alpha) = 0,75$.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine Auswertung mit einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* zu einer teilweise sehr großen Über- oder Unterschätzung der tatsächlichen charakteristischen Betondruckfestigkeit des untersuchten Betons führen kann. Bei großer Streuung und kleinem Stichprobenumfang können sogar mechanisch unplausible negative Werte entstehen. Für eine Erhöhung des Stichprobenumfangs konnte ein positiver Einfluss verzeichnet werden. Von der Verwendung einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* ohne weitere Einschränkungen, wie z. B. eine Begrenzung der Streuung, ist somit besonders bei kleinem Stichprobenumfang abzuraten.

5.3.2.2 Bestimmung von $f_{ck, is}$ nach DIN EN 1990– Logarithmische Normalverteilung

In Abb. 5.36 bis Abb. 5.45 sind die Ergebnisse der Bewertung der Teilstichproben mit einer logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* entsprechend Abschnitt 3.7.3 dargestellt. Da die logarithmische Normalverteilung per Definition keine negativen Werte annehmen kann, wurde der auf der Ordinate aufgetragene Wertebereich entsprechend angepasst.

Wie bereits für die Normalverteilung festgestellt, führt auch die Anwendung einer logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* zu einer sehr großen Streubreite der möglichen Ergebnisse (vgl. Abb. 5.36 bis Abb. 5.38). Aufgrund des Definitionsbereichs der logarithmischen Normalverteilung treten zwar keine negativen

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Werte mehr auf, dennoch streut das Verhältnis $f_{ck, is} / f_{ck, is, Grundgesamtheit}$ für $n = 3$ in einem Intervall von ca. 10 % bis 205 % bezogen auf den an der Gesamtstichprobe bestimmten tatsächlichen Wert der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit. Eine Erhöhung des Stichprobenumfangs führt wie bereits bei der Normalverteilung zu einer Reduzierung der Streubreite. Bei $n = 8$ streuen die Werte immer noch in einem Intervall von ca. 60 % bis 190 %. Eine Erhöhung des Stichprobenumfangs wirkt sich somit besonders auf die jeweiligen Mindestwerte aus, während der Einfluss auf die Maximalwerte als gering eingestuft werden kann.

Weiterhin steigt, wie schon bei der Normalverteilung festgestellt, mit zunehmender Streuung der Gesamtstichprobe die Streubreite der an den Teilstichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit stets an.

Im Mittel liegen die an den Teilstichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeiten in einem Intervall von ca. 75 % bis 100 % des an der Gesamtstichprobe bestimmten charakteristischen Wertes der In-situ-Betondruckfestigkeit. Mit ansteigendem Variationskoeffizienten der Gesamtstichprobe nimmt der Wert immer weiter ab. Umgekehrt liegen die Werte bei größerem Stichprobenumfang immer näher an dem tatsächlichen Wert.

Der in Abb. 5.39 bis Abb. 5.41 dargestellte Absolutwert der Abweichung zeigt ein ähnliches Verhalten. Auch hier führen eine Zunahme des Variationskoeffizienten der Gesamtstichprobe und eine Reduzierung des Stichprobenumfangs zu einem deutlichen Anstieg der möglichen Abweichungen. Bei $n = 3$ liegen die Abweichungen in einem Intervall von ca. -35 N/mm^2 bis $+45 \text{ N/mm}^2$ und bei $n = 8$ in einem Intervall von ca. -15 N/mm^2 bis $+25 \text{ N/mm}^2$. Im Mittel wird der tatsächliche Wert der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit bei $n = 3$ um bis zu -10 N/mm^2 unterschätzt. Bei $n = 8$ ist im Mittel kaum noch eine Abweichung zu dem tatsächlichen Wert der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit feststellbar.

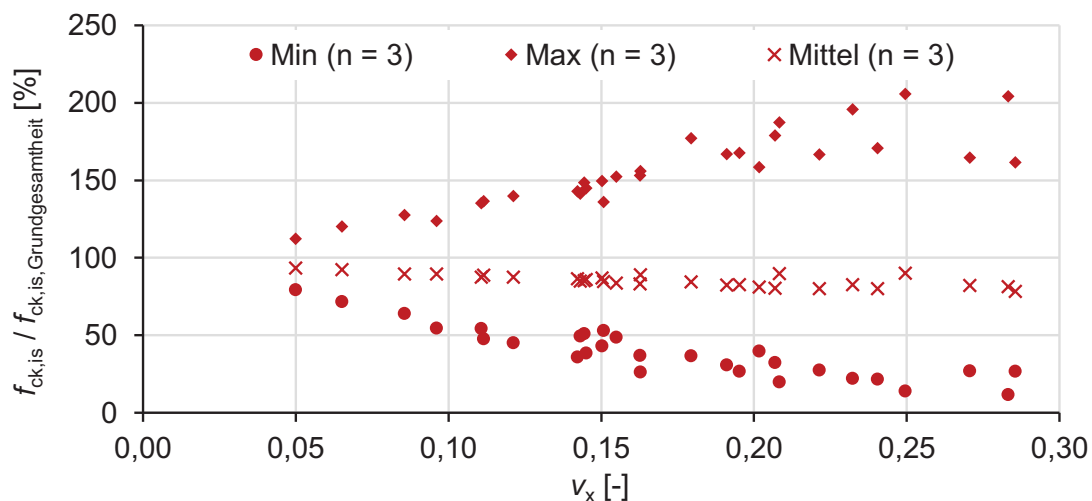


Abb. 5.36 Verhältnis zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – LNV und $n = 3$

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

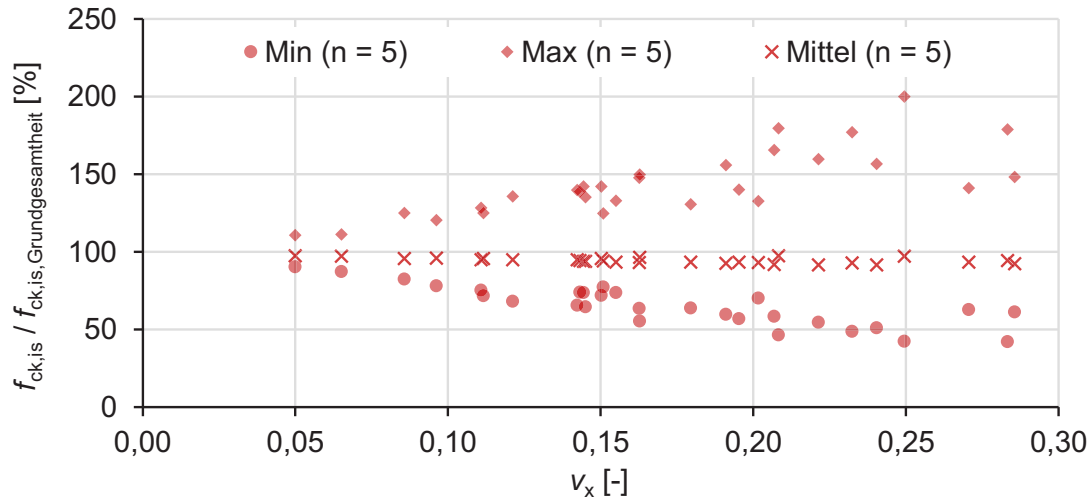


Abb. 5.37 Verhältnis zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – LNV und $n = 5$

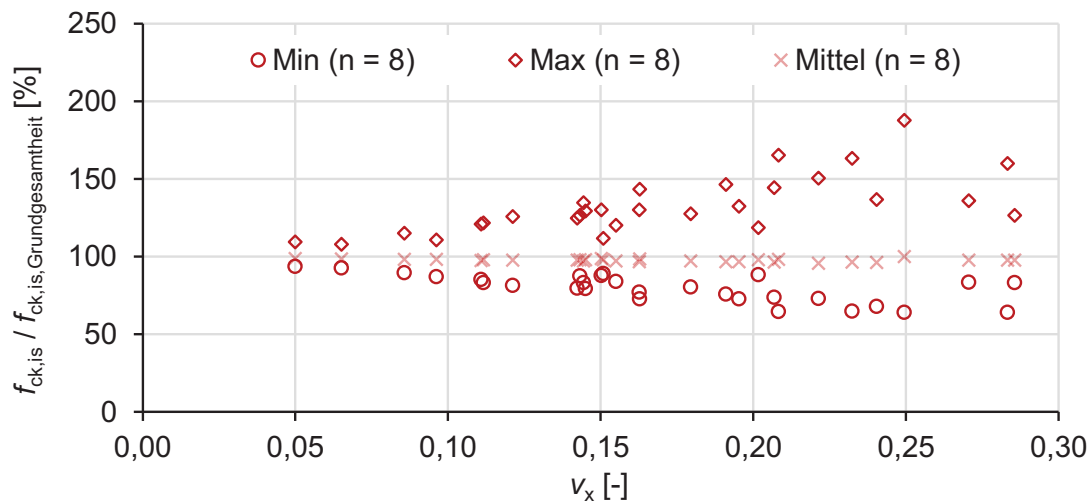


Abb. 5.38 Verhältnis zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – LNV und $n = 8$

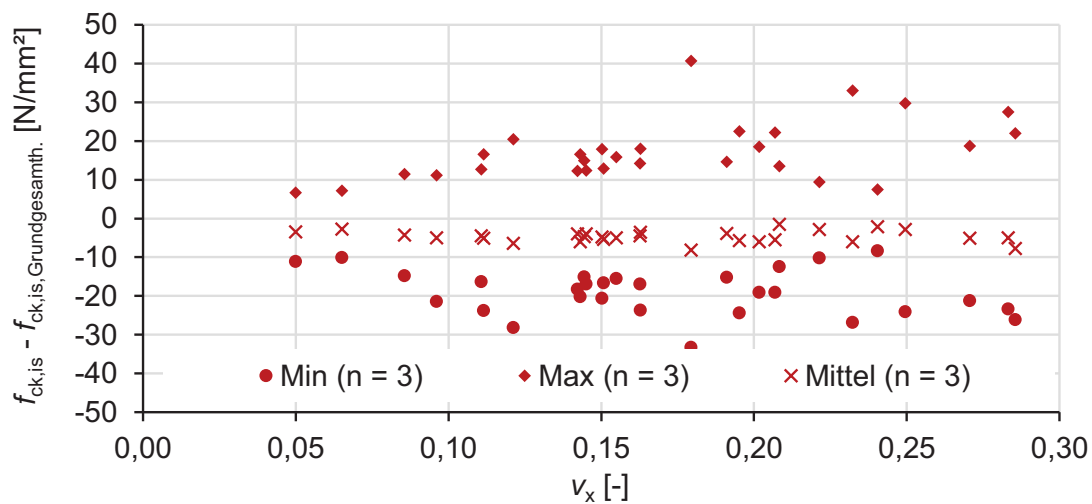


Abb. 5.39 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – LNV und $n = 3$ in Abhängigkeit von v_x

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

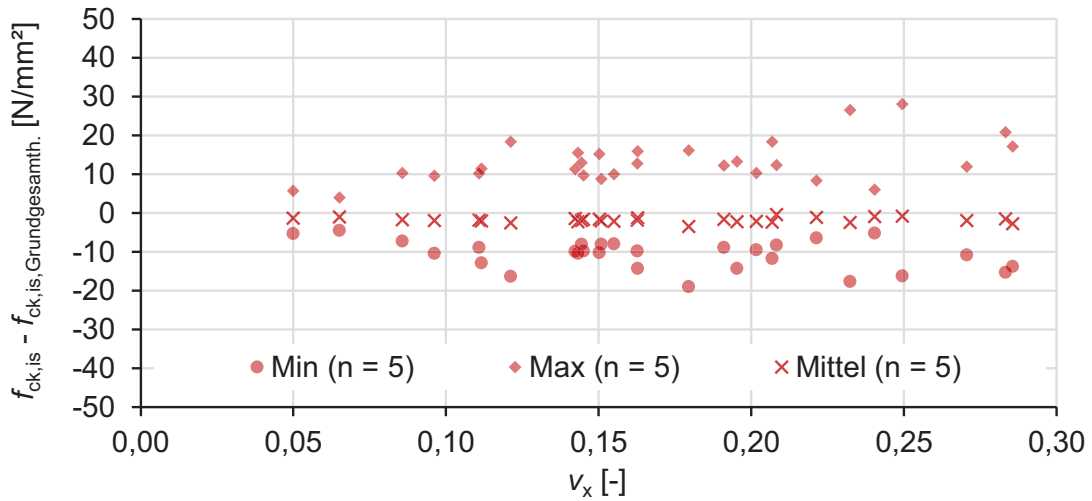


Abb. 5.40 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – LNV und $n = 5$ in Abhängigkeit von v_x

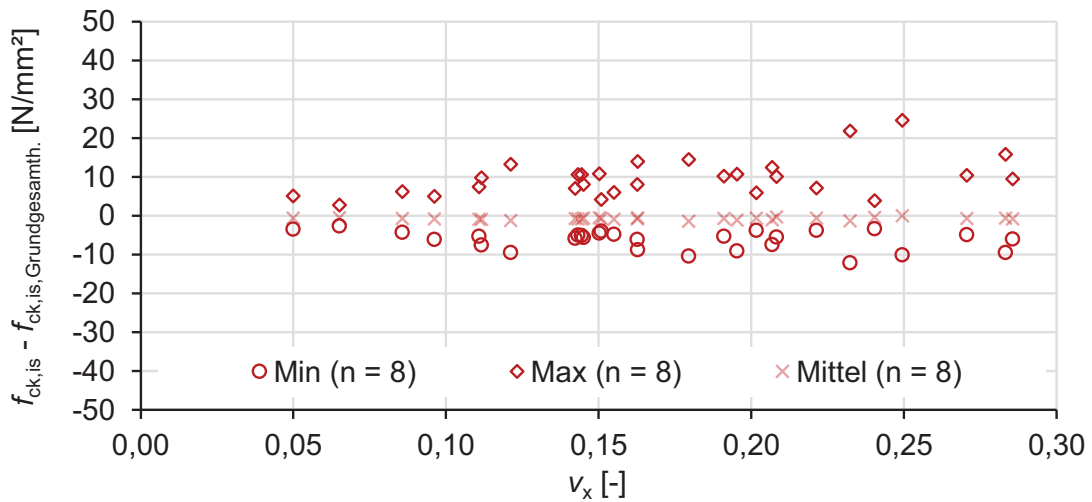


Abb. 5.41 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – LNV und $n = 8$ in Abhängigkeit von v_x

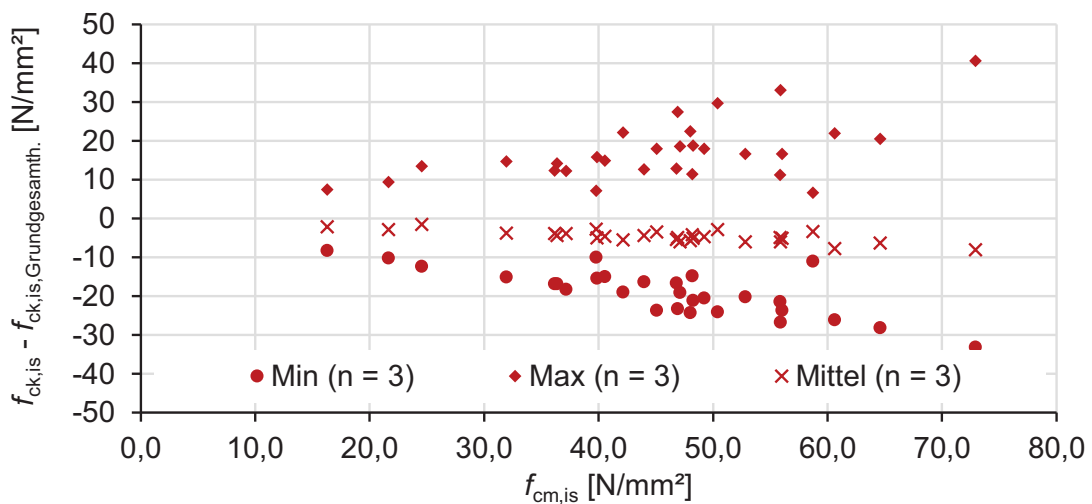


Abb. 5.42 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – LNV und $n = 3$ in Abhängigkeit von $f_{cm, is}$

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

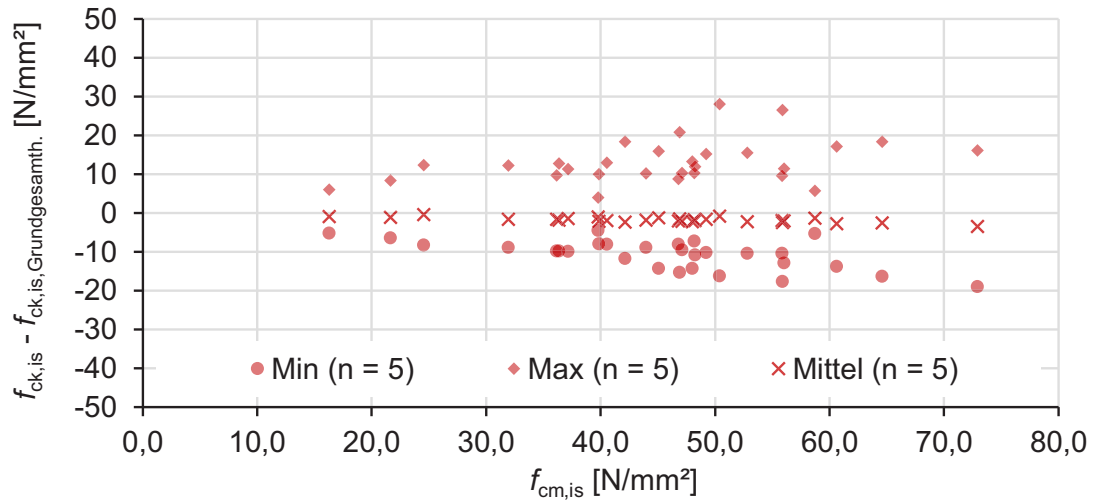


Abb. 5.43 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – LNV und $n = 5$ in Abhängigkeit von $f_{cm, is}$

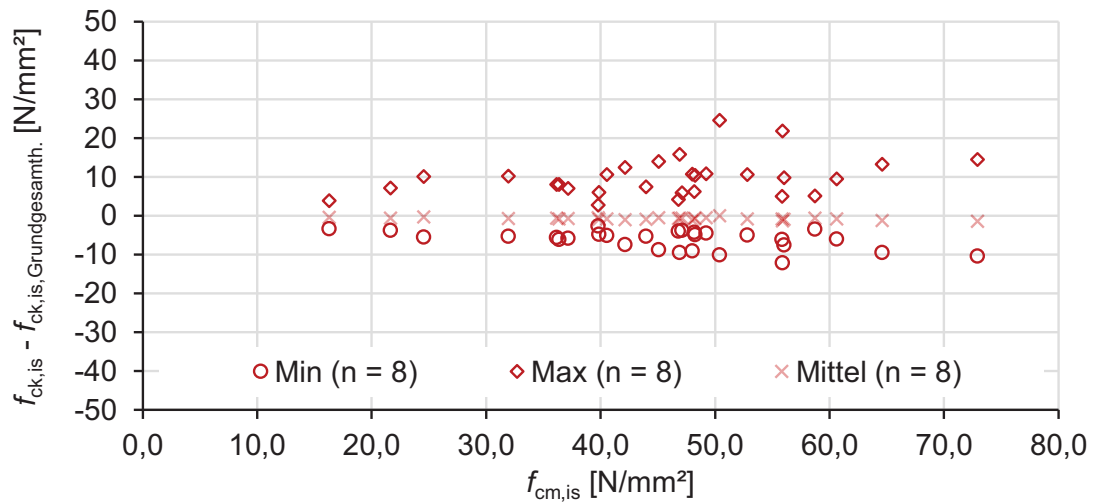


Abb. 5.44 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – LNV und $n = 8$ in Abhängigkeit von $f_{cm, is}$

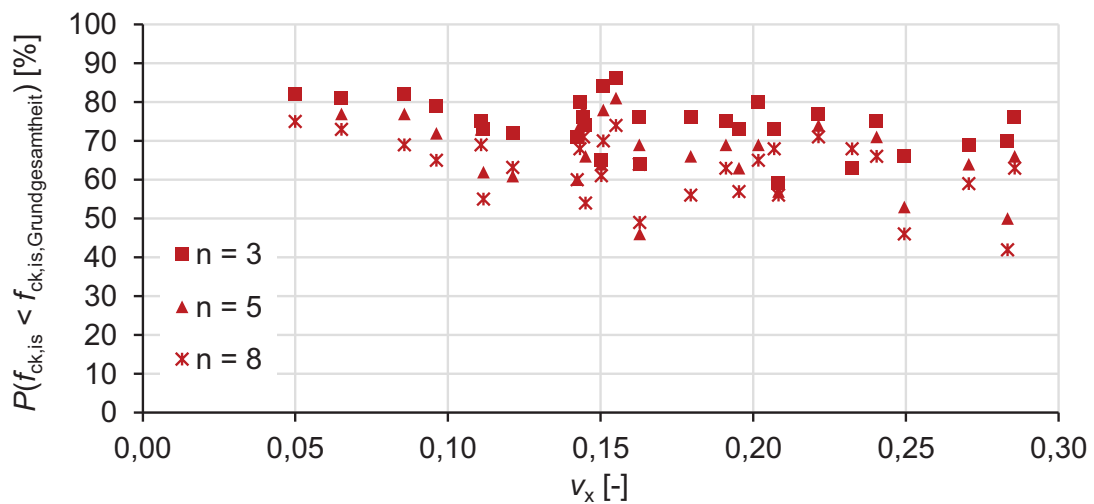


Abb. 5.45 Unterschreitungswahrscheinlichkeit bei Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit nach DIN EN 1990 – LNV

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Die in Abb. 5.42 bis Abb. 5.44 in Abhängigkeit vom Mittelwert der In-situ-Betondruckfestigkeit der Gesamtstichprobe aufgetragene Abweichung zeigt, dass große Differenzen tendenziell eher bei großem Mittelwert der In-situ-Betondruckfestigkeit auftreten.

Wie bereits bei der Normalverteilung, kann im Rahmen der hier betrachteten Untersuchungen auch bei einer logarithmischen Normalverteilung weder dem Variationskoeffizienten der Gesamtstichprobe noch dem Stichprobenumfang ein maßgeblicher Einfluss auf die Unterschreitungswahrscheinlichkeit zugemessen werden (vgl. Abb. 5.45). Die Werte liegen allgemein in einem Intervall von ca. 40 % bis 90 % und im Mittel bei ca. 68 %. Somit führt auch die logarithmische Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* zu einem vergleichbaren Konfidenzniveau wie eine Auswertung mit klassischen statistischen Verfahren mit $(1 - \alpha) = 0,75$.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine Auswertung mit einer logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* zu einer teilweise sehr großen Über- oder Unterschätzung der tatsächlichen charakteristischen Betondruckfestigkeit des untersuchten Betons führen kann. Im Vergleich zur Auswertung mit einer Normalverteilung ist die Abweichung nach unten insofern begrenzt, dass keine negativen Werte mehr auftreten können. Die maximal mit beiden Verfahren festgestellte Überschätzung unterscheidet sich kaum.

Eine Erhöhung des Stichprobenumfangs wirkt sich positiv auf die Streubreite aus. Von der Verwendung einer logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* ohne weitere Einschränkungen, wie z. B. eine Begrenzung der Streuung, ist somit besonders bei kleinem Stichprobenumfang ebenfalls abzuraten.

5.3.2.3 Bestimmung von $f_{ck, is}$ nach DIN EN 13791:2008 – Ansatz B

Bei Betrachtung der in Abb. II.30 bis II.58 dargestellten Ergebnisse fällt zunächst auf, dass bei einigen Datensätzen, wie z. B. bei dem in Abb. II.30 abgebildeten, an den Stichproben teilweise identische charakteristische Werte der In-situ-Betondruckfestigkeit ermittelt werden, welche in der grafischen Darstellung alle auf einer Linie liegen. Bei all diesen Werten war jeweils das Mindestwertkriterium nach Gleichung (3.9) maßgebend.

In Abb. 5.46 bis Abb. 5.55 sind die Ergebnisse der Bewertung der Teilstichproben mit Ansatz B nach *DIN EN 13791:2008-05* entsprechend Abschnitt 3.7.2 dargestellt. Der auf der Ordinate abgetragene Wertebereich wurde wie bereits bei der logarithmischen Normalverteilung gewählt.

Die mit Ansatz B nach *DIN EN 13791:2008-05* ermittelten Werte der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit streuen, wie Abb. 5.46 bis Abb. 5.48 zu entnehmen, für $n = 3$ in einem Intervall von ca. 40 % bis 250 % bezogen auf den an der Gesamtstichprobe bestimmten tatsächlichen Wert der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit. Bei $n = 8$ streuen die Werte immer noch in einem Intervall von ca. 65 % bis 200 %, womit festzustellen ist, dass eine Erhöhung des Stichprobenumfangs nur eine geringfügige Reduzierung der Streubreite mit sich bringt. Die Streubreite der Ergebnisse liegt in einem ähnlichen Bereich wie bei der Anwendung einer logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12*. Die

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

maximal beobachtete Überschätzung ist jedoch besonders bei kleinem Stichprobenumfang bei Ansatz B um ca. 50 % größer.

Weiterhin steigt, wie schon bei der Normal- und logarithmischen Normalverteilung festgestellt, mit zunehmender Streuung der Gesamtstichprobe die Streubreite der an den Teilstichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit an.

Im Mittel liegen die an den Teilstichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeiten in einem Intervall von ca. 85 % bis 145 % des an der Gesamtstichprobe bestimmten charakteristischen Wertes der In-situ-Betondruckfestigkeit. Mit ansteigendem Variationskoeffizienten der Gesamtstichprobe steigt der Wert immer weiter an. Bei Stichproben mit $n = 3$ ist die mittlere Abweichung am größten.

Der in Abb. 5.49 bis Abb. 5.51 dargestellte Absolutwert der Abweichung zeigt ein ähnliches Verhalten. Auch hier führt eine Zunahme des Variationskoeffizienten der Gesamtstichprobe zu einem deutlichen Anstieg der möglichen Abweichungen. Eine Erhöhung des Stichprobenumfangs bringt nur eine geringfügige Reduzierung der Streubreite mit sich. Die Abweichungen liegen in einem Intervall von ca. -10 N/mm^2 bis $+40 \text{ N/mm}^2$. Im Vergleich zur logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* wird somit zwar das Maß der möglichen Unterschreitung deutlich reduziert, das Maß der Überschreitung bleibt jedoch nahezu unverändert.

Im Mittel wird der tatsächliche Wert der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit unabhängig vom Stichprobenumfang um bis zu $+15 \text{ N/mm}^2$ überschätzt.

Die in Abb. 5.52 bis Abb. 5.54 in Abhängigkeit vom Mittelwert der In-situ-Betondruckfestigkeit der Gesamtstichprobe aufgetragene Abweichung macht deutlich, dass große Abweichungen besonders bei höherem Mittelwert der Gesamtstichprobe auftreten. Die Ursache hierfür liegt darin, dass durch die Verwendung einer konstanten, von der Streuung und vom Mittelwert unabhängigen Spanne k Betone mit höherer Festigkeit nur unzureichend genau beschrieben werden.

Dies wird an der in Tab. 5.4 dargestellten Vergleichsrechnung zwischen Ansatz B nach *DIN EN 13791:2008-05* (Gleichung (3.8)) und einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* (Gleichung (3.10)) deutlich. Das Mindestwertkriterium nach Gleichung (3.9) wird dabei nicht berücksichtigt. Es gilt somit der in Gleichung (5.4) beschriebene Zusammenhang.

$$k_n \cdot s_x = k \quad (5.4)$$

Die Spanne k deckt lediglich sehr kleine Werte der Standardabweichung ab. Bei $n = 3$ und einer mittleren Druckfestigkeit von 50 N/mm^2 führt die Spanne k zu einem vergleichbaren Wert wie eine Auswertung mit einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* und einem Variationskoeffizienten der Stichprobe $v_x = 0,04$. Die in Abb. 4.7 dargestellten Ergebnisse zeigen jedoch, dass auch bei größerem Mittelwert der In-situ-Betondruckfestigkeit teilweise deutlich höhere Werte des Variationskoeffizienten nicht auszuschließen sind.

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Tab. 5.4 Vergleichsrechnung zwischen Ansatz B nach *DIN EN 13791:2008-05* und Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12*

n	k	k_n	s_x
[-]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
3	7	3,37	2,1
7	6	2,08	2,9
10	5	1,92	2,6

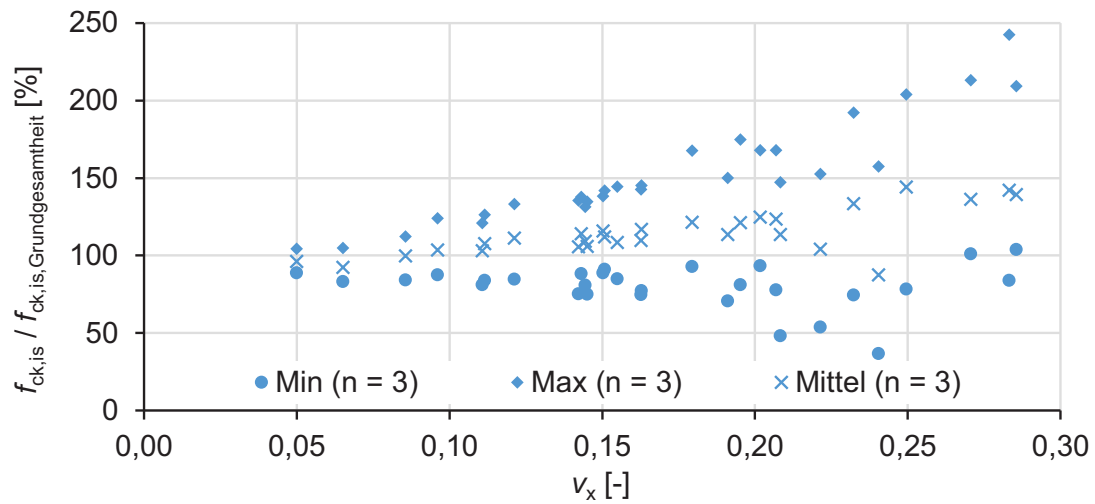


Abb. 5.46 Verhältnis zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für *DIN EN 13791* – Ansatz B und $n = 3$

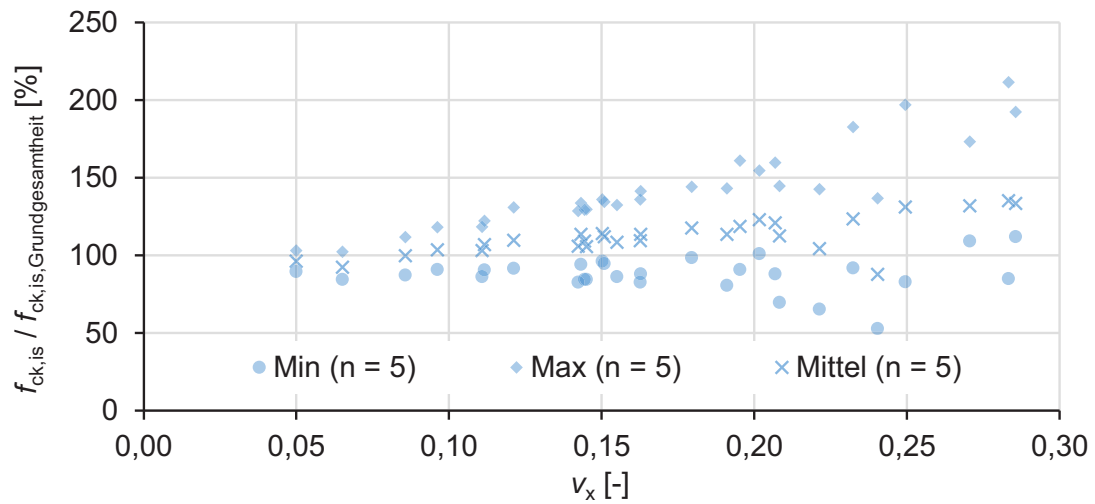


Abb. 5.47 Verhältnis zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für *DIN EN 13791* – Ansatz B und $n = 5$

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

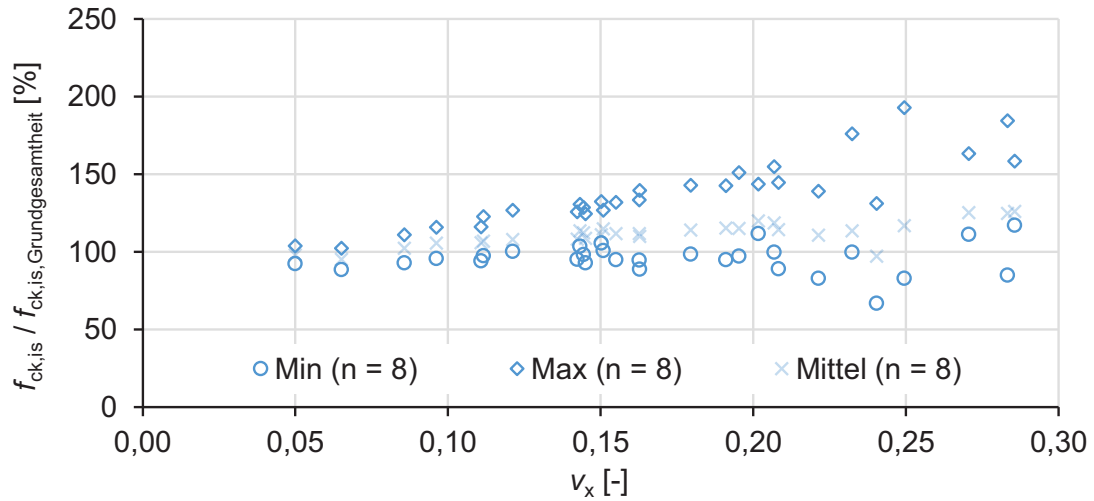


Abb. 5.48 Verhältnis zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 13791 – Ansatz B und $n = 8$

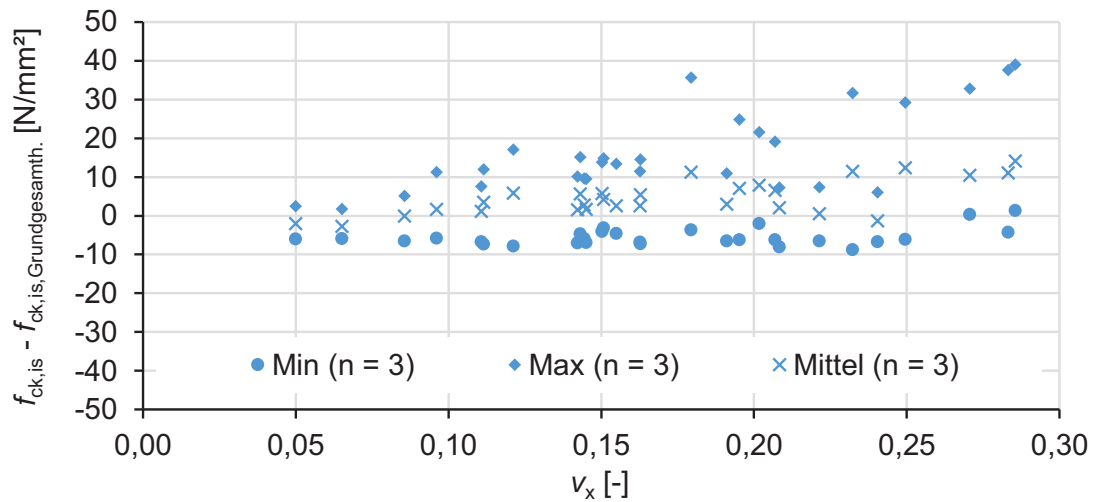


Abb. 5.49 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakt. In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 13791 – Ansatz B und $n = 3$ in Abhängigkeit von v_x

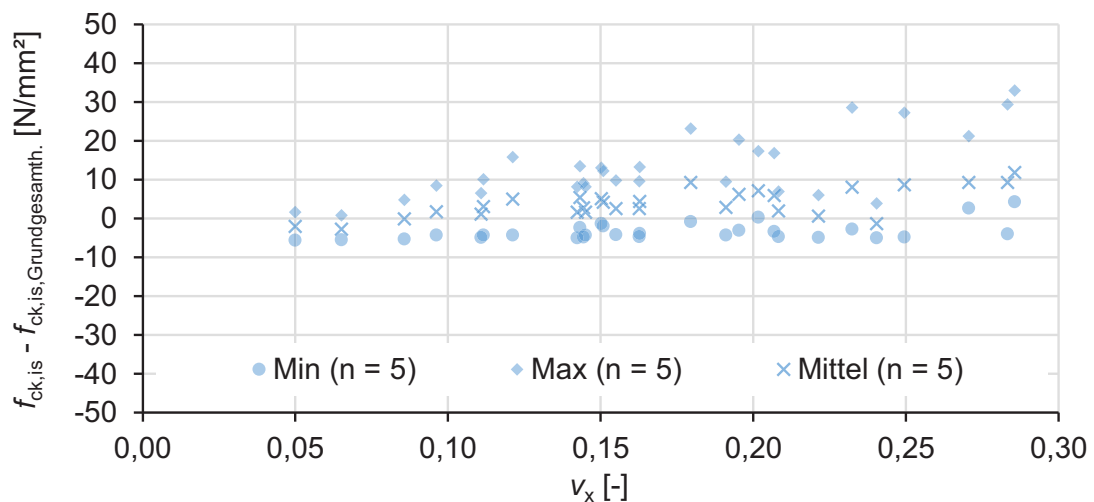


Abb. 5.50 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakt. In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 13791 – Ansatz B und $n = 5$ in Abhängigkeit von v_x

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

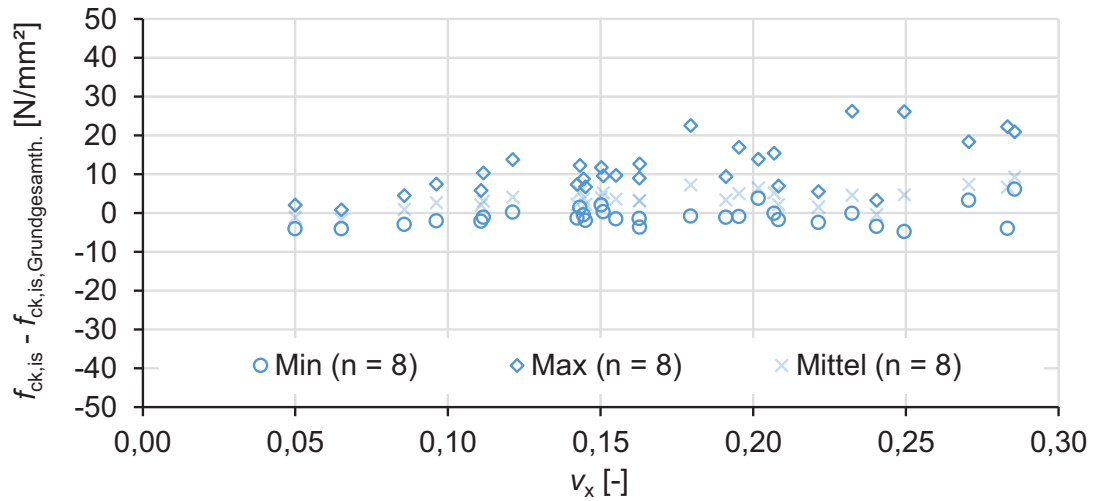


Abb. 5.51 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakt. In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 13791 – Ansatz B und $n = 8$ in Abhängigkeit von v_x

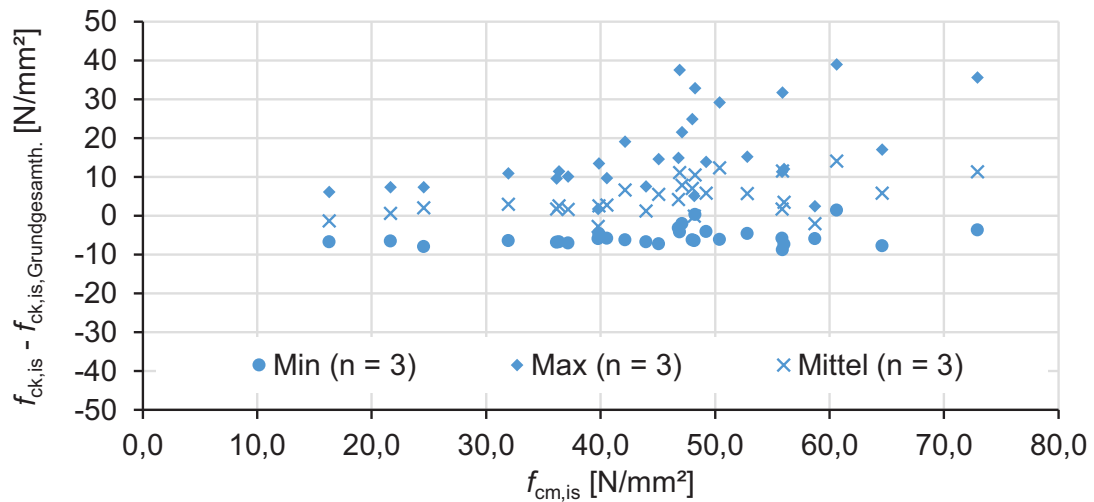


Abb. 5.52 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakt. In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 13791 – Ansatz B und $n = 3$ in Abhängigkeit von $f_{cm, is}$

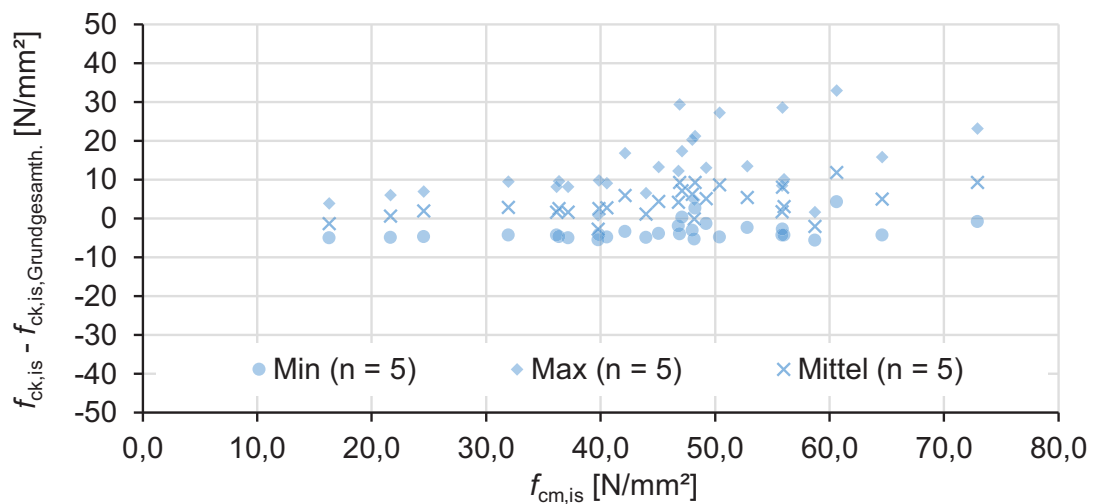


Abb. 5.53 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakt. In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 13791 – Ansatz B und $n = 5$ in Abhängigkeit von $f_{cm, is}$

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

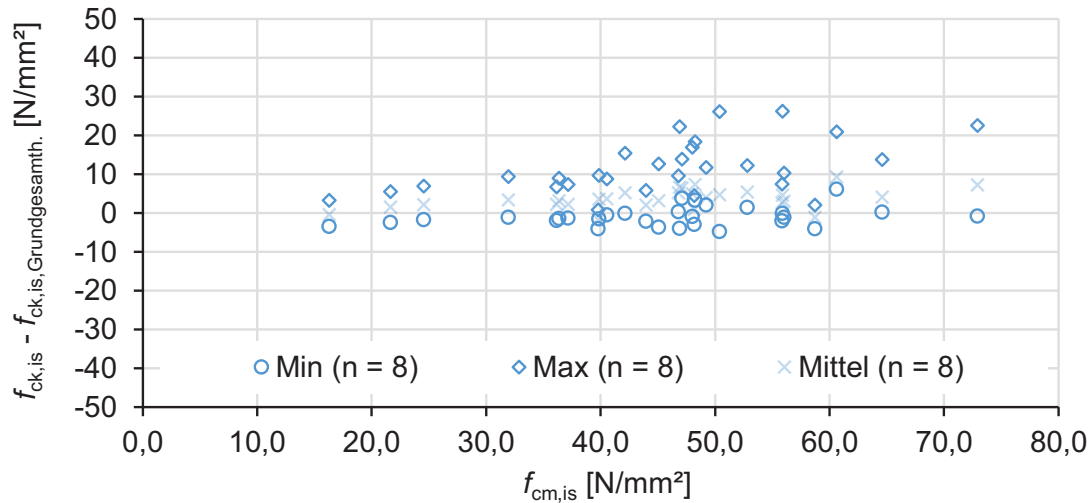


Abb. 5.54 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakt. In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 13791 – Ansatz B und $n = 8$ in Abhängigkeit von $f_{cm, is}$

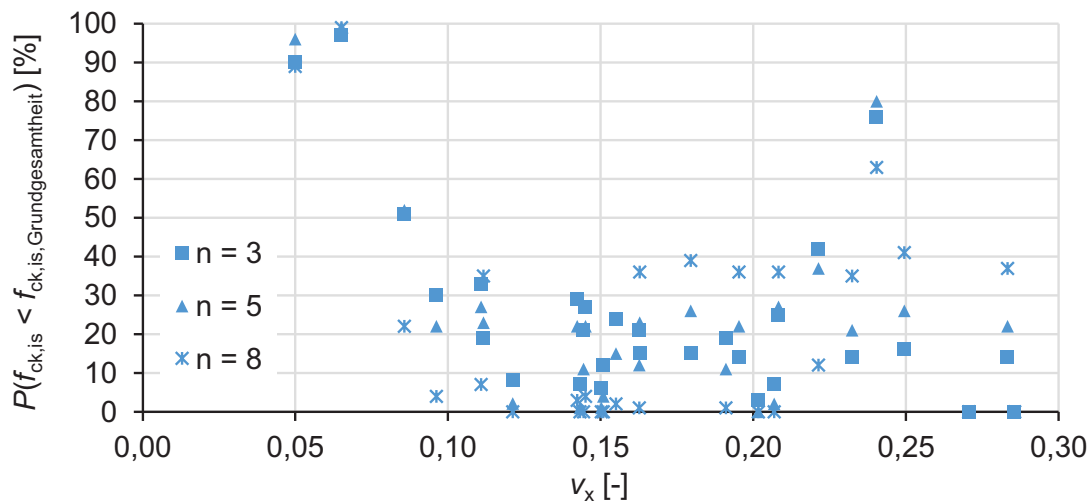


Abb. 5.55 Unterschreitungswahrscheinlichkeit bei Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit nach DIN EN 13791 – Ansatz B

Die in Abb. 5.55 dargestellte Unterschreitungswahrscheinlichkeit streut in einem sehr großen Bereich. Die Werte liegen in einem Intervall von ca. 0 bis 100 %. Dies bedeutet, dass teilweise alle an den Teilstichproben ermittelten Werte der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit größer sind, als der tatsächliche Wert der zugehörigen Gesamtstichprobe. Ein Großteil der Werte liegt zwischen 0 % und 40 %. Größere Werte der Unterschreitungswahrscheinlichkeit konnten nur in Ausnahmefällen festgestellt werden. Weder dem Variationskoeffizienten der Gesamtstichprobe noch dem Stichprobenumfang kann ein maßgeblicher Einfluss auf die Unterschreitungswahrscheinlichkeit zugeordnet werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Ansatz B nach *DIN EN 13791:2008-05* im Vergleich der bisher gebräuchlichen Verfahren zu der größten mittleren Überschätzung führt. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnten mittlere Überschätzungen von bis zu 15 N/mm² beobachtet werden. Einzelwerte können den tatsächlichen Wert der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

sogar um bis zu 40 N/mm² überschätzen. Eine Erhöhung des Stichprobenumfangs führt nur zu einer geringfügigen Reduzierung der Abweichung.

Von der Verwendung von Ansatz B nach *DIN EN 13791:2008-05* zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit für die Nachrechnung bestehender Massivbauwerke ist somit abzuraten, da im Einzelfall sehr große und somit im Hinblick auf die Zuverlässigkeit auch kritische Überschätzungen der tatsächlichen charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit nicht ausgeschlossen werden können.

5.3.3 Bauartenspezifische Verfahren nach BAW und Nachrechnungsrichtlinie

5.3.3.1 Bestimmung von $f_{ck, is}$ nach BAW

Über die in Abschnitt 5.3.2 beschriebenen Verfahren hinaus wurde von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) ein eigens für die Bewertung bestehender, massiver Wasserbauwerke konzipiertes Auswerteverfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit entwickelt (vgl. Abschnitt 3.7.7). Das Vorgehen entspricht der Anwendung einer logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12*, jedoch unter Berücksichtigung eines Zielwertes des Konfidenzniveaus von 95 %, was sich in erhöhten k_n -Werten widerspiegelt. Während zwar ein Mindeststichprobenumfang $n = 8$ empfohlen wird, sind dennoch die Werte für k_n bereits ab $n = 3$ angegeben, weshalb auch nachfolgend eine Bewertung des genannten Verfahrens ab $n = 3$ erfolgt.

In Abb. 5.56 bis Abb. 5.65 sind die Ergebnisse der Bewertung der Teilstichproben mit dem in *BAW 2016* enthaltenen Verfahren dargestellt. Der auf der Ordinate abgetragene Wertebereich wurde wie bei der logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* gewählt.

Die Anwendung des in *BAW 2016* beschriebenen Verfahrens führt zu einer sehr großen Streubreite der möglichen Ergebnisse (vgl. Abb. 5.56 bis Abb. 5.58). Für $n = 3$ liegen die Werte in einem Intervall von ca. 0 % bis 200 % bezogen auf den an der Gesamtstichprobe bestimmten tatsächlichen Wert der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit. Eine Erhöhung des Stichprobenumfangs führt wie bereits bei der logarithmischen Normalverteilung zu einer Reduzierung der Streubreite. Bei $n = 8$ streuen die Werte immer noch in einem Intervall von ca. 35 % bis 175 %.

Im Vergleich zur logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* steigt somit das Maß der maximal beobachteten Unterschreitung leicht an und das Maß der maximal beobachteten Überschreitung wird geringfügig reduziert.

Ein Anstieg des Variationskoeffizienten der Gesamtstichprobe führt zu einer Erhöhung der Streubreite der an den Teilstichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit.

Im Mittel liegen die an den Teilstichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeiten in einem Intervall von ca. 40 % bis 95 % des an der Gesamtstichprobe bestimmten charakteristischen Wertes der In-situ-Betondruckfestigkeit und damit auf einem deutlich geringeren Niveau als bei der

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Auswertung mit einer logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* mit den dort angegebenen k_n -Werten. In diesem Zusammenhang ist jedoch zu beachten, dass der hier als Vergleichsgröße verwendete charakteristische Wert der In-situ-Betondruckfestigkeit der Gesamtstichprobe basierend auf einer logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* mit den in Tab. 3.4 genannten k_n -Werten und nicht mit den in Tab. 3.7 für ein Konfidenzniveau von 95 % aufgeführten Werten berechnet wurde.

Mit ansteigendem Variationskoeffizienten der Gesamtstichprobe nimmt das Verhältnis zwischen der an der Stichprobe geschätzten und der an der Gesamtstichprobe bestimmten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit im Mittel immer kleinere Werte an. Umgekehrt liegen die Werte bei größerem Stichprobenumfang immer näher an dem tatsächlichen Wert.

Der Absolutwert der Abweichung zeigt ein ähnliches Verhalten (vgl. Abb. 5.59 bis Abb. 5.61). Auch hier führen eine Zunahme des Variationskoeffizienten der Gesamtstichprobe und eine Reduzierung des Stichprobenumfangs zu einem deutlichen Anstieg der möglichen Abweichungen. Bei $n = 3$ liegen die Abweichungen in einem Intervall von ca. -50 N/mm^2 bis $+40 \text{ N/mm}^2$ und bei $n = 8$ in einem Intervall von ca. -25 N/mm^2 bis $+20 \text{ N/mm}^2$. Im Vergleich zur logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* steigt somit die maximal beobachtete Unterschreitung an und die Überschreitung wird geringfügig reduziert. Im Mittel wird der tatsächliche Wert der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit bei $n = 3$ um bis zu 25 N/mm^2 und bei $n = 8$ um bis zu 10 N/mm^2 unterschätzt. Die mittlere Unterschätzung ist somit deutlich größer als bei der logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12*.

Große Differenzen treten tendenziell eher bei großem Mittelwert der In-situ-Betondruckfestigkeit auf (vgl. Abb. 5.62 bis Abb. 5.64).

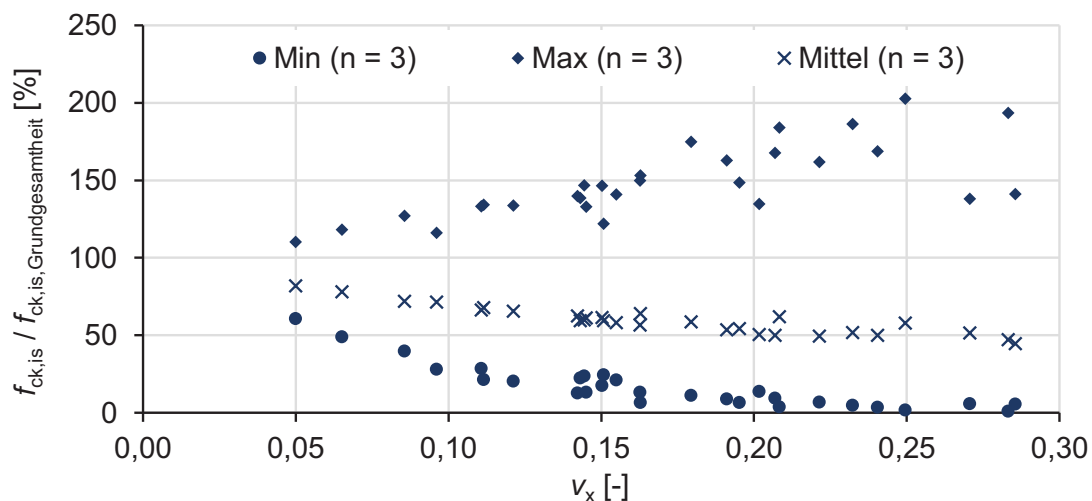


Abb. 5.56 Verhältnis zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für BAW TbW und $n = 3$

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

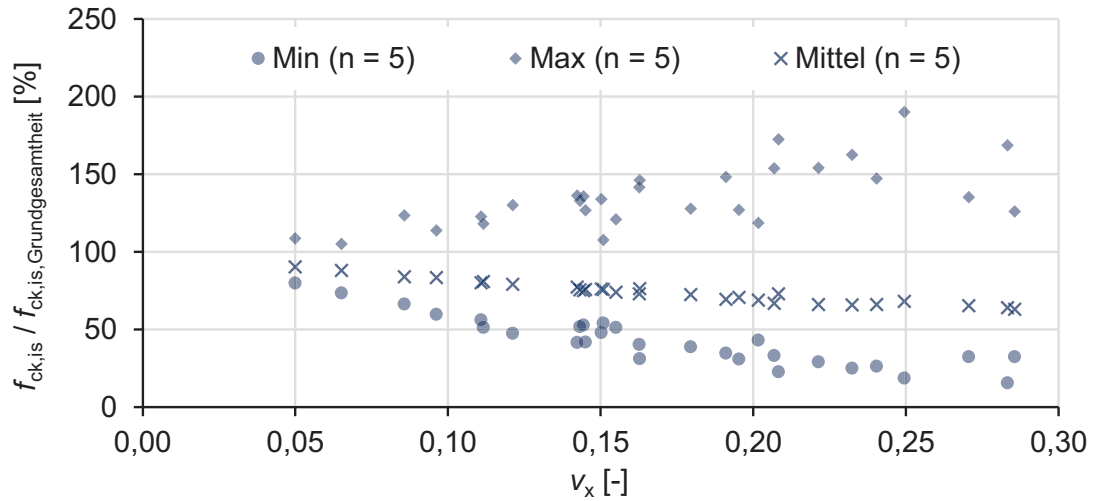


Abb. 5.57 Verhältnis zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für BAW TbW und $n = 5$

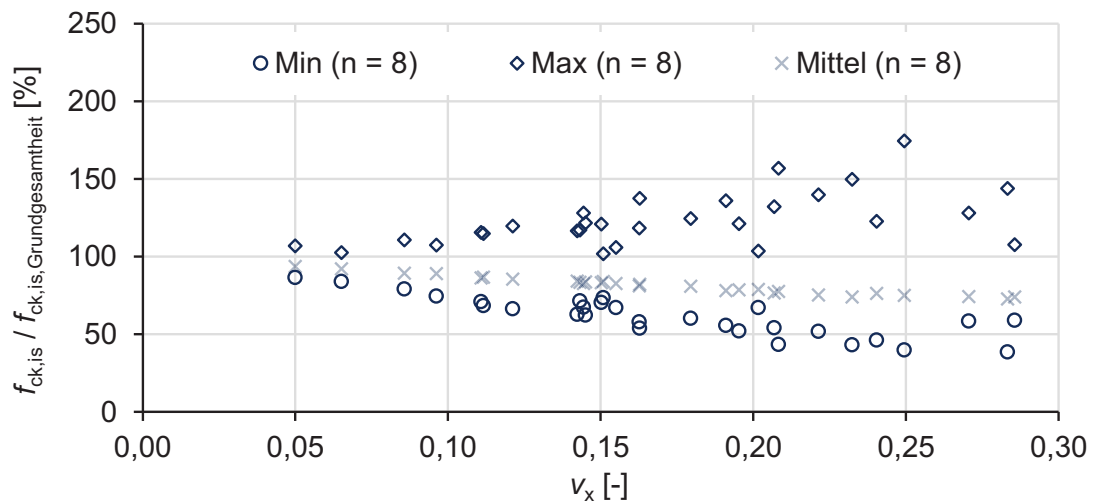


Abb. 5.58 Verhältnis zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für BAW TbW und $n = 8$

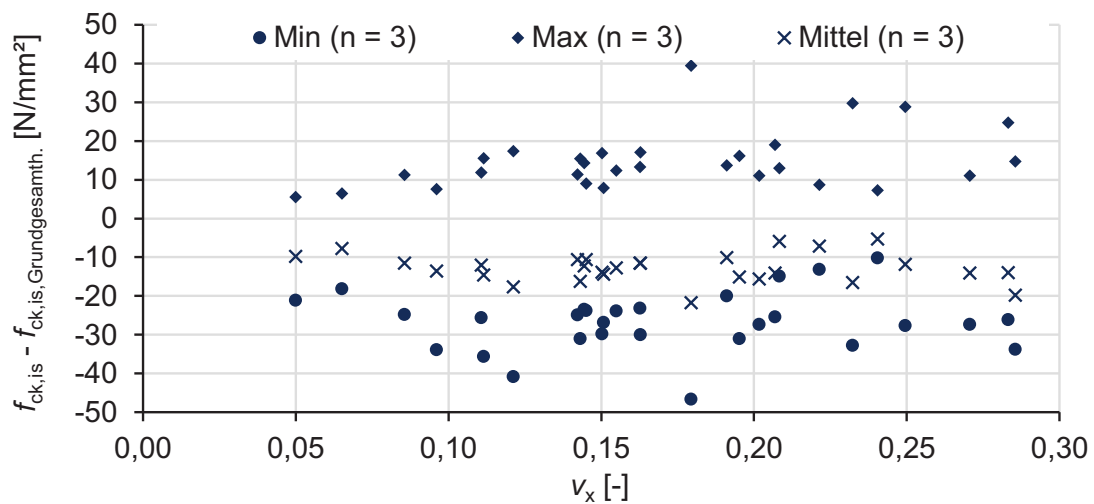


Abb. 5.59 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für BAW TbW und $n = 3$ in Abhängigkeit von v_x

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

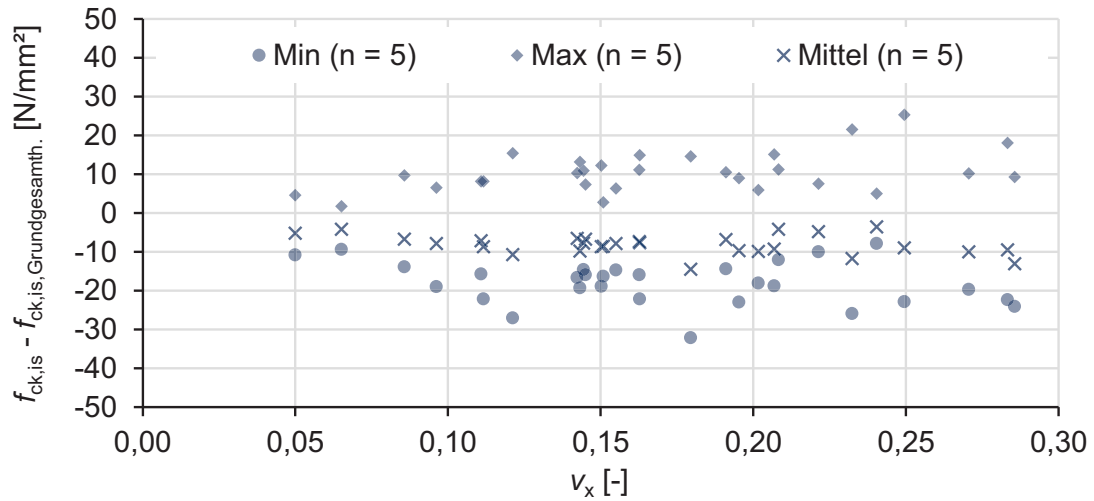


Abb. 5.60 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für BAW TbW und $n = 5$ in Abhängigkeit von v_x

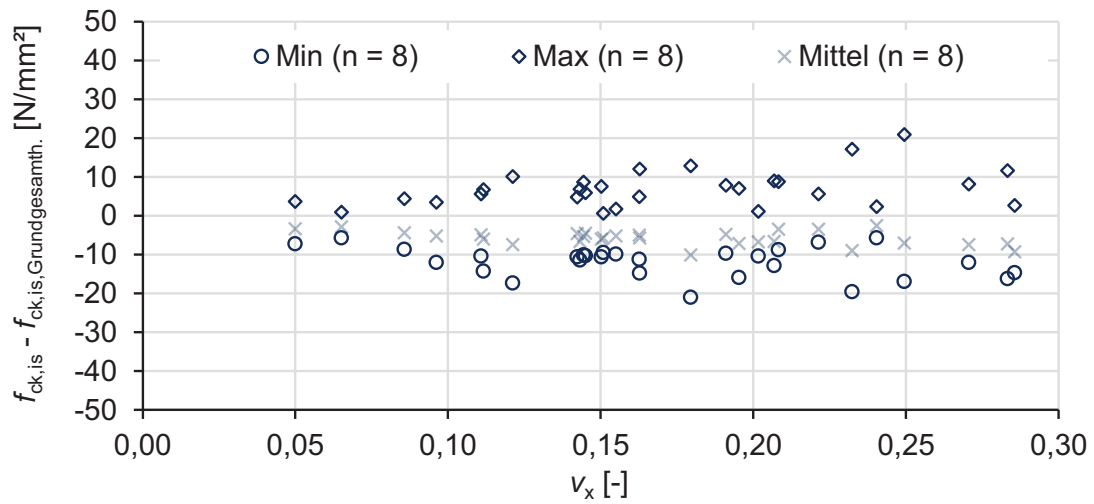


Abb. 5.61 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für BAW TbW und $n = 8$ in Abhängigkeit von v_x

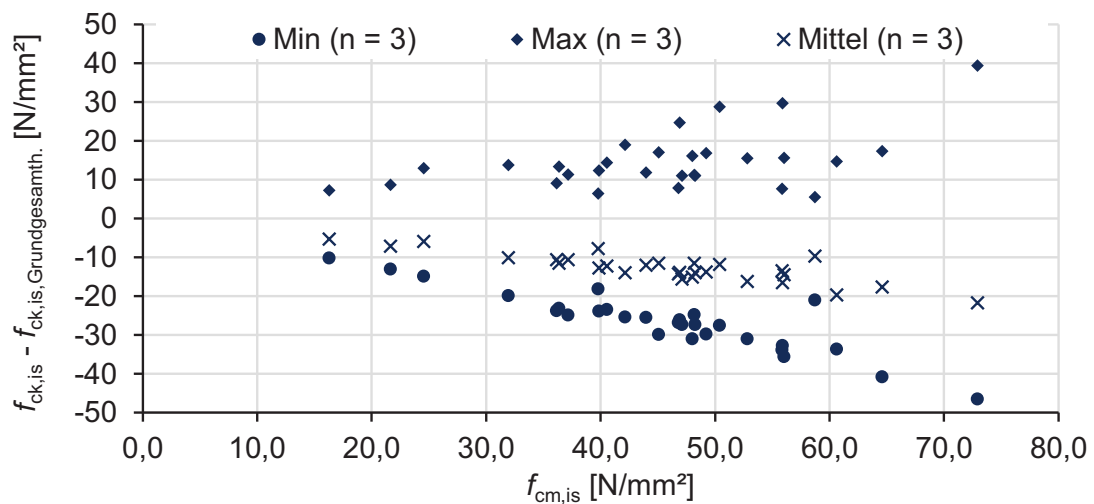


Abb. 5.62 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für BAW TbW und $n = 3$ in Abhängigkeit von $f_{cm, is}$

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

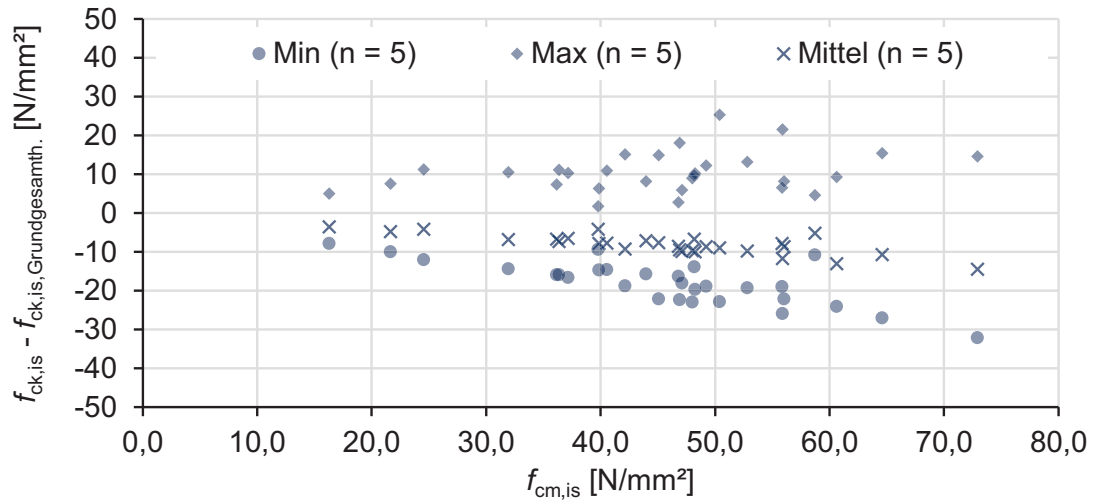


Abb. 5.63 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für BAW TbW und $n = 5$ in Abhängigkeit von $f_{cm, is}$

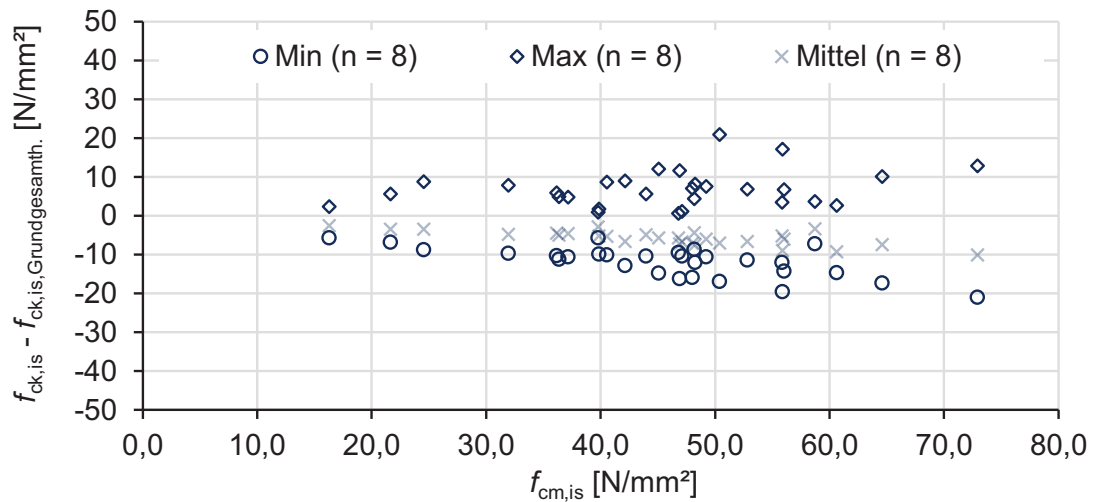


Abb. 5.64 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für BAW TbW und $n = 8$ in Abhängigkeit von $f_{cm, is}$

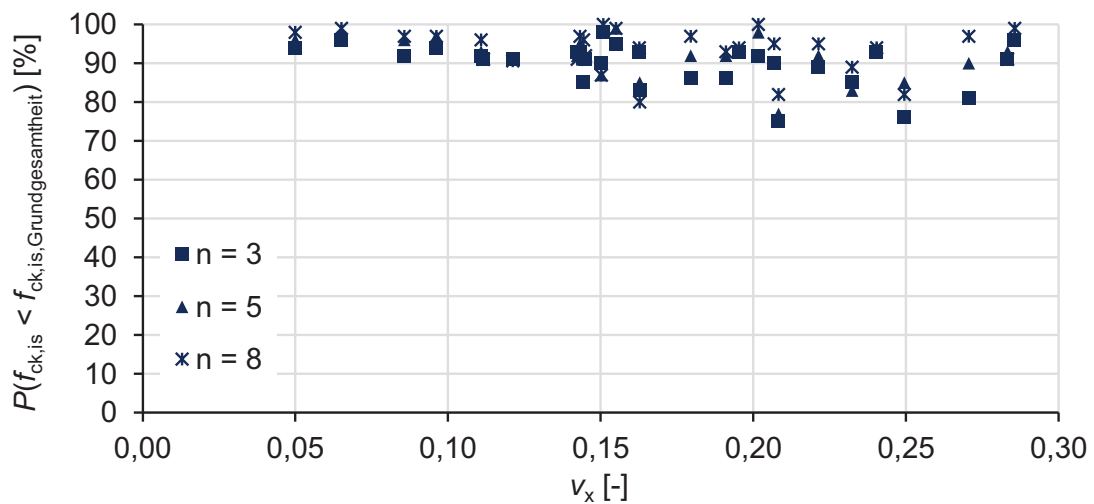


Abb. 5.65 Unterschreitungswahrscheinlichkeit bei Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit nach BAW TbW

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Die Unterschreitungswahrscheinlichkeit liegt wie in Abb. 5.65 beschrieben in einem Intervall von ca. 75 bis 100 % und im Mittel bei ca. 91 % womit im Vergleich zur logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* deutlich höhere Werte erreicht werden. Weder der Variationskoeffizient der Gesamtstichprobe noch der Stichprobenumfang haben dabei einen maßgeblichen Einfluss.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit dem in *BAW 2016* enthaltenen Verfahren die Streubreite der möglichen Ergebnisse im Vergleich zu einer logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* nahezu unverändert bleibt. Es erfolgt lediglich eine leichte Verschiebung des möglichen Wertebereichs. Das Maß der Überschreitung wird leicht reduziert während die Unterschreitung leicht zunimmt. Trotz der Erhöhung des Zielwertes des Konfidenzniveaus können auch sehr große, für die Nachrechnung bestehender Bauwerke als kritisch einzustufende Abweichungen nicht ausgeschlossen werden.

Von der Verwendung des in *BAW 2016* empfohlenen Verfahrens ist somit besonders bei kleinem Stichprobenumfang ebenfalls abzuraten.

5.3.3.2 Bestimmung von $f_{ck, is}$ nach Nachrechnungsrichtlinie

Das in *Nachrechnungsrichtlinie 2011* für die Bestimmung charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeiten zur Nachrechnung bestehender Straßenbrücken empfohlene Verfahren entspricht, unter Berücksichtigung eines Mindeststichprobenumfangs $n = 5$, einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12*.

Die Streubreite der möglichen Ergebnisse kann somit Abschnitt 5.3.2.1 entnommen werden.

5.3.4 Weiterentwicklung bestehender Verfahren

5.3.4.1 Allgemeines

Die in Abschnitt 5.3.2 und 5.3.3 beschriebenen Untersuchungen zeigen, dass für keines der betrachteten Verfahren eine uneingeschränkte Anwendungsempfehlung zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit für eine zuverlässigkeitsorientierte Nachrechnung ausgesprochen werden kann.

Bei Anwendung der Normal- oder logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* führt eine Erhöhung des Stichprobenumfangs zu einer deutlichen Reduzierung der Streubreite der möglichen Ergebnisse. Die Empfehlung eines Mindeststichprobenumfangs $n = 8$ oder größer ist zwar sinnvoll, stellt jedoch eine nur bedingt praxistaugliche Lösung dar. In vielen Fällen ist aus statisch-konstruktiven oder vermeintlich wirtschaftlichen Gründen die verfügbare Probekörperanzahl meist geringer.

Darüber hinaus zeigen die durchgeführten Untersuchungen, dass bei Anwendung einer Normal- oder logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* große Abweichungen - besonders bei großer Streuung der Gesamtstichprobe - auftreten.

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Verfahren wie z. B. der in *DIN EN 13791:2008-05* enthaltene Ansatz B, bei denen der charakteristische Wert der In-situ-Betondruckfestigkeit aus der Differenz zwischen dem Mittelwert und einer konstanten Spanne k berechnet wird, erscheinen basierend auf den durchgeführten Untersuchungen ungeeignet, da der Mittelwert und die Streuung der betrachteten Gesamtheit nicht berücksichtigt werden können. Deshalb werden derartige Ansätze in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Mit dem Ziel, die Streubreite der möglichen Ergebnisse zu reduzieren, wird nachfolgend der Einfluss einer Begrenzung der Streuung der Stichprobe untersucht. Für die Begrenzung der Streuung wird zunächst der Einfluss einer konstanten, d. h. nicht von der Druckfestigkeit abhängigen, Mindeststandardabweichung $s_{x,\min} = 3,0 \text{ N/mm}^2$, welche im Rahmen der Fortschreibung der EN 13791 diskutiert wurde, bei Auswertung unter Zugrundelegung einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* betrachtet. Der Mindestwert wird insofern berücksichtigt, als entweder der an der Stichprobe ermittelte Wert oder der geforderte Mindestwert verwendet werden. Der größere Wert wird dabei maßgebend. Das Vorgehen entspricht dem im Rahmen der Überarbeitung der *EN 13791:2007* diskutierten Verfahren nach *CEN - N102*, wobei das dort empfohlene Mindestwertkriterium entsprechend Gleichung (3.9) nicht berücksichtigt wurde.

Darüber hinaus wird auch der Einfluss einer prozentualen Begrenzung der Streuung über einen Mindestwert des Variationskoeffizienten $v_{x,\min} = 0,08$ bei Auswertung mit einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* untersucht. Der Mindestwert wird insofern berücksichtigt, dass entweder der an der Stichprobe ermittelte Wert oder der geforderte Mindestwert verwendet werden. Der größere Wert wird dabei maßgebend. Zusätzlich wird der Einfluss eines Höchstwertes des Variationskoeffizienten $v_{x,\max} = 0,20$, welcher in Anlehnung an die im Hochbau üblichen Werte des Variationskoeffizienten nach Abb. 4.11 gewählt wurde, betrachtet.

Der Höchstwert des Variationskoeffizienten wird insofern berücksichtigt, als Stichproben mit einem Variationskoeffizienten größer als 0,20 von der Auswertung ausgeschlossen werden. Bei solchen Stichproben mit untypisch hoher Streuung empfiehlt sich eine umfassende Überprüfung aller Einzelwerte auf Zugehörigkeit zu einer Grundgesamtheit, wie z. B. in Kapitel 3 beschrieben. Zusätzlich kann eine mathematische Überprüfung im Hinblick auf Ausreißer entsprechend Kapitel 6 zielführend sein. Darüber hinaus sollte in solchen Fällen nach Möglichkeit die Probekörperanzahl erhöht werden, um die statistische Belastbarkeit der Untersuchung zu erhöhen.

Ist zwar eine Erhöhung des Stichprobenumfangs nicht möglich aber eine Vermischung verschiedener Grundgesamtheiten kann ausgeschlossen werden, so führt eine Auswertung mit einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* zu sehr kleinen und auf der sicheren Seite liegenden charakteristischen Werten der In-situ-Betondruckfestigkeit.

5.3.4.2 Bestimmung von $f_{ck, is}$ nach DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,\min} = 3,0 \text{ N/mm}^2$

Im Vergleich zur Auswertung mit einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* ohne Begrenzung der Streuung zeigen die in Abb. 5.66 bis Abb. 5.75 dargestellten

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Ergebnisse zunächst, dass der Mindestwert der Standardabweichung lediglich das Maß der Überschreitung reduziert. Das Maß der Unterschreitung bleibt unverändert.

Das in Abb. 5.66 bis Abb. 5.68 aufgeführte Verhältnis zwischen dem an der Stichprobe bestimmten und dem tatsächlichen Wert der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit der Gesamtstichprobe zeigt zunächst, dass die Begrenzung der Streuung über $s_{x,\min} = 3,0 \text{ N/mm}^2$ lediglich bei kleinem Stichprobenumfang und kleinem Variationskoeffizienten der betrachteten Grundgesamtheit wirksam ist. Bei dem untersuchten Stichprobenumfang $n = 8$ ist die Mindeststandardabweichung kaum noch wirksam.

Die in Abb. 5.69 bis Abb. 5.71 dargestellte Abweichung zwischen dem an der Stichprobe bestimmten und dem tatsächlichen Wert der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit der Gesamtstichprobe zeigt ein ähnliches Verhalten. Auch hier wird der Mindestwert der Standardabweichung $s_{x,\min} = 3,0 \text{ N/mm}^2$ besonders bei kleinem Stichprobenumfang und kleinem Variationskoeffizienten der betrachteten Grundgesamtheit wirksam. Die maximal beobachtete Überschätzung wird teilweise um ca. 10 N/mm^2 , was etwa dem Produkt aus $s_{x,\min} = 3 \text{ N/mm}^2$ und dem Faktor k_n , welcher für $n = 3$ den Wert 3,37 annimmt, reduziert. Bei $n = 8$ ist nur noch eine sehr geringfügige Auswirkung feststellbar.

Eine deutliche Abhängigkeit zwischen dem Mittelwert der In-situ-Betondruckfestigkeit der Gesamtstichprobe und der Auswirkung der Mindeststandardabweichung kann nicht beobachtet werden (vgl. Abb. 5.72 bis Abb. 5.74).

Die Unterschreitungswahrscheinlichkeit liegt, wie in Abb. 5.75 beschrieben, in einem Intervall von ca. 55 % bis 100 % und im Mittel bei ca. 80 %. Auch hier wirkt sich die Mindeststandardabweichung im Vergleich zu einer Auswertung mit einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* hauptsächlich bei kleinem Stichprobenumfang aus.

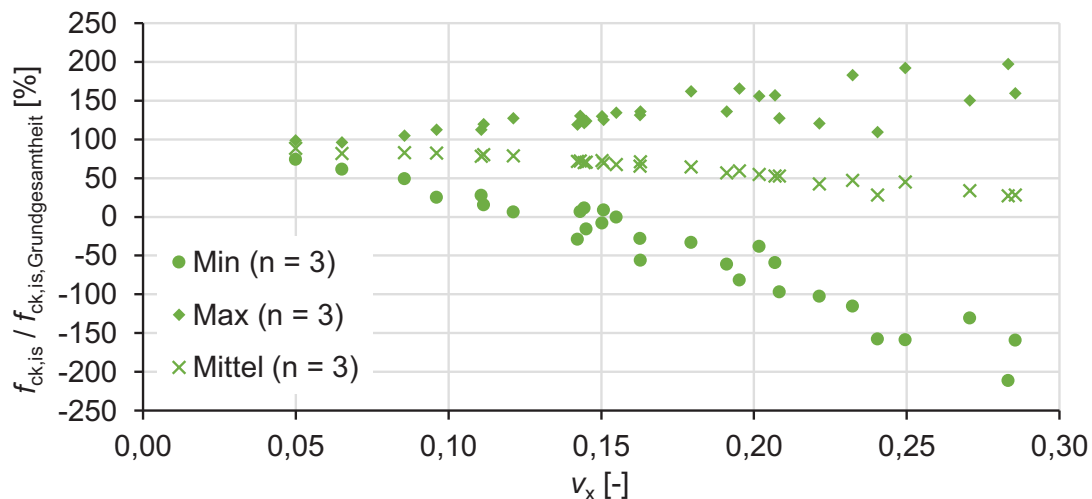


Abb. 5.66 Verhältnis zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,\min}$ und $n = 3$

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

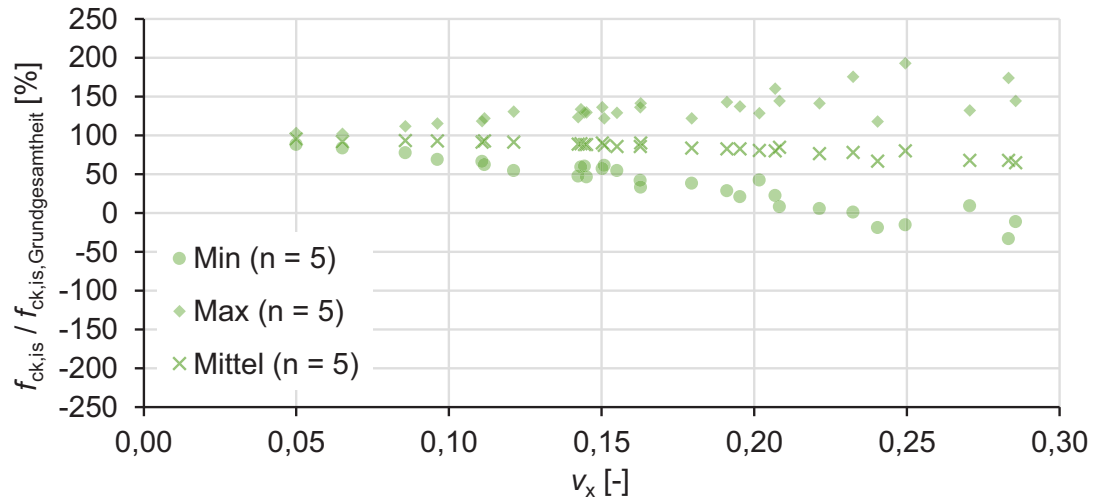


Abb. 5.67 Verhältnis zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$ und $n = 5$

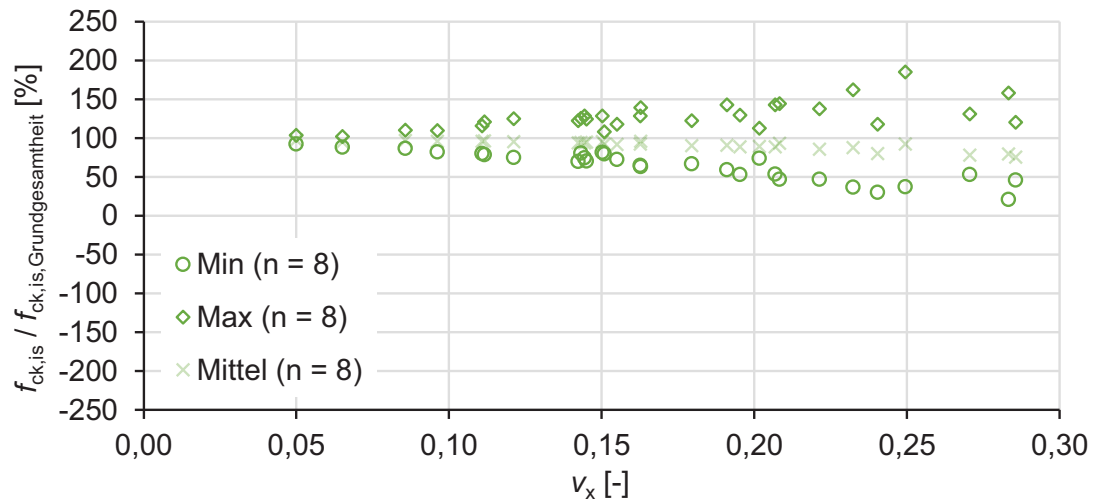


Abb. 5.68 Verhältnis zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$ und $n = 8$

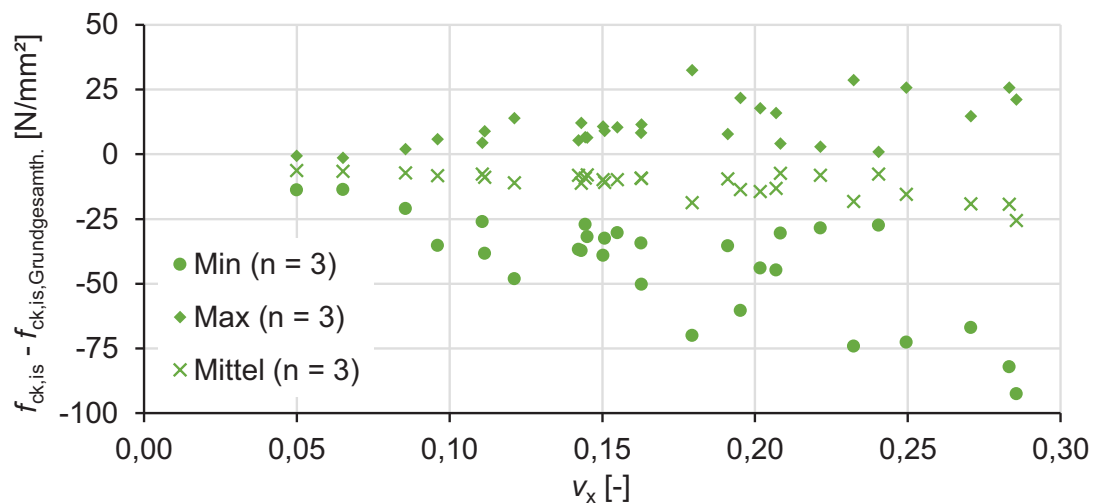


Abb. 5.69 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakt. In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$ und $n = 3$ in Abhängigkeit von v_x

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

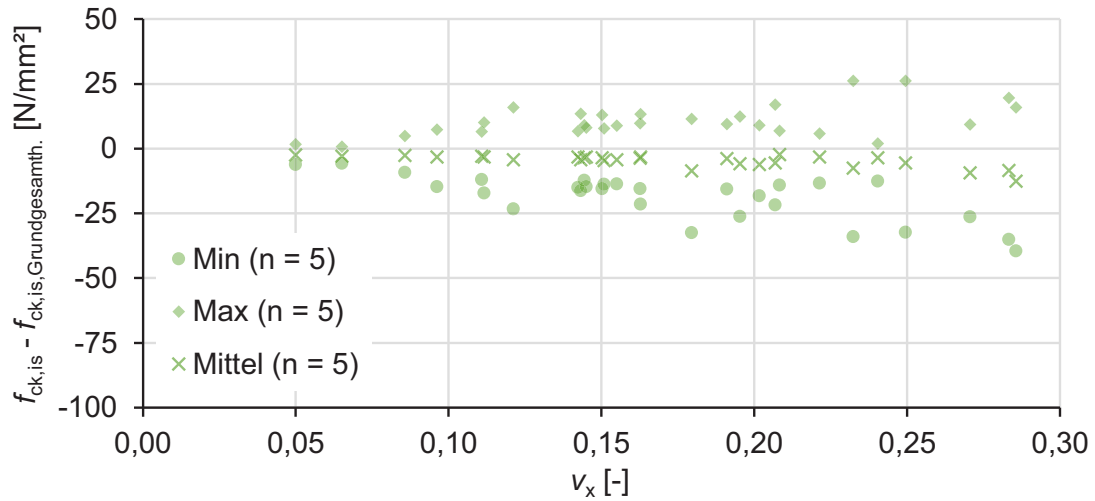


Abb. 5.70 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakt. In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – NV mit $s_{x, min}$ und $n = 5$ in Abhängigkeit von v_x

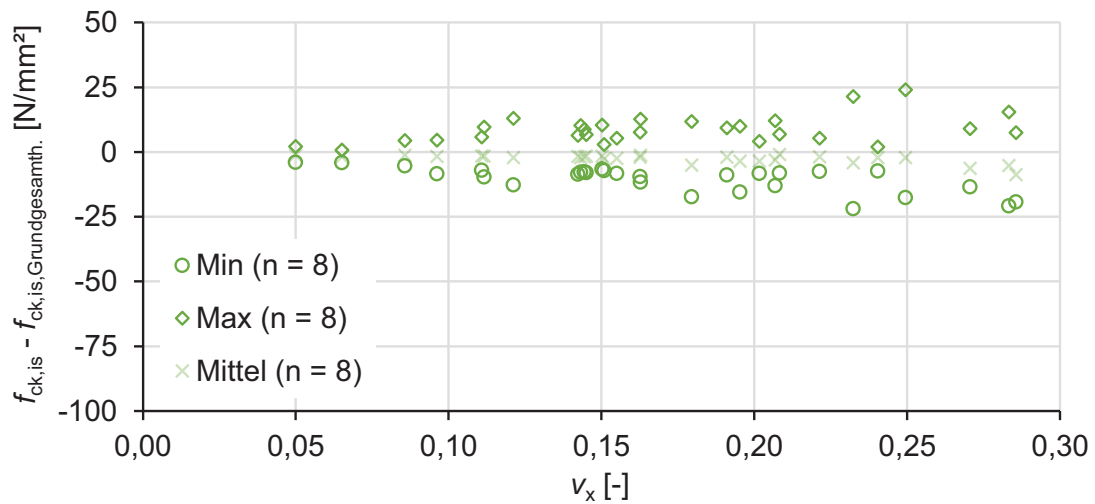


Abb. 5.71 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakt. In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – NV mit $s_{x, min}$ und $n = 8$ in Abhängigkeit von v_x

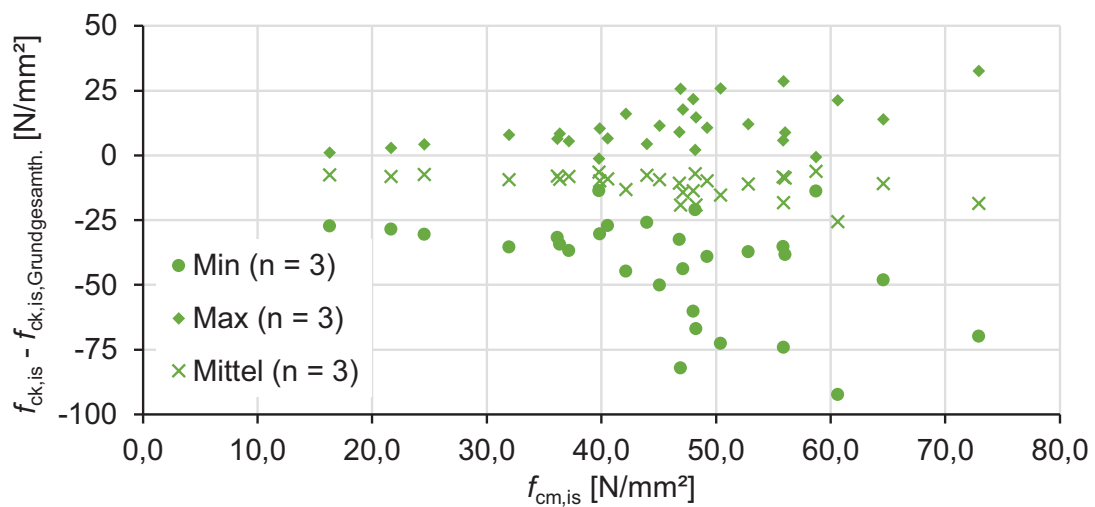


Abb. 5.72 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakt. In-situ-Betondruckfestigk. für DIN EN 1990 – NV mit $s_{x, min}$ und $n = 3$ in Abhängigkeit von $f_{cm, is}$

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

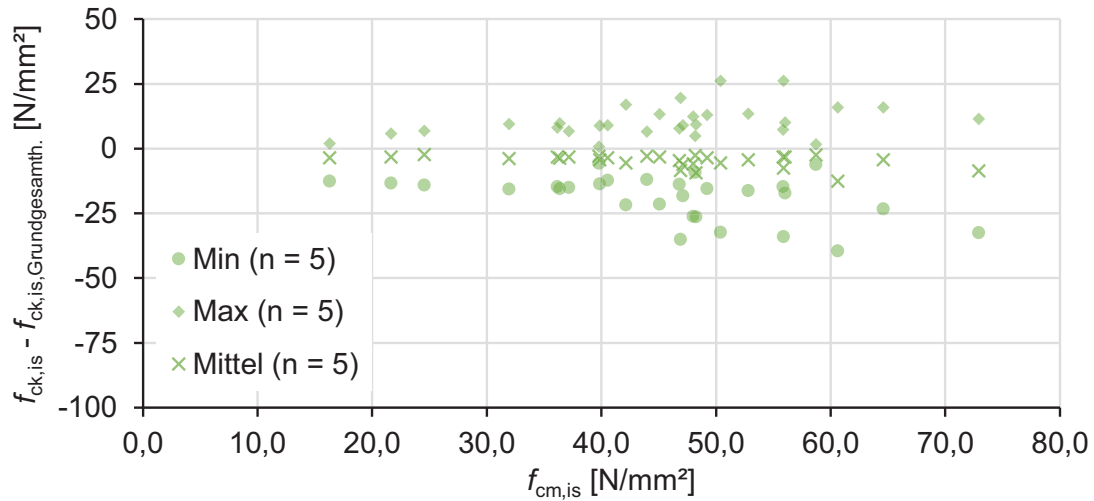


Abb. 5.73 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakt. In-situ-Betondruckfestigk. für DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$ und $n = 5$ in Abhängigkeit von $f_{cm, is}$

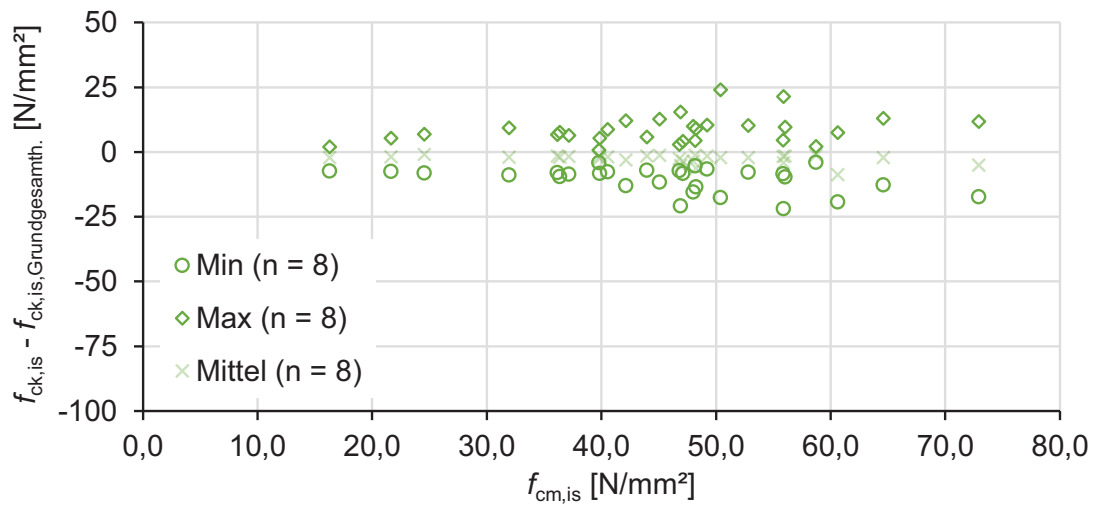


Abb. 5.74 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakt. In-situ-Betondruckfestigk. für DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$ und $n = 8$ in Abhängigkeit von $f_{cm, is}$

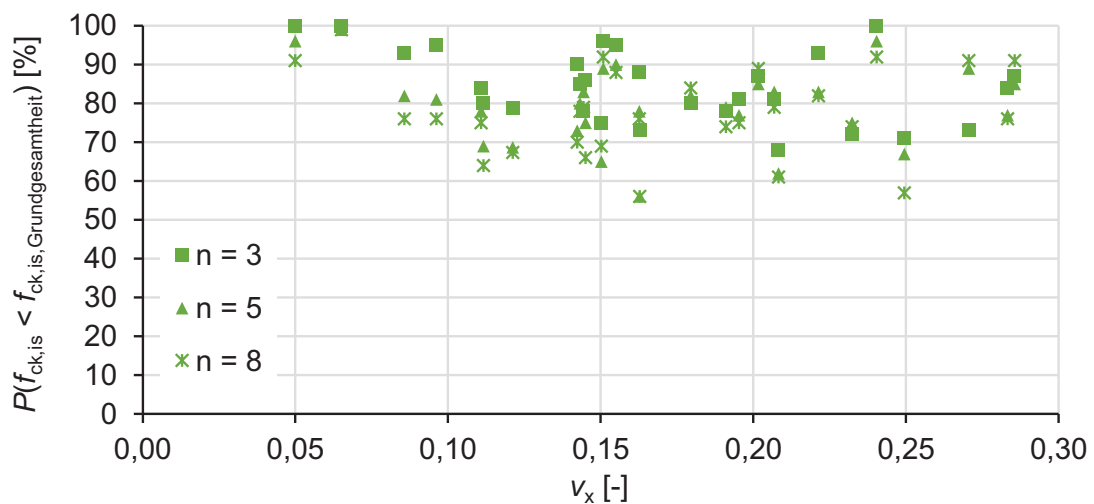


Abb. 5.75 Unterschreitungswahrscheinlichkeit bei Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit nach DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine Begrenzung der Streuung über einen konstanten Mindestwert der Standardabweichung $s_{x,\min} = 3 \text{ N/mm}^2$ nur bei kleinem Stichprobenumfang und kleiner Streuung der untersuchten Grundgesamtheit wirksam ist. Eine Erhöhung des Mindestwertes würde zwar zu einer gesteigerten Wirksamkeit auch bei größerem Stichprobenumfang und größerer Streuung der Grundgesamtheit führen, jedoch aber auch zu sehr konservativen Ergebnissen für kleine Stichproben mit kleiner Streuung der Grundgesamtheit.

5.3.4.3 Bestimmung von $f_{ck, is}$ nach DIN EN 1990 – NV mit $v_{x,\min}$ und $v_{x,\max}$

In Abb. 5.77 bis Abb. 5.86 sind die Ergebnisse der Bewertung der Teilstichproben mit einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* unter der zusätzlichen Berücksichtigung eines Mindestvariationskoeffizienten $v_{x,\min} = 0,08$ und eines Höchstwertes des Variationskoeffizienten $v_{x,\max} = 0,20$ dargestellt. Der Anteil an Teilstichproben mit einem Variationskoeffizienten größer als 0,20, welche folglich im Rahmen der Auswertung nicht berücksichtigt wurden, ist in Abb. 5.76 abgebildet. Besonders bei großem Variationskoeffizienten der Grundgesamtheit wird teilweise ein Anteil an Teilstichproben mit $v_x > 0,20$ von bis zu 90 % erreicht (siehe Ablesebeispiel Abb. 5.76), wobei bei $n = 8$ die größten Werte auftreten. Für diese Stichproben wird empfohlen, alle Einzelwerte kritisch auf Zugehörigkeit zu einer Grundgesamtheit zu überprüfen. Hinweise hierzu können Kapitel 3 und Kapitel 6 der vorliegenden Arbeit entnommen werden. Alternativ wird, sofern möglich, eine Erhöhung des Stichprobenumfangs empfohlen.

Da die Berücksichtigung eines derartigen Vorgehens im Rahmen der hier durchgeführten statistischen Simulationen nicht möglich ist, werden nachfolgend jeweils nur die Teilstichproben mit einem Variationskoeffizienten $\leq 0,20$ betrachtet.

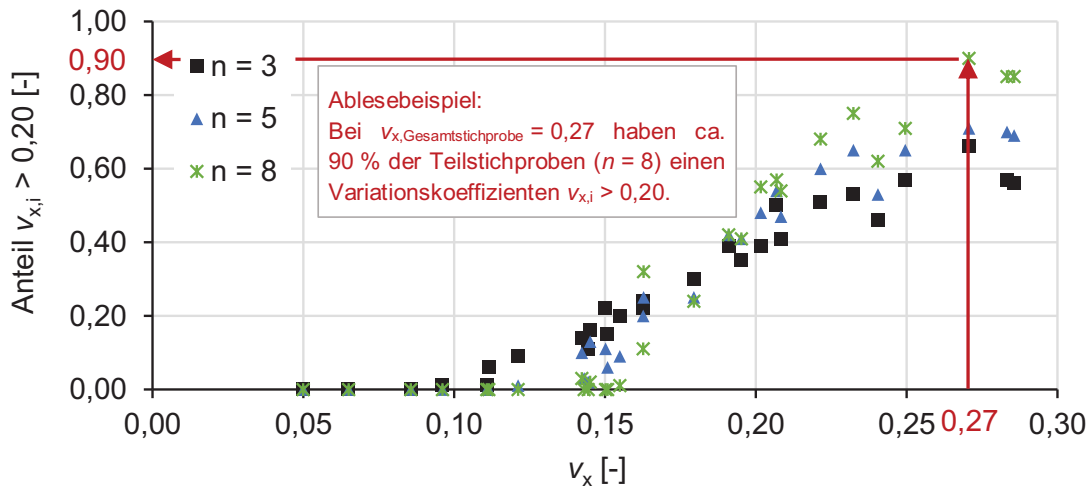


Abb. 5.76 Anteil der Teilstichproben mit einem Variationskoeffizienten $v_x > 0,20$

Zunächst ist deutlich erkennbar, dass durch die Verwendung eines Höchstwertes des Variationskoeffizienten der Teilstichproben das Maß der Unterschreitung erheblich reduziert werden kann. Für $n = 3$ konnte ein Mindestwert des Verhältnisses zwischen der an einer Teilstichprobe geschätzten und der tatsächlichen charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit von 35 % beobachtet werden. Für $n = 8$ liegt der entsprechende Wert bei 71 % (vgl. Abb. 5.77 bis Abb. 5.79). Im Vergleich zur

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12*, bei der Werte von bis zu -211% auftraten, stellt dies eine erhebliche Verbesserung dar. Auch im Hinblick auf das Maß der Überschätzung kann bei allen betrachteten Stichprobenumfängen eine deutliche Wirksamkeit des Mindestvariationskoeffizienten festgestellt werden. Das Verhältnis zwischen der an einer Teilstichprobe geschätzten und der tatsächlichen charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit liegt bei $n = 3$ bei höchstens 196% und bei $n = 8$ bei höchstens 180% , was auch eine Verbesserung im Vergleich zur Anwendung einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* mit $s_{x,\min} = 3,0 \text{ N/mm}^2$ darstellt. Im Mittel liegen die an den Teilstichproben mit $v_x \leq 0,20$ geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeiten in einem Intervall von ca. 75% bis 125% des an der Gesamtstichprobe bestimmten charakteristischen Wertes der In-situ-Betondruckfestigkeit. Die Abweichungen sind bei großem Variationskoeffizienten der Gesamtstichprobe und bei $n = 8$ am größten. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist jedoch zu beachten, dass vor allem bei großer Streuung der Gesamtstichprobe aufgrund eines Variationskoeffizienten der Teilstichprobe größer als $0,20$ bis zu 90% der Teilstichproben von der Auswertung ausgeschlossen wurden.

Entsprechend führen $v_{x,\min}$ und $v_{x,\max}$ auch zu einer deutlichen Reduzierung des Absolutbetrages der Abweichung. Für $n = 3$ konnte eine Unterschätzung von höchstens 34 N/mm^2 und für $n = 8$ von höchstens 13 N/mm^2 beobachtet werden. Die maximal beobachtete Überschätzung liegt für $n = 3$ bei 25 N/mm^2 und für $n = 8$ bei 22 N/mm^2 . Im Mittel weichen die Werte um -12 bis $+8 \text{ N/mm}^2$ vom tatsächlichen Wert ab. Dies stellt auch im Vergleich zur Anwendung einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* mit $s_{x,\min} = 3,0 \text{ N/mm}^2$ eine Verbesserung dar.

Bei ansteigendem Mittelwert der betrachteten Gesamtstichprobe kann besonders für $n = 3$ eine sehr hohe Wirksamkeit des Mindestvariationskoeffizienten festgestellt werden (vgl. Abb. 5.83 bis Abb. 5.85).

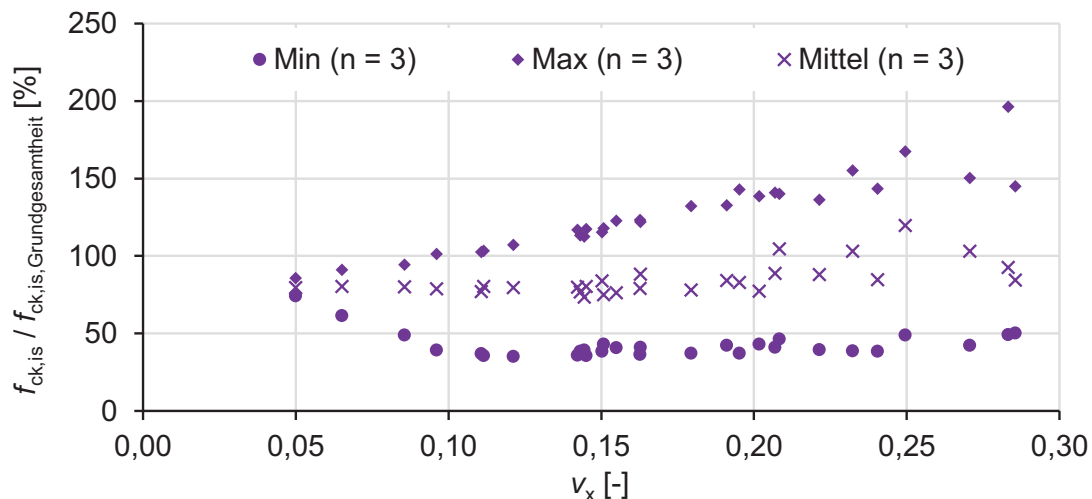


Abb. 5.77 Verhältnis zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für *DIN EN 1990 – NV* mit $v_{x,\min/\max}$ und $n = 3$

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

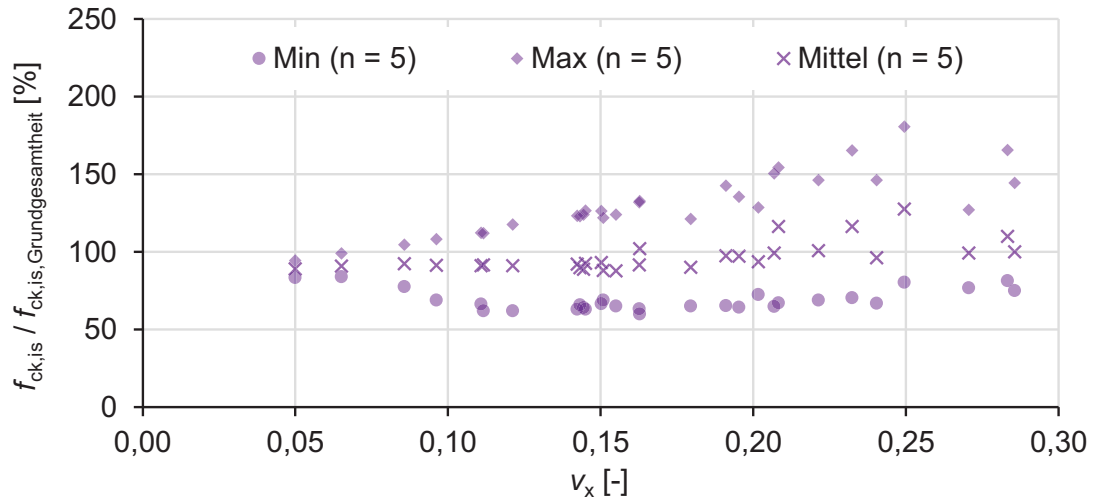


Abb. 5.78 Verhältnis zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – NV mit $v_{x, min/max}$ und $n = 5$

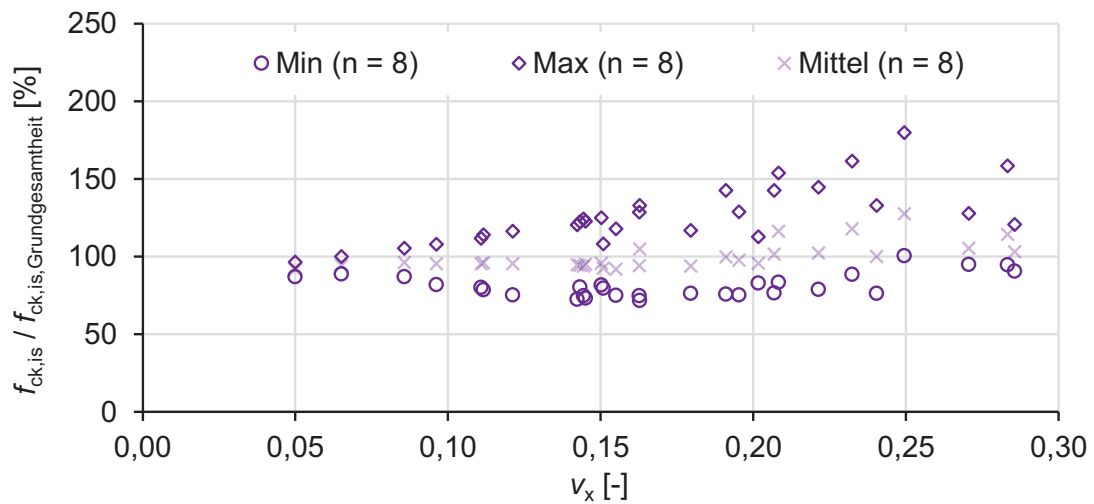


Abb. 5.79 Verhältnis zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 1990 – NV mit $v_{x, min/max}$ und $n = 8$

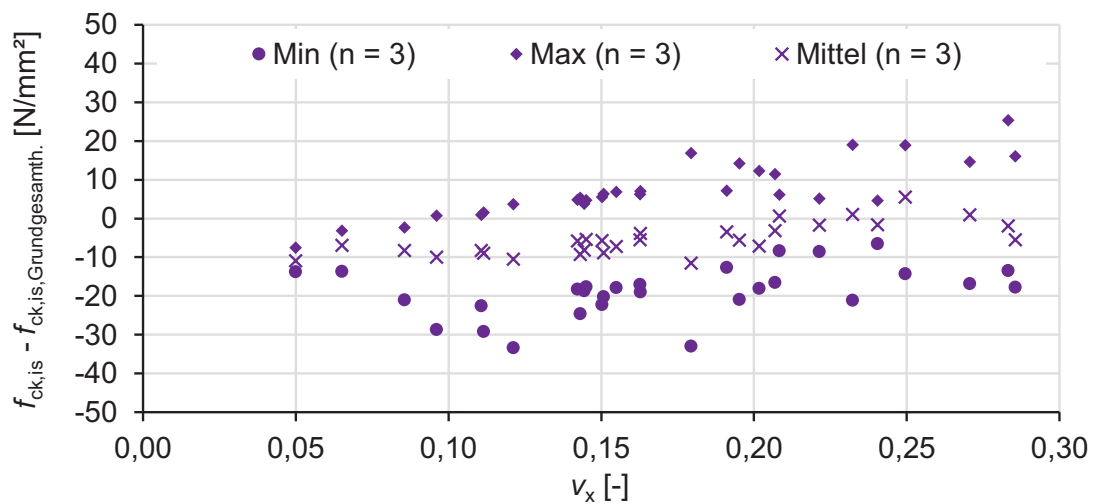


Abb. 5.80 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächl. charakt. In-situ-Betondruckfestigk. für DIN EN 1990 – NV mit $v_{x, min/max}$ und $n = 3$ in Abhängigkeit von v_x

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

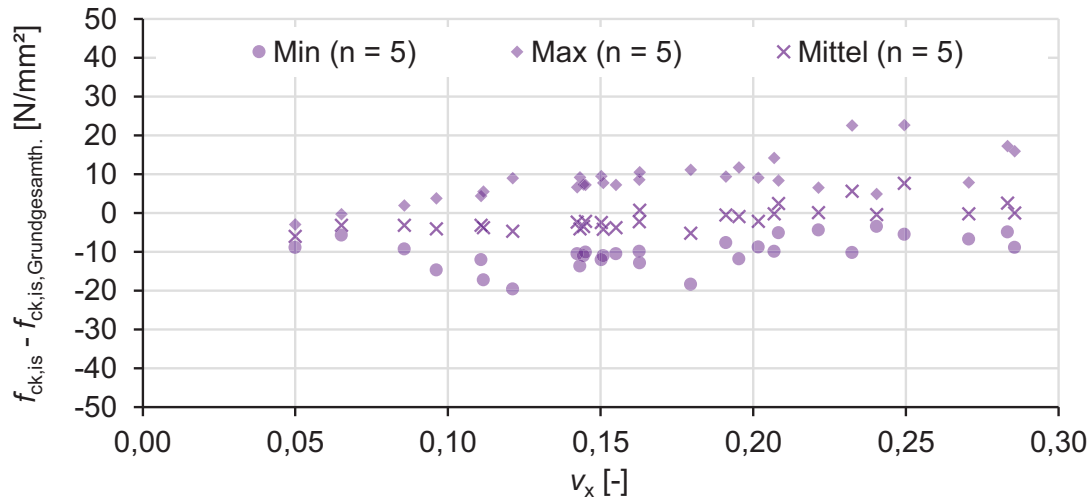


Abb. 5.81 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächl. charakt. In-situ-Betondruckfestigk. für DIN EN 1990 – NV mit $v_{x, min/max}$ und $n = 5$ in Abhängigkeit von v_x

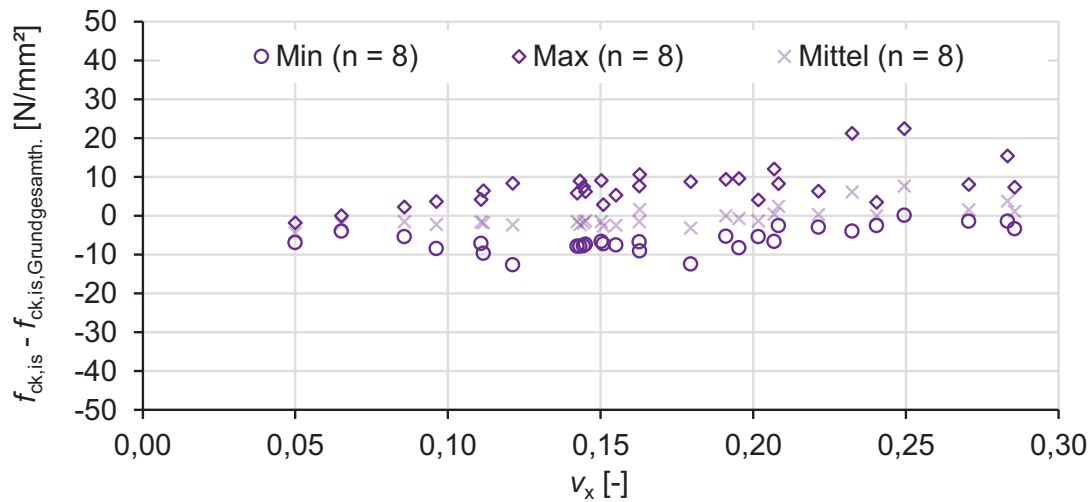


Abb. 5.82 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächl. charakt. In-situ-Betondruckfestigk. für DIN EN 1990 – NV mit $v_{x, min/max}$ und $n = 8$ in Abhängigkeit von v_x

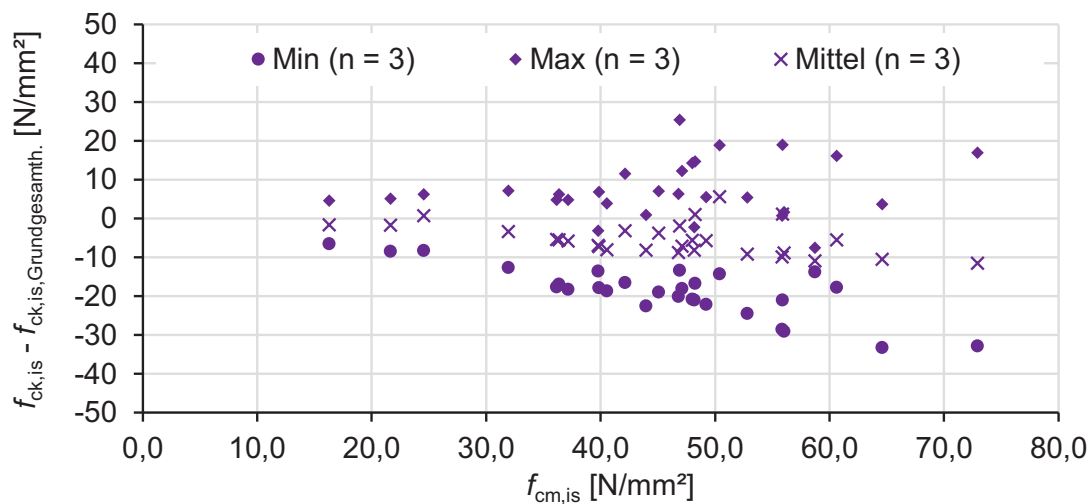


Abb. 5.83 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächl. charakt. In-situ-Betondruckfestigk. für DIN EN 1990 – NV mit $v_{x, min/max}$ und $n = 3$ in Abhängigkeit von $f_{cm, is}$

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

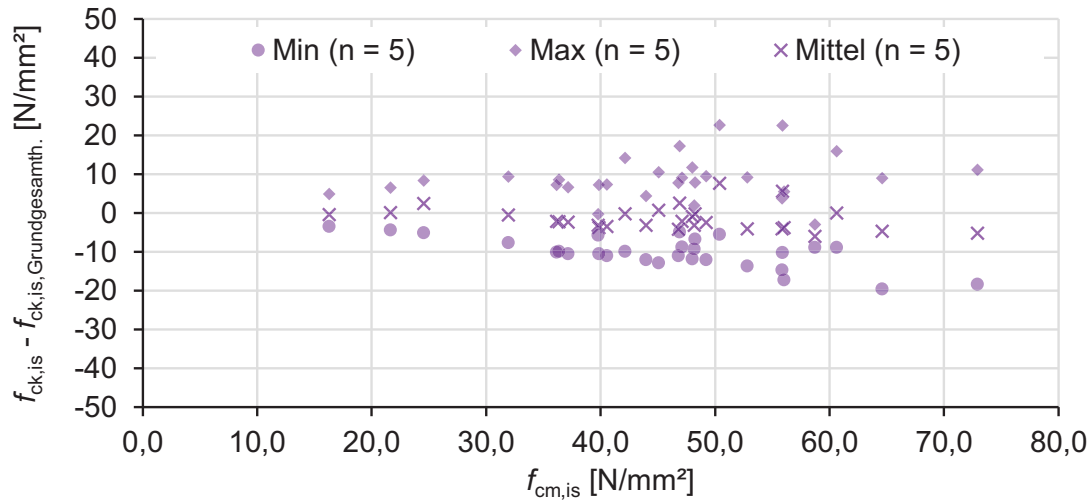


Abb. 5.84 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächl. charakt. In-situ-Betondruckfestigk. für DIN EN 1990 – NV mit $v_{x,min/max}$ und $n = 5$ in Abhängigkeit von $f_{cm, is}$

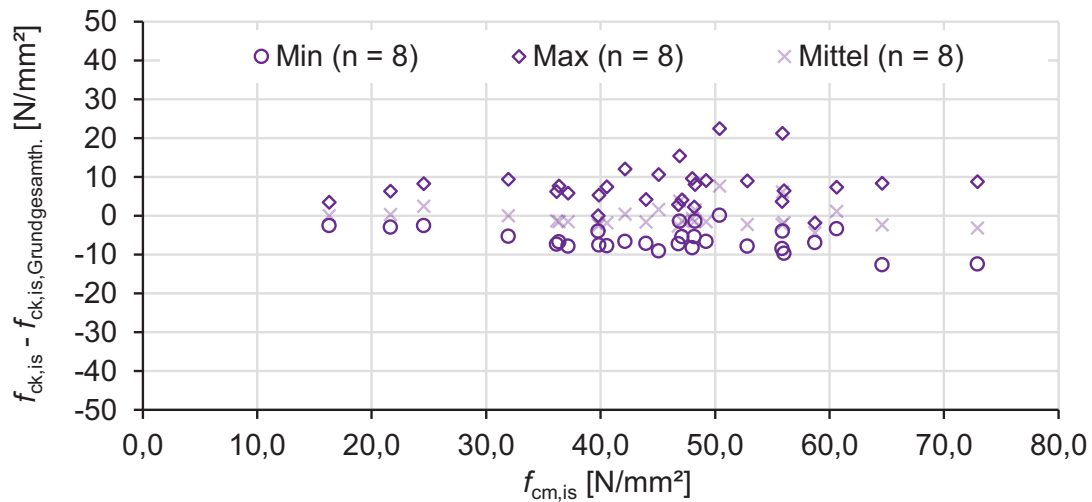


Abb. 5.85 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächl. charakt. In-situ-Betondruckfestigk. für DIN EN 1990 – NV mit $v_{x,min/max}$ und $n = 8$ in Abhängigkeit von $f_{cm, is}$

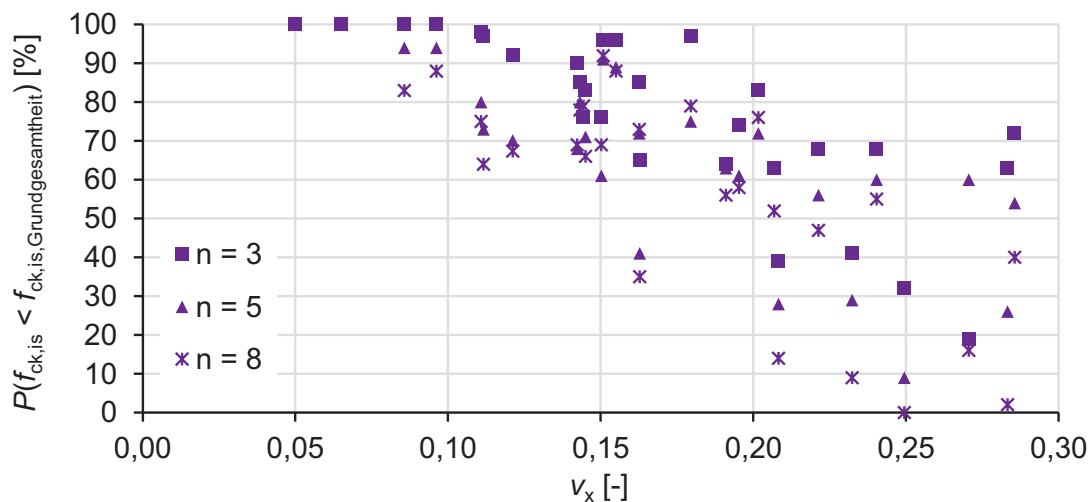


Abb. 5.86 Unterschreitungswahrscheinlichkeit bei Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit nach DIN EN 1990 – NV mit $v_{x,min/max}$

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Die Unterschreitungswahrscheinlichkeit liegt wie in Abb. 5.86 beschrieben in einem Intervall von 0 % bis 100 %, wobei die geringe Unterschreitungswahrscheinlichkeit lediglich bei großem Variationskoeffizienten der betrachteten Gesamtstichprobe auftritt. Die Ursache hierfür liegt darin, dass, wie in Abb. 5.76 beschrieben, durch $v_{x,max} = 0,20$ besonders bei großem Variationskoeffizienten der Gesamtstichprobe ein großer Anteil der Teilstichproben von der Auswertung ausgeschlossen wird. Eine Bewertung dieser Teilstichproben führte zu kleinen charakteristischen Werten der In-situ-Betondruckfestigkeit und somit zu einem Anstieg der Unterschreitungswahrscheinlichkeit.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass durch den Ansatz eines Mindestvariationskoeffizienten $v_{x,min} = 0,08$ die Überschreitung des tatsächlichen Wertes der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit auf ein unkritisches Maß reduziert werden kann. Durch den zusätzlichen Ansatz eines Höchstwertes des Variationskoeffizienten $v_{x,max} = 0,20$ können große Unterschreitungen einschließlich mechanisch unplausibler negativer Werte, welche bei kleinem Stichprobenumfang in Verbindung mit großer Streuung der Stichprobe entstehen können, vermieden werden. Auch bei einer Begrenzung der Streuung durch $v_{x,min}$ und $v_{x,max}$ bleibt die Streubreite weiterhin abhängig vom Stichprobenumfang. Mit steigendem Umfang nimmt die Streubreite ab. Bei einem Stichprobenumfang von $n = 8$ sind $v_{x,min}$ und $v_{x,max}$ nur noch in wenigen Fällen wirksam.

Im Vergleich zu einer Auswertung mit einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* und $s_{x,min} = 3,0 \text{ N/mm}^2$ zeigt die Begrenzung der Streuung über den Variationskoeffizienten eine erhöhte Wirksamkeit.

5.4 Neuentwickeltes Verfahren zur Bestimmung von $f_{ck, is}$

Auf Grundlage der vorgestellten Ergebnisse wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein neues Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit erarbeitet. Ziel war es, ein praxistaugliches Verfahren zu entwickeln, welches sich nur geringfügig von dem bisherigen Vorgehen nach *DIN EN 13791:2008-05* unterscheidet. Erste Ergebnisse wurden in *Weber et al. 2016* veröffentlicht.

Das neuentwickelte Verfahren, welches in Anlehnung an *DIN EN 13791:2008-05* die modifizierten Ansätze A und B unterscheidet, ist inzwischen Bestandteil von *DIN EN 13791/A20:2017-02*. Darüber hinaus ist das neue Verfahren auch schon in *DAfStb 619* und *DBV 2016* enthalten.

Die charakteristische Druckfestigkeit von Bauwerkbeton ist mit dem neu entwickelten Verfahren, wie in Abb. 5.87 dargestellt, in Abhängigkeit vom Umfang der Stichprobe entweder nach dem modifizierten Ansatz A oder nach dem modifizierten Ansatz B zu bewerten.

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Der modifizierte Ansatz A ist in den folgenden Fällen anzuwenden:

- a) wenn mindestens $n = 9$ Prüfergebnisse aus Bohrkernen zur Verfügung stehen,
- b) wenn mindestens $n = 3$ Prüfergebnisse aus Bohrkernen zur Verfügung stehen und der Variationskoeffizient der Stichprobe $v_x > 0,20$ beträgt.

Der modifizierte Ansatz B darf nur in den Fällen angewendet werden, in denen $n = 3$ bis 8 Prüfergebnisse aus Bohrkernprüfungen vorliegen und der Variationskoeffizient der Stichprobe $v_x \leq 0,20$ ist.

Eine Einstufung in Festigkeitsklassen ist nicht erforderlich.

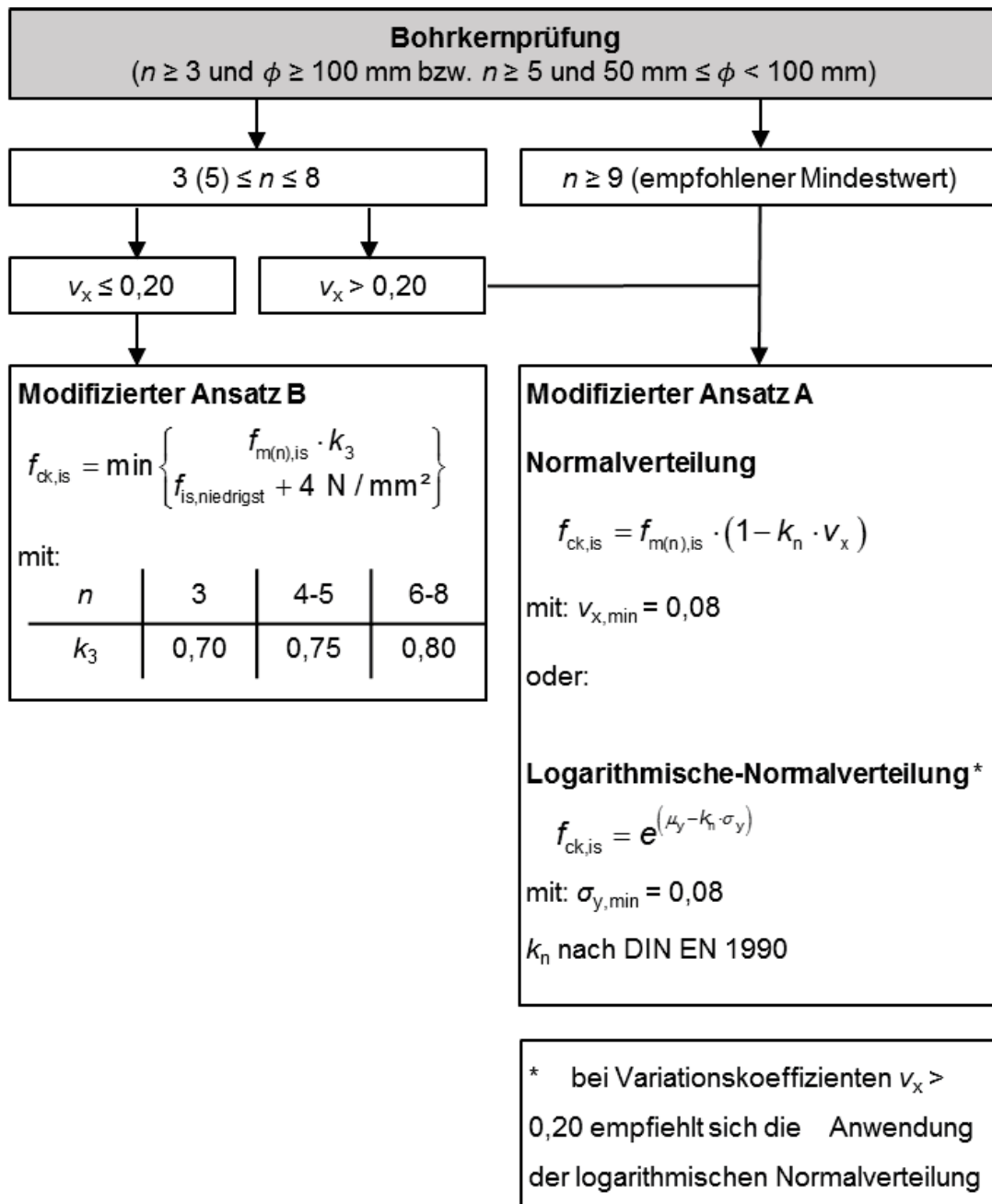


Abb. 5.87 Neu entwickeltes Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit (inhaltsgleich in DIN EN 13791/A20:2017-02)

Modifizierter Ansatz A

Die geschätzte charakteristische Druckfestigkeit des Prüfbereichs berechnet sich unter Ansatz einer Normalverteilung wie folgt:

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} \cdot (1 - k_n \cdot v_x) \quad (5.5)$$

Dabei ist für den Variationskoeffizienten der Stichprobe nach Gleichung (2.9) ein empirisch festgelegter Mindestwert $v_{x, min} \geq 0,08$ anzusetzen. Der Faktor k_n ist Tab. 3.4 zu entnehmen. Zwischenwerte für k_n dürfen nach Gleichung (3.14) berechnet oder linear interpoliert werden. Ab einem Stichprobenumfang von $n > 30$ darf für k_n ein konstanter Wert von 1,64 angenommen werden.

Alternativ darf eine logarithmische Normalverteilung entsprechend *DIN EN 1990:2010-12* verwendet werden. Dabei ist für die Standardabweichung der logarithmierten Einzelwerte der Stichprobe ein Mindestwert $\sigma_{y, min} \geq 0,08$ (entsprechend Gleichung (2.44)) anzusetzen.

Allgemein ist bei Variationskoeffizienten der Stichprobe $v_x > 0,20$ die Anwendung der logarithmischen Normalverteilung zu empfehlen.

Modifizierter Ansatz B

Die geschätzte charakteristische Druckfestigkeit des Prüfbereichs ist der niedrigere der folgenden beiden Werte:

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} \cdot k_3 \quad (5.6)$$

oder

$$f_{ck, is} = f_{is, niedrigst} + 4 \text{ N/mm}^2 \quad (5.7)$$

Tab. 5.5 k_3 -Faktoren

n	k_3
3	0,70
4 bis 5	0,75
6 bis 8	0,80

Der in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang in Tab. 5.5 dargestellte Faktor k_3 basiert auf der Anwendung einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit, ergänzt um einen Mindestwert des Variationskoeffizienten $v_{x, min}$. Der Faktor k_3 beschreibt den in Gleichung (5.8) dargestellten Term.

$$k_3 = 1 - k_n \cdot v_x \quad (5.8)$$

Auf Grundlage der zuvor beschriebenen Untersuchungen wurde mit dem Ziel einer möglichst wirtschaftlichen aber zugleich auch statistisch belastbaren Aussage ein weiter auf der sicheren Seite liegender Mindestwert des Variationskoeffizienten $v_{x, min} = 0,09$ gewählt. Unter Berücksichtigung des vom Stichprobenumfang

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

abhängigen Faktors k_n nach Tab. 3.4 können die k_3 -Faktoren wie in Tab. 5.6 dargestellt berechnet werden.

Tab. 5.6 Herleitung k_3 -Faktoren

n	k_n	$v_{x,min}$	k_3	
			$1 - k_n \cdot v_x$	gewählt
3	3,37	0,09	0,70	0,70
4	2,63	0,09	0,76	0,75
5	2,33	0,09	0,79	
6	2,18	0,09	0,80	0,80
7	2,08	0,09	0,81	
8	2,00	0,09	0,82	

Beträgt der Variationskoeffizient der Stichprobe $v_x > 0,20$ kann auf der sicheren Seite liegend eine Bewertung der Druckfestigkeit nach dem modifizierten Ansatz A erfolgen. Alternativ werden eine Erhöhung des Stichprobenumfangs sowie eine Überprüfung der Zugehörigkeit aller Probekörper zu einer Grundgesamtheit empfohlen. Hierzu können die in Kapitel 3 beschriebenen Verfahren sowie mathematische Ausreißertests gemäß Kapitel 6 verwendet werden. Ist bei einem Variationskoeffizient der Stichprobe $v_x > 0,20$ eine Erhöhung des Stichprobenumfangs nicht möglich und alle Probekörper können abgesichert einer Grundgesamtheit zugeordnet werden, so muss die vorliegende Stichprobe mit dem modifizierten Ansatz A ausgewertet werden, was zu auf der sicheren Seite liegenden Ergebnissen führt.

In den Abbildungen Abb. 5.88 bis Abb. 5.97 sind die Ergebnisse der Bewertung der Teilstichproben mit dem neu entwickelten Verfahren dargestellt. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass lediglich Teilstichproben mit $v_x \leq 0,20$, deren Anteil Abb. 5.76 entnommen werden kann, berücksichtigt wurden. Folglich wurden alle Teilstichproben mit dem modifizierten Ansatz B bewertet. In Anhang II der vorliegenden Arbeit ist zusätzlich das Ergebnis der Bewertung der Teilstichproben mit $v_x > 0,20$ mit dem modifizierten Ansatz A dargestellt. Die so ermittelten Werte zeigen, dass sofern alle Einzelwerte abgesichert einer Grundgesamtheit zugeordnet werden können und eine Erhöhung des Stichprobenumfangs nicht möglich ist, eine Auswertung mit dem modifizierten Ansatz A in jedem Fall zu auf der sicheren Seite liegenden Ergebnissen führt.

Die in Abb. 5.88 bis Abb. 5.90 dargestellte Auswertung zeigt, dass der modifizierte Ansatz B unabhängig vom Stichprobenumfang n zu einer sehr geringen Streubreite der möglichen Ergebnisse führt. Bei einem Stichprobenumfang $n = 3$ streuen die Ergebnisse in einem Intervall von ca. 65 % bis 190 % bezogen auf den an der Gesamtstichprobe bestimmten tatsächlichen Wert der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit. Bei $n = 8$ streuen die Ergebnisse in einem Intervall von ca. 80 % bis 175 %. Eine Erhöhung des Stichprobenumfangs führt somit zu einer geringfügigen Reduzierung der Unter- sowie der Überschreitung.

Darüber hinaus kann eine deutliche Abhängigkeit zwischen der Streubreite der möglichen Ergebnisse und dem Variationskoeffizienten der betrachteten Gesamtstichprobe festgestellt werden. Mit zunehmender Streuung der

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Gesamtstichprobe steigt die Streubreite der an den Teilstichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit stets an.

Im Mittel liegen die an den Teilstichproben geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeiten in einem Intervall von ca. + 75 % bis + 145 % des an der Gesamtstichprobe bestimmten charakteristischen Wertes der In-situ-Betondruckfestigkeit. Mit ansteigendem Variationskoeffizienten der Gesamtstichprobe steigt der Wert leicht an.

Der in Abb. 5.91 bis Abb. 5.93 dargestellte Absolutwert der Abweichung zeigt ein ähnliches Verhalten. Auch hier führt eine Zunahme des Variationskoeffizienten der Gesamtstichprobe zu einem Anstieg der möglichen Abweichungen. Bei $n = 3$ liegen die Abweichungen in einem Intervall von ca. $- 15 \text{ N/mm}^2$ bis $+ 25 \text{ N/mm}^2$ und bei $n = 8$ in einem Intervall von ca. $- 10 \text{ N/mm}^2$ bis $+ 20 \text{ N/mm}^2$. Im Mittel wird der tatsächliche Wert der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit bei $n = 3$ um bis zu $- 12 \text{ N/mm}^2$ unterschätzt und bei $n = 8$ um bis zu $+ 12 \text{ N/mm}^2$ überschätzt. Mit zunehmendem Variationskoeffizienten der betrachteten Gesamtstichprobe konnte ein Anstieg der maximal beobachteten Überschätzung festgestellt werden. Bei Gesamtstichproben mit einem Variationskoeffizienten $v_x < 0,20$ ist die maximale Überschätzung meist kleiner als 10 N/mm^2 .

Weiterhin zeigt die in Abb. 5.94 bis Abb. 5.96 in Abhängigkeit vom Mittelwert der In-situ-Betondruckfestigkeit der Gesamtstichprobe aufgetragene Abweichung, dass das neu entwickelte Verfahren nur in geringem Maß vom Mittelwert der In-situ-Betondruckfestigkeit beeinflusst wird.

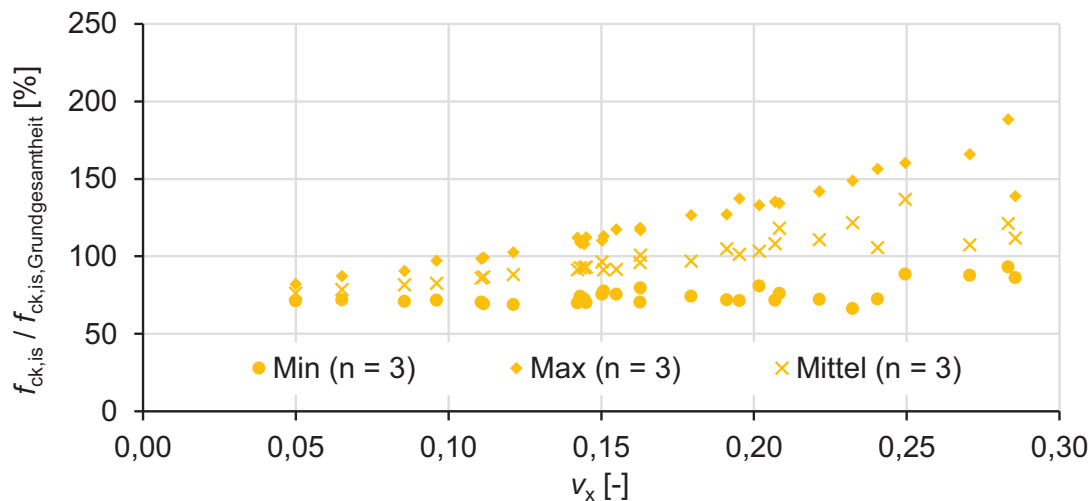


Abb. 5.88 Verhältnis zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 13791/A20:2017 und $n = 3$

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

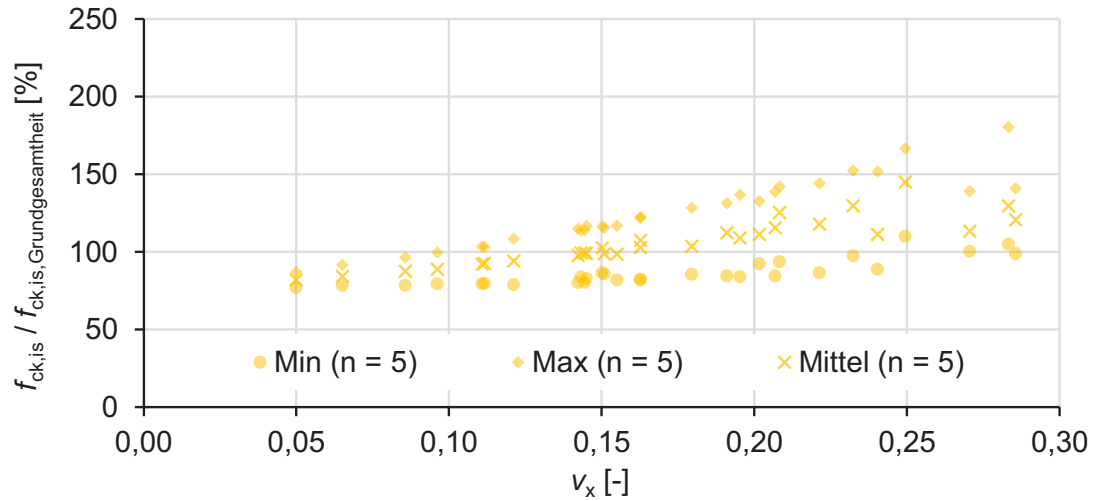


Abb. 5.89 Verhältnis zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 13791/A20:2017 und $n = 5$

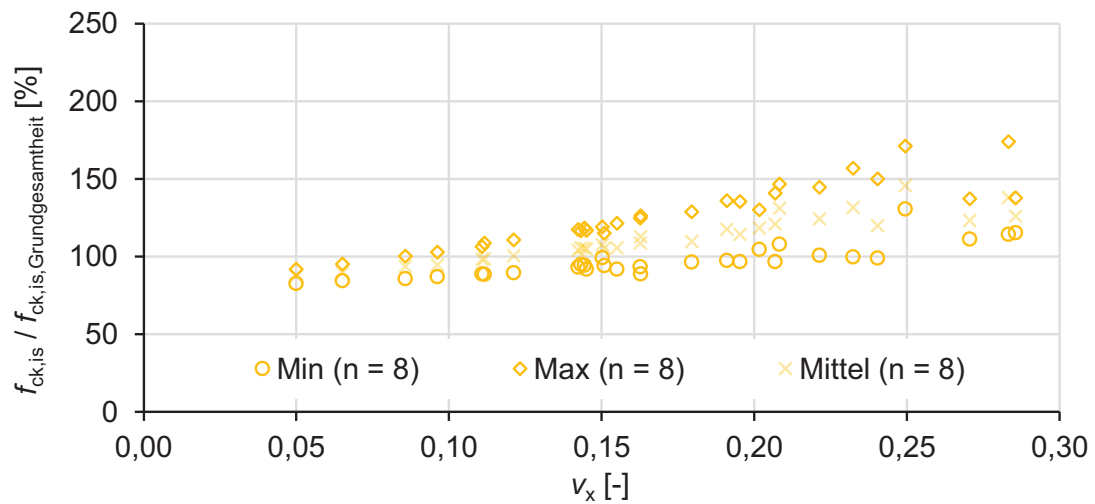


Abb. 5.90 Verhältnis zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 13791/A20:2017 und $n = 8$

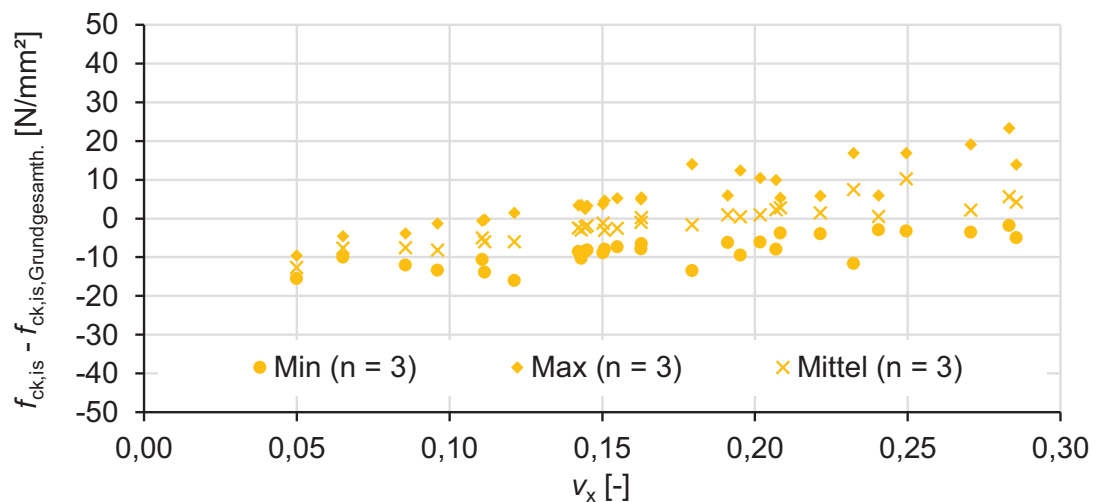


Abb. 5.91 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakt. In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 13791/A20:2017 und $n = 3$ in Abhängigkeit von v_x

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

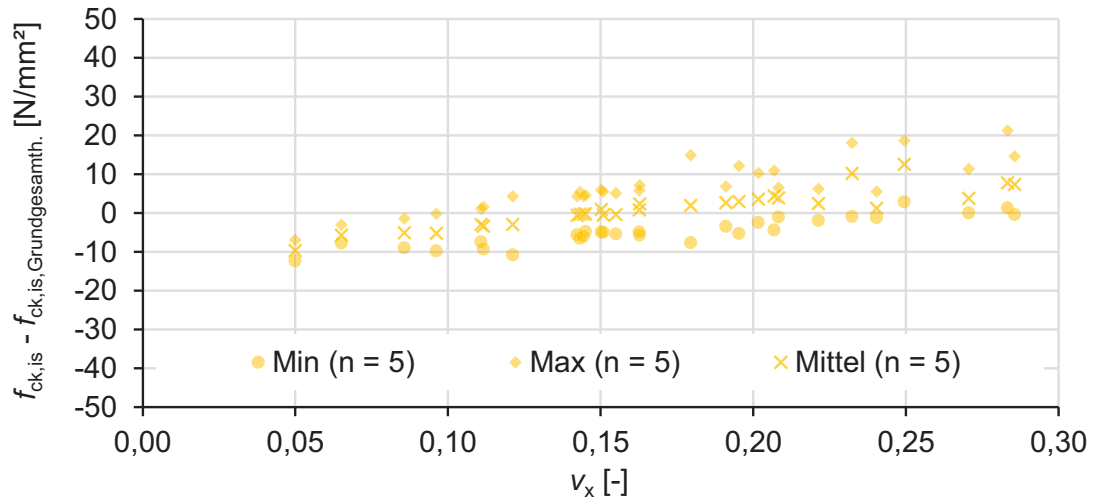


Abb. 5.92 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakt. In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 13791/A20:2017 und $n = 5$ in Abhängigkeit von v_x

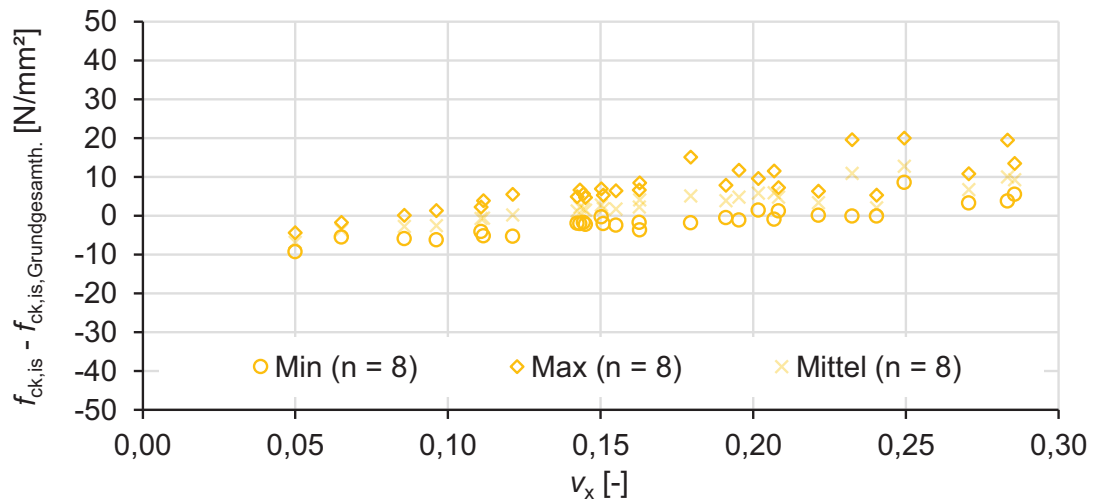


Abb. 5.93 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakt. In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 13791/A20:2017 und $n = 8$ in Abhängigkeit von v_x

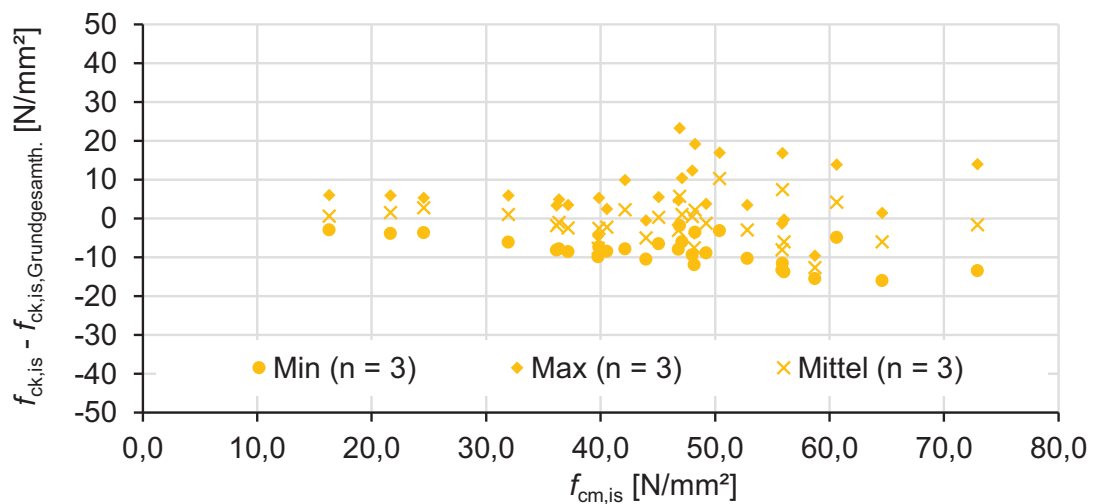


Abb. 5.94 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakt. In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 13791/A20:2017 und $n = 3$ in Abhängigkeit von $f_{cm, is}$

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

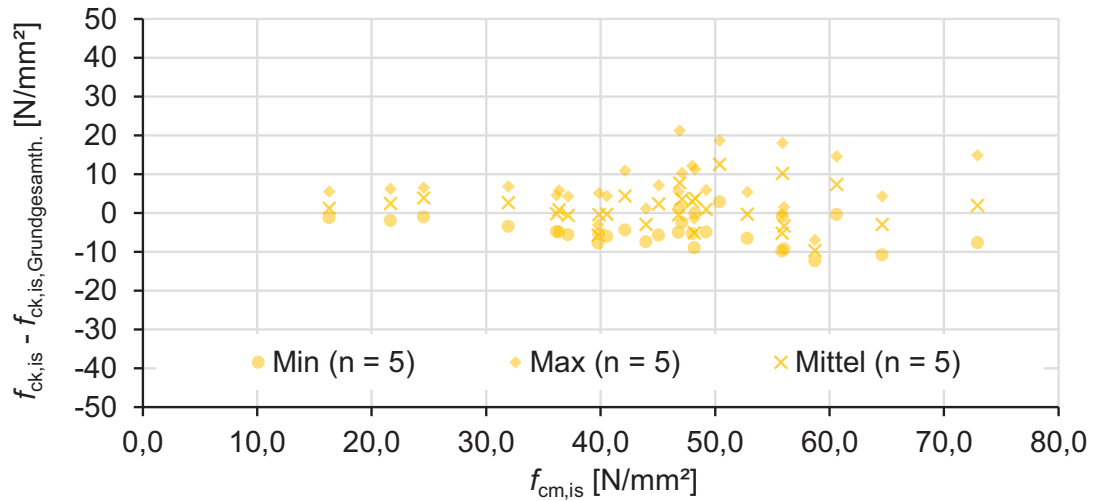


Abb. 5.95 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakt. In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 13791/A20:2017 und $n = 5$ in Abhängigkeit von $f_{cm, is}$

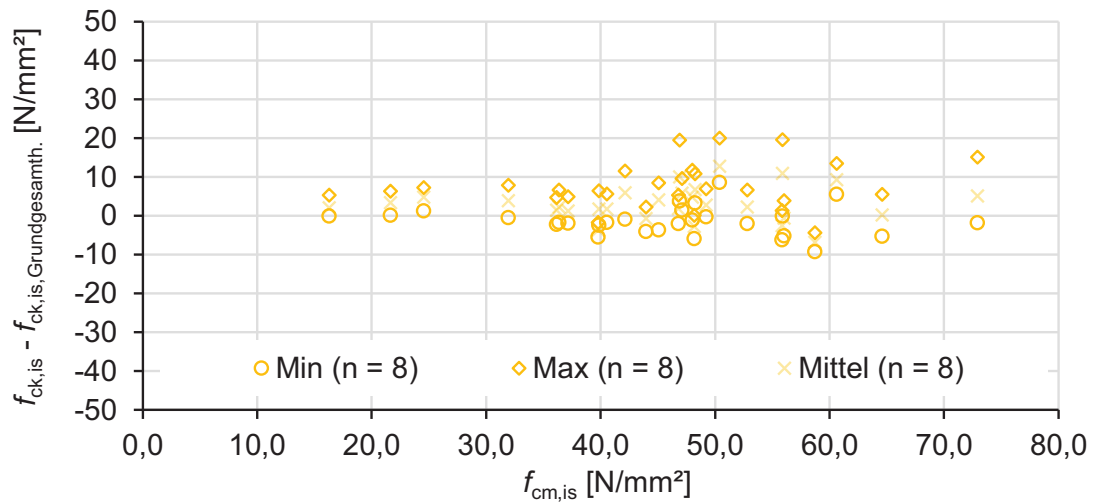


Abb. 5.96 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakt. In-situ-Betondruckfestigkeit für DIN EN 13791/A20:2017 und $n = 8$ in Abhängigkeit von $f_{cm, is}$

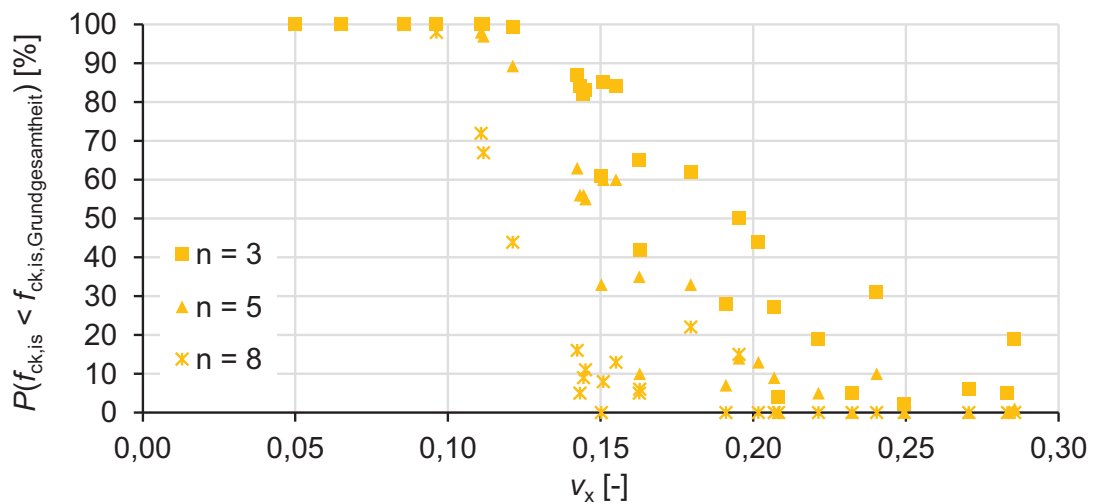


Abb. 5.97 Unterschreitungswahrscheinlichkeit bei Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit nach DIN EN 13791/A20:2017

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Wie bereits bei der zuvor betrachteten Auswertung unter Zugrundelegung einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* und Ansatz eines Mindest- und Höchstwertes des Variationskoeffizienten liegt auch die in Abb. 5.97 beschriebene Unterschreitungswahrscheinlichkeit bei Anwendung des neu entwickelten Verfahrens in einem Intervall von 0 % bis 100 %. Geringe Unterschreitungswahrscheinlichkeit treten besonders bei großem Variationskoeffizienten der betrachteten Gesamtstichprobe auf. Die Ursache hierfür liegt wie bereits zuvor erläutert darin, dass durch $v_{x,max} = 0,20$ besonders bei großem Variationskoeffizienten der Gesamtstichprobe ein großer Anteil der Teilstichproben von der Auswertung ausgeschlossen wird. Eine Bewertung der ausgeschlossenen Teilstichproben führte zu kleinen charakteristischen Werten der In-situ-Betondruckfestigkeit und somit zu einem Anstieg der Unterschreitungswahrscheinlichkeit. Ein Rückschluss auf das zugehörige Konfidenzniveau aus der in Abb. 5.97 dargestellten Unterschreitungswahrscheinlichkeit ist somit nur bedingt aussagekräftig, da teilweise bis zu 90 % der Teilstichproben nicht berücksichtigt werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das basierend auf den Untersuchungen zur Begrenzung der Streuung mittels $s_{x,min}$ sowie $v_{x,min}$ und $v_{x,max}$ in dieser Arbeit neu entwickelte Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit zu einer sehr geringen Streubreite der möglichen Ergebnisse führt. Bei den im Hochbau gebräuchlichen Werten des Variationskoeffizienten der Grundgesamtheit bis zu $v_x \approx 0,20$ (siehe Abb. 4.11) kann das Maß der Überschreitung auf ein unkritisches Maß reduziert und die charakteristische In-situ-Betondruckfestigkeit mit im Mittel sehr geringer Abweichung geschätzt werden. Dennoch ist zu beachten, dass besonders bei großer Streuung im Einzelfall auch Überschätzungen von ca. 20 N/mm² nicht ausgeschlossen werden können.

5.5 Ausblick und Bewertung neuer Verfahren nach E DIN EN 13791:2018

Im Rahmen der Überarbeitung der *EN 13791:2007* durch den Normenausschuss CEN/TC 104/ SC1/ TG11 wurde ein weiterer Ansatz zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit basierend auf Untersuchungen an Bohrkernen entwickelt, welcher Bestandteil von *E DIN EN 13791:2018-06* ist. Für die Anwendung ist jedoch eine Mindestanzahl von acht Prüfwerten erforderlich, womit der positive Einfluss eines erhöhten Stichprobenumfangs gewürdigt wird. Für einen geringeren Stichprobenumfang stehen lediglich kombinierte Verfahren aus direkten und indirekten Prüfverfahren zur Verfügung, auf die im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht weiter eingegangen wird, da mit indirekten Prüfverfahren lediglich die oberflächennahe Festigkeit abgeschätzt werden kann und die daraus abgeleitete Festigkeit für eine Nachrechnung nur bedingt geeignet ist.

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Die in den Abbildungen Abb. 5.98 bis Abb. 5.101 dargestellten Ergebnisse zeigen deutlich, dass das in *E DIN EN 13791:2018-06* enthaltene Verfahren zur gleichen Reduzierung der Überschreitung führt, wie die in Abschnitt 5.3.4.3 beschriebene Auswertung mit einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* mit $v_{x,\min} = 0,08$ und $v_{x,\max} = 0,20$. Die Unterschreitung entspricht der in Abb. 5.28 dargestellten Auswertung mit einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* ohne weitere Anwendungsgrenzen.

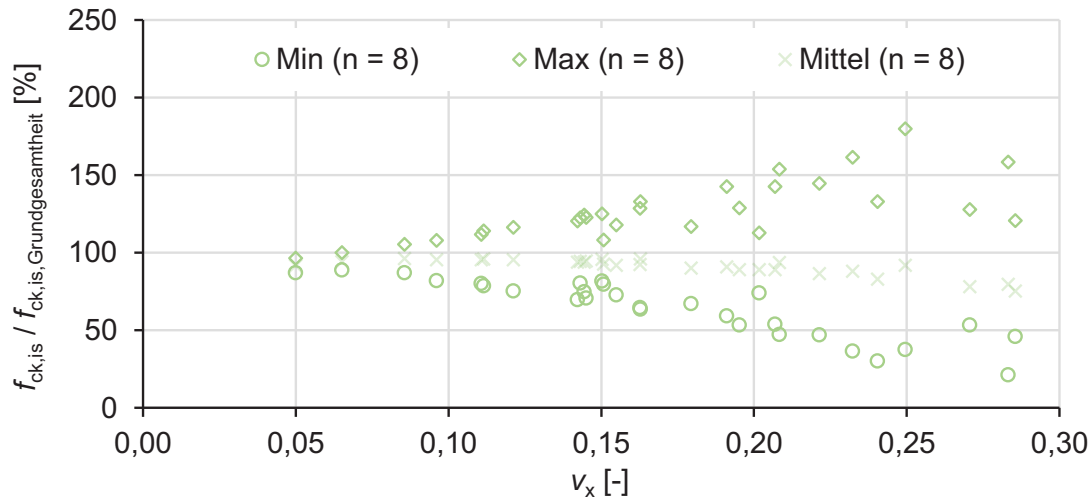


Abb. 5.98 Verhältnis zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakteristischer In-situ-Betondruckfestigkeit für E DIN EN 13791:2018 und $n = 8$

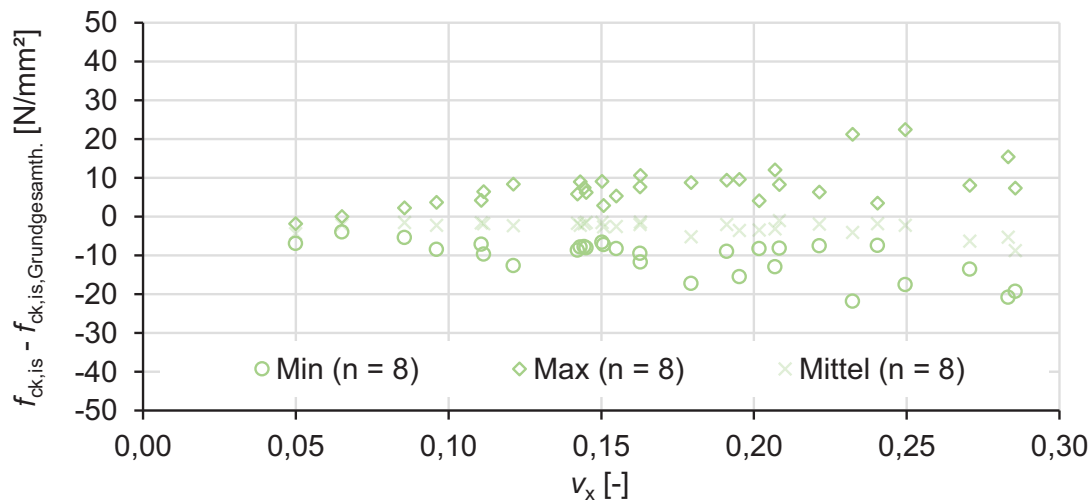


Abb. 5.99 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakt. In-situ-Betondruckfestigkeit für E DIN EN 13791:2018 und $n = 8$ in Abhängigkeit von v_x

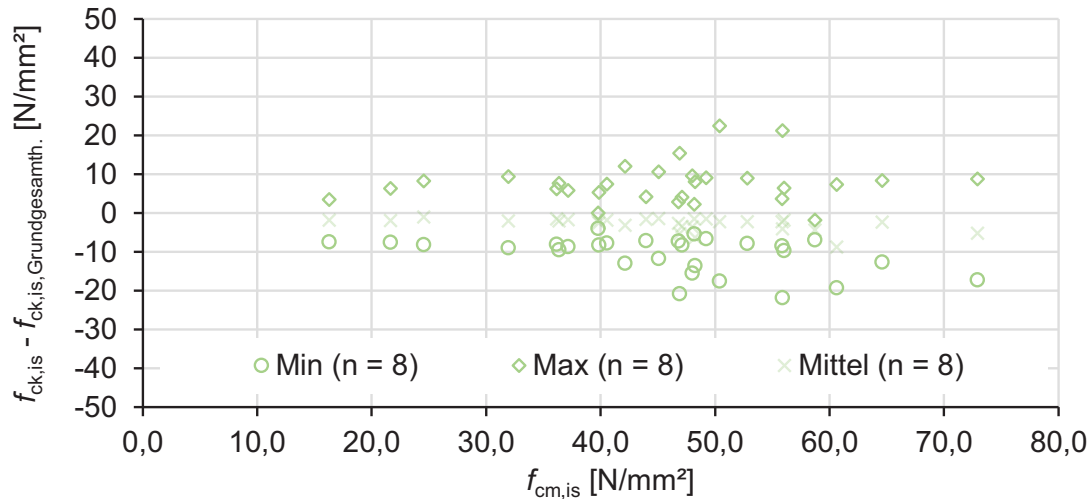


Abb. 5.100 Abweichung zwischen Min, Mittel und Max und tatsächlicher charakt. In-situ-Betondruckfestigkeit für E DIN EN 13791:2018 und $n = 8$ in Abhängigkeit von $f_{cm, is}$

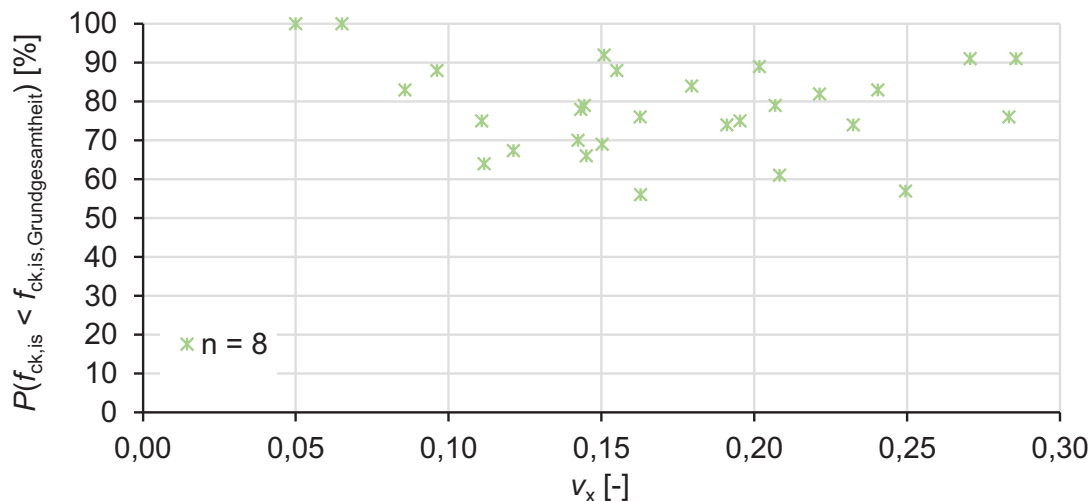


Abb. 5.101 Unterschreitungswahrscheinlichkeit bei Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit nach E DIN EN 13791:2018

In der Summe führt das Verfahren nach *E DIN EN 13791:2018-06* somit, im Hinblick auf eine zuverlässigkeitsorientierte Nachrechnung, zu einer Reduzierung der Überschätzung auf ein unkritisches Niveau und zu auf der sicheren Seite liegenden Ergebnissen. Durch die Begrenzung des Anwendungsbereichs auf einen Stichprobenumfang $n \geq 8$ ist der Ansatz in vielen praxisüblichen Fällen jedoch nicht einsetzbar.

5.6 Zwischenfazit

5.6.1 Bewertung des tatsächlichen Konfidenzniveaus bei Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit nach DIN EN 1990

Die hier beschriebene Betrachtung umfangreicher Untersuchungen realer Prüfergebnisse der In-situ-Druckfestigkeit von Bestandsbetonen zeigt zunächst, dass eine statistische Bewertung von Stichproben mit der in *DIN EN 1990:2010-12* beschriebenen Bayes'schen Methode zu einer mittleren

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Unterschreitungswahrscheinlichkeit (Verhältnis der Anzahl der Teilstichproben mit einer charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit kleiner als die der Grundgesamtheit zur Gesamtanzahl der Teilstichproben) von 77 % (NV) und 68 % (LNV) führt. Aufgrund der großen Stichprobenanzahl kann dieser Wert synonym für das klassischen statistischen Verfahren zugrunde liegende Konfidenzniveau verwendet werden. Somit kann der in *DIN EN 1990:2010-12* genannte Orientierungswert von 75 % bestätigt werden. In *prEN 1990:2018-04* ist kein derartiger Hinweis mehr enthalten. Eine denkbare Ursache hierfür wäre, dass die Bayes'sche Methode im Unterschied zu klassischen statistischen Verfahren nicht auf einem Konfidenzniveau basiert und der bisher aufgeführte Orientierungswert lediglich Raum für nicht sachgerechte Interpretationen liefert.

Die in *Schäper 2010* geäußerte Kritik an der Anwendung der LNV nach *DIN EN 1990:2010-12* ist zwar aus mathematischer Sicht richtig, jedoch keinesfalls allgemeingültig. Es werden lediglich zwei Datensätze aus Untersuchungen von Mauerwerksmörtel mit Variationskoeffizienten $v_x = 0,25$ und $v_x = 0,63$ verwendet, womit die Ergebnisse nur bedingt auf die Untersuchung der In-situ-Betondruckfestigkeit übertragbar sind.

Aufgrund dessen scheint es basierend auf den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen auch nicht angezeigt wie in *Schäper 2010* empfohlen, den Zielwert des Konfidenzniveaus bei Anwendung der LNV nach *DIN EN 1990:2010-12* auf 0,90 zu erhöhen.

5.6.2 Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang mit bestehenden Verfahren nach DIN EN 1990, DIN EN 13791:2008 und DIN ISO 16269-6

Im Hinblick auf die Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang geht aus den hier erläuterten statistischen Simulationen hervor, dass bei kleinem Stichprobenumfang für keines der bisher verwendeten statistischen Auswerte- oder Näherungsverfahren nach *DIN EN 1990:2010-12* und *DIN EN 13791:2008-05* eine uneingeschränkte Anwendungsempfehlung ausgesprochen werden kann.

Sowohl für die Normalverteilung als auch für die logarithmische Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* konnten einzelne Überschätzungen des tatsächlichen Wertes der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit von bis zu 40 N/mm² und somit in einem als äußerst kritisch einzustufenden Bereich festgestellt werden. Auch im Hinblick auf das Maß der Unterschreitung zeigen beide Verfahren besonders bei kleinem Stichprobenumfang sehr deutliche Schwächen. Die Normalverteilung führt teilweise sogar zu mechanisch unplausiblen negativen Werten. Bei der Normalverteilung konnte eine Unterschreitung von bis zu 92 N/mm² und bei der logarithmischen Normalverteilung von bis zu 33 N/mm² beobachtet werden, womit auch sehr unwirtschaftliche Ergebnisse möglich sind. Eine Erhöhung des Stichprobenumfangs wirkt sich bei beiden Verfahren durch eine Reduzierung der Streubreite positiv aus, wobei besonders das Maß der Unterschreitung reduziert wird.

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Der in *DIN EN 13791:2008-05* enthaltene Ansatz B führt im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen zur größten mittleren Überschätzung. Für die mittlere Überschätzung konnten Werte von bis zu 15 N/mm² festgestellt werden. Einzelwerte übersteigen den tatsächlichen Wert der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit sogar um bis zu 40 N/mm². Eine Erhöhung des Stichprobenumfangs führt nur zu einer geringfügigen Reduzierung der Abweichung. Die Anwendung von Ansatz B nach *DIN EN 13791:2008-05* zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit für die Nachrechnung bestehender Massivbauwerke ist somit nicht anzuraten, da sehr große und damit als kritisch einzustufende Überschätzungen der In-situ-Betondruckfestigkeit nicht ausgeschlossen werden können.

5.6.3 Bewertung des bauartenspezifischen Verfahrens nach BAW

Eine wie z. B. in *BAW 2016* vorgeschlagene Erhöhung des Zielwertes des Konfidenzniveaus auf $(1 - \alpha) = 0,95$ führt zwar im Mittel zu einer Reduzierung der aus der Stichprobe geschätzten charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit, die maximal mögliche Überschätzung wird jedoch im Vergleich zur Auswertung mit einer logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* nicht beeinflusst. In der Summe führt die Erhöhung des Konfidenzniveaus zu einer deutlichen Reduzierung der Wirtschaftlichkeit der Schätzung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit.

5.6.4 Bewertung neuer europäischer Ansätze nach E DIN EN 13791:2018

Das in *E DIN EN 13791:2018-06* enthaltene Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit allein durch die Prüfung von Bohrkernen trägt dem in der vorliegenden Arbeit aufgezeigten positiven Einfluss einer Erhöhung des Stichprobenumfangs konsequent Rechnung. Durch die Forderung eines Mindeststichprobenumfangs $n = 8$ ist das Verfahren in vielen praxisüblichen Fällen jedoch nicht einsetzbar.

5.6.5 Weiterentwicklung bestehender Verfahren und Anwendungsempfehlung

Eine wesentlich höhere Effektivität kann der Begrenzung der Streuung der Stichprobe durch $s_{x,\min}$ oder $v_{x,\min}$ und $v_{x,\max}$ attestiert werden. Ein Mindestwert der Streuung führt allgemein zu einer Reduzierung der Überschätzung. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Begrenzung der Streuung über den Variationskoeffizienten im Hinblick auf die betrachteten und bei der Bewertung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit gebräuchlichen Mittelwerte, Variationskoeffizienten und Stichprobenumfänge zu einer deutlich effektiveren Reduzierung der Streubreite führt.

Die Einführung eines Maximalwertes der Streuung über $v_{x,\max}$ führt darüber hinaus zusätzlich zu einer Reduzierung der Unterschreitung und somit zu einer Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Schätzung.

Im Vergleich der untersuchten Auswerteverfahren kann bei Anwendung des neu entwickelten Verfahrens die geringste maximale Überschätzung erreicht werden. Auch die maximale Unterschreitung ist mit bis zu 15 N/mm² als sehr gering einzustufen.

Verfahren zur Bestimmung der In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Lediglich mit Ansatz B nach *DIN EN 13791:2008-05* kann eine noch geringere Unterschreitung verzeichnet werden, was jedoch mit einer erhöhten und oft kritischen Überschreitung einhergeht.

Die in Abb. 5.97 dargestellte Unterschreitungswahrscheinlichkeit ist zwar besonders bei großer Streuung der betrachteten Grundgesamtheit in vielen Fällen sehr gering, wobei jedoch zu beachten ist, dass durch die Verwendung von $v_{x,max}$ teilweise bis zu 90 % der Teilstichproben aussortiert werden.

Der empfohlene Höchstwert des Variationskoeffizienten $v_{x,max}$ soll vor allem dazu führen, dass bei großer Stichprobenstreuung alle Einzelwerte nochmals kritisch hinterfragt und auf Zugehörigkeit zu einer Grundgesamtheit überprüft werden. Hierzu können über die in Abschnitt 3.3.2.1 genannten visuellen und nicht visuellen Verfahren ergänzend auch die im folgenden Abschnitt 6 beschriebenen Ausreißertests eingesetzt werden.

Können alle Einzelwerte abgesichert einer Grundgesamtheit zugeordnet werden und eine Erhöhung des Stichprobenumfangs ist nicht möglich, so liefert eine Auswertung mit dem modifizierten Ansatz A auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse.

Vor diesem Hintergrund kann die Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit mit dem neuentwickelten Verfahren nach Abschnitt 5.4, welches besonders bei kleinem Stichprobenumfang im Vergleich zu den bestehenden Verfahren eine teils erhebliche Verbesserung darstellt, stets angeraten werden. Dennoch sei darauf hingewiesen, dass das neu entwickelte Verfahren, welches inzwischen bereits in *DIN EN 13791/A20:2017-02* sowie *DAfStb 619* und *DBV 2016* enthalten ist, zwar im Vergleich zu den bisher gebräuchlichen Verfahren eine deutliche Verbesserung darstellt, dennoch können Überschreitungen nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

6 Ausreißertests bei der stichprobenartigen Bewertung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit

6.1 Allgemeines

Für die Nachrechnung bestehender Massivbauwerke sind im Grenzzustand der Tragfähigkeit gemäß aktueller Normung 5 %-Quantilwerte der betrachteten Materialeigenschaft (sogenannte charakteristische Materialkennwerte) erforderlich. In der Praxis gebräuchliche Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Druckfestigkeit, basierend auf einer experimentellen Untersuchung der Betondruckfestigkeit durch Bohrkernentnahme am Bestandstragwerk, fußen auf einem Stichprobenumfang $n \geq 3$.

Besonders bei kleinem Stichprobenumfang führen jedoch einzelne Extremwerte zu einem sehr starken Anstieg der Streuung und damit einhergehend zu sehr kleinen charakteristischen Werten der Betondruckfestigkeit. In den aktuell eingeführten Regelwerken sind keine Verfahren für eine mathematisch abgesicherte Überprüfung der Zugehörigkeit aller Einzelwerte zu einer Grundgesamtheit und somit auch zur Identifikation von Ausreißern enthalten.

Ein Ausreißer ist nach *Rooch 2014* als Messwert definiert, der nicht in eine Messreihe passt, weil er z. B. auffällig groß oder klein ist. Mögliche Ursachen für große Abweichungen einzelner Prüfwerte bei der Bestimmung der In-situ-Betondruckfestigkeit an Bohrkernen sind nicht erkennbare Vorschäden, Bewehrungseinschlüsse, Betonierfehler und Messfehler. Bei der Untersuchung der In-situ-Betondruckfestigkeit sind sowohl Ausreißer nach oben (Überschätzung) als auch Ausreißer nach unten (Unterschätzung) möglich.

Neben verschiedenen visuellen Verfahren, wie z. B. der Überprüfung der Bohrkernoberfläche im Hinblick auf Kornabstufung und Betongefüge (vgl. Kapitel 3) werden einzelne Extremwerte bisher durch eine auf individueller Erfahrung basierende subjektive Beurteilung ggf. als Ausreißer eingestuft und somit von der weiteren Beurteilung der Stichprobe ausgeschlossen.

Im Rahmen der Überarbeitung der *EN 13791:2007* soll mit dem Grubbs-Test ein Ausreißertest in die Norm, welche bereits als Entwurf *E DIN EN 13791:2018-06* vorliegt, aufgenommen werden. Zur Festlegung, ab wann ein Extremwert als signifikanter Ausreißer einzustufen ist und somit von der präzisierten Stichprobe abweicht, verwenden Ausreißertests das Signifikanzniveau α (vgl. Abschnitt 2.3.3.2), welches im Bauwesen bisher nicht einheitlich festgelegt ist. Grundsätzlich wird zwischen beidseitigen Ausreißertests (zweiseitiges Konfidenzintervall) und einseitigen Ausreißertests (einseitig nach oben oder unten begrenztes Konfidenzintervall) (vgl. Abb. 2.9) unterschieden.

Allgemein ist bei der Anwendung von Ausreißertests zu beachten, dass die Kriterien zur Entscheidung, ob es sich um einen Ausreißer handelt oder nicht, meist auf der Annahme einer normalverteilten Grundgesamtheit beruhen, welche wie in Anhang I gezeigt die tatsächliche Verteilung der Betondruckfestigkeit nicht immer realitätsnah beschreibt. Weicht die Verteilung der Einzelwerte der zu bewertenden Stichprobe von

der Normalverteilung ab, kann dies die Aussagekraft eines Ausreißertest maßgeblich nachteilig beeinträchtigen.

Im vorliegenden Abschnitt erfolgt basierend auf stochastisch generierten sowie realen Datensätzen eine Bewertung der Anwendbarkeit verschiedener Ausreißertests bei der Beurteilung der In-situ-Betondruckfestigkeit unter Berücksichtigung des Stichprobenumfangs. Darauf aufbauend wird ein neues, auf die Besonderheiten von Bestandsbetonen angepasstes Verfahren entwickelt.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen zum Thema Ausreißertests sind in Auszügen inhaltsgleich in *Weber et al. 2019a* vorveröffentlicht.

6.2 Einfluss von Extremwerten auf Lage- und Streuungsparameter

6.2.1 Allgemeines

In Abschnitt 2.2 wurden verschiedene numerische Zusammenfassungen, die die wesentlichen Kenngrößen eines Datensatzes wiedergeben, vorgestellt. Allgemein wird zwischen Kenngrößen zur Beschreibung der Lage (Zentrum der Stichprobe und somit der Bereich, in dem sich ein großer Teil der Einzelwerte befindet) und Kenngrößen zur Beschreibung der Streuung von Daten unterschieden. Zur Bewertung des Einflusses von Extremwerten auf die aus einer Stichprobe abgeleiteten Lage- und Streuungsparameter werden nachfolgend verschiedene fiktive aber auch reale Datensätze untersucht. Zunächst wird dabei der allgemeine Einfluss des Auftretens von Extremwerten um die Masse der Daten auf die zugehörigen Schätzer der Lage betrachtet. Darüber hinaus wird an Sensitivitätskurven der betragsmäßige Einfluss von Extremwerten auf den zugehörigen Schätzer bewertet.

6.2.2 Lageparameter symmetrisch und nicht symmetrisch verteilter Daten

In Abb. 6.1 und Abb. 6.2 sind Median, Mittelwert und getrimmter Mittelwert für jeweils fünf symmetrisch und nicht symmetrisch verteilte, fiktive Datensätze mit einem Stichprobenumfang von $n = 5$ dargestellt. Der getrimmte Mittelwert (vgl. Abschnitt 0) wurde dabei exemplarisch für $\gamma = 0,10$ bestimmt. Nach Gleichung. (2.4) werden somit bei dem vorliegenden Stichprobenumfang von $n = 5$ keine Einzelwerte von der Berechnung des Mittelwertes ausgeschlossen.

Die in Abb. 6.1 dargestellten Stichproben zeigen deutlich, dass bei symmetrisch verteilten Daten die enthaltenen Extremwerte für alle dargestellten Verfahren keinen Einfluss auf die Schätzung der Lageparameter haben. Alle betrachteten Verfahren führen jeweils zum gleichen Ergebnis.

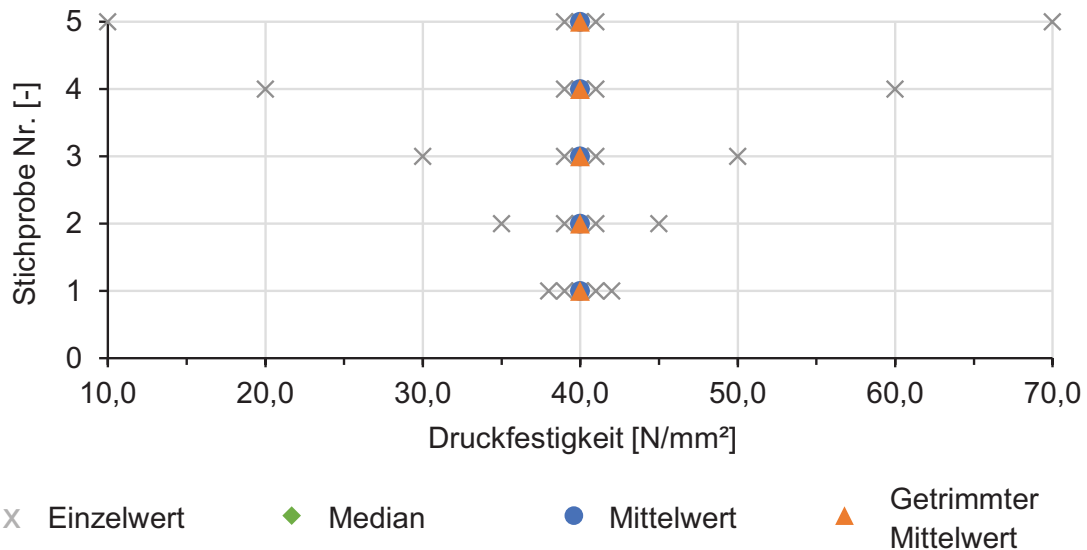


Abb. 6.1 Lageparameter symmetrisch verteilter Daten

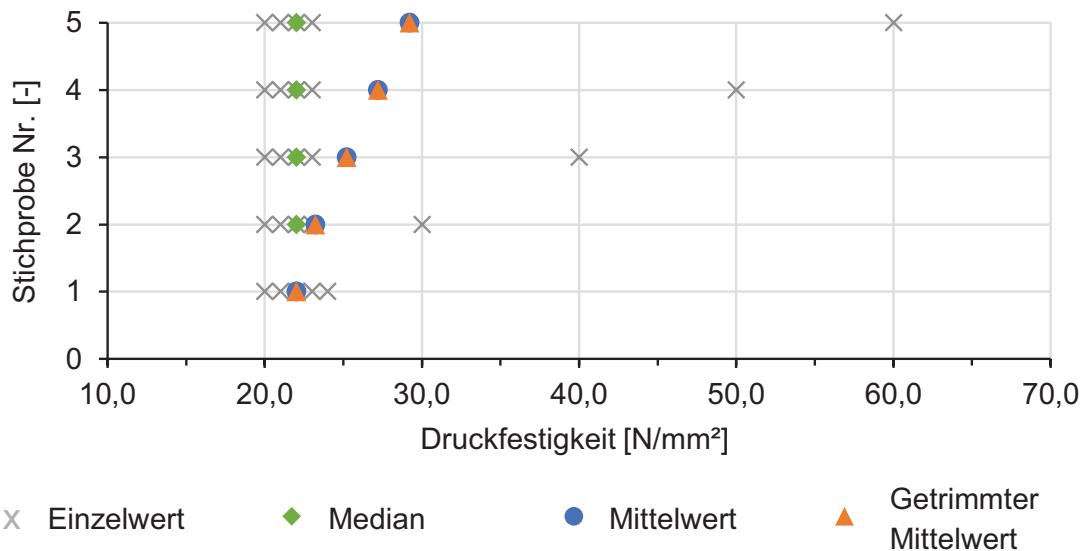


Abb. 6.2 Lageparameter asymmetrisch verteilter Daten

Bei asymmetrisch verteilten Daten (Abb. 6.2) hingegen führen die verschiedenen Verfahren zu teilweise sehr unterschiedlichen Schätzungen der Lage. Es ist deutlich zu erkennen, dass das arithmetische Mittel sehr sensibel auf einzelne Extremwerte, die deutlich von den übrigen Daten abweichen, reagiert. Der Median hingegen ist bei allen fünf Stichproben gleich groß und ist somit weniger anfällig für einzelne Extremwerte. Die Verwendung getrimmter Mittelwerte nach Gleichung (2.3) ist bei kleinem Stichprobenumfang nicht zielführend. Für den gewählten Wert $\gamma = 0,10$ wird bei dem vorliegenden Stichprobenumfang $n = 5$ kein Einzelwert von der Berechnung des Mittelwertes ausgeschlossen. Eventuelle Extremwerte werden somit auch nicht ausgeschlossen. Infolgedessen entspricht der getrimmte Mittelwert im vorliegenden Beispiel dem jeweiligen arithmetischen Mittelwert.

Allgemein kann festgehalten werden, dass der Median deutlich näher bei der Masse der Daten liegt und in einem viel geringeren Maß von einzelnen Extremwerten beeinflusst wird als das arithmetische Mittel. Der Median wird daher auch als robuster Schätzer bezeichnet.

6.2.3 Sensitivitätskurven für Lage- und Streuungsparameter

Zur Beschreibung des betragsmäßigen Einflusses von Extremwerten auf die zugehörigen Schätzer der Lage und Streuung werden nachfolgend für zehn reale Datensätze mit $n = 5$ sowie für zehn reale Datensätze mit $19 \leq n \leq 63$ verschiedene Sensitivitätskurven (vgl. Abschnitt 2.5) dargestellt. Bei den Stichproben handelt es sich jeweils um Ergebnisse von Untersuchungen zur Bestimmung der In-situ-Betondruckfestigkeit durch Druckfestigkeitsprüfungen an aus dem Bauteil entnommenen Bohrkernen. Die Einzelwerte können Anhang III entnommen werden.

Die Sensitivitätskurve ist ein Maß zur Beschreibung der Reaktion einer Schätzfunktion, wenn zu einer Stichprobe mit dem Umfang n noch ein zusätzlicher Wert x_{n+1} hinzukommt. Ist der Verlauf der Funktion einer Sensitivitätskurve nicht beschränkt, d. h. es gibt keine obere und untere Grenze, so ist der zugehörige Schätzer auch nicht robust (vgl. Hampel 1986).

Zur Beschreibung der Lage werden nachfolgend der Mittelwert und der Median und zur Beschreibung der Streuung die Standardabweichung und die MAD betrachtet.

In Abb. 6.3 bis Abb. 6.6 sind die Sensitivitätskurven für den Mittelwert, den Median, die Standardabweichung und die MAD (median absolute deviation; vgl. Abschnitt 0) für jeweils zehn reale Datensätze mit $n = 5$ dargestellt. Auf der Ordinatenachse ist die Änderung Δ der jeweils betrachteten Kenngröße in Abhängigkeit der Größe eines auf der Abszissenachse aufgetragen, zusätzlichen Wertes x_{n+1} , dargestellt. Für den zusätzlichen Wert x_{n+1} wurde hier ein fiktives Intervall von 0 bis 200 N/mm² gewählt. Die Sensitivitätskurve ist von der Schätzfunktion selbst, den konkreten Beobachtungswerten sowie deren Anzahl abhängig.

Beträgt die auf der Ordinatenachse aufgetragene Änderung Δ der betrachteten Kenngröße 0, so entspricht der zusätzliche Wert x_{n+1} genau dem Wert der betrachteten Kenngröße der ursprünglichen Stichprobe (vgl. exemplarisches Ablesebeispiel Abb. 6.3).

Der Verlauf der Sensitivitätskurven für Median (vgl. Abb. 6.4) und MAD (vgl. Abb. 6.6) zeigt deutlich, dass beide Schätzer im Vergleich zu Mittelwert und Standardabweichung (vgl. Abb. 6.3 und Abb. 6.5) deutlich weniger stark durch einen Extremwert in der Stichprobe beeinflusst werden. Solche Schätzer werden auch als robuste Schätzer bezeichnet. Mittelwert und Standardabweichung, welche die gebräuchlichen Schätzer zur Beurteilung einer Stichprobe nach *DIN EN 1990:2010-12* und *DIN EN 13791/A20:2017-02* darstellen, reagieren sehr empfindlich auf einzelne Extremwerte.

In Abb. 6.7 bis Abb. 6.10 sind die entsprechenden Sensitivitätskurven für jeweils zehn Datensätze mit $19 \leq n \leq 63$ dargestellt.

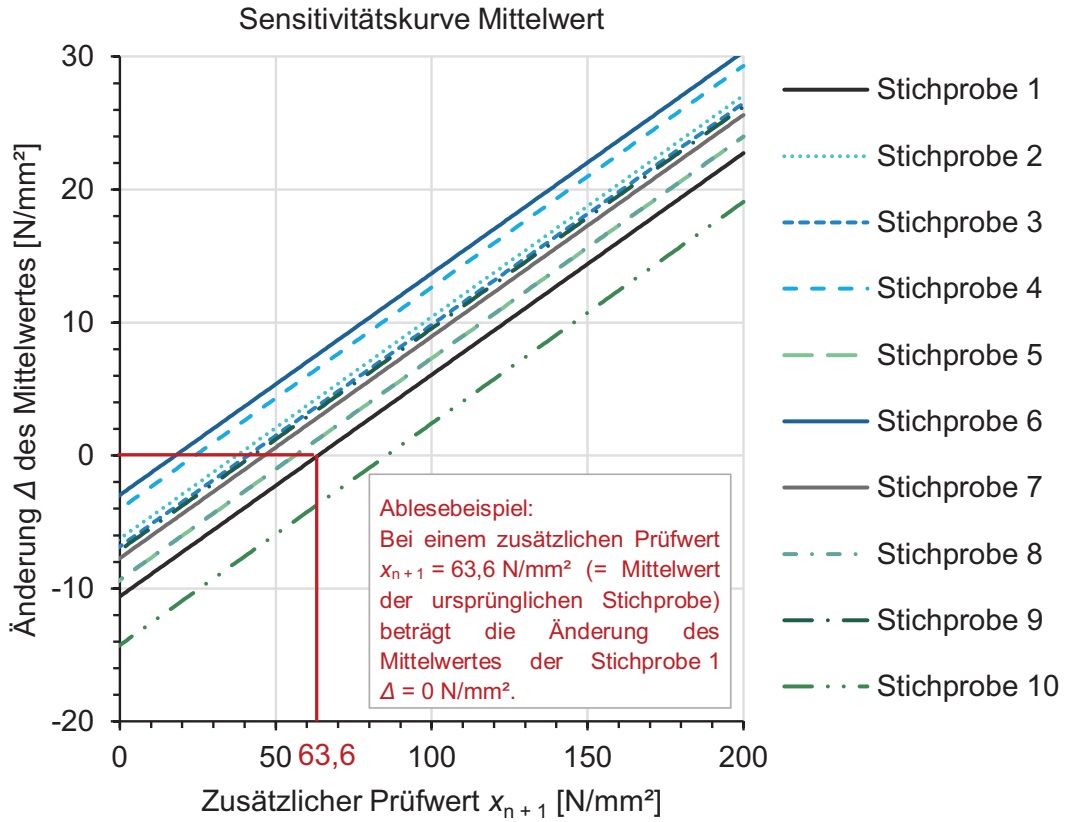


Abb. 6.3 Sensitivitätskurven für den Mittelwert für Stichproben mit $n = 5$

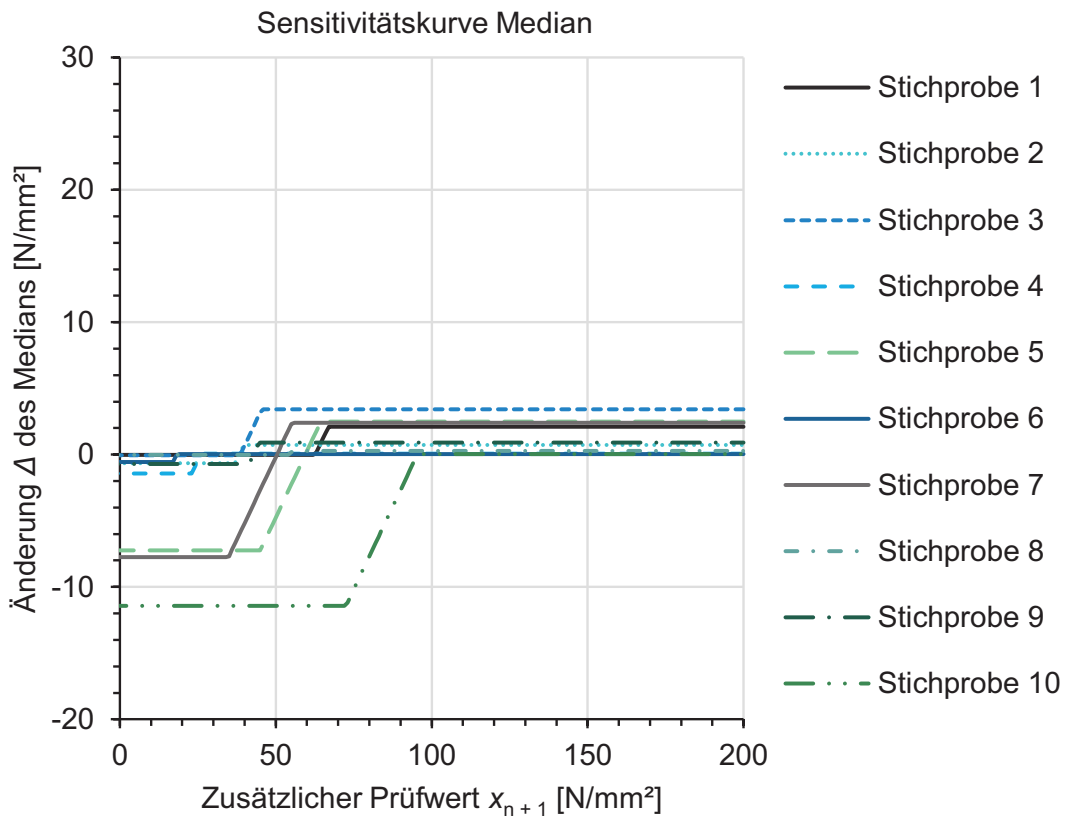


Abb. 6.4 Sensitivitätskurven für den Median für Stichproben mit $n = 5$

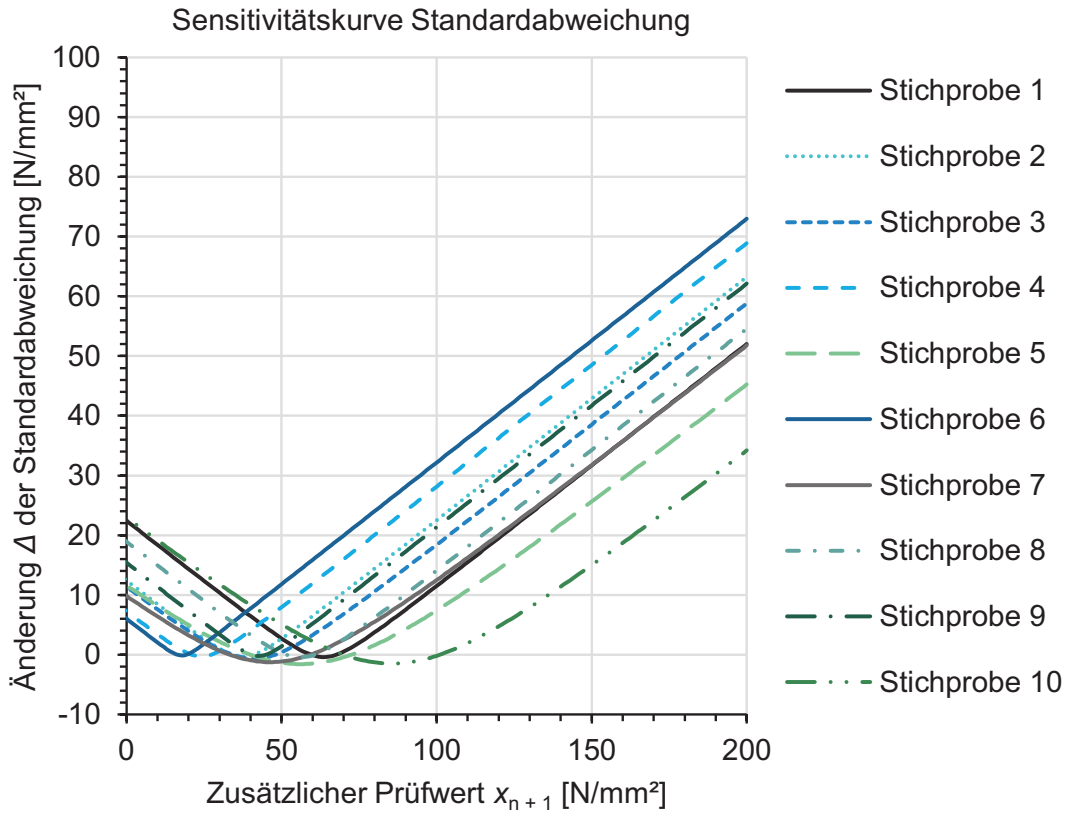


Abb. 6.5 Sensitivitätskurven für die Standardabweichung für Stichproben mit $n = 5$

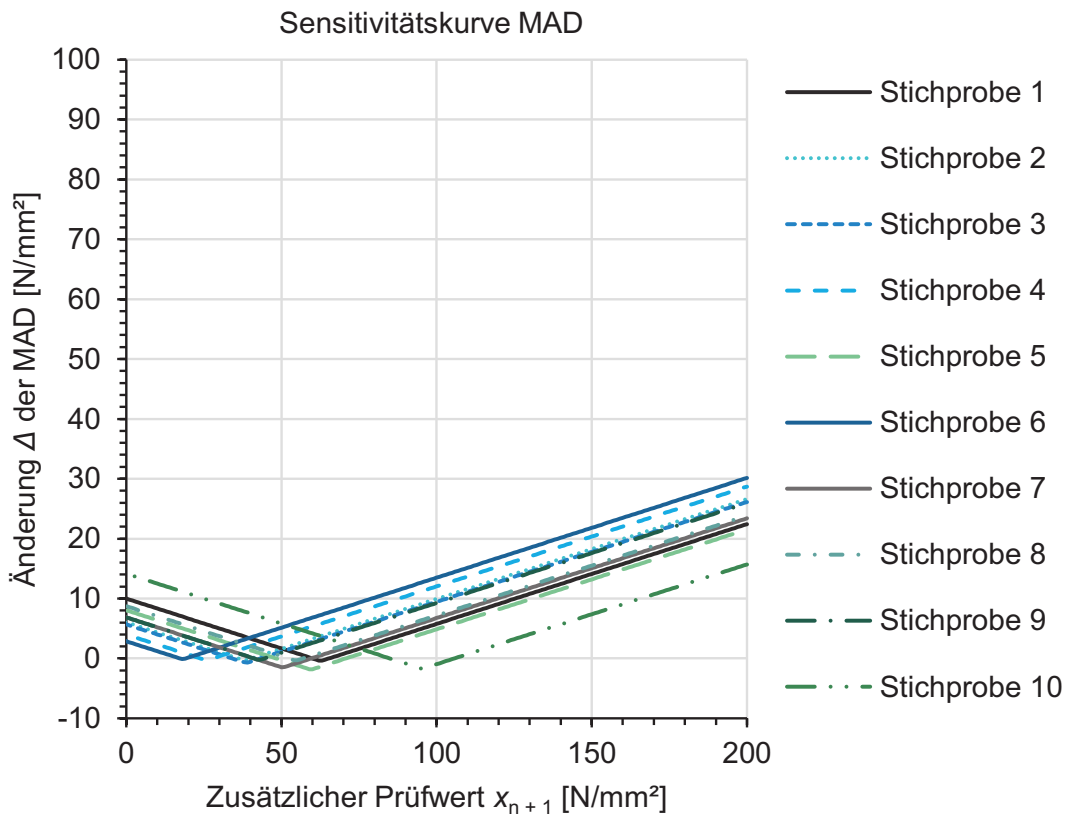
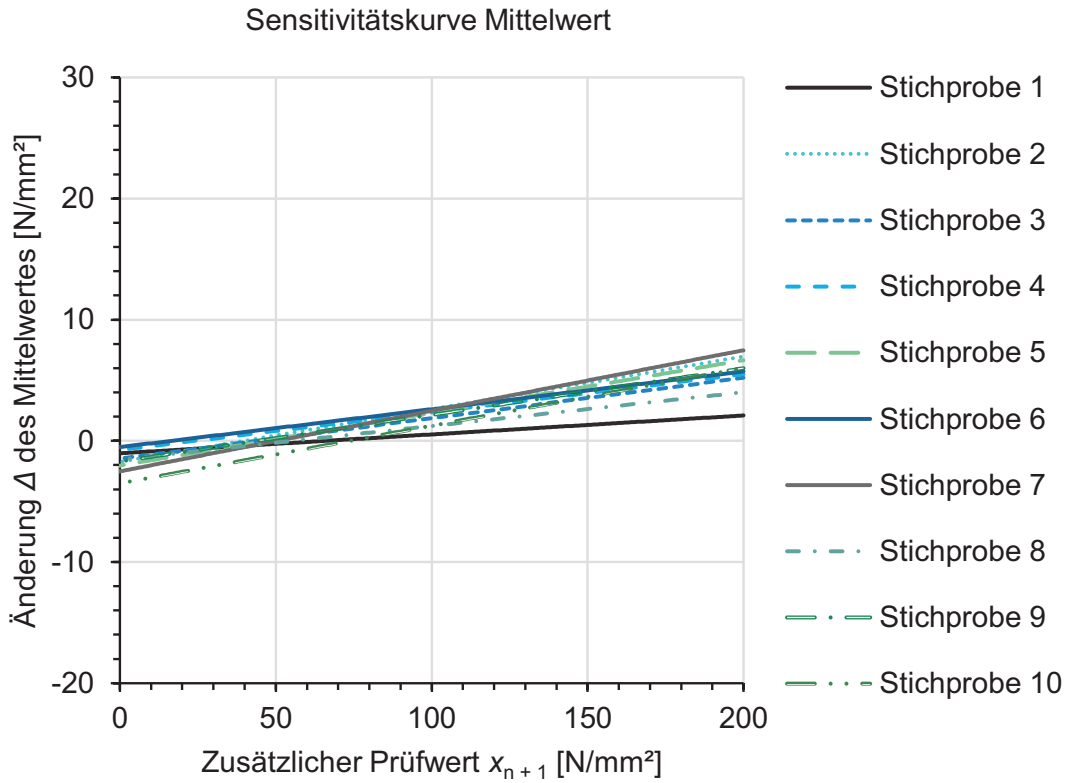
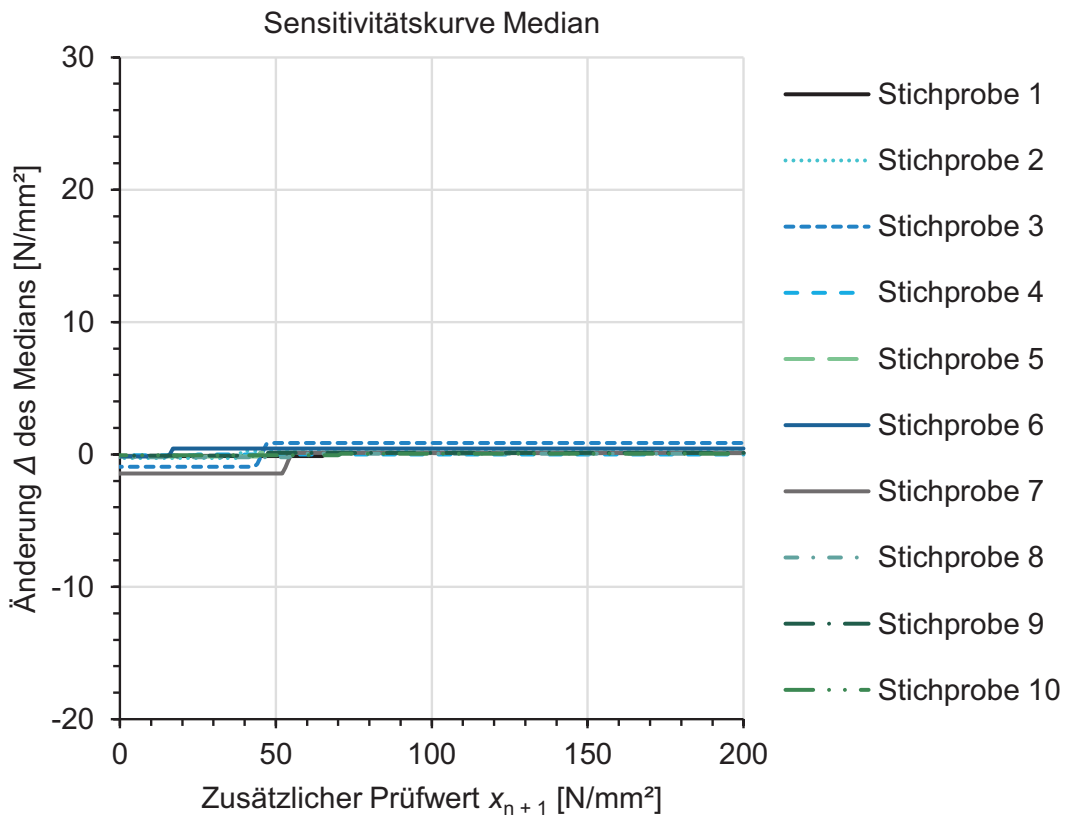


Abb. 6.6 Sensitivitätskurven für die Median absolute deviation (MAD) für Stichproben mit $n = 5$

Abb. 6.7 Sensitivitätskurven für den Mittelwert für Stichproben mit $n > 10$ Abb. 6.8 Sensitivitätskurven für den Median für Stichproben mit $n > 10$

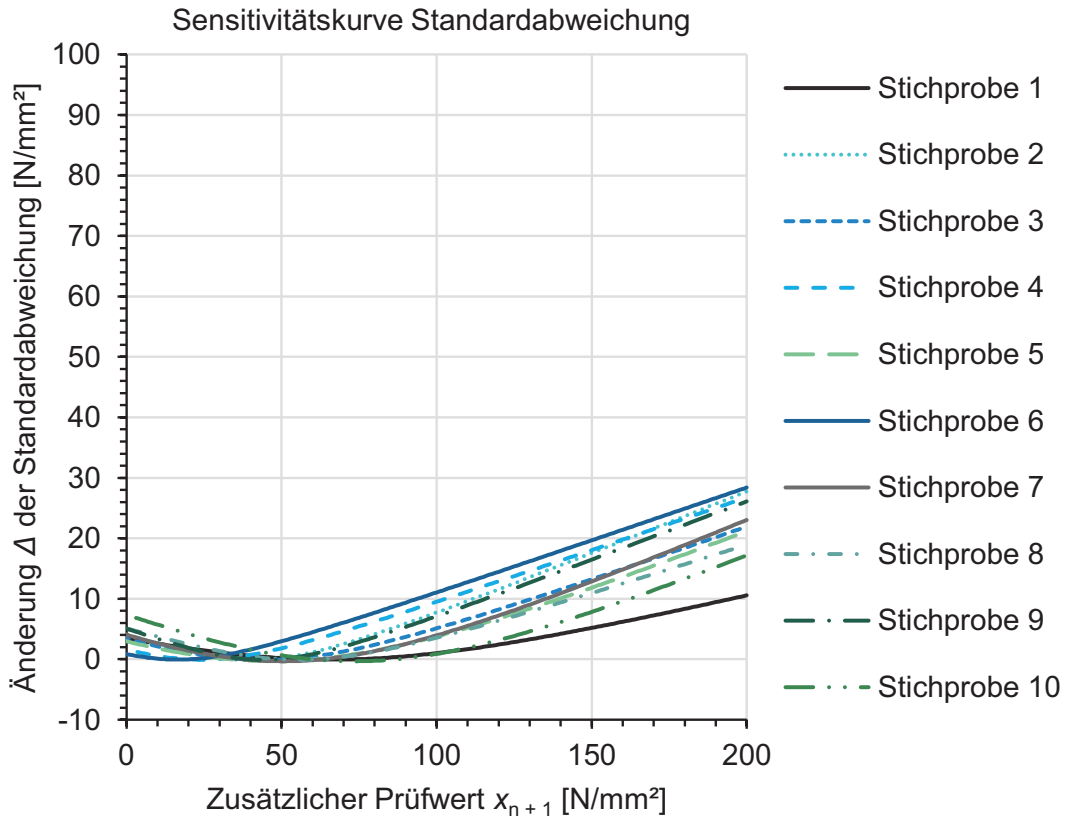


Abb. 6.9 Sensitivitätskurven für die Standardabweichung für Stichproben mit $n > 10$

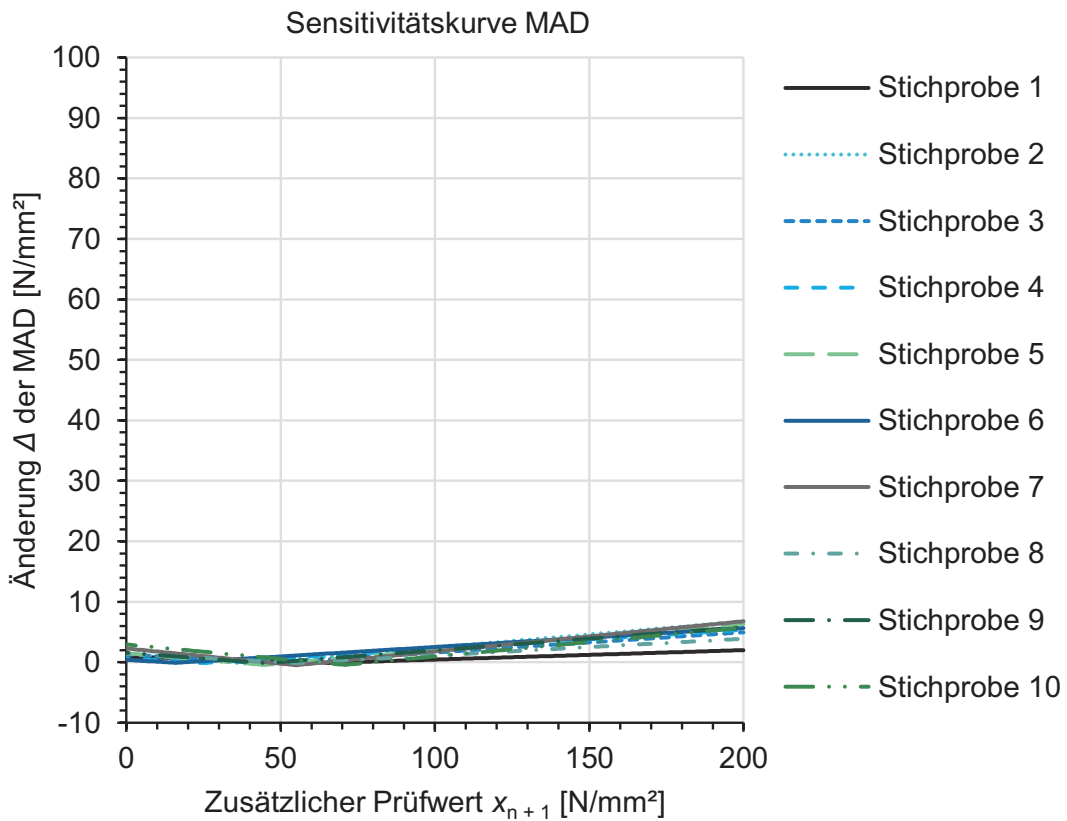


Abb. 6.10 Sensitivitätskurven für die Median absolute deviation (MAD) für Stichproben mit $n > 10$

Für alle hier betrachteten Parameter zur Schätzung der Lage oder Streuung kann bei großem Stichprobenumfang ein viel geringerer Einfluss einzelner Extremwerte festgestellt werden. Für den Median und die MAD ist der Einfluss einzelner Extremwerte wie in Abb. 6.8 und Abb. 6.10 gezeigt sogar vernachlässigbar klein.

Besonders aber bei kleinem Stichprobenumfang kann ein einziger Extremwert jedoch vor allem den Mittelwert und die Standardabweichung stark verfälschen. Die Überprüfung einer Stichprobe im Hinblick auf Ausreißer ist daher stets anzuraten und insbesondere bei kleinem Stichprobenumfang von großer Bedeutung.

6.3 Bestehende Ausreißertests

6.3.1 Ausreißertest nach David-Hartley-Pearson (zweiseitiges Konfidenzintervall)

Der Ausreißertest nach David-Hartley-Pearson (DHP) setzt nach *Hartung 1993* eine normalverteilte Grundgesamtheit voraus. Der DHP-Test prüft, ob es sich bei dem größten oder kleinsten Einzelprüfergebnis um einen Ausreißer handelt. Als Maß wird dabei nach Gleichung (6.1) die Spannweite der Stichprobe; d. h. die Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten Einzelwert, dividiert durch deren Standardabweichung (Gleichung (2.8)) verwendet.

$$Q = \frac{x_n - x_1}{s} \quad (6.1)$$

Sobald Q den kritischen Wert Q_{krit} überschreitet, wird der Einzelwert mit dem größten Abstand vom Mittelwert der Messreihe als Ausreißer gewertet. Falls beide Werte gleich weit vom Mittelwert entfernt sind, gelten beide als Ausreißer. In Tab. 6.1 sind exemplarisch die Werte von Q_{krit} für die Signifikanzniveaus (vgl. Abschnitt 2.3.3) $\alpha = 0,01$ und $\alpha = 0,05$ in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang n aufgetragen.

Tab. 6.1 Kritische Werte $Q_{\text{krit}}(n; \alpha)$ nach *David et al. 1954*

n	$\alpha = 0,01$	$\alpha = 0,05$	n	$\alpha = 0,01$	$\alpha = 0,05$
4	2,45	2,43	12	4,13	3,91
5	2,80	2,75	15	4,43	4,17
6	3,10	3,01	20	4,79	4,49
7	3,34	3,22	30	5,25	4,89
8	3,54	3,40	40	5,54	5,15
9	3,72	3,55	50	5,77	5,35
10	3,88	3,69			

6.3.2 Ausreißertest nach Grubbs (zweiseitiges Konfidenzintervall)

Der Ausreißertest nach Grubbs setzt ebenfalls eine normalverteilte Grundgesamtheit voraus. Der Grubbs-Test prüft, ob es sich bei dem größten bzw. kleinsten Einzelprüfergebnis um einen Ausreißer handelt. Als Maß wird dabei die Distanz zwischen dem Extremwert und dem arithmetischen Mittel der Stichprobe, im Verhältnis zur Standardabweichung der Stichprobe nach Gleichung (6.2) angesetzt.

$$T_n = \frac{\max |x_i - \bar{x}|}{s} \quad (6.2)$$

Ein Einzelprüfwert ist als Ausreißer einzustufen, sobald T_n den kritischen Wert T_{krit} als Funktion der (Student-)t-Verteilung nach Gleichung (6.3) in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang n und dem gewählten Signifikanzniveau α überschreitet.

$$T_{\text{krit}} = \frac{n-1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{t_{1-\frac{\alpha}{2n}, n-2}^2}{n-2 + t_{1-\frac{\alpha}{2n}, n-2}^2}} \quad (6.3)$$

mit:

$t_{1-\frac{\alpha}{2n}, n-2}$ Quantil der t-Verteilung für das Konfidenzniveau α und $n - 2$ Freiheitsgrade
(z. B. tabelliert in *Roach 2014*)

Zur Bewertung der In-situ-Betondruckfestigkeit wird der Grubbs-Test in *E DIN EN 13791:2018-06* mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,01$ empfohlen.

6.3.3 Ausreißertest nach Dixon (einseitiges Konfidenzintervall)

Bei dem Ausreißertest nach *Dixon 1953* wird geprüft, ob es sich bei dem größten oder kleinsten Einzelwert einer Stichprobe um einen Ausreißer handelt. Das Kriterium zur Beurteilung ob ein Ausreißer vorliegt ist abhängig vom vorliegenden Stichprobenumfang n . In Tab. 6.2 sind die Kriterien zur Prüfung des größten und kleinsten Einzelwertes sowie die zugehörigen und vom Signifikanzniveau α abhängigen kritischen Werte dargestellt. Ein Einzelprüfwert ist als Ausreißer einzustufen, sobald r_{ij} den kritischen Wert r_{krit} nach Tab. 6.2 überschreitet.

Tab. 6.2 Kriterien zur Prüfung von Extremwerten sowie kritische Werte $r_{\text{krit}}(n; \alpha)$ nach *Dixon 1953*

n	Kriterium zur Prüfung von Extremwerten	$\alpha = 0,01$	$\alpha = 0,05$
3	Überprüfung des kleinsten Einzelwertes x_1 $r_{10} = (x_2 - x_1) / (x_n - x_1)$	0,988	0,941
4		0,889	0,765
5	Überprüfung des größten Einzelwertes x_n $r_{10} = (x_n - x_{n-1}) / (x_n - x_1)$	0,780	0,642
6		0,698	0,560
7		0,637	0,507
8	Überprüfung des kleinsten Einzelwertes x_1 $r_{11} = (x_2 - x_1) / (x_{n-1} - x_1)$	0,683	0,554
9		0,635	0,512
10	Überprüfung des größten Einzelwertes x_n $r_{11} = (x_n - x_{n-1}) / (x_n - x_2)$	0,597	0,477

Tab. 6.2 Fortsetzung

n	Kriterium zur Prüfung von Extremwerten	$\alpha = 0,01$	$\alpha = 0,05$
11	Überprüfung des kleinsten Einzelwertes x_1	0,679	0,576
12	$r_{21} = (x_3 - x_1)/(x_{n-1} - x_1)$ Überprüfung des größten Einzelwertes x_n	0,642	0,546
13	$r_{21} = (x_n - x_{n-2})/(x_n - x_2)$	0,615	0,521
14	Überprüfung des kleinsten Einzelwertes x_1 $r_{22} = (x_3 - x_1)/(x_{n-2} - x_1)$ Überprüfung des größten Einzelwertes x_n $r_{22} = (x_n - x_{n-2})/(x_n - x_3)$	0,641	0,546
15		0,616	0,525
16		0,595	0,507
17		0,577	0,490
18		0,561	0,475
19		0,547	0,462
20		0,535	0,450
25		0,489	0,406

6.3.4 Ausreißertest nach BS 6089 (einseitig, nach unten begrenztes Konfidenzintervall)

Im Gegensatz zu den vorgenannten Verfahren, prüft der Ausreißertest nach *BS 6089* lediglich, ob es sich bei dem kleinsten Einzelprüfergebnis f_{\min} um einen Ausreißer handelt. Als Maß wird dabei die Distanz zwischen dem arithmetischen Mittel der verbleibenden Werte $f_{m(n-1)}$, also alle Werte ohne f_{\min} , und dem kleinsten Einzelprüfwert f_{\min} , im Verhältnis zum Mittelwert der verbleibenden Werte $f_{m(n-1)}$ nach Gleichung (6.4) genutzt.

$$R_t = \frac{f_{m(n-1)} - f_{\min}}{f_{m(n-1)}} \quad (6.4)$$

Ein Einzelprüfwert ist als Ausreißer einzustufen, sobald R_t den kritischen Wert $R_{t,\text{krit}}$ nach Gleichung (6.5) aufbauend auf einer t -Verteilung mit einseitigem Konfidenzniveau und $n - 2$ Freiheitsgraden (z. B. tabelliert in *Roach 2014*) und einem Variationskoeffizienten der Grundgesamtheit von 6 % in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang n und dem gewählten Signifikanzniveau α überschreitet. *BS 6089* unterscheidet dabei zwischen einem auffälligen Wert, verbunden mit einem Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ und einem signifikanten Ausreißer, verbunden mit einem Signifikanzniveau $\alpha = 0,025$, der bei der Bestimmung des Nachrechnungswertes der Betondruckfestigkeit nicht zu berücksichtigen ist.

$$R_{t,\text{krit}} = t_{1-\alpha,n-2} \cdot \left(\frac{6}{100}\right) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{1}{n-1}\right)} \quad (6.5)$$

6.4 Vergleich und Bewertung bestehender Ausreißertests

Zur Bewertung der Anwendbarkeit und Effizienz wurden die in Abschnitt 6.3 genannten Ausreißertests auf jeweils 14 synthetisch generierte Datensätze mit einem für die Bewertung der Betondruckfestigkeit an Bohrkernen typischen Stichprobenumfang von $n = 4$, $n = 7$ und $n = 10$ angewendet. Es wurden sowohl Datensätze mit Extremwerten nach oben als auch nach unten betrachtet. Bei einem Stichprobenumfang $n = 10$ wurde zusätzlich der Fall zweier Extremwerte untersucht. Die Einzelwerte können Anhang III entnommen werden.

In den nachfolgenden Abbildungen Abb. 6.11 bis Abb. 6.18 sind die Ergebnisse der Bewertung der Stichproben mit den Ausreißertests nach BS 6089 ($\alpha = 0,025$), Dixon ($\alpha = 0,05$), Grubbs ($\alpha = 0,01$), wie er auch in *E DIN EN 13791:2018-06* enthalten ist, und Grubbs ($\alpha = 0,05$) dargestellt. Alle Einzelwerte sind als Kreuz dargestellt, Ausreißer sind zusätzlich rot gekennzeichnet:

- x Einzelwert,
- x als Ausreißer identifizierter Einzelwert.

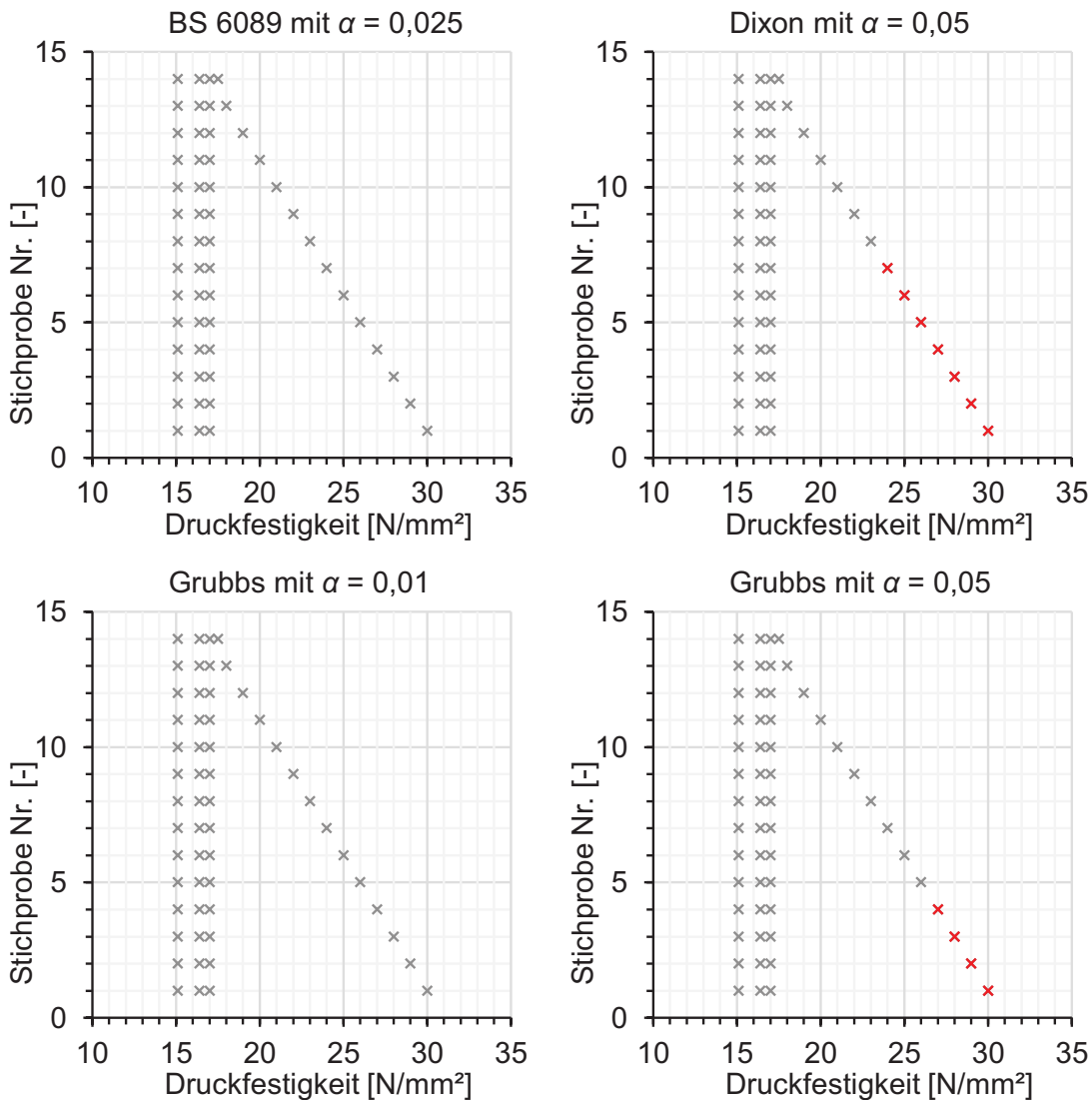


Abb. 6.11 Ausreißertests für $n = 4$ und großen Einzelwert

Die Tests wurden jeweils so oft durchgeführt, bis keine weiteren Ausreißer identifiziert werden konnten, was auch als multiples Testen bezeichnet wird (vgl. Roy u. Bargmann 1958). Auf eine Darstellung der Ergebnisse des Ausreißertests nach David-Hartley-Pearson wurde in dieser Arbeit verzichtet, da dieser bis auf wenige Fälle keine Ausreißer identifizieren konnte und somit für die Bewertung der Ergebnisse der Betondruckfestigkeitsuntersuchung an Bohrkernen ungeeignet ist.

Die Bewertung der einzelnen Stichproben erfolgte mit der Software Matlab, Version R2017b. Die zugehörigen Eingabetexte können Anhang III entnommen werden.

Die in Abb. 6.11 dargestellte Bewertung verschiedener Stichproben mit einem Stichprobenumfang von $n = 4$ und einem einzelnen Extremwert, der mit veränderlichem Abstand nach oben von der Masse der Daten abweicht, zeigt zunächst, dass mit dem Ausreißertest nach *BS 6089* und einem Signifikanzniveau $\alpha = 0,025$ keine Extremwerte als Ausreißer eingestuft werden können. Dies entspricht dem definierten Anwendungsbereich des Ausreißertests nach *BS 6089*, welcher für die Überprüfung des kleinsten Einzelwertes ausgelegt ist. Mit dem Ausreißertest nach *Dixon 1953* ist bei einem Stichprobenumfang von $n = 4$ und einem einzelnen, großen Extremwert eine vernünftige Einstufung von Extremwerten möglich. Mit dem Ausreißertest nach Grubbs können bei dem betrachteten Stichprobenumfang von $n = 4$ und einem einzelnen, großen Extremwert sowohl bei $\alpha = 0,01$ als auch bei $\alpha = 0,05$ keine oder nur sehr wenige Extremwerte als Ausreißer identifiziert werden. Viele deutlich von der Masse der Daten abweichende Einzelwerte können mit dem Ausreißertest nach Grubbs nicht erfasst werden.

Zur Beurteilung des Einflusses der Richtung der Abweichung ist in Abb. 6.12 im Unterschied zu der in Abb. 6.11 dargestellten Auswertung das Ergebnis der Anwendung verschiedener Ausreißertests auf unterschiedliche Stichproben mit $n = 4$ und einem einzelnen Extremwert, der mit veränderlichem Abstand nach unten von der Masse der Daten abweicht abgebildet. Für die betrachteten Stichproben mit $n = 4$ und einem einzelnen, kleinen Extremwert ist mit dem Ausreißertest nach *BS 6089* und dem Ausreißertest nach *Dixon 1953* eine zielsichere Identifikation von Ausreißern möglich. Wie in Abb. 6.12 beschrieben, können bei $n = 4$ und einem einzelnen, kleinen Extremwert mit dem Ausreißertest nach Grubbs sowohl bei $\alpha = 0,01$ als auch bei $\alpha = 0,05$ keine oder nur sehr wenige Extremwerte als Ausreißer identifiziert werden. Viele deutlich von der Masse der Daten abweichende Einzelwerte können mit dem Ausreißertest nach Grubbs nicht erfasst werden.

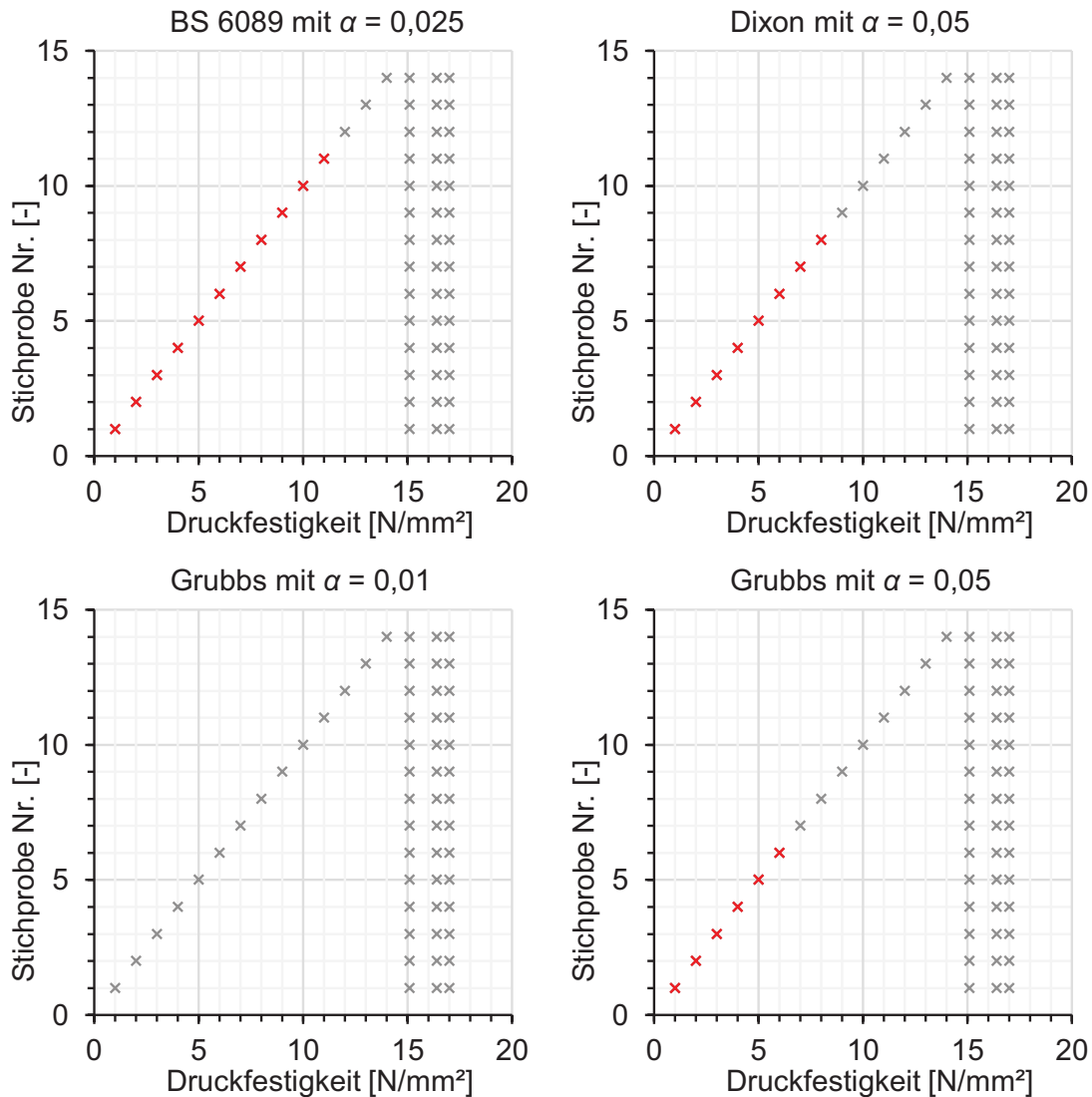


Abb. 6.12 Ausreißertests für $n = 4$ und kleinen Einzelwert

In Abb. 6.13 ist das Ergebnis der Bewertung von 14 Stichproben mit einem Stichprobenumfang von $n=7$ und einem einzelnen Extremwert, der mit veränderlichem Abstand nach oben von der Masse der Daten (d. h. den sonstigen Werten) abweicht, dargestellt. Zunächst fällt auf, dass mit dem Ausreißertest nach *BS 6089* und einem Signifikanzniveau $\alpha = 0,025$, obwohl die einzelnen Extremwerte nach oben abweichen, in vielen Fällen fälschlicherweise der jeweils kleinste Einzelwert als Ausreißer eingestuft wird. Mit dem Ausreißertest nach *Dixon 1953* ist bei einem Stichprobenumfang von $n = 7$ und einem einzelnen, großen Extremwert erneut eine vernünftige Einstufung von Extremwerten möglich. Im Vergleich zu den in Abb. 6.11 und Abb. 6.12 beschriebenen Bewertungen von Stichproben mit $n = 4$ führt eine Erhöhung des Stichprobenumfangs zu einer Verbesserung der Ergebnisse der Bewertung der Stichproben mit dem Ausreißertest nach Grubbs. Sowohl bei $\alpha = 0,01$ als auch bei $\alpha = 0,05$ können viele, deutlich der Größe nach abweichende Einzelwerte erfasst werden, wobei für $\alpha = 0,05$ entsprechend mehr Einzelwerte als Ausreißer eingestuft werden als für $\alpha = 0,01$.

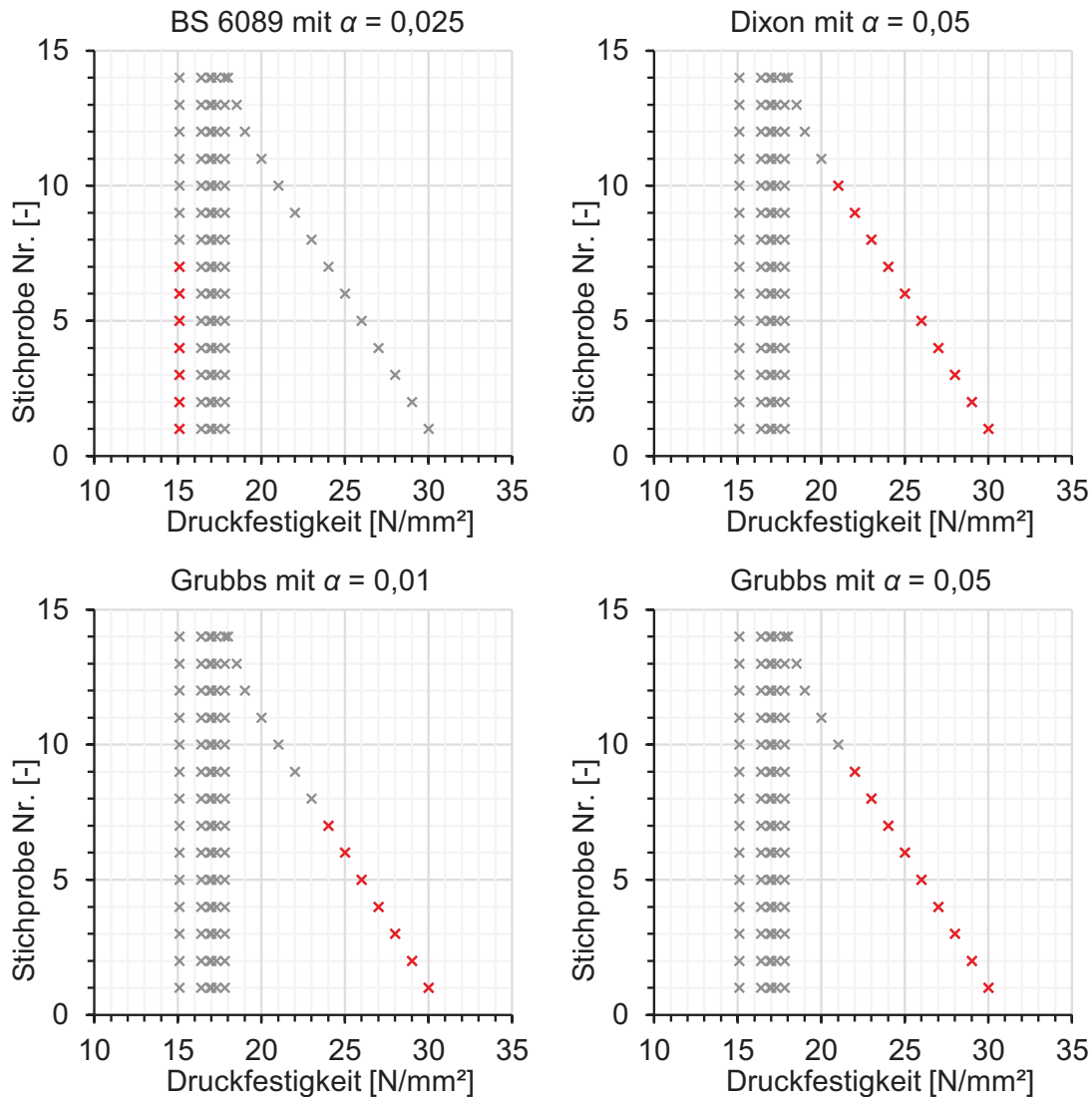


Abb. 6.13 Ausreißertests für $n = 7$ und großen Einzelwert

Im Unterschied zu Abb. 6.13 wird in Abb. 6.14 bei einem Stichprobenumfang von $n = 7$ ein einzelner, mit veränderlichem Abstand nach unten abweichender Extremwert betrachtet.

Durch die Erhöhung des Stichprobenumfangs auf $n = 7$ werden mit dem Ausreißertest nach *BS 6089* im Vergleich zu der in Abb. 6.12 beschriebenen Bewertung weitere Einzelwerte als Ausreißer eingestuft. Teilweise werden auch Einzelwerte, die nur noch in geringem Maß von der Masse der Daten abweichen, als Ausreißer eingestuft.

Mit dem Ausreißertest nach *Dixon 1953* ist bei einem Stichprobenumfang von $n = 7$ und einem einzelnen, kleinen Extremwert erneut eine vernünftige Einstufung von Extremwerten möglich.

Auch bei $n = 7$ und einem einzelnen, kleinen Extremwert können mit dem Ausreißertest nach Grubbs sowohl bei $\alpha = 0,01$ als auch bei $\alpha = 0,05$ viele, deutlich von der Masse der Daten abweichende Einzelwerte als Ausreißer eingestuft werden. Für $\alpha = 0,05$ werden mehr Einzelwerte als Ausreißer eingestuft als für $\alpha = 0,01$.

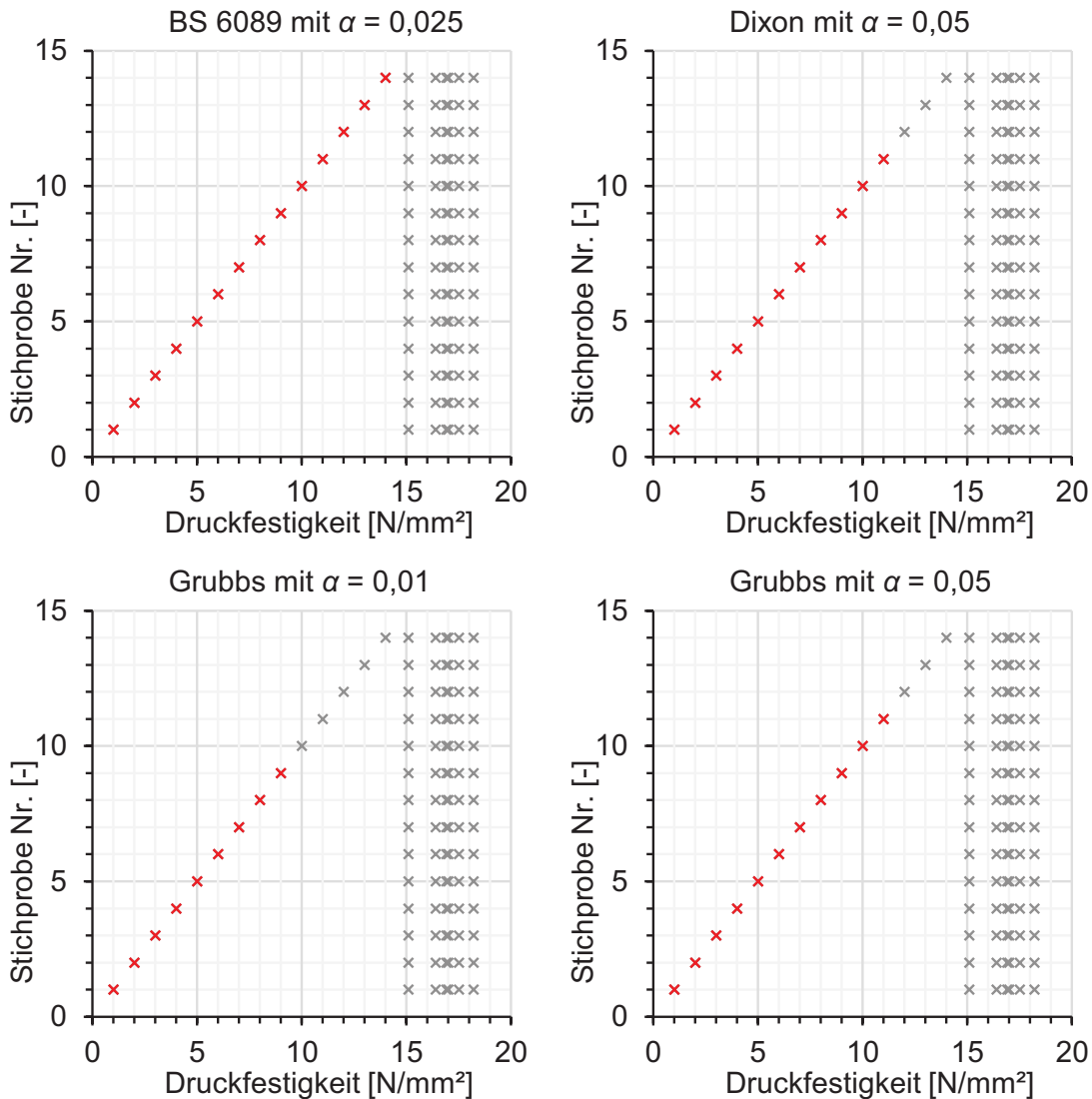


Abb. 6.14 Ausreißertests für $n = 7$ und kleinen Einzelwert

Zur Bewertung des Einflusses einer weiteren Erhöhung des Stichprobenumfangs sind in Abb. 6.15 die Ergebnisse der Untersuchung verschiedener Stichproben mit $n = 10$ und jeweils einem einzelnen Extremwert, der mit veränderlichem Abstand nach oben abweicht dargestellt.

Wie bereits in Abb. 6.13 bei einem Stichprobenumfang von $n = 7$ zu beobachten, wird entsprechend Abb. 6.15 mit dem Ausreißertest nach *BS 6089* und einem Signifikanzniveau $\alpha = 0,025$, obwohl die einzelnen Extremwerte die sonstigen Werte übersteigen, fälschlicherweise der jeweils kleinste Einzelwert als Ausreißer eingestuft.

Der Ausreißertest nach *Dixon 1953* identifiziert bei den betrachteten Stichproben mit $n = 10$ und einzelnen, großen Extremwerten Ausreißer zielsicher.

Auch bei einem Stichprobenumfang von $n = 10$ und einzelnen, großen Extremwerten führt der Ausreißertest nach *Grubbs* sowohl für $\alpha = 0,01$ als auch für $\alpha = 0,05$ zu einer vernünftigen Einstufung von Ausreißern.

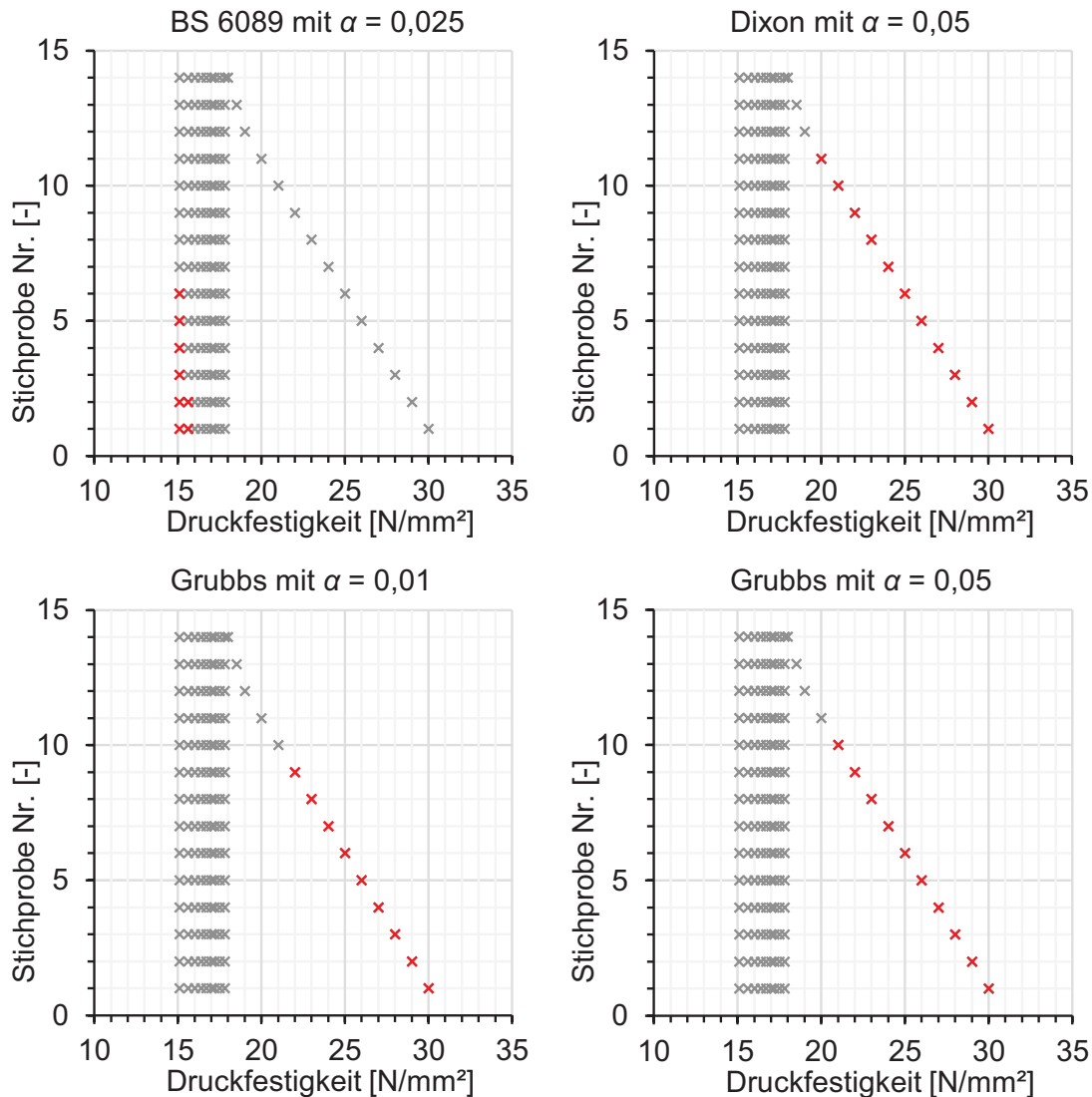


Abb. 6.15 Ausreißertests für $n = 10$ und großen Einzelwert

Wie bei den zuvor betrachteten Stichprobenumfängen werden auch für $n = 10$ über die bereits in Abb. 6.15 dargestellten, nach oben abweichenden Einzelwerte auch nach unten abweichende Einzelwerte untersucht (vgl. Abb. 6.16).

Im Vergleich zu der in Abb. 6.14 beschriebenen Bewertung von Stichproben mit $n = 7$ und einzelnen, kleinen Extremwerten führt eine weitere Erhöhung des Stichprobenumfangs bei einer Bewertung mit dem Ausreißertest nach *BS 6089* zu einem deutlichen Anstieg der Anzahl, der als Ausreißer eingestuft Einzelwerte. Dabei werden fälschlicherweise auch viele, nur noch in geringem Umfang von der Masse der Daten abweichende Einzelwerte der Gruppe der Ausreißer zugeordnet.

Wie auch schon bei den zuvor bewerteten Stichproben, führt der Ausreißertest nach *Dixon 1953* auch hier zu einer realistischen Einstufung von einzelnen Extremwerten als Ausreißer.

Mit dem Ausreißertest nach Grubbs können auch bei einem Stichprobenumfang von $n = 10$ und einzelnen, kleinen Extremwerten sowohl für $\alpha = 0,01$ als auch für $\alpha = 0,05$ Ausreißer zielsicher identifiziert werden.

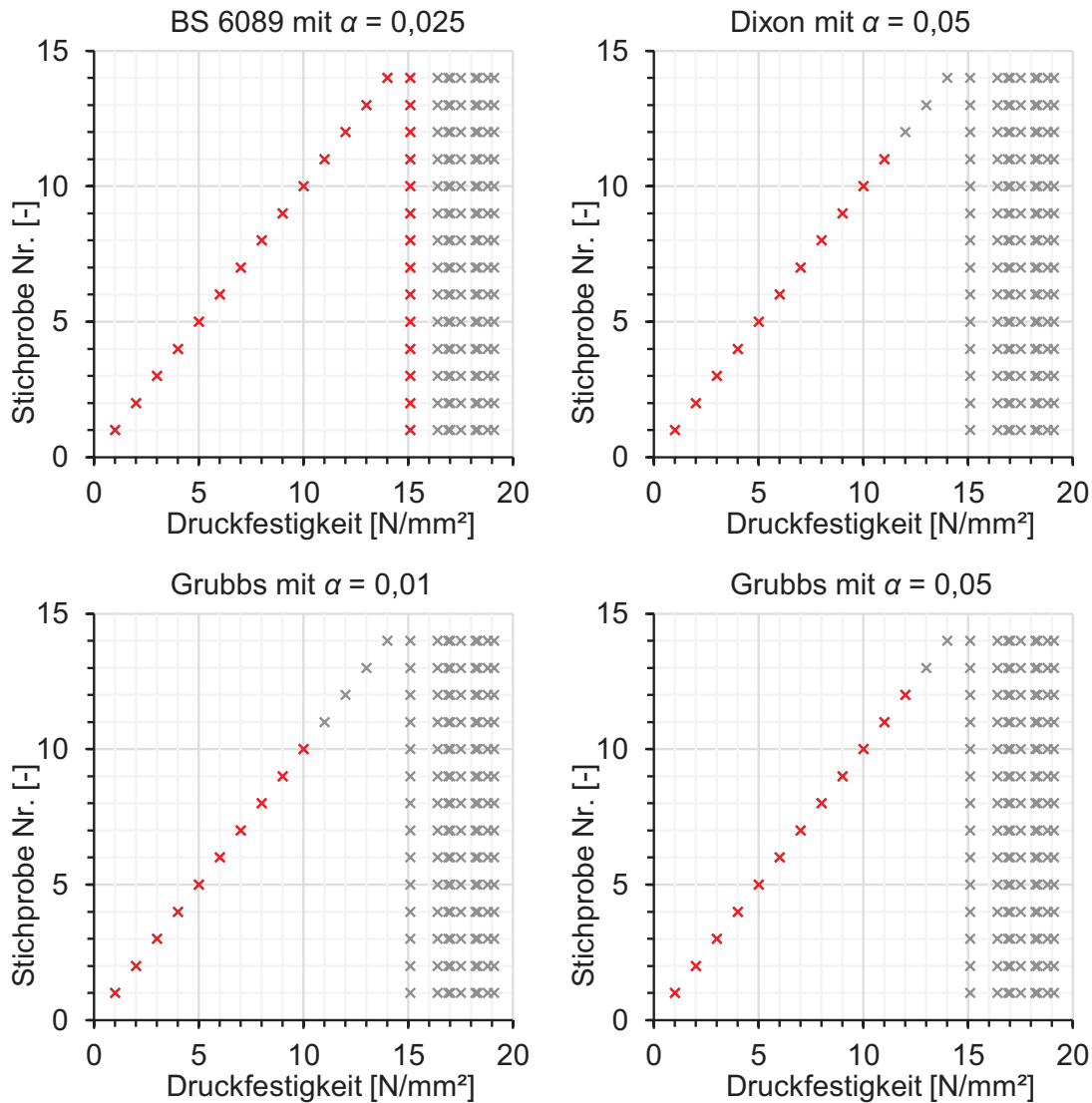


Abb. 6.16 Ausreißertests für $n = 10$ und kleinen Einzelwert

Über die bisher betrachteten Stichproben mit einem einzelnen Extremwert hinaus werden in Abb. 6.17 und Abb. 6.18 auch Stichproben mit $n = 10$ und jeweils zwei Extremwerten betrachtet.

Zunächst werden in Abb. 6.17 Stichproben mit $n = 10$ und jeweils zwei, mit veränderlichem Abstand nach oben von der Masse der Daten abweichenden Einzelwerten untersucht.

Der Anstieg der Anzahl der Extremwerte innerhalb einer Stichprobe führt bei einer Bewertung mit dem Ausreißertest nach *BS 6089* und einem Signifikanzniveau $\alpha = 0,025$ zu einer deutlichen Zunahme der als Ausreißer identifizierten Einzelwerte. Obwohl die einzelnen Extremwerte nach oben abweichen, werden fälschlicherweise die jeweils kleinsten Einzelwerte als Ausreißer eingestuft.

Mit dem Ausreißertest nach *Dixon 1953* können durch die Erhöhung der Anzahl der Extremwerte innerhalb einer Stichprobe nur noch bei einer einzelnen Stichprobe Ausreißer identifiziert werden. Viele, deutlich abweichende Einzelwerte bleiben unerkannt.

Vergleichbare Ergebnisse zeigen sich bei einer Bewertung mit dem Ausreißertest nach Grubbs sowohl für $\alpha = 0,01$ als auch für $\alpha = 0,05$, wobei für $\alpha = 0,05$ mehr Ausreißer identifiziert werden können als für $\alpha = 0,01$. Dennoch bleiben auch hier viele, deutlich von der Masse der Daten abweichende Einzelwerte unerkannt und werden nicht als Ausreißer eingestuft.

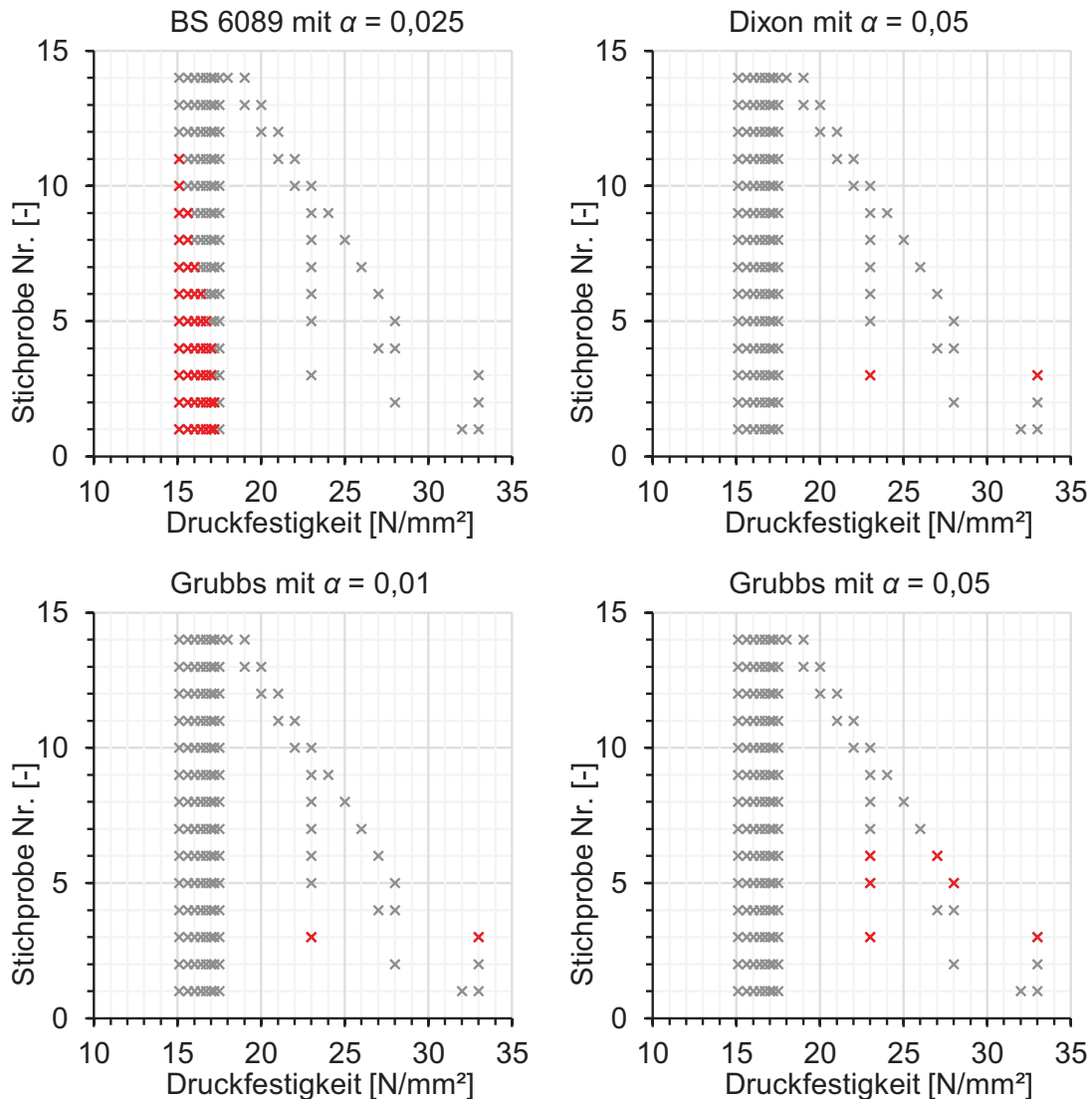


Abb. 6.17 Ausreißertests für $n = 10$ und zwei große Einzelwerte

Zur Beurteilung des Einflusses der Richtung der Abweichung (d. h. nach oben oder unten) ist in Abb. 6.18 im Unterschied zu der in Abb. 6.17 dargestellten Auswertung das Ergebnis der Anwendung verschiedener Ausreißertests bei zwei Extremwerten, die mit veränderlichem Abstand nach unten von der Masse der Daten abweichen abgebildet. Im Vergleich zu der in Abb. 6.16 dargestellten Bewertung von Stichproben mit $n = 10$ und einem einzelnen, kleinen Extremwert führt die Erhöhung der Anzahl der Extremwerte bei einer Untersuchung mit dem Ausreißertest nach *BS 6089* zu ähnlichen Ergebnissen. Auch hier werden einige, nur noch gering abweichende Einzelwerte der Gruppe der Ausreißer zugeordnet.

Die Bewertung der Stichproben mit mehreren nach unten abweichenden Einzelwerten mit dem Ausreißertest nach *Dixon 1953* führt zu den gleichen Ergebnissen wie die in

Abb. 6.17 beschriebenen Untersuchungen von Stichproben mit mehreren nach oben abweichenden Einzelwerten. Viele deutlich von der Masse der Daten abweichende Einzelwerte bleiben mit dem Ausreißertest nach *Dixon 1953* unerkannt.

Entsprechendes gilt für den Ausreißertest nach Grubbs, sowohl für $\alpha = 0,01$ als auch für $\alpha = 0,05$.

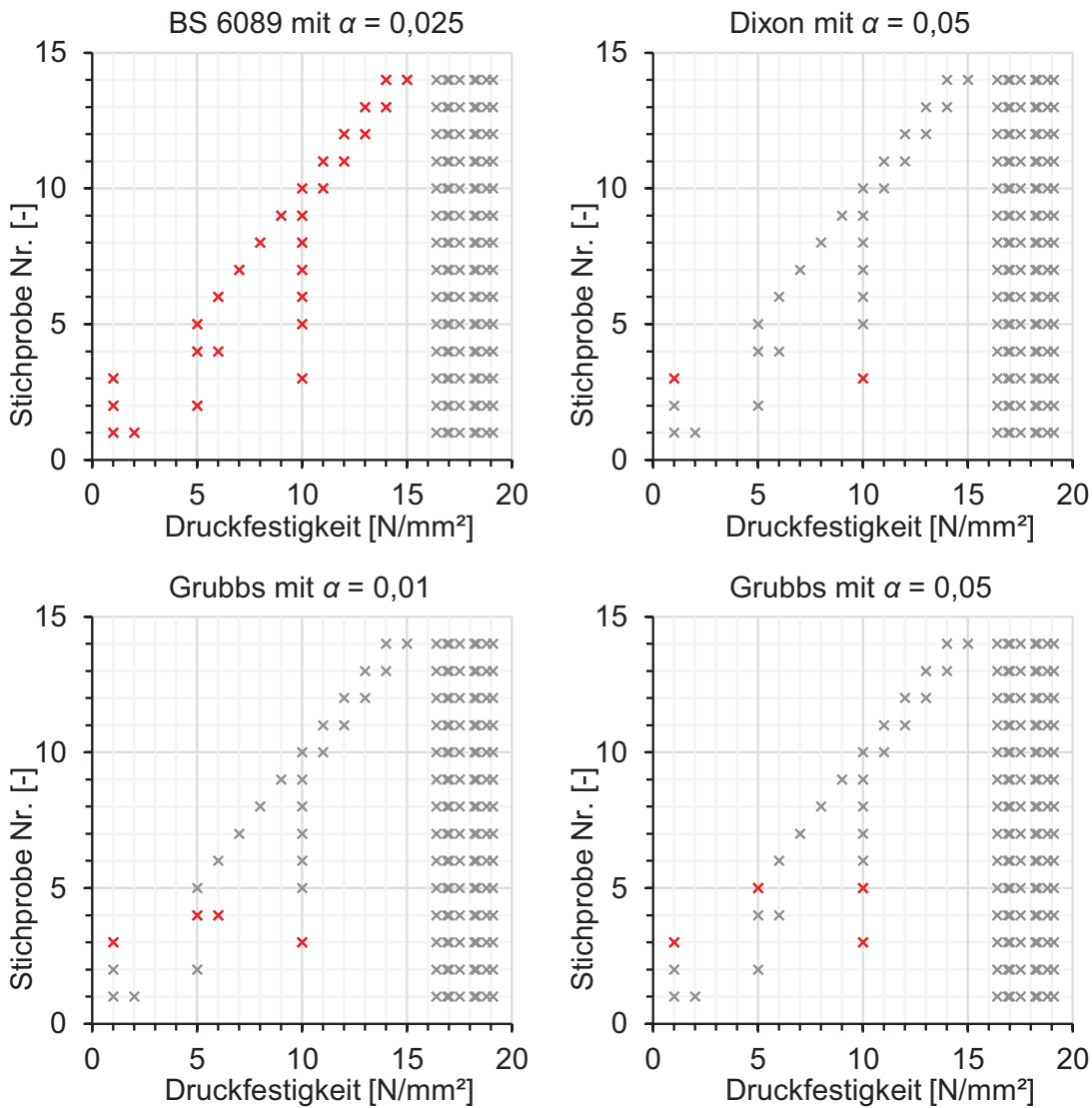


Abb. 6.18 Ausreißertests für $n = 10$ und zwei kleine Einzelwerte

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit dem Ausreißertest nach *BS 6089*, welcher zur Überprüfung des kleinsten Einzelprüfergebnisses konzipiert ist, bei fälschlicher Anwendung auf Stichproben mit großen Extremwerten in sehr vielen Fällen, entgegen der Verteilung der Daten innerhalb der Stichprobe, trotzdem die kleinsten Werte der Stichprobe als Ausreißer identifiziert werden. Eine nicht sachgerechte Anwendung des Ausreißertests nach *BS 6089* auf Stichproben mit großen Extremwerten ist also unbedingt zu vermeiden. Mit zunehmendem Umfang steigt bei Stichproben mit kleinen Extremwerten die Anzahl der als Ausreißer eingestuft Einzelwerte an. In vielen Fällen werden auch unkritische Werte als Ausreißer eingestuft.

Der Ausreißertest nach *Dixon 1953* liefert nahezu unabhängig vom Stichprobenumfang bei Datensätzen mit nur einem Extremwert, egal ob nach oben oder unten, plausible Ergebnisse. Bei Stichproben mit mehreren Extremwerten zeigt der Test jedoch deutliche Schwächen. Es können fast keine Ausreißer mehr identifiziert werden.

Der Ausreißertest nach Grubbs (vgl. *Hartung 1993*) mit einem Signifikanzniveau $\alpha = 0,01$, wie er in *EN 13791:2018-06* enthalten ist, ist bei kleinem Stichprobenumfang (hier: $n = 4$) praktisch wirkungslos. Erst mit zunehmendem Umfang der Stichprobe und einem einzelnen, sich deutlich abgrenzenden Extremwert können Ausreißer identifiziert werden. Enthält die Stichprobe jedoch mehr als einen Extremwert, verliert der Ausreißertest nach Grubbs mit $\alpha = 0,01$ fast vollständig seine Wirksamkeit. Eine Erhöhung des Signifikanzniveaus auf $\alpha = 0,05$ führt bei Stichproben mit nur einem Extremwert zu einer Verbesserung der Ergebnisse. Die Schwächen bei Stichproben mit mehr als einem Extremwert bleiben jedoch nahezu unverändert.

Auf Grundlage der dargestellten Ergebnisse kann also für keinen der in Abschnitt 6.4 genannten Ausreißertests eine uneingeschränkte Anwendungsempfehlung ausgesprochen werden. Eine mögliche Ursache für die unzureichende Einstufung von Extremwerten, speziell mit den Ausreißertests nach Grubbs und David-Hartley-Pearson, ist die Bewertung der Abweichung mithilfe der empirischen Standardabweichung. Die empirische Standardabweichung kann wie in Abschnitt 6.2.3 dargestellt, besonders bei dem hier vorliegenden kleinen Stichprobenumfang, sehr stark von einzelnen Extremwerten beeinflusst werden. Vor diesem Hintergrund wurde der im nachfolgenden Kapitel dargestellte medianbasierte Ausreißertest entwickelt, welcher bei der Bewertung einzelner Extremwerte auf robuste Verfahren zurückgreift.

6.5 Entwicklung eines medianbasierten Ausreißertests

Basierend auf den Ansätzen von *Kurz et al. 2016* wurde ein zweistufiger, medianbasierter Ausreißertest entwickelt, der im Nachfolgenden vorgestellt wird. Zunächst wird dabei in Stufe I entschieden, ob es sich bei dem zu bewertenden Extremwert um einen „auffälligen Wert“ handelt, welcher dann ggf. in Stufe II zu einem definierten Signifikanzniveau α noch als Ausreißer eingestuft werden kann.

Bei Stufe I wird als Maß für die Abweichung nach Gleichung (6.6) der Betrag der Distanz zwischen dem Extremwert und dem Median *med* der Stichprobe genutzt. Der Median wird anders als das arithmetische Mittel besonders bei kleinem Stichprobenumfang weniger von Extremwerten beeinflusst und ist daher meist repräsentativer zur Beschreibung der Lage der untersuchten Stichprobe.

$$D_i = |x_i - \text{med}| \quad (6.6)$$

Ein Einzelprüfwert ist als auffälliger Wert einzustufen, sobald D_i den kritischen Wert $D_{i,\text{krit}}$ nach Gleichung (6.7) überschreitet.

$$D_{i,\text{krit}} = e^{(-1/n)} \cdot (x_{1-p} - x_p) \quad (6.7)$$

mit:

x_p aus der Stichprobe ohne Annahme einer Verteilungsfunktion geschätztes p -Quantil

x_{1-p} aus der Stichprobe ohne Annahme einer Verteilungsfunktion geschätztes $(1 - p)$ -Quantil

Nach *Roach 2014* teilt ein p -Quantil die nach der Größe sortierten Daten in zwei Teile: $100 \cdot p$ % der Daten sind kleiner und der Rest $(100 \cdot (1 - p))$ % ist größer als das p -Quantil. Bei kleinem Stichprobenumfang nähert sich mit abnehmendem p die Differenz zwischen den Quantilwerten x_{1-p} und x_p der Differenz zwischen dem kleinstem und größten Einzelprüfwert an. Um dennoch auffällige Werte identifizieren zu können, wird die kritische Streubreite durch Multiplikation mit dem Faktor $\exp(-1/n)$, welcher sich besonders bei kleinem Stichprobenumfang auswirkt, reduziert, was dem in *Gumbel 1947* beschriebenen Vorgehen entspricht. Mit zunehmendem Stichprobenumfang konvergiert der Wert des Faktors $\exp(-1/n)$ gegen 1,0 und die kritische Streubreite wird fast ausschließlich durch die Wahl der Quantilwerte bestimmt.

Zur Bewertung, ob es sich bei einem als auffällig eingestuften Einzelwert auch um einen Ausreißer zu einem Signifikanzniveau α handelt, wird als Maß für die Abweichung nach Gleichung (6.8) der Betrag der Distanz zwischen dem Extremwert und dem Median der Stichprobe, dividiert durch die MAD (Median absolute deviation) genutzt. Die Division durch die MAD, welche wie in Abschnitt 6.2.3 gezeigt, im Unterschied zur Standardabweichung eine qualitativ robuste Schätzung der Streuung darstellt, führt zu einer Standardisierung der Abweichung.

$$D_{II} = \frac{|x_i - \text{med}|}{\text{MAD}} \quad (6.8)$$

Ein auffälliger Wert ist als Ausreißer einzustufen, sobald D_{II} den kritischen Wert $D_{II,\text{krit}}$ nach Gleichung (6.9) überschreitet.

$$D_{II,\text{krit}} = t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-3} + (\bar{x}_\gamma - \text{med}) \quad (6.9)$$

mit:

$t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-3}$ Quantil der t -Verteilung für das Konfidenzniveau α und $n - 3$ Freiheitsgrade (z. B. tabelliert in *Roach 2014*). Die Anzahl der Freiheitsgrade wird hierbei nur um 3 reduziert, da Ordnungsstatistiken (hier Median, MAD und zwei Quantilwerte) nicht stochastisch unabhängig sind (vgl. *Arnold et al. 1992*))

x_γ getrimmter Mittelwert nach Gleichung (2.3) zum Niveau γ

Durch die Addition der Differenz zwischen getrimmtem Mittelwert und Median erfolgt eine Zentrierung um den Erwartungswert. Das Niveau zur Berechnung des getrimmten Mittelwertes wurde für den medianbasierten Ausreißertest zu $\gamma = 0,10$ gewählt, was bedeutet, dass bei der Berechnung des Mittelwertes jeweils die zehn kleinsten und zehn größten Prozent der Daten vernachlässigt werden. Zur Wahl der Quantilwerte zur Berechnung des kritischen Wertes $D_{I,\text{krit}}$ wurde mit den bereits in Abschnitt 6.4 verwendeten und Anhang III aufgelisteten fiktiven Datensätzen eine Parameterstudie

durchgeführt. Für p wurden Werte zwischen 0,05 und 0,20 angesetzt. Als Signifikanzniveau α wurde in Anlehnung an die in Abschnitt 6.3 vorgestellten Verfahren der Wert 0,05 gewählt. Eine allgemeingültige Festlegung des Signifikanzniveaus zur Bewertung von Stichproben im Bauwesen liegt bisher nicht vor. In den nachfolgenden Abbildungen Abb. 6.19 bis Abb. 6.26 sind die Ergebnisse der Bewertung der Stichproben mit dem medianbasierten Ausreißertest für $p = 0,05$; 0,10; 0,15 und 0,20 dargestellt. Ausreißer sind als rote Kreuze und auffällige Werte als gelbe Kreuze gekennzeichnet:

- x als auffälliger Wert identifizierter Einzelwert,
- x als Ausreißer identifizierter Einzelwert.

Jeder Ausreißer ist auch als auffälliger Wert eingestuft. Der Test wurde jeweils so oft durchgeführt, bis keine weiteren Ausreißer identifiziert werden konnten. Die Berechnung der Quantilwerte erfolgte mit der Software Matlab, Version R2017b unter Verwendung des Befehls „quantile“. Weiterführende Erläuterungen hierzu können z. B. Langford 2006 entnommen werden.

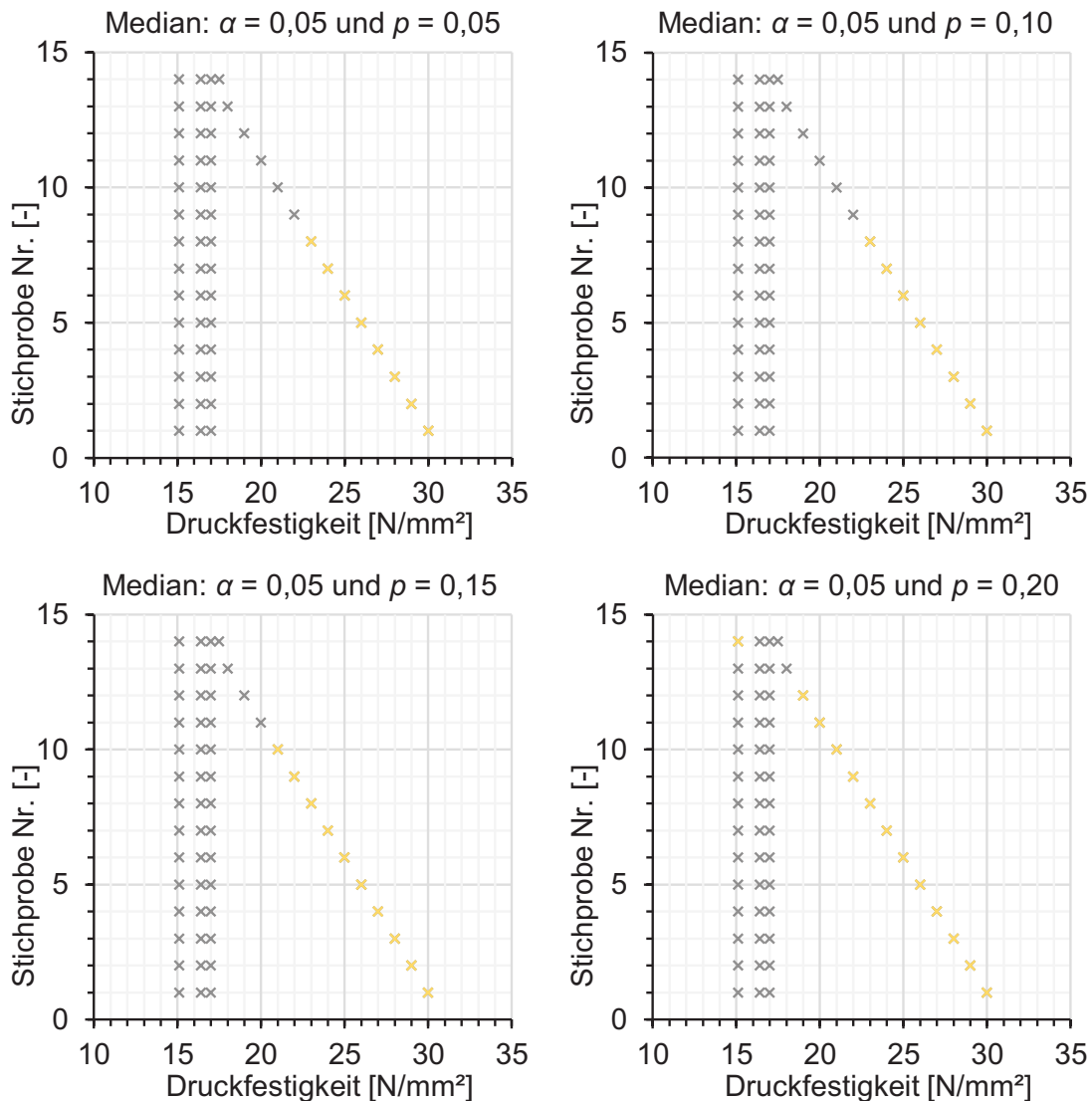


Abb. 6.19 Medianbasierter Ausreißertest für $n = 4$ und großen Einzelwert

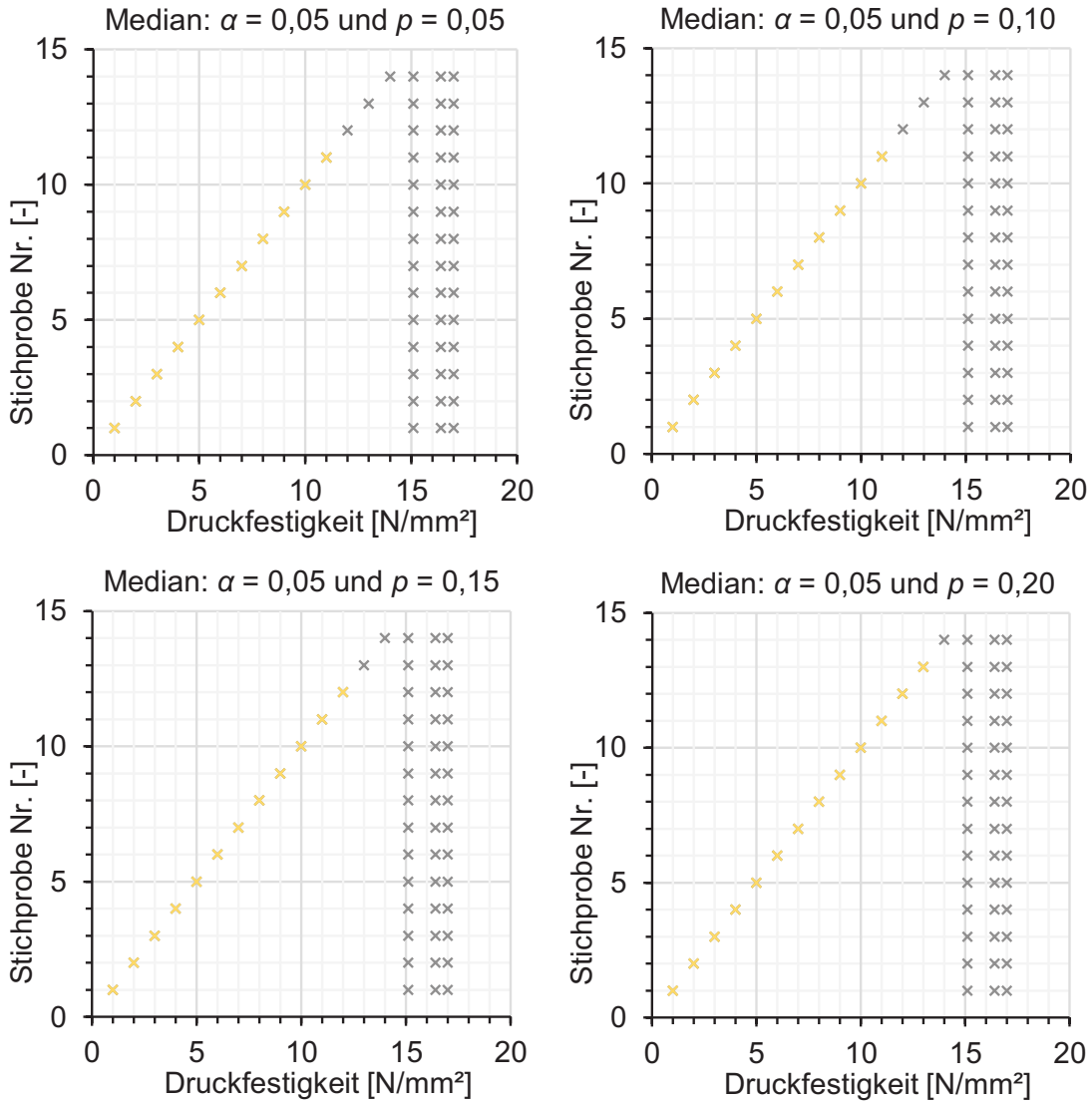


Abb. 6.20 Medianbasierter Ausreißertest für $n = 4$ und kleinen Einzelwert

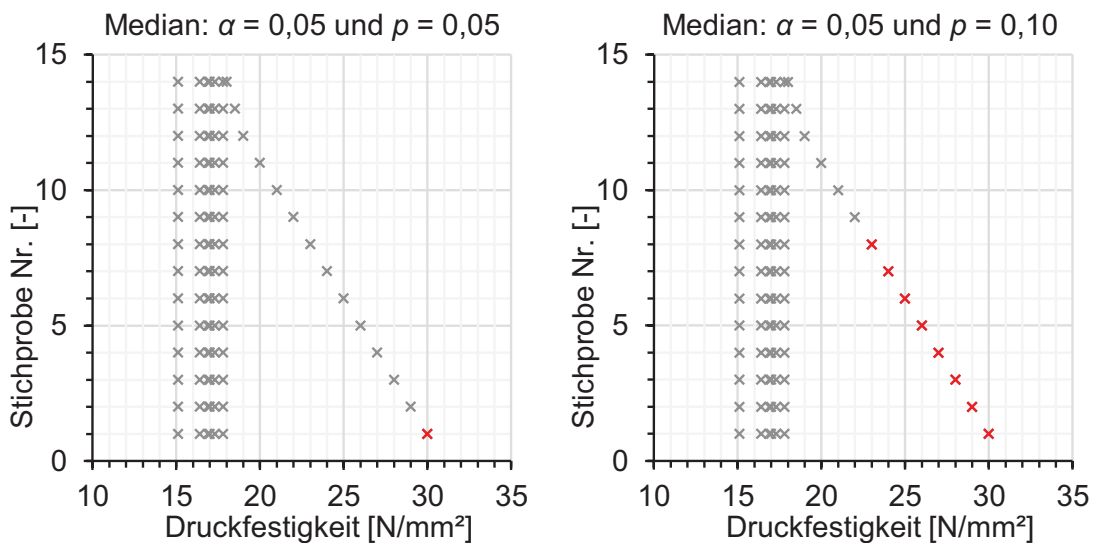


Abb. 6.21 Medianbasierter Ausreißertest für $n = 7$ und großen Einzelwert

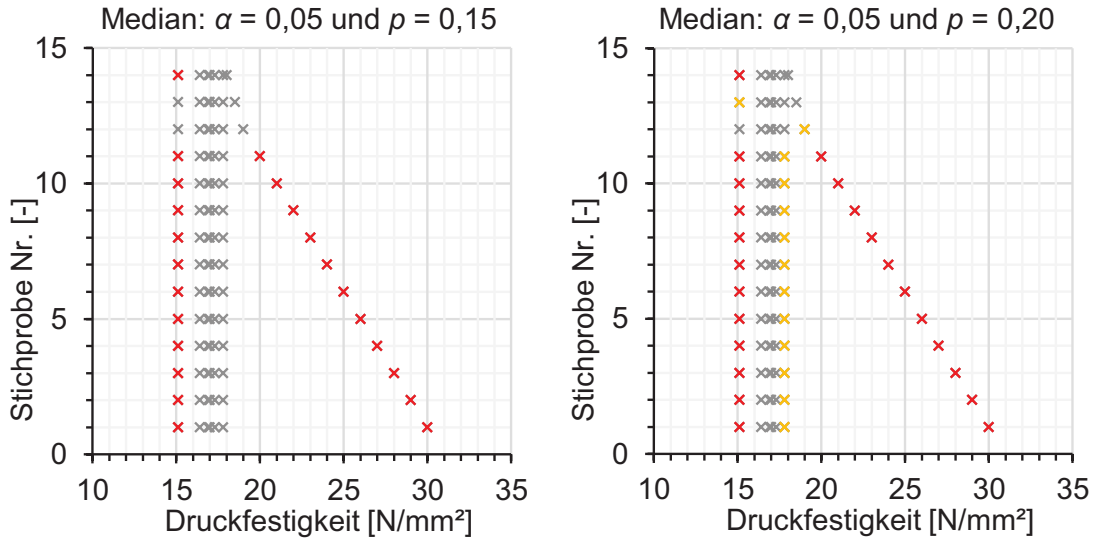


Abb. 6.21 Fortsetzung

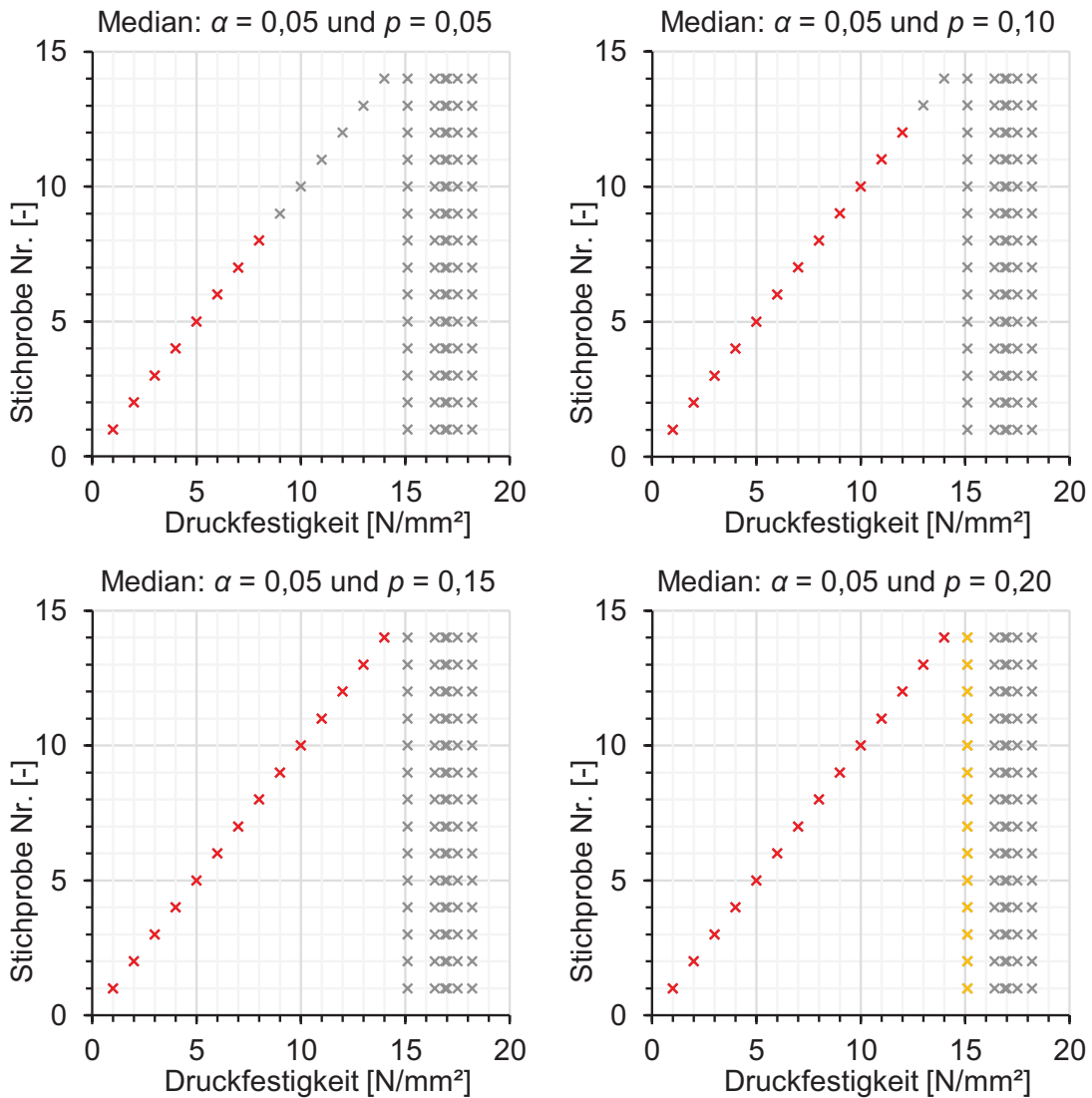


Abb. 6.22 Medianbasierter Ausreißertest für $n = 7$ und kleinen Einzelwert

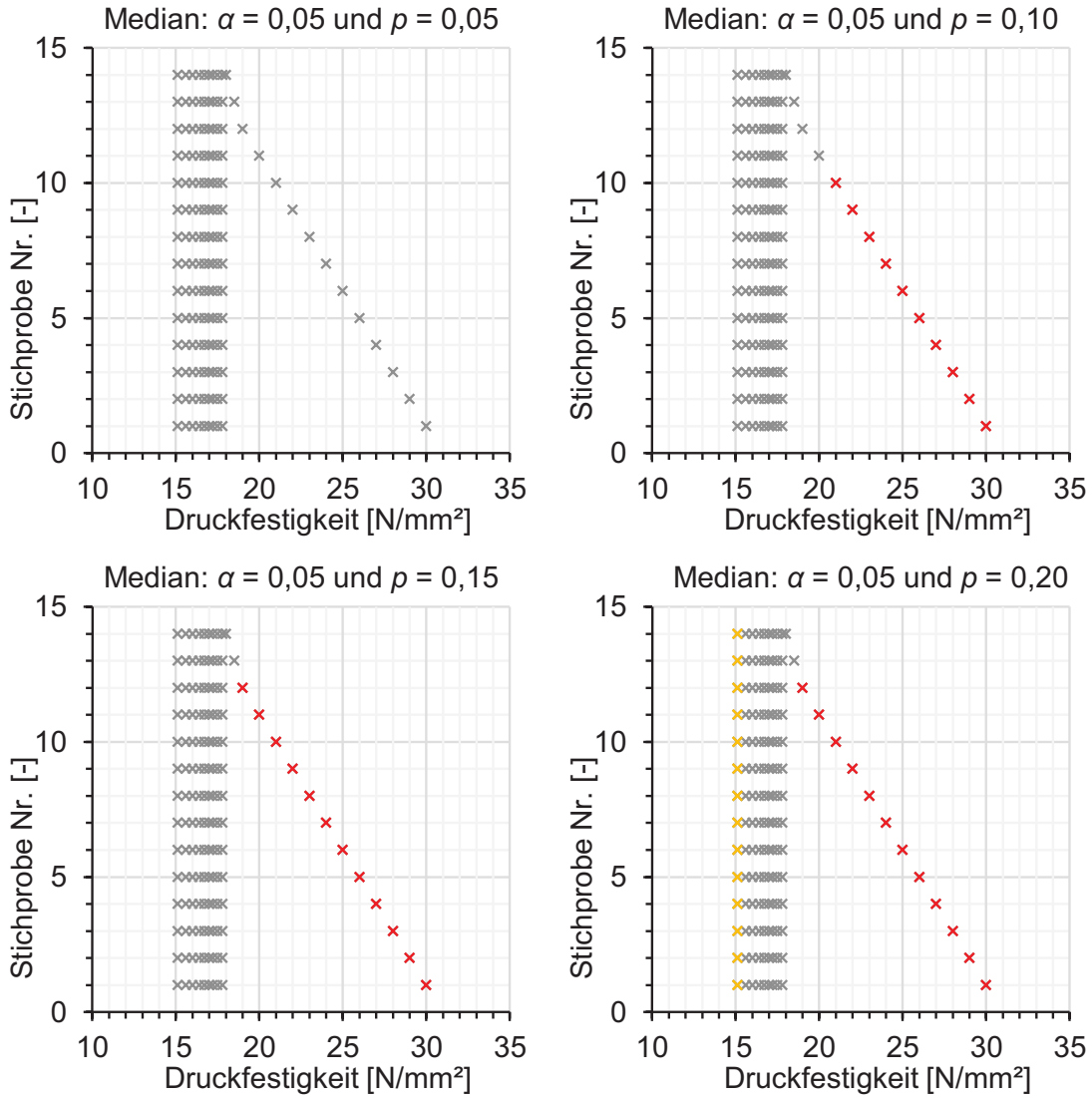


Abb. 6.23 Medianbasierter Ausreißertest für $n = 10$ und großen Einzelwert

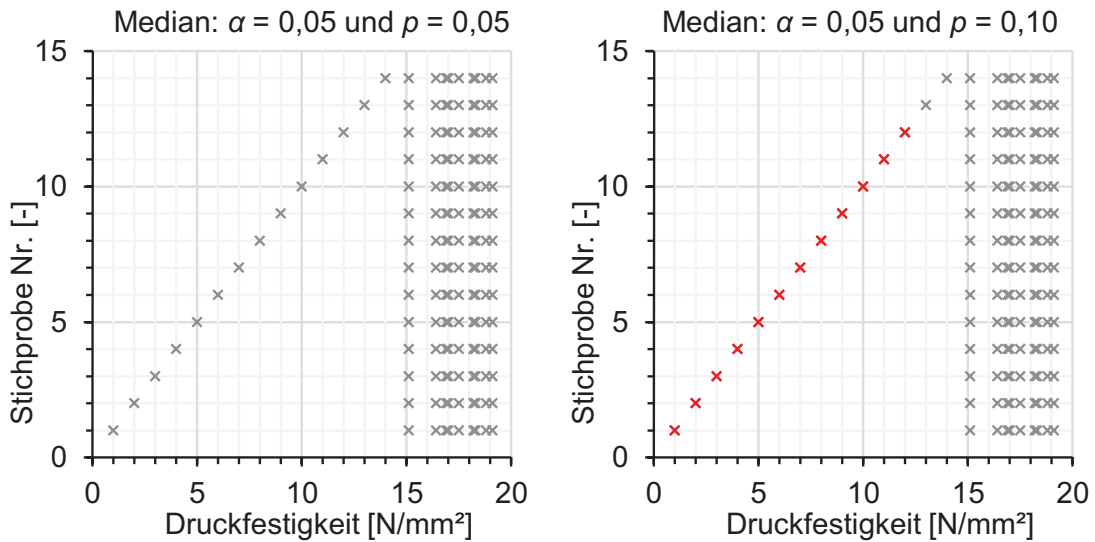


Abb. 6.24 Medianbasierter Ausreißertest für $n = 10$ und kleinen Einzelwert

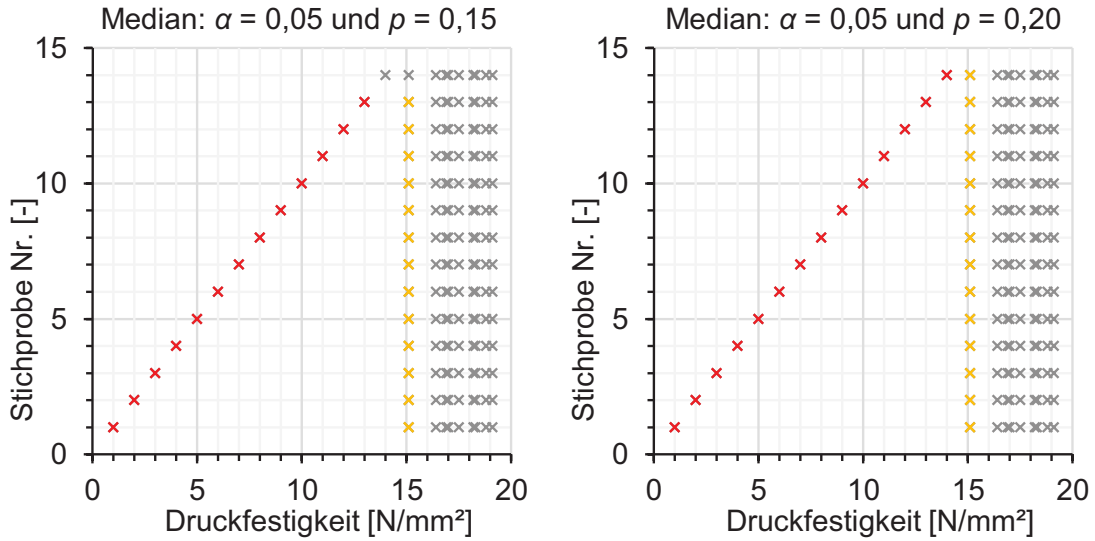


Abb. 6.24 Fortsetzung

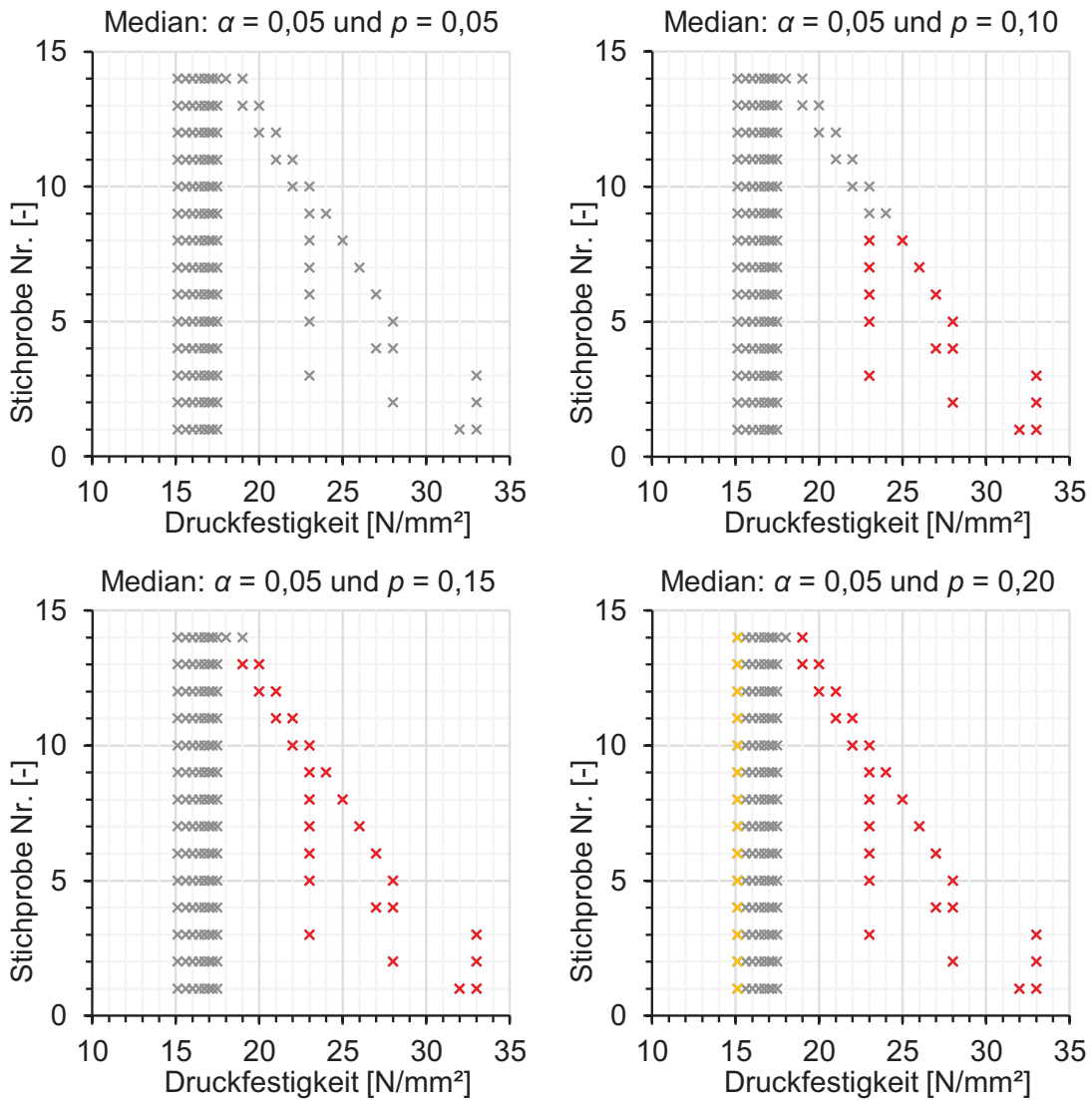


Abb. 6.25 Medianbasierter Ausreißertest für $n = 10$ und zwei große Einzelwerte

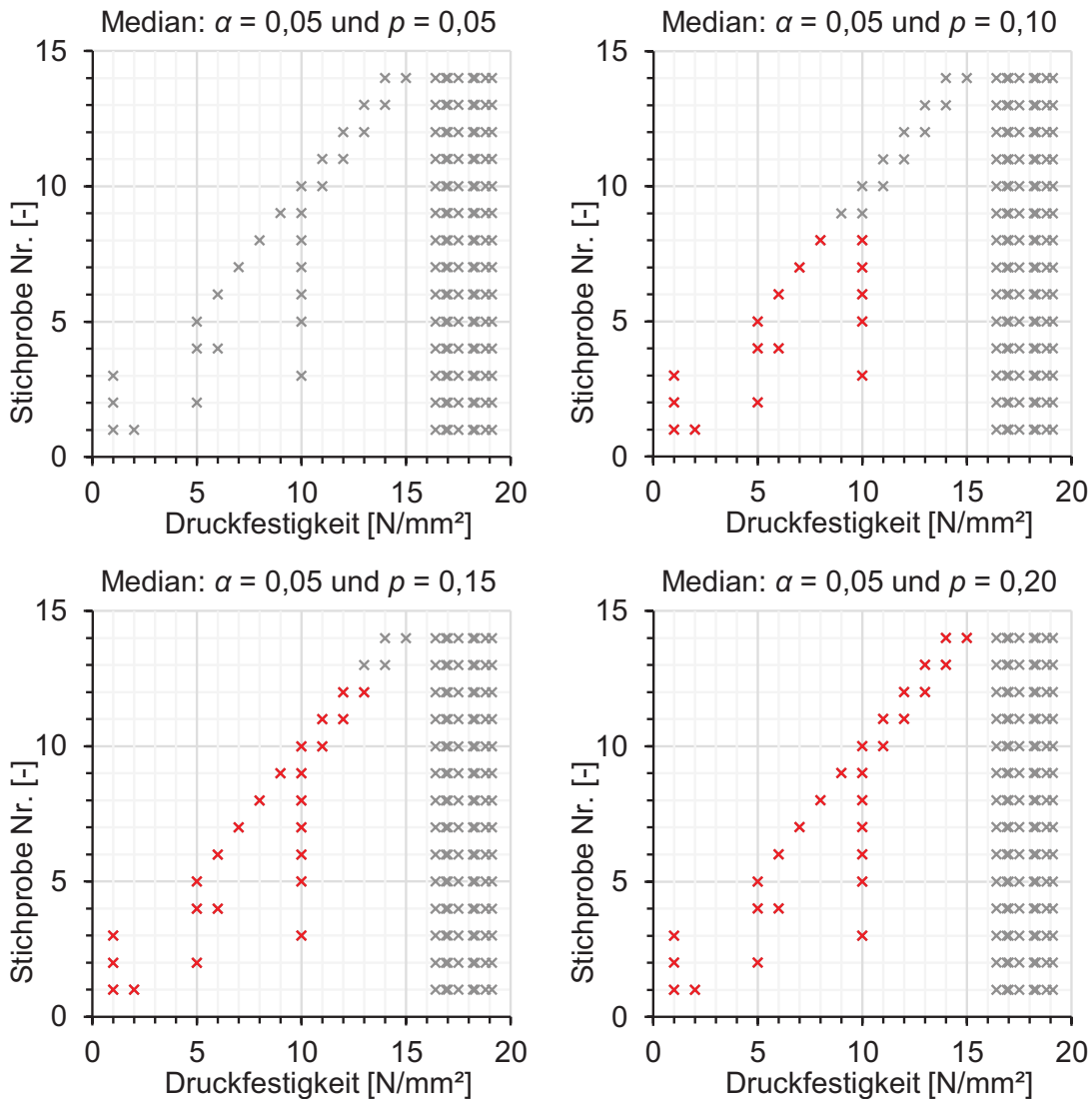


Abb. 6.26 Medianbasierter Ausreißertest für $n = 10$ und zwei kleine Einzelwerte

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei dem sehr kleinen Stichprobenumfang $n = 4$, ähnlich der zuvor vorgestellten Bewertung mit dem Ausreißertest nach Grubbs, auch mit dem medianbasierten Ausreißertest keine Extremwerte zu einem Signifikanzniveau α als Ausreißer identifiziert werden können (Stufe II). Jedoch können mit dem in Stufe I des medianbasierten Ausreißertests genannten Verfahren auffällige Einzelwerte identifiziert werden.

Im Hinblick auf die Wahl der Quantilwerte zeigt die durchgeführte Parameterstudie für $p = 0,05$ und einen ansteigenden Stichprobenumfang, unabhängig von der Anzahl und Lage der Extremwerte, eine immer geringer werdende Wirksamkeit des medianbasierten Ausreißertests. Bei $n = 10$ können mit $p = 0,05$ keine Ausreißer oder auffälligen Werte mehr identifiziert werden.

Für $p = 0,15$ und $p = 0,20$ werden nahezu unabhängig vom Stichprobenumfang, Lage und Anzahl der Extremwerte zu viele Einzelwerte (d. h. auch augenscheinlich unauffällige Werte) als Ausreißer (Stufe II) oder auffällige Werte (Stufe I) eingestuft.

Für $p = 0,10$ hingegen erfolgt bei allen hier betrachteten Datensätzen eine zielsichere Identifizierung von auffälligen Werten bzw. Ausreißern.

Durch die Verwendung robuster Schätzwerte für die Lage und Streuung der Stichprobe können auch bei mehreren Extremwerten innerhalb einer Stichprobe mit dem medianbasierten Ausreißertest Ausreißer oder auffällige Werte identifiziert werden (siehe Abb. 6.25 und Abb. 6.26).

6.6 Bewertung realer Datensätze

6.6.1 Bewertung realer Datensätze mit $n = 5$

Über die Beurteilung und Kalibrierung bereits bestehender sowie des neu entwickelten, medianbasierten Ausreißertests an fiktiven Stichproben hinaus sind die genannten Ausreißertests auch an realen Daten zu überprüfen, da nur solche Datensätze, die tatsächliche Streuung der In-situ-Betondruckfestigkeit wirklichkeitsnah wiedergeben können. In den nachfolgenden Abbildungen Abb. 6.27 bis Abb. 6.34 sind die Ergebnisse der Bewertung von zehn realen Stichproben mit $n = 5$ und Einzelwerten der In-situ-Druckfestigkeit zwischen 10 und 100 N/mm² mit den Ausreißertests nach BS 6089 ($\alpha = 0,025$), Dixon ($\alpha = 0,05$), Grubbs ($\alpha = 0,01$), Grubbs ($\alpha = 0,05$) sowie dem neu entwickelten, medianbasierten Ausreißertest ($\alpha = 0,05$) mit $p = 0,05$; 0,10; 0,15 und 0,20 dargestellt. Bei den Stichproben handelt es sich jeweils um Ergebnisse von Untersuchungen zur Bestimmung der In-situ-Betondruckfestigkeit durch Druckfestigkeitsprüfungen an Bohrkernen. Die zugehörigen Einzelwerte können Anhang III.1 entnommen werden. Alle Einzelwerte sind als Kreuz dargestellt. Auffällige Werte sind zusätzlich gelb und Ausreißer rot gekennzeichnet.

- x Einzelwert,
- x als auffälliger Wert identifizierter Einzelwert (Stufe I),
- x als Ausreißer identifizierter Einzelwert (Stufe II).

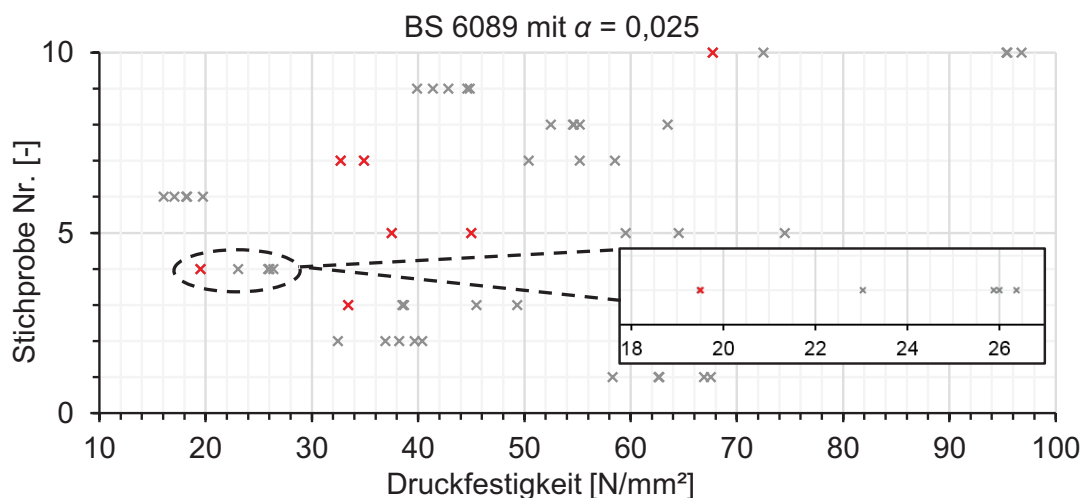


Abb. 6.27 Bewertung realer Stichproben mit $n = 5$ mit dem Ausreißertest nach BS 6089 mit $\alpha = 0,025$

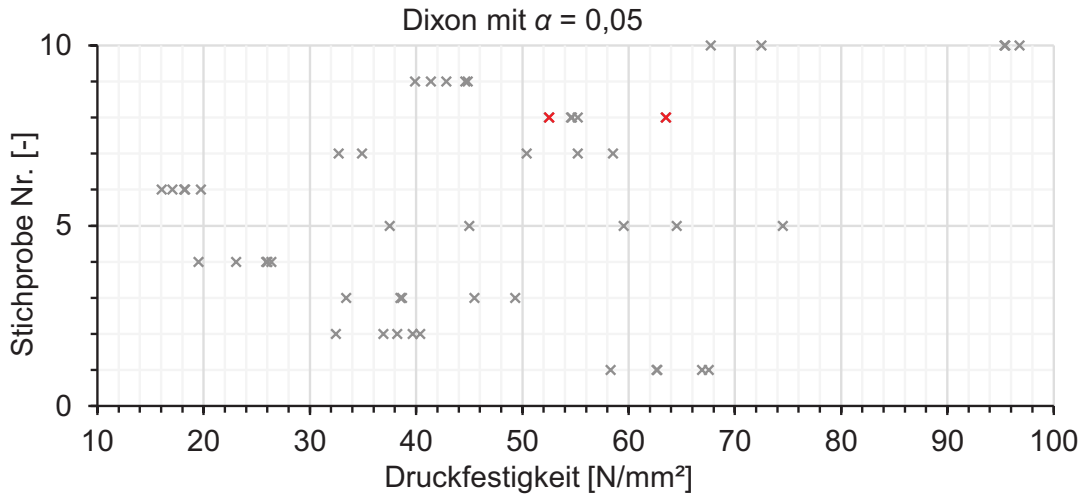


Abb. 6.28 Bewertung realer Stichproben mit $n = 5$ mit dem Ausreißertest nach Dixon mit $\alpha = 0,05$

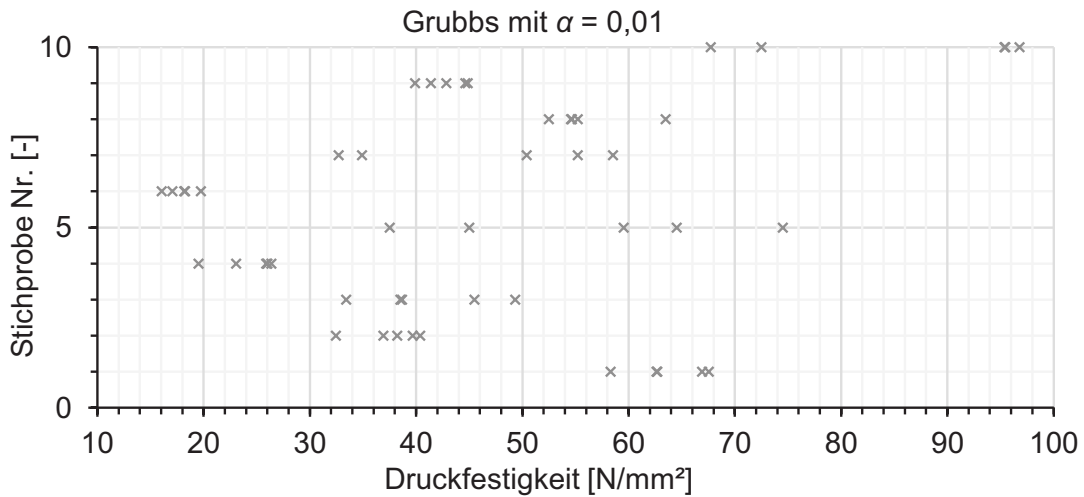


Abb. 6.29 Bewertung realer Stichproben mit $n = 5$ mit dem Ausreißertest nach Grubbs mit $\alpha = 0,01$

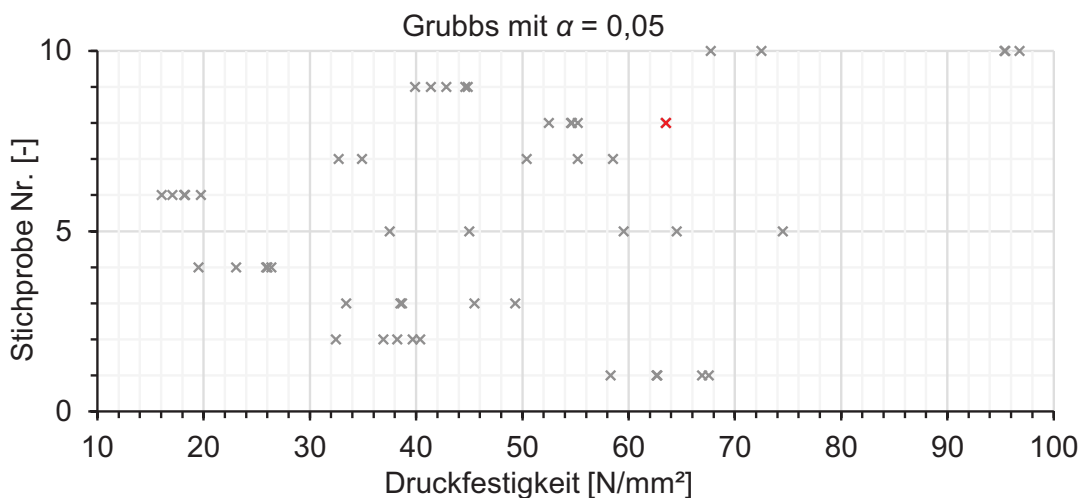


Abb. 6.30 Bewertung realer Stichproben mit $n = 5$ mit dem Ausreißertest nach Grubbs mit $\alpha = 0,05$

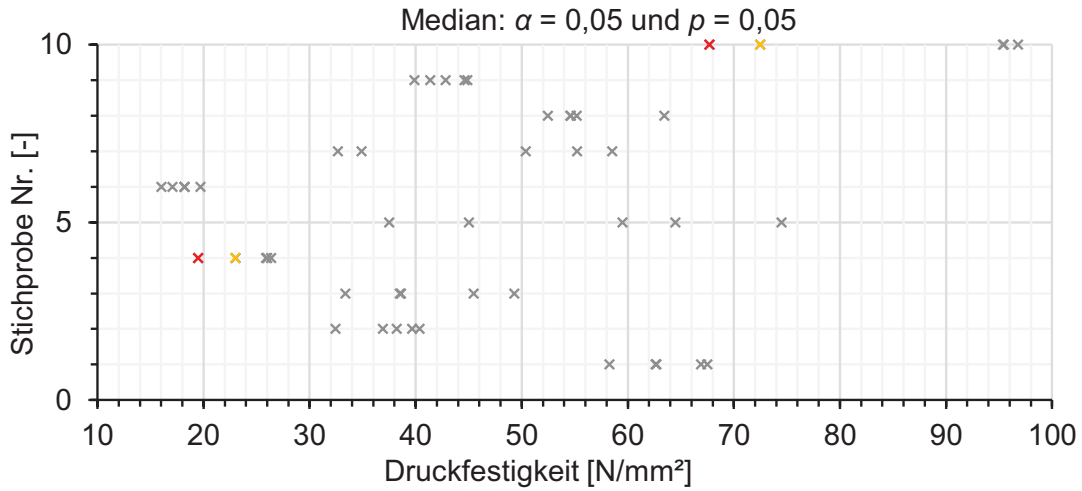


Abb. 6.31 Bewertung realer Stichproben mit $n = 5$ mit dem medianbasierten Ausreißertest mit $\alpha = 0,05$ und $p = 0,05$

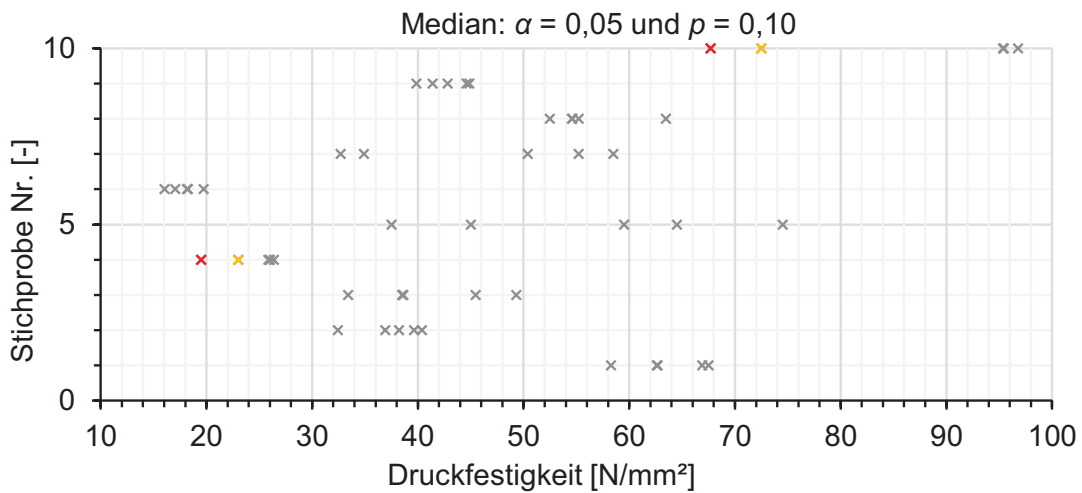


Abb. 6.32 Bewertung realer Stichproben mit $n = 5$ mit dem medianbasierten Ausreißertest mit $\alpha = 0,05$ und $p = 0,10$

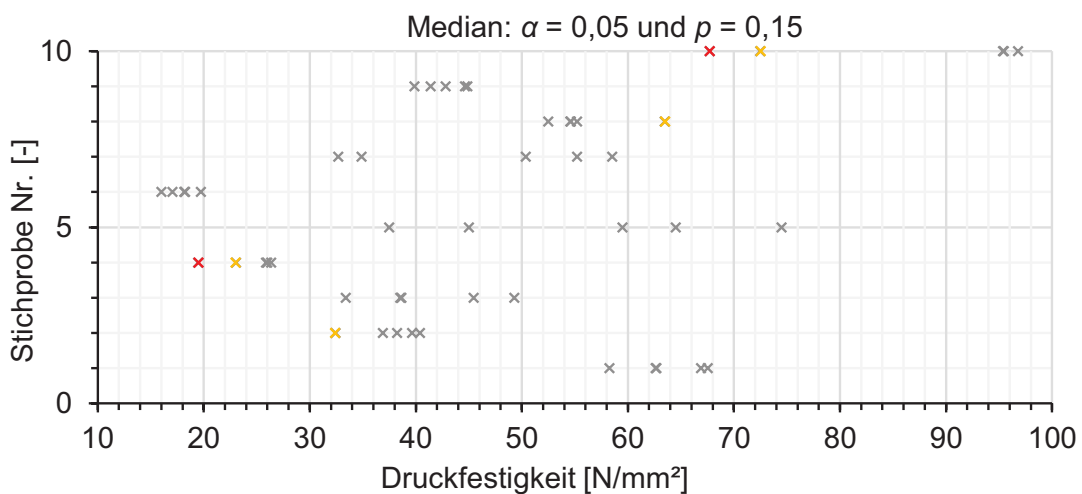


Abb. 6.33 Bewertung realer Stichproben mit $n = 5$ mit dem medianbasierten Ausreißertest mit $\alpha = 0,05$ und $p = 0,15$

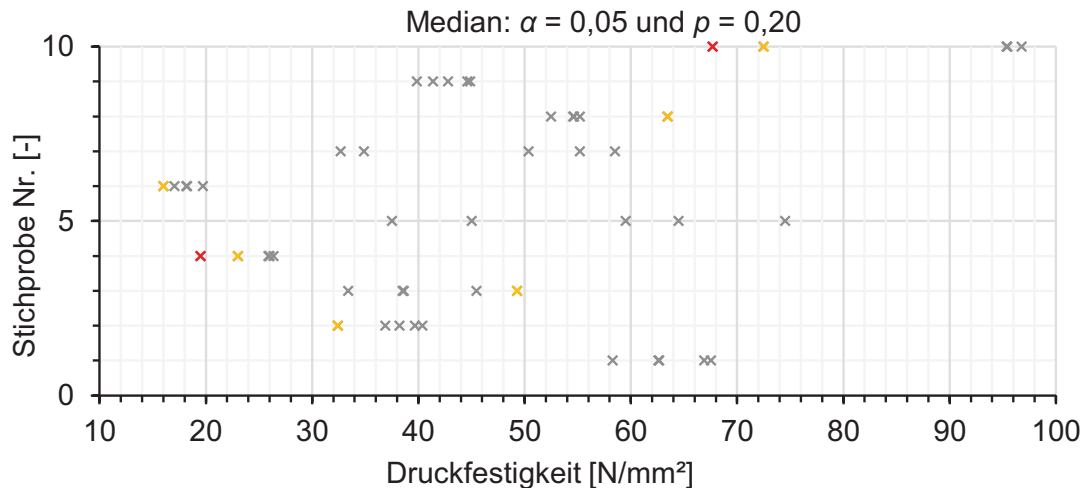


Abb. 6.34 Bewertung realer Stichproben mit $n = 5$ mit dem medianbasierten Ausreißertest mit $\alpha = 0,05$ und $p = 0,20$

Wie bereits schon bei der Bewertung der fiktiven Datensätze beobachtet, werden auch bei einer Beurteilung realer Datensätze mit $n = 5$ mit dem Ausreißertest nach *BS 6089* und $\alpha = 0,025$ bei einigen Stichproben jeweils der kleinste oder die beiden kleinsten Werte als Ausreißer eingestuft (vgl. Abb. 6.27). Werte mit einer großen Abweichung werden meist als Ausreißer eingestuft. Lediglich bei Stichprobe Nummer 10 bleibt ein Wert mit deutlicher Abweichung zur Masse der Daten unerkannt. Eine Einstufung von nach oben von der Masse der Daten abweichenden Extremwerten als Ausreißer ist mit dem Ausreißertest nach *BS 6089* nicht möglich.

Die Ausreißertests nach Dixon ($\alpha = 0,05$), Grubbs ($\alpha = 0,01$) und ($\alpha = 0,05$) sind, wie Abb. 6.28, Abb. 6.29 und Abb. 6.30 zeigen, praktisch wirkungslos. Insbesondere bei Stichprobe Nummer 10, bei der zwei der fünf Einzelwerte deutlich von der Masse der Daten abweichen, können keine Ausreißer identifiziert werden. Mit dem Ausreißertest nach Grubbs ($\alpha = 0,01$), wie er auch in *E DIN EN 13791:2018-06* enthalten ist, können bei keiner der betrachteten Stichproben einzelne Extremwerte als Ausreißer eingestuft werden.

Bei einer Bewertung der Stichproben mit dem medianbasierten Ausreißertest ($\alpha = 0,05$) werden für $p = 0,05$ und $p = 0,10$ die gleichen Werte als Ausreißer oder auffällige Werte identifiziert (vgl. Abb. 6.31 und Abb. 6.32). Dabei werden alle Einzelwerte mit augenscheinlich kritischer Abweichung erkannt. Bei einem weiteren Anstieg von p auf 0,15 (vgl. Abb. 6.33) oder 0,20 (vgl. Abb. 6.34) werden zunehmend auch Einzelwerte mit nur geringer Abweichung von der Masse der Daten als Ausreißer oder als auffällige Werte eingestuft. Wie bereits bei der in Abschnitt 6.5 beschriebenen Untersuchung fiktiver Daten ist somit auch bei den realen Stichproben mit $n = 5$ für $p = 0,10$ eine zielsichere Identifizierung von auffälligen Werten oder Ausreißern möglich.

Von einer Betrachtung weiterer, realer Stichproben mit kleinem Stichprobenumfang wird abgesehen, da die an den realen Stichproben mit $n = 5$ gewonnen Erkenntnisse weitestgehend mit den Ergebnissen der Beurteilung der fiktiven Daten übereinstimmen, wodurch diesen eine ausreichende Allgemeingültigkeit unterstellt werden kann.

6.6.2 Bewertung realer Datensätze mit $n > 10$

Neben der für die In-situ-Druckfestigkeit typischen Beurteilung von Stichproben mit einem Umfang $n \leq 10$ sind im Rahmen von Bestandsaufnahmen im Einzelfall auch teilweise Stichproben mit einem größeren Umfang zu beurteilen.

Zur Bewertung der Anwendbarkeit von Ausreißertests auf Stichproben mit $n > 10$ werden nachfolgend zehn reale Datensätze mit einem Stichprobenumfang zwischen 19 und 63 Einzelwerten betrachtet.

Bei den Stichproben handelt es sich erneut um Ergebnisse von Untersuchungen zur Bestimmung der In-situ-Betondruckfestigkeit durch Druckfestigkeitsprüfungen an Bohrkernen. Die zugehörigen Einzelwerte können Anhang III.1 entnommen werden. Alle Einzelwerte sind als Kreuz dargestellt. Auffällige Werte sind zusätzlich gelb und Ausreißer rot gekennzeichnet.

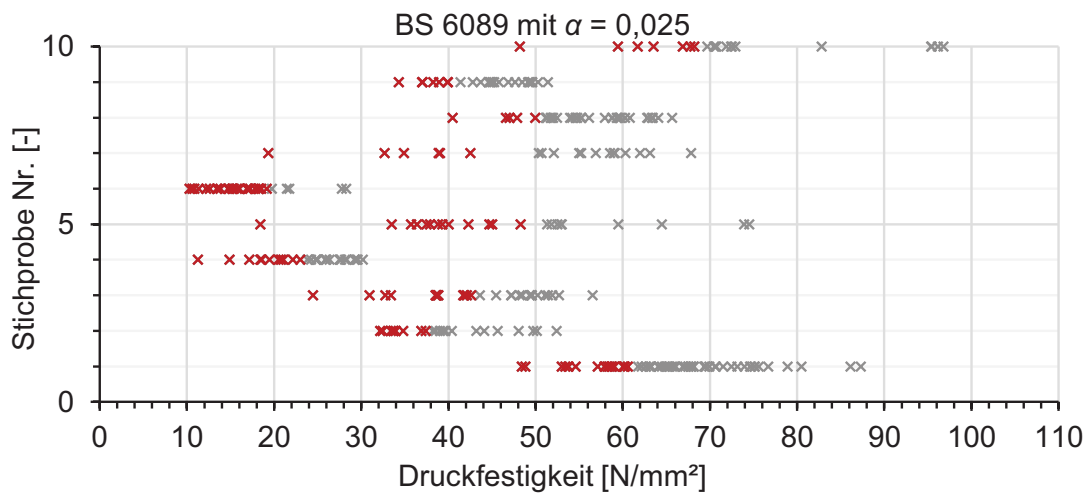


Abb. 6.35 Bewertung realer Stichproben mit $n > 10$ mit dem Ausreißertest nach BS 6089 mit $\alpha = 0,025$

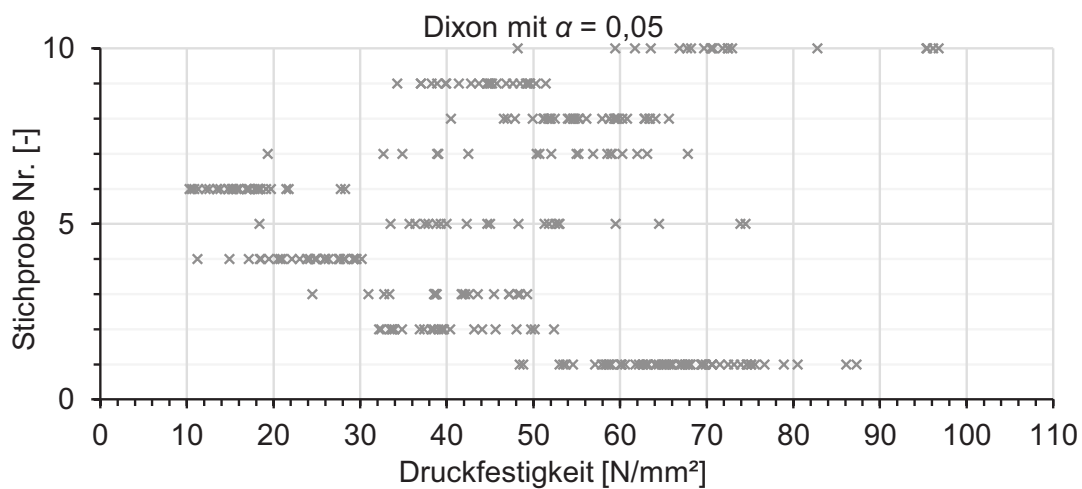


Abb. 6.36 Bewertung realer Stichproben mit $n > 10$ mit dem Ausreißertest nach Dixon mit $\alpha = 0,05$

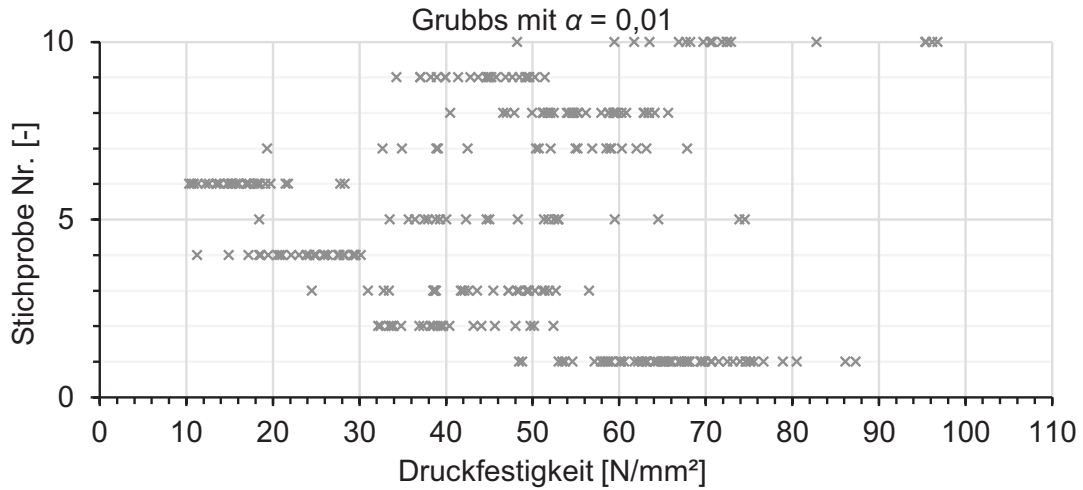


Abb. 6.37 Bewertung realer Stichproben mit $n > 10$ mit dem Ausreißertest nach Grubbs mit $\alpha = 0,01$

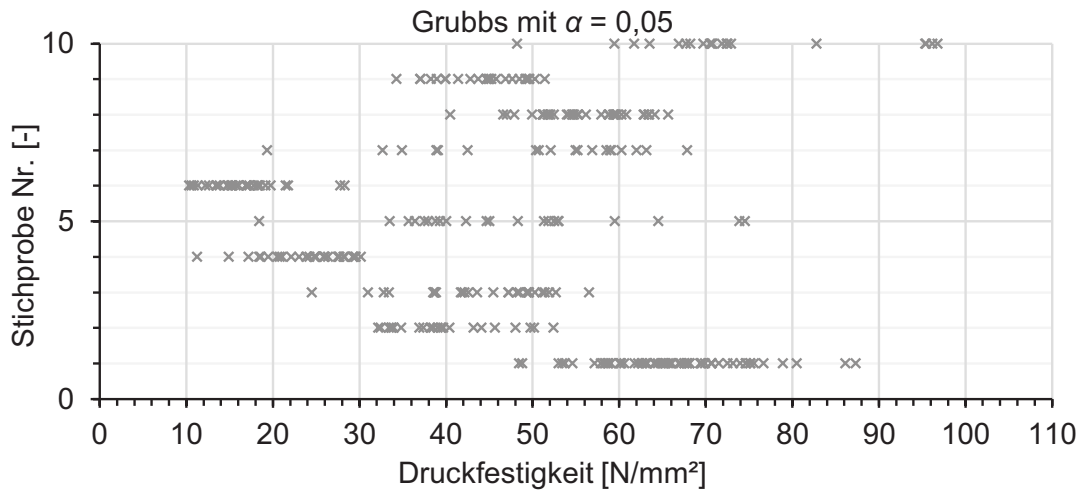


Abb. 6.38 Bewertung realer Stichproben mit $n > 10$ mit dem Ausreißertest nach Grubbs mit $\alpha = 0,05$

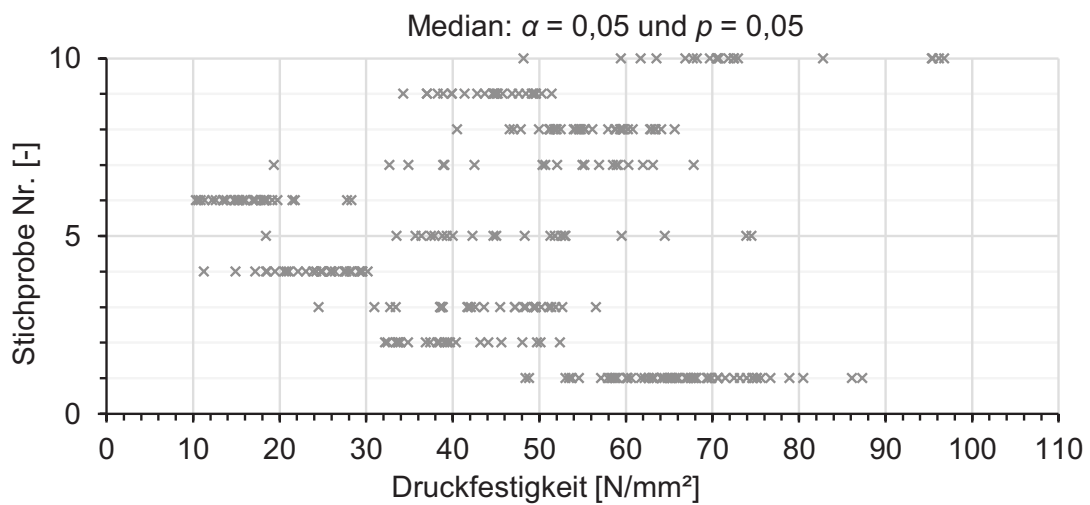


Abb. 6.39 Bewertung realer Stichproben mit $n > 10$ mit dem medianbasierten Ausreißertest mit $\alpha = 0,05$ und $p = 0,05$

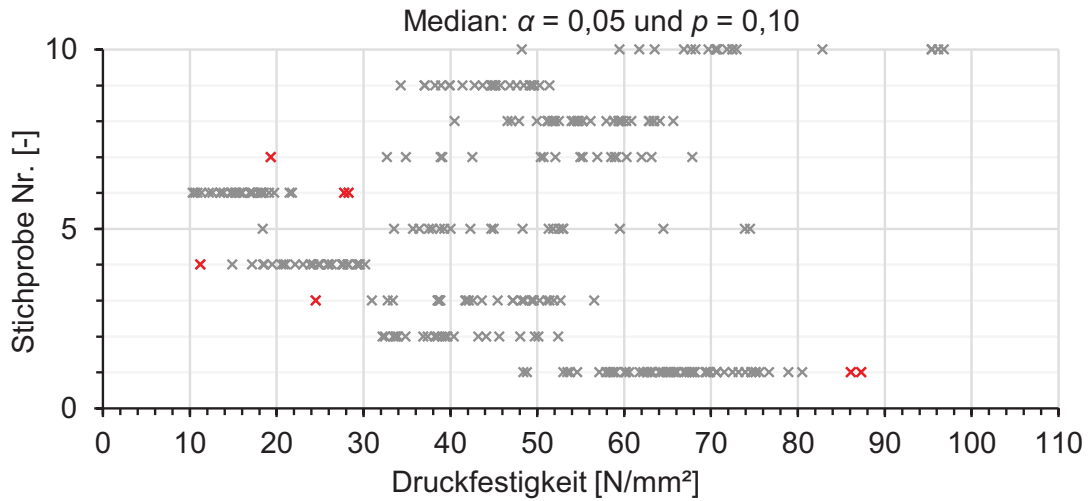


Abb. 6.40 Bewertung realer Stichproben mit $n > 10$ mit dem medianbasierten Ausreißertest mit $\alpha = 0,05$ und $p = 0,10$

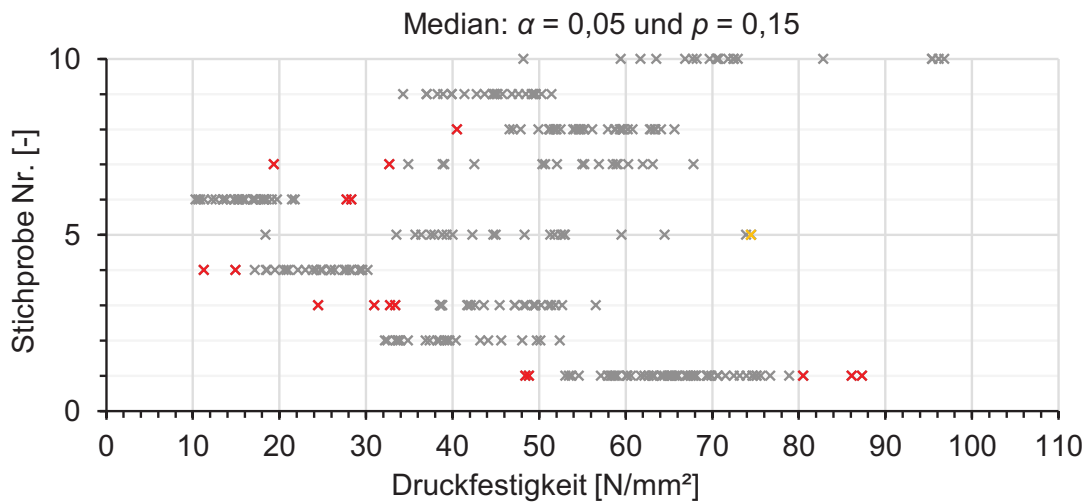


Abb. 6.41 Bewertung realer Stichproben mit $n > 10$ mit dem medianbasierten Ausreißertest mit $\alpha = 0,05$ und $p = 0,15$

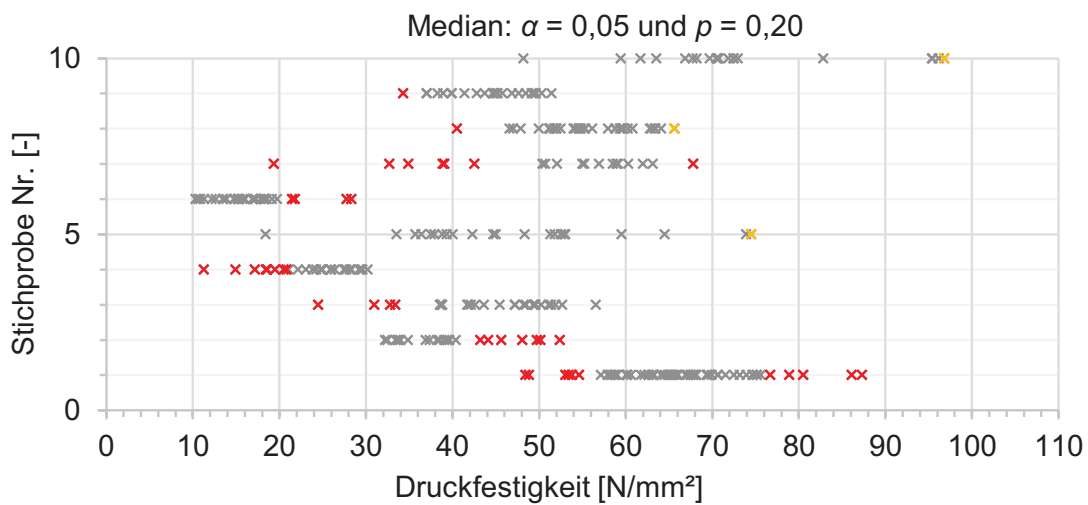


Abb. 6.42 Bewertung realer Stichproben mit $n > 10$ mit dem medianbasierten Ausreißertest mit $\alpha = 0,05$ und $p = 0,20$

Bei einer Bewertung der Stichproben mit dem Ausreißertest nach *BS 6089* ($\alpha = 0,025$) werden, wie Abb. 6.35 zeigt, bei jeder der betrachteten Stichproben sehr viele Einzelwerte ohne kritische Abweichung von der Masse der Daten als Ausreißer eingestuft. Bei Stichprobe Nummer 6 werden sogar über 50 % der Einzelwerte als Ausreißer identifiziert. Eine Einstufung von nach oben von der Masse der Daten abweichenden Extremwerten als Ausreißer ist mit dem Ausreißertest nach *BS 6089* nicht möglich.

Die Ausreißertests nach Dixon ($\alpha = 0,05$), Grubbs ($\alpha = 0,01$) und ($\alpha = 0,05$) sind für eine Bewertung großer Stichproben wirkungslos. Bei keiner der hier betrachteten Stichproben konnten Extremwerte als Ausreißer identifiziert werden (vgl. Abb. 6.36, Abb. 6.37 und Abb. 6.38). Entsprechendes gilt für den medianbasierten Ausreißertest ($\alpha = 0,05$) mit $p = 0,05$ (vgl. Abb. 6.39). Eine Erhöhung von p führt zu einem Anstieg der als auffällige Werte oder Ausreißer eingestuften Einzelwerte (vgl. Abb. 6.40 bis Abb. 6.42). Bei $p = 0,15$ oder $0,20$ werden, wie z. B. an Stichprobe Nummer 1 deutlich wird, jedoch auch Einzelwerte mit nur geringer Abweichung von der Masse der Daten als Ausreißer oder auffällige Werte eingestuft.

Auch bei den realen Stichproben mit $n > 10$ ist somit mit dem medianbasierten Ausreißertest für $p = 0,10$ eine zielsichere Identifizierung von deutlich auffälligen Werten oder Ausreißern möglich.

6.7 Empfohlenes Vorgehen und Zwischenfazit

Die dargestellten Sensitivitätskurven Abb. 6.3 bis Abb. 6.10 veranschaulichen, wie stark Mittelwert und Standardabweichung als klassische Schätzer der Lage und Streuung und damit auch die Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit durch einzelne Extremwerte beeinflusst werden können. Dies gilt insbesondere bei kleinem Stichprobenumfang, welcher bei der Bewertung der In-situ-Betondruckfestigkeit durch Untersuchungen an Bohrkernen häufig gegeben ist. Deshalb verspricht eine detailliertere Analyse und Bewertung der vorliegenden Stichproben im Hinblick auf Ausreißer erhebliche Vorteile.

Hier setzen Ausreißertests an, sofern eventuell enthaltene Extremwerte nicht mechanisch oder messtechnisch begründet von der präzisierten Stichprobe ausgeschlossen werden können.

Die durchgeführten Parameterstudien an fiktiven Datensätzen mit Stichprobenumfang $n = 4$, $n = 7$ oder $n = 10$ zeigen deutlich, dass viele gebräuchliche Ausreißertests, wie auch der Ausreißertest nach Grubbs mit einem Signifikanzniveau $\alpha = 0,01$, bei kleinem Stichprobenumfang bzw. mehreren Extremwerten innerhalb einer Stichprobe nur bedingt zur Einstufung von Ausreißern geeignet sind. Trotz dessen wird der Ausreißertest nach Grubbs in *EDIN EN 13791:2018-06* ab einem Mindeststichprobenumfang von $n = 4$ empfohlen. Eine wesentliche Ursache hierfür liegt in der Bewertung der Abweichung mit Mittelwert und Standardabweichung, also nicht robusten Schätzern der Lage und Streuung.

Der neu entwickelte medianbasierte Ausreißertest, bei dem die Einstufung einzelner Extremwerte basierend auf robusten Schätzverfahren erfolgt, ermöglicht für die betrachteten fiktiven Stichproben mit einem Umfang von $n = 4$ bis $n = 10$ eine

zielsichere Identifikation von Ausreißern. Dabei ist zu beachten, dass bei sehr kleinem Stichprobenumfang, wie z. B. hier vorliegend $n = 4$, zwar mit dem medianbasierten Ausreißertest auch keine Einstufung basierend auf einem Signifikanzniveau α möglich ist, jedoch durch den zweistufigen Aufbau auffällige Werte identifiziert werden können.

Die an den fiktiven Datensätzen mit einem Umfang zwischen $n = 4$ und $n = 10$ beobachteten Effekte können, wie die in Abb. 6.27 bis Abb. 6.34 dargestellte Bewertung von Stichproben mit $n = 5$ zeigt, auch auf reale Datensätze übertragen werden.

Für kleine Stichproben mit einem Umfang $n \leq 10$ kann somit eine Bewertung mit dem medianbasierten Ausreißertest bei einem Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ und $p = 0,10$ empfohlen werden, da dieser Test unabhängig von Lage und Anzahl der Extremwerte geeignete Ergebnisse liefert.

Die in den Abbildungen Abb. 6.35 bis Abb. 6.42 dargestellte Untersuchung verschiedener, realer Datensätze mit $n > 10$ zeigt ähnliche Ergebnisse. Während der Ausreißertest nach *BS 6089* sehr viele, teilweise auch nur sehr gering von der Masse der Daten abweichende Einzelwerte als Ausreißer einstuft, sind der Ausreißertest nach Dixon ($\alpha = 0,05$) und der Ausreißertest nach Grubbs ($\alpha = 0,01$ und $\alpha = 0,05$) bei realen Daten und großem Stichprobenumfang praktisch wirkungslos. Mit dem medianbasierten Ausreißertest ist hingegen eine zielsichere Identifikation von Ausreißern möglich. Dabei werden für $p = 0,10$ die besten Ergebnisse erzielt. Somit kann auch für Stichproben mit $n > 10$ eine Bewertung mit dem medianbasierten Ausreißertest bei einem Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ und $p = 0,10$ empfohlen werden.

Allgemein kann ein Ausreißertest mehrfach auf eine Stichprobe angewendet werden, allerdings sollte im Falle eines Ausreißeranteils größer 50 % grundsätzlich die Stichprobe hinsichtlich Datenqualität, Verfahren, Vermischung von Grundgesamtheiten und weiteren Aspekten überprüft werden. Alle als Ausreißer eingestuften Einzelwerte sind dabei generell zu dokumentieren und zu kommentieren.

Falls Werte aufgrund schadhafter Betonbereiche innerhalb des Prüfbereichs als Ausreißer identifiziert werden und von der weiteren Auswertung wie z. B. der Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit ausgeschlossen werden, sind die betroffenen Bauteile in jedem Fall durch geeignete Maßnahmen instand zu setzen.

7 Korrelation der Druckfestigkeiten von Bohrkernen aus Bauwerkbeton und genormten Probekörpern

7.1 Einführung in die Thematik

Während *DIN EN 1992-1-1:2011-01* in seinen Nachweisformaten auf die im Labor an normgelagerten Probekörpern nachgewiesene Betondruckfestigkeit referenziert, wird im Bestand der charakteristische Wert in der Regel anhand von aus dem Tragwerk gewonnenen Bohrkernen bestimmt.

Durch verschiedene Einflussgrößen wie z. B. unterschiedliche Art der Verdichtung, Feuchtegehalt und Umgebungsbedingungen unterscheidet sich der Beton in Bauwerken oder Bauteilen von dem in Laborprobekörpern in vielerlei Hinsicht. Nichtlineare Temperatur- und Feuchtegradienten können dabei im Bauteil zu einer Rissbildung führen.

Darüber hinaus kann durch die Bohrkernentnahme selbst eine Gefügeschädigung der zu untersuchenden Betonprobe entstehen. Zusätzlich kann bei der Druckprüfung durch „Ausmuscheln“ angeschnittener Gesteinskörner die Querschnittsfläche reduziert werden.

Im Ergebnis führt dies dazu, dass bei gleicher Betonzusammensetzung und gleichem Betonalter die am Bohrkern ermittelte Druckfestigkeit zumeist kleiner ist, als die am genormten Probekörper geprüfte Druckfestigkeit.

Dem tragen *DIN EN 13791:2008-05* und *DIN EN 13791/A20:2017-02* Rechnung, indem dort für das Verhältnis der Druckfestigkeit von Bohrkernen zur charakteristischen Festigkeit von genormten Probekörpern ein Übertragungsfaktor η von 0,85 angegeben wird, welcher auch im Teilsicherheitsbeiwert für die Bestimmung des Bemessungswertes der Betondruckfestigkeit nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* berücksichtigt wird.

Hintergrunddokumente, die den Umrechnungsbeiwert $\eta = 0,85$ für die Betondruckfestigkeit der Größe nach belegen, existieren allerdings nicht. Untersuchungen von Petersons aus dem Jahr 1968 (*Petersons 1968*) und Rostásy aus dem Jahr 1990 (*DAfStb 408*) enthalten lediglich nicht ausreichend begründete und nicht nachvollziehbare Werte für den Umrechnungsbeiwert, welcher dort zudem eine sehr große Streubreite zwischen 0,70 und 1,30 aufweist. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass sich speziell die in *Petersons 1968* aufgeführten Untersuchungen auf heute nicht mehr übliche Probekörpergeometrien und Lagerungsarten beziehen und somit keine Umrechnungsfaktoren liefern, die eine Umrechnung auf Eurocode - Niveau ermöglichen. Auch der z. B. in *Golden u. Beushausen 2014* beschriebene Einfluss der Bohrkernentnahmerichtung wurde bisher nicht berücksichtigt.

Wird im Rahmen der Beprobung am Bauwerk eine über die 28-Tage-Festigkeit hinausgehende Nacherhärtung des Betons miterfasst, stellt sich zudem die Frage, ob der Umrechnungsfaktor in gleicher Weise wie auf 28-Tage-Niveau berechtigt ist.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, ob der in *DIN EN 13791:2008-05* und *DIN EN 13791/A20:2017-02* postulierte Übertragungsfaktor 0,85 das

Verhältnis der Druckfestigkeit von Bauwerkbeton zur charakteristischen Druckfestigkeit von genormten Probekörpern zu jedem Zeitpunkt, d. h. auch bei der Nachrechnung von bestehenden Massivbauwerken, zuverlässig beschreibt.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des DAfStb-Forschungsprojektes V 496 durchgeführt. Die nachfolgenden Ausführungen sind gleichlautend in dem Abschlussbericht des vorgenannten Vorhabens (vgl. *DAfStb* 632) veröffentlicht.

Basierend auf einer umfassenden Literaturrecherche sollen zunächst mögliche Hintergrundinformationen zum aktuell bei der Bemessung von Neubauwerken anzusetzenden Übertragungsfaktor $\eta = 0,85$ zusammengestellt werden.

Aufbauend auf den theoretischen Erkenntnissen wird anschließend ausgehend von einer Standardbetonzusammensetzung im Rahmen eines Versuchsprogramms der Einfluss verschiedener Parameter auf das Verhältnis zwischen am Bohrkern und am genormten Probekörper bestimmter Betondruckfestigkeit untersucht.

7.2 Normative Regelungen für die Bestimmung des Bemessungswertes der Betondruckfestigkeit nach DIN EN 1992-1-1

Der Bemessungswert der Betondruckfestigkeit ist nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* für den Neubaufall gemäß Gleichung (7.1) zu bestimmen.

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (7.1)$$

mit:

α_{cc} Beiwert zur Berücksichtigung von Langzeitauswirkungen auf die Betondruckfestigkeit und von ungünstigen Auswirkungen durch die Art der Beanspruchung nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01*: in Deutschland $\alpha_{cc} = 0,85$ für Stahlbetonbauteile und $\alpha_{cc} = 0,70$ für unbewehrte Betonbauteile

Anmerkung: Langzeitauswirkungen und ungünstige Auswirkungen durch die Art der Beanspruchung beschreiben dabei die Festigkeitsminderung durch eine Dauerstandsbeanspruchung.

f_{ck} charakteristische Betondruckfestigkeit bezogen auf den wassergelagerten Normzylinder mit $h/d = 300/150$ mm im Alter von 28 Tagen

γ_c Teilsicherheitsbeiwert für Beton nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01*

Für Beton wird nach *Fingerloos et al. 2016* der Unterschied zwischen der charakteristischen Druckfestigkeit f_{ck} des Laborprüfkörpers Zylinder und des eingebauten Bauwerkbetons $f_{ck, is}$ mit $f_{ck} / f_{ck, is} = \gamma_{conv} = 1,15$ ($f_{ck, is} / f_{ck} \approx 0,85$) vorausgesetzt. D. h. es gilt die Annahme, dass die charakteristische Druckfestigkeit (5 %-Quantil) hergestellter Laborprüfkörper ca. 15 % über der charakteristischen Festigkeit (5 %-Quantil) vergleichbarer Proben aus Bauwerkbeton (Bohrkerne) liegt. Unterschiede in der Streuung der Druckfestigkeit des Laborprüfkörpers und des eingebauten Bauwerkbetons werden somit in dem Umrechnungsfaktor $\gamma_{conv} = 1,15$ mit berücksichtigt. Ob der empfohlene Umrechnungsfaktor $\gamma_{conv} = 1,15$ auf

Mittelwertniveau oder auf einem bestimmten Konfidenzniveau festgelegt wurde, geht aus *DIN EN 1992-1-1:2011-01* und *Fingerloos et al. 2016* nicht hervor.

Der beschriebene Unterschied $f_{ck} / f_{ck, is} = \gamma_{conv} = 1,15$ ist nach *Fingerloos et al. 2016* im Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_C = 1,5$ enthalten. Folglich soll der Bemessungswert der Betondruckfestigkeit f_{cd} bei einer Bestimmung nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* den Bemessungswert der Betondruckfestigkeit im Bauwerk beschreiben.

7.3 Normative Regelungen für die Bewertung der Druckfestigkeit von Bauwerkbeton

7.3.1 Regelungen nach DIN 1048-2:1991

Für die Zuordnung in eine Festigkeitsklasse nach *DIN 1045:1988-07* müssen die mittels zerstörenden Untersuchungen im Alter von 28 bis 90 Tagen an Bohrkernen ermittelten Werte der Betondruckfestigkeit nach *DIN EN 1048-2:1991-06* mindestens 85 % des für die jeweilige Festigkeitsklasse festgelegten Wertes erreichen. Dieser Ansatz gilt sowohl für die Nennfestigkeit (5 %-Quantilwert) als auch für die Serienfestigkeit (mittlere Druckfestigkeit).

Der empfohlene Zusammenhang basiert auf der Annahme, dass die am Bohrkern mit einem Durchmesser von 100 mm oder 150 mm und einer Schlankheit von 1,0 geprüfte Betondruckfestigkeit mit der Druckfestigkeit von Würfeln mit einer Kantenlänge von 200 mm gleichgesetzt werden darf. Nach aktuell gültigem Regelwerk – der *DIN EN 13791:2008-05* mit *DIN EN 13791/A20:2017-02* - ist die am Bohrkern mit einem Durchmesser von 50 mm, 100 mm oder 150 mm und einer Schlankheit von 1,0 geprüfte Betondruckfestigkeit jedoch mit der Druckfestigkeit eines Würfels mit einer Kantenlänge von 150 mm gleichzusetzen.

Zur Anpassung auf aktuelle Festigkeitsdefinitionen müsste also zur Berücksichtigung der geänderten Probekörpergeometrie des Würfels und dazu gleichbleibender Geometrie des Bohrkerns der in *DIN EN 1048-2:1991-06* enthaltene Verhältniswert 85 % mit dem Verhältnis der Druckfestigkeiten der Würfel mit der Kantenlänge 150 mm oder 200 mm $f_{c, cube150} / f_{c, cube200} = 1,05$ nach *DIN 1045:1988-07* angepasst werden. Daraus resultiert ein Umrechnungsfaktor von 0,81 (= 0,85/1,05).

7.3.2 Regelungen nach DIN EN 13791:2008

In *DIN EN 13791:2008-05*, welche Regelungen zur Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen enthält, wird für das Verhältnis von Bauwerkbeton zur charakteristischen Druckfestigkeit von genormten Probekörpern ein Wert von 0,85 angegeben, womit auch in *DIN EN 13791:2008-05* berücksichtigt wird, dass die Druckfestigkeit von Bauwerkbeton niedriger sein kann als diejenige, die an genormten Probekörpern derselben Betoncharge gemessen wurde.

In Anhang A von *DIN EN 13791:2008-05* werden verschiedenen Faktoren mit einem Einfluss auf die Bohrkerndruckfestigkeit genannt. Dabei wird unterschieden, ob diese eine Eigenschaft des Betons betreffen oder ob sie bei der Prüfung eine Variable darstellen. Im Hinblick auf die Betoneigenschaften werden Feuchtegehalt, Porenvolumen, Prüfrichtung in Bezug auf die Betonierichtung und Fehlstellen

genannt. Als Variablen bei der Prüfung werden u. a. Bohrkerndurchmesser und Auswirkungen des Bohrens selbst aufgelistet.

Nach *DIN EN 13791:2008-05* ist die Druckfestigkeit eines wassergetränkten (d. h. gemäß *DIN EN 12504-1:2009-07* für mindestens 48 h in Wasser gelagerten Bohrkerns) 10 bis 15 % niedriger als die eines luftgetrockneten Vergleichsbohrkerns. In der Regel wird bei Laborversuchen nach *DIN EN 13791:2008-05* ein Wert von 8 bis 12 % erreicht.

Durch eine Zunahme des Porenvolumens um ca. 1 % nimmt die Druckfestigkeit um 5 bis 8 % ab (*DIN EN 13791:2008-05*).

In Abhängigkeit von der Stabilität des Frischbetons kann bei Ortbeton die Druckfestigkeit eines senkrecht, in Betonierichtung entnommenen Bohrkerns größer als die Festigkeit eines waagrecht, senkrecht zur Betonierichtung entnommenen Bohrkerns sein. Als Größenordnung wird für die Differenz der Festigkeiten in *DIN EN 13791:2008-05* ein Wert von 0 bis 8 % angegeben. Ursache hierfür sind Blutwasserhohlräume, die sich unter Grobzuschlägen bilden können (vgl. Abb. 7.1). Bei horizontal entnommenen Bohrkernen sind die Blutwasserhohlräume entlang der Belastungslinie ausgerichtet (vgl. Abb. 7.1 b) und fördern somit die Rissbildung während der Druckprüfung.

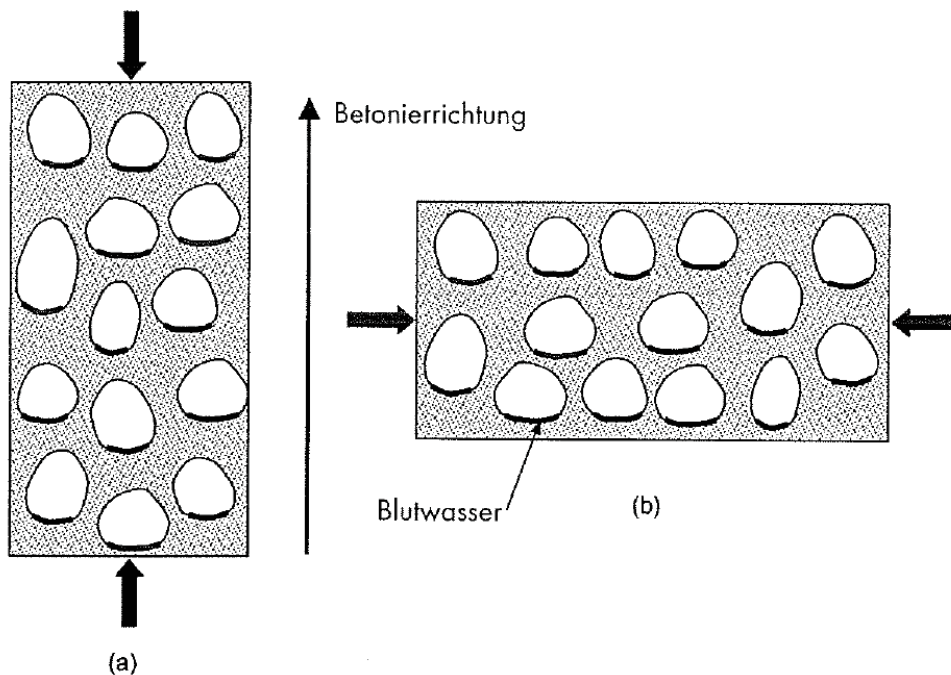


Abb. 7.1 Einfluss der Bohrkernentnahmerichtung (a: vertikal / b: horizontal) in Bezug auf die Betonierichtung aus *Golden u. Beushausen 2014*

Als variable Größe bei der Prüfung hat der Bohrkerndurchmesser einen Einfluss sowohl auf die gemessene Druckfestigkeit als auch auf die zugehörige Schwankungsbreite. Mit abnehmendem Verhältnis von Bohrkerndurchmesser zu maximaler Korngröße steigt nach *DIN EN 13791:2008-05* die Schwankungsbreite der gemessenen Druckfestigkeiten an.

Besonders bei jungen Betonen oder Betonen mit geringer Festigkeit, wie sie im Bestand häufig vorliegen, können durch die Bohrkernentnahme selbst Schäden verursacht werden.

Angeschnittene Zuschlagstoffe in der Bohrkernoberfläche, die ggf. nur durch Adhäsion der Matrix in der Oberfläche verbleiben, tragen nur wenig zur Bohrkerndruckfestigkeit bei.

Weiterhin wird in Anhang C von *DIN EN 13791:2008-05* auf den Einfluss der Betonierhöhe auf die Druckfestigkeit verwiesen. Die Druckfestigkeit des Bauwerkbetons sinkt grundsätzlich in Betonierichtung. Eine Begründung hierfür wird jedoch nicht gegeben, weshalb auf die nachfolgend vorgestellten Untersuchungen verwiesen wird.

7.3.3 Regelungen nach prEN 13791:2018

Die Erläuterung (*CEN - 219*) zum Neuentwurf *E DIN EN 13791:2018-06* enthält ebenfalls Hinweise zum Verhältnis der Druckfestigkeit von Bauwerkbeton und genormten Probekörpern. Es wird wiederum ein Wert von 0,85 empfohlen.

In den Erläuterungen wird darauf hingewiesen, dass das Verhältnis meist zwischen 0,75 und 0,95 streut, jedoch aber auch unklar ist, welchem Quantil der Wert 0,85 entspricht.

Als Einflussgrößen werden in den Erläuterung zu *E DIN EN 13791:2018-06* der Feuchtegehalt der Bohrkernprobe, das Probenalter (Reife des Betons), die Erhärtingsbedingungen (Nachbehandlung), die Art der Verdichtung, Lufteinschlüsse, die Bohrkernentnahmerichtung in Bezug zur Betonierichtung sowie der Einfluss der Bohrkernentnahme selbst genannt.

Für den Einfluss des Feuchtegehalts gelten die bereits in *DIN EN 13791:2008-05* enthaltenen Ansätze.

Unter der Annahme, dass zu jedem Zeitpunkt ausreichend Wasser zur Verfügung steht, sind im Hinblick auf die Erhärtung folgende Hinweise enthalten:

- Sofern in den ersten Stunden nach der Betonage die Betontemperatur niedrig ist, steigt der Zuwachs der Druckfestigkeit im Vergleich zu Standard Erhärtungsbedingungen an.
- Sofern in den ersten Stunden nach der Betonage die Betontemperatur hoch ist, nimmt der Zuwachs der Druckfestigkeit im Vergleich zu Standard Erhärtungsbedingungen ab.

Bei der Bewertung von Bestandsbetonen spielen die (Nach-) Erhärtungsbedingungen jedoch keine Rolle, da die meisten Betone zum Zeitpunkt der Untersuchung bereits mehrere Jahre bis Jahrzehnte alt sind.

Darüber hinaus wird in *E DIN EN 13791:2018-06* auf den Einfluss der Verdichtung auf die Druckfestigkeit des Bauwerkbetons eingegangen. Durch die Verdichtung erfolgt eine Bewegung von Luft- und Wassereinschlüssen. Dies führt z. B. bei Stützen oder Wänden zu einer Reduktion der Druckfestigkeit im oberen Bereich von Bauteilen.

Durch die unterschiedliche Art der Verdichtung von Bauwerkbeton und genormten Probekörpern kann nach *E DIN EN 13791:2018-06* davon ausgegangen werden, dass der Anteil an Lufteinschlüssen bei Bauwerkbeton in der Regel größer ist als bei zugehörigen genormten Probekörpern. Fertigteile stellen hierbei eine Ausnahme dar und sind gesondert zu betrachten. Wie bereits in *DIN EN 13791:2008-05* wird darauf verwiesen, dass durch eine Zunahme des Porenvolumens um ca. 1 % die Druckfestigkeit um 5 bis 8 % abnimmt.

Als Variable bei der Prüfung wird ebenfalls auf den Einfluss der Bohrkernentnahmerichtung in Bezug auf die Betonierrichtung eingegangen. Die Druckfestigkeit von vertikal in Betonierrichtung entnommenen Bohrkernen ist in Abhängigkeit von der Frischbetonstabilität größer als die aus demselben Beton in horizontaler Richtung entnommener Bohrkern. Die Differenz liegt bei bis zu 8 %.

Als Imperfektionen, deren Einfluss auf die In-situ-Betondruckfestigkeit gesondert zu bewerten ist, werden Rissbildung und Mikrorissbildung, Wasseransammlungen unter flachkörnigen Partikeln und örtliche Entmischung genannt. Solche Imperfektionen können auch die Ursache für statistische Ausreißer (vgl. Kapitel 6) sein.

Einflüsse durch die Bohrkernentnahme selbst werden inhaltsgleich zu *DIN EN 13791:2008-05* beschrieben.

7.3.4 Regelungen nach ACI 214.4R-10

7.3.4.1 Allgemeines

Im amerikanischen Regelwerk *ACI 214.4R-10 2014* werden als mögliche Ursachen für Unterschiede zwischen der geplanten und der tatsächlich am Bauwerk vorliegenden Betondruckfestigkeit die Qualität der Verdichtung und Nachbehandlung, durch zusätzliches Wasser hervorgerufenes „Bluten“ des Betons, Mikrorissbildung infolge Vorbelastung, nicht sachgerechte Behandlung und Vorbereitung der Bohrkern und thermisch bedingte Eigenspannungen sowie Einflüsse durch die Bohrkernentnahme selbst genannt.

7.3.4.2 Verdichtung

Eine unzureichende Verdichtung des Betons im Bauteil mit Innenrüttler kann zu einem erhöhten Luftporenanteil im Vergleich zu lagenweise auf dem Rütteltisch verdichteten Laborprobekörpern führen. Nach *ACI 214.4R-10 2014* nimmt je Volumenprozent an Lufteinschlüssen die Druckfestigkeit um ca. 7 % ab.

Darüber hinaus kann bei vertikal betonierten, in Ortbetonbauweise hergestellten, Bauteilen (z. B. Stützen und Wänden) die Verdichtung der unteren Schichten durch den von darüber liegenden Schichten verursachten Frischbetondruck beeinflusst werden. Infolge des erhöhten Frischbetondrucks können die unteren Schichten von vertikal betonierten Bauteilen eine höhere Betondruckfestigkeit aufweisen.

7.3.4.3 Nachbehandlung

Nach *ACI 214.4R-10 2014* haben Temperatur und Feuchte der Umgebung während der Hydratation des Betons einen wesentlichen Einfluss auf die Festigkeit des Betons.

Niedrige Temperaturen während der Hydratation führen zu einer langsameren Festigkeitsentwicklung, können aber zu einer höheren Langzeitfestigkeit führen. Hohe Temperaturen während der Hydratation verursachen gegenteilige Effekte. Besonders bei dicken Bauteilen kann die Druckfestigkeit auch durch thermisch bedingte Effekte – Eigenspannungen und Rissbildung – beeinflusst werden.

Aufgrund des größeren Anteils an nicht geschalter Oberfläche ist insbesondere bei Platten die Gefahr des Verlustes von Feuchtigkeit während der Hydratation viel größer als bei z. B. Wänden oder Stützen. Die Druckfestigkeit von unzureichend nachbehandelten Decken kann nach *ACI 214.4R-10 2014* bis zu 25 % unter der Druckfestigkeit von normgerecht nachbehandelten Decken liegen.

7.3.4.4 Blüten

Als weitere Ursache für eine eventuell geringere Festigkeit von Bauwerkbeton im Vergleich zur Festigkeit von Laborprobekörpern wird in *ACI 214.4R-10 2014* das Blüten von Frischbeton genannt.

Durch das Blüten können unterhalb von Gesteinskörnern Hohlräume entstehen, die zu einer Abminderung der Betondruckfestigkeit senkrecht zur Betonierichtung führen. Die Druckfestigkeit von parallel zur Betonierichtung entnommenen Bohrkernen kann somit größer sein als die von senkrecht zur Betonierichtung entnommenen Proben.

7.3.4.5 Mikrorissbildung

Eine weitere Ursache für einen Festigkeitsunterschied zwischen Bauwerkbeton und Festigkeit des unter Laborbedingungen hergestellten und gelagerten Laborprobekörpers stellt nach *ACI 214.4R-10 2014* eine eventuelle Mikrorissbildung dar. Mikrorisse, bedingt durch Spannungen infolge von Lasten, nicht sachgerechter Behandlung und Vorbereitung der Bohrkernentnahme oder z. B. Temperaturgradienten können zu einer Reduktion der Druckfestigkeit des Bauwerkbetons führen.

7.3.4.6 Einflüsse durch die Bohrkernentnahme

Durch eine nicht sachgerechte Bohrkernentnahme können nach *ACI 214.4R-10 2014* Schäden am Bohrkern verursacht werden, die zu einer Reduzierung der Festigkeit führen. Darüber hinaus kann durch eine nicht ausreichend fest geführte Bohrkronen eine wellenförmige Bohrkernmantelfläche erzeugt werden, die sich in einer größeren Streuung der Druckfestigkeit widerspiegelt. Außerdem können sich angeschnittene Gesteinskörner während der Druckfestigkeitsprüfung durch Überschreiten der Adhäsion aus der Bohrkernmantelfläche herauslösen („Ausmuscheln“), was ebenfalls zu einer größeren Streuung der Druckfestigkeit führen kann.

7.4 Aufarbeitung früherer Untersuchungen und Regelungen

7.4.1 Allgemeines

Der Unterschied zwischen der charakteristischen Betondruckfestigkeit des Laborprüfkörpers Zylinder f_{ck} und des eingebauten Bauwerkbetons $f_{ck, is}$ wird maßgeblich durch folgende Parameter beeinflusst:

- Einbringen des Betons,
- Art der Verdichtung (Rütteltisch / Innenrüttler oder Stampfbeton),
- Einfluss des Bewehrungsgrades auf die Verarbeitung des Frischbetons,
- Betonalter,
- Nachbehandlung,
- Einflüsse aus der Bohrkernentnahme (eventuelle Vorschädigung),
- Mikrorissbildung durch Schwindspannungen,
- „Ausmuscheln“ angeschnittener Gesteinskörnung bei der Druckfestigkeitsprüfung.

Zur Quantifizierung des Unterschiedes zwischen der Betondruckfestigkeit von Laborprüfkörpern (Würfel oder Zylinder) und des eingebauten Bauwerkbetons (In-situ-Druckfestigkeit) werden nachfolgend die Ergebnisse verschiedener früherer Untersuchungen (siehe Tab. 7.1) zusammengefasst und bewertet.

Tab. 7.1 Übersicht über die betrachteten früheren Untersuchungen

		Wand	Stütze	Platte	Balken	Massiges Bauteil	Fertigteil	Fundament
<i>The Concrete Society 2004</i>	Abschnitt 7.4.2	Ja		Ja		Ja		
<i>Petersons 1968</i>	Abschnitt 7.4.3	Ja	Ja	Ja			Ja	
<i>DAfStb 408</i>	Abschnitt 7.4.4	Ja						
<i>Bartlett u. MacGregor 1996</i>	Abschnitt 7.4.5	unbekannt						
<i>Lewandowski 1971*</i>	Abschnitt 7.4.6	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	

* beinhaltet weitere Untersuchungen von *Petersons 1964, Campbell u. Tobin 1967, Bloem 1968, Henzel u. Grube 1966, Thomas 1938, Hognestad 1951, Evans u. Lawson 1955*

7.4.2 Untersuchungen der Concrete Society

Die in *The Concrete Society 2004* dargestellten Erkenntnisse zur Korrelation von In-situ-Betondruckfestigkeit, bestimmt am Bohrkern, und Druckfestigkeit des unter Laborbedingungen hergestellten Laborprobekörpers, bestimmt an einem Würfel mit einer Kantenlänge von 100 mm, basieren auf einem umfangreichen

Versuchsprogramm, bei dem verschiedene Betonmischungen, Zementarten, Bauteiltypen in einem Untersuchungszeitraum von einem Jahr betrachtet wurden. Die wesentlichen Kenndaten sind in Tab. 7.2 zusammengefasst.

Tab. 7.2 Kenndaten des Versuchsprogramms nach *The Concrete Society 2004*

Betondruckfestigkeit	Zielwert der mittleren Betondruckfestigkeit: 30 N/mm ² und 50 N/mm ²	
Zementart	PC	Portlandzement
	P/FA-B	70 % Portlandzement und 30 % Flugasche
	P/B	50 % Portlandzement und 50 % Hochofenschlacke
	PLC	Portlandkalksteinzement
Zuschläge	nicht gebrochener Kies und Sand; 20 – 5 mm; gebrochener Kalkstein und Sand; 20 – 5 mm	
Bauteiltyp	Wand	H/B/D = 3/2/0,3 m
	Platte	L/B/D = 2/2/0,2 m
	massiges Bauteil	H/B/D = 1,5/1,5/1,5 m
Herstellungszeitraum	Winter Sommer	Frühjahr 1997 Sommer 1997
Bohrkerne	<i>d</i> = 100 mm; <i>L</i> = 110 mm; Entnahme und Prüfung im Alter von 28, 42, 84 Tagen und einem Jahr; Wände und Platten: vier Kerne (aus denen jeweils ein Probekörper vorbereitet wurde) je Bauteiltyp für jedes Alter; massige Bauteile: zwei bis drei Kerne (aus denen jeweils vier Probekörper vorbereitet wurden) je Bauteiltyp für jedes Alter; Die Bohrkerne wurden ca. vier Tage vor der Prüfung aus dem entsprechenden Bauteil entnommen. Weitere Hinweise zur Lagerung der Bohrkerne bis zur Prüfung sind in <i>The Concrete Society 2004</i> nicht enthalten.	
Würfel	Würfel mit einer Kantenlänge von 100 mm; Verdichtung auf dem Rütteltisch; Prüfung im Alter von 7, 28, 42, 84 Tagen und einem Jahr; im Alter von 28 d: drei Würfel; sonst: zwei Würfel; Lagerung und Nachbehandlung: bis zur Prüfung Lagerung bei 20 ± 2°C unter Wasser	

Vor dem Hintergrund des großen erforderlichen Betonvolumens wurden die massigen Bauteile und die Platten aus einer Charge und die Wände aus einer weiteren Charge hergestellt. Die Bauteile wurden mit einem Innenrüttler verdichtet. Ohne zusätzlichen Schutz vor Witterungseinflüssen wurden alle Bauteile im Freien gelagert.

Insgesamt wurden 16 verschiedene Betonmischungen (vgl. Tab. 7.3) verwendet, aus denen je Herstellungszeitraum eine Wand, eine Platte und ein massiges Bauteil hergestellt wurden.

Tab. 7.3 Kenndaten der Betonmischungen nach *The Concrete Society 2004*

Mischung Nr.	Zielwert der mittleren Druckfestigkeit [N/mm ²]	Zementart	Zuschlag
1	30	PC	Kies
2	50	PC	Kies
3	30	PC	Kalkstein
4	50	PC	Kalkstein
5	30	P/FA-B	Kies
6	50	P/FA-B	Kies
7	30	P/FA-B	Kalkstein
8	50	P/FA-B	Kalkstein
9	30	P/B	Kies
10	50	P/B	Kies
11	30	P/B	Kalkstein
12	50	P/B	Kalkstein
13	30	PLC	Kies
14	50	PLC	Kies
15	30	PLC	Kalkstein
16	50	PLC	Kalkstein

Der Verhältniswert von In-situ-Betondruckfestigkeit und Druckfestigkeit des unter Normbedingungen hergestellten Laborprobekörpers wird basierend auf Mittelwerten beschrieben. Der Einfluss der Bohrkernentnahmerichtung auf die Druckfestigkeit sowie ggf. unterschiedliche Dichten werden im Rahmen der Auswertung nicht gesondert berücksichtigt. Die an den Bohrkernen ermittelten Druckfestigkeiten wurden lediglich insofern angepasst, als dass aus der Probekörpergeometrie $h/d = 110/100$ mm resultierende Abweichungen in Bezug auf den Würfel mit $a = 100$ mm korrigiert wurden.

In Tab. 7.4 sind die am Bauteil zu verschiedenen Zeitpunkten ermittelten mittleren Festigkeiten in Bezug auf die mittlere Festigkeit des Normwürfels im Alter von 28 Tagen dargestellt. Dabei sind die ermittelten Min- und Max-Korrelationswerte für jede Zementart in Abhängigkeit von der Bauteilart und dem Bauwerksalter, aufgeteilt nach dem Zielwert der mittleren Druckfestigkeit aufgelistet. Der Einfluss des Herstellungszeitraumes (Sommer oder Winter) und der Zuschlagsart wird nicht betrachtet.

Die in Tab. 7.4 zusammengefassten Ergebnisse zeigen allgemein, dass in Abhängigkeit von Zementart, Zielwert der mittleren Druckfestigkeit und Bauteilart die am Bauwerk ermittelte Druckfestigkeit die am Normzylinder im Alter von 28 d ermittelte Festigkeit sowohl über- als auch unterschreiten kann.

Tab. 7.4 Korrelation zwischen In-situ-Druckfestigkeit und 28 Tage-Druckfestigkeit von Laborprobekörpern nach *The Concrete Society 2004*

Zementart	Druckfestigkeit *	Bauteil-typ	$f_{c, is} / f_{c, m, cube, 28 d}$							
			28 Tage		42 Tage		84 Tage		365 Tage	
			Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
	[N/mm ²]									
PC	30,0	massig	0,75	0,95	0,80	0,95	0,85	1,05	0,95	1,10
		Platte	1,00	1,25	1,05	1,35	1,05	1,50	1,15	1,60
		Wand	0,85	0,95	0,85	1,00	0,85	1,05	0,90	1,10
	50,0	massig	0,60	0,70	0,70	0,75	0,70	0,80	0,75	0,90
		Platte	0,85	1,00	0,95	1,10	0,95	1,15	1,05	1,25
		Wand	0,85	0,95	0,80	0,95	0,85	1,00	0,95	1,05
P/FA-B	30,0	massig	0,85	1,10	0,85	1,20	0,95	1,35	1,45	1,65
		Platte	0,80	1,20	0,90	1,30	1,00	1,50	1,65	2,15
		Wand	0,80	1,05	0,85	1,10	1,05	1,30	1,50	1,60
	50,0	massig	0,75	1,00	0,80	1,00	0,95	1,05	1,00	1,35
		Platte	0,75	0,95	1,00	1,15	1,15	1,25	1,20	1,70
		Wand	0,80	1,00	0,90	1,05	1,05	1,25	1,35	1,40
P/B	30,0	massig	0,70	1,10	0,85	1,10	1,00	1,20	1,15	1,35
		Platte	0,65	1,15	0,85	1,30	1,20	1,40	1,35	1,70
		Wand	0,70	1,00	0,85	1,15	1,05	1,25	1,15	1,35
	50,0	massig	0,80	1,05	0,95	1,20	0,90	1,25	1,00	1,55
		Platte	0,90	1,05	1,05	1,30	1,20	1,30	1,30	1,80
		Wand	0,70	1,00	0,85	1,10	1,00	1,20	1,05	1,25
PLC	30,0	massig	0,80	0,95	0,85	1,00	0,95	1,10	1,00	1,15
		Platte	0,95	1,05	1,05	1,20	1,15	1,35	1,20	1,45
		Wand	0,85	1,00	0,90	1,05	0,95	1,00	1,10	1,20
	50,0	massig	0,60	0,80	0,70	0,90	0,70	1,00	0,80	0,95
		Platte	0,80	0,90	0,95	1,00	1,00	1,05	1,05	1,20
		Wand	0,80	0,95	0,90	1,00	0,90	1,05	1,00	1,15

Eine mögliche Ursache für die Festigkeitsunterschiede kann in der unterschiedlichen Dichte von Laborprobekörper und Bauwerkbeton liegen. Neben der Druckfestigkeit wurde im Rahmen der dargestellten Untersuchungen auch die Dichte betrachtet. Die Dichte des Bauwerkbetons von Wänden und Platten war im Durchschnitt 1 % niedriger als die Dichte der zugehörigen Normwürfel. Für die massigen Bauteile konnte ein entsprechender Unterschied von 2,5 % festgestellt werden. Nach *The Concrete Society 2004* sinkt je 1 % Luftporenanteil die Druckfestigkeit um 8 %. Sowohl bei den Würfeln, als auch bei den Bohrkernen konnte kein signifikanter Einfluss des Alters auf die Dichte verzeichnet werden.

Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass die Verhältniswerte mit zunehmendem Alter ansteigen, was dadurch begründet werden kann, dass im Vergleich zu der am Normwürfel im Alter von 28 Tagen ermittelten Festigkeit, die Druckfestigkeit des Bauwerkbetons durch Nacherhärtung meist weiter zunimmt.

Das Festigkeitsverhältnis nimmt gemäß Tab. 7.4 für massige Bauteile aus Betonen mit niedriger Festigkeit unabhängig vom Probekörperalter meist größere Maximalwerte an als bei Betonen mit hoher Zielfestigkeit. Eine mögliche Ursache hierfür liegt im Temperaturanstieg infolge Hydratation im jungen Alter, welcher bei Betonen mit einer höheren Festigkeit oft größer ausfällt als bei Betonen mit einer kleineren Zielfestigkeit. Der Einfluss von Mikrorissbildung infolge von durch Hydratationswärmentwicklung verursachter thermischer Eigenspannungen ist bei massigen Bauteilen am größten, weshalb bei diesen Bauteilen auch fast immer der kleinste Verhältniswert festgestellt wurde.

Bei Platten sind die Verhältniswerte meist am größten. Durch die Entnahme der Bohrkerne in Betonierrichtung wirkt sich der in Abschnitt 7.3.4.4 beschriebene Einfluss durch Bluten nicht negativ auf die Druckfestigkeit aus.

7.4.3 Untersuchungen von Petersons

7.4.3.1 Allgemeines

Aufbauend auf verschiedenen vorausgehenden Untersuchungen wird in *Petersons 1968* der Unterschied zwischen der Betondruckfestigkeit von Laborprüfkörpern und des eingebauten Bauwerkbetons dargestellt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abb. 7.2 und Tab. 7.5 zusammengefasst. Die dargestellten Werte beschreiben jeweils Mittelwerte.

Bei der Auswertung unterscheidet Petersons zwischen „standard test specimens“, „job-stored test specimens“ und „drilled core cylinder test specimens“. „Standard test specimens“ beschreiben dabei Probekörper, die unter Normbedingungen, welche nicht weiter erläutert werden, hergestellt und gelagert wurden. „Job-stored test specimens“ umfassen hingegen Probekörper, die unter den gleichen Bedingungen wie das Bauteil hergestellt und gelagert wurden. „Drilled core cylinder test specimens“ sind am fertigen Bauteil entnommene Bohrkerne.

Bei den beschriebenen Untersuchungen wurde die Druckfestigkeit für alle drei Probekörperarten im gleichen Alter – ca. 28 Tage - bestimmt. Bei der Auswertung der Ergebnisse wird zwischen verschiedenen Bauteiltypen unterschieden.

Die Untersuchungen zeigen deutlich, dass sowohl die Druckfestigkeit von Probekörpern, die unter gleichen Bedingungen wie das Bauteil hergestellt und gelagert wurden, als auch der an Bohrkernen ermittelte Wert im Mittel unterhalb der an unter Normbedingungen hergestellten und gelagerten Probekörpern geprüften Betondruckfestigkeit liegen.

Tab. 7.5 Vergleich der Betondruckfestigkeiten, bestimmt an „Standard test specimens“, „Job-stored test specimens“ und „Core cylinder test specimens drilled from structures“ nach *Petersons 1968*

Bauteil- typ	Würfeldruck- festigkeit	Nachbehandlung	Relative Festigkeit		
			Standard test specimens	Job-stored test specimens	Core cylinders drilled from structures
[-]	[kg/cm ²]	[-]	[%]	[%]	[%]
Stützen	250	unzureichend	100	77	90
	500	unzureichend	100	69	74
	225	Wasser	100	92	96
	450	Wasser	100	92	90
	650	Wasser	100	92	88
	350	ordnungsgemäß	100	91	60
	350	ordnungsgemäß	100	69	65
Wände	300	Wasser	100	106	102
	300	ordnungsgemäß (normal)	100	100	98
	300	unzureichend (Luft)	100	72	84
	580	Wasser	100	94	83
	580	ordnungsgemäß (normal)	100	100	83
	580	unzureichend (Luft)	100	81	78
Platten	130	ordnungsgemäß	100	91	86
	160	ordnungsgemäß	100	95	89
	250	ordnungsgemäß	100	89	91
	310	ordnungsgemäß	100	86	87
	425	ordnungsgemäß	100	85	94
	425	unzureichend	100	77	71
	450	ordnungsgemäß	100	89	80
	450	unzureichend	100	84	68
	410	ordnungsgemäß	100	96	87

Tab. 7.5 Fortsetzung

Bauteil- typ	Würfeldruck- festigkeit	Nachbehandlung	Relative Festigkeit		
			Standard test specimens	Job-stored test specimens	Core cylinders drilled from structures
[-]	[kg/cm ²]	[-]	[%]	[%]	[%]
Fertig- teile	650	ordnungsgemäß	100	84	51
	650	Dampf	100	85	51
	650	Dampf	100	86	77
	800	Dampf	100	82	65
	800	ordnungsgemäß	100	89	75

* Mittelwert der Betondruckfestigkeit am Würfel mit einer Kantenlänge von 200 mm

Einzelfälle, bei denen die an „Job-stored specimens“ oder die an Bohrkernen ermittelte Druckfestigkeit, die an unter genormten Bedingungen hergestellten und gelagerten Probekörpern ermittelte Betondruckfestigkeit übersteigen, sind meist auf eine überdurchschnittliche Nachbehandlung zurückzuführen.

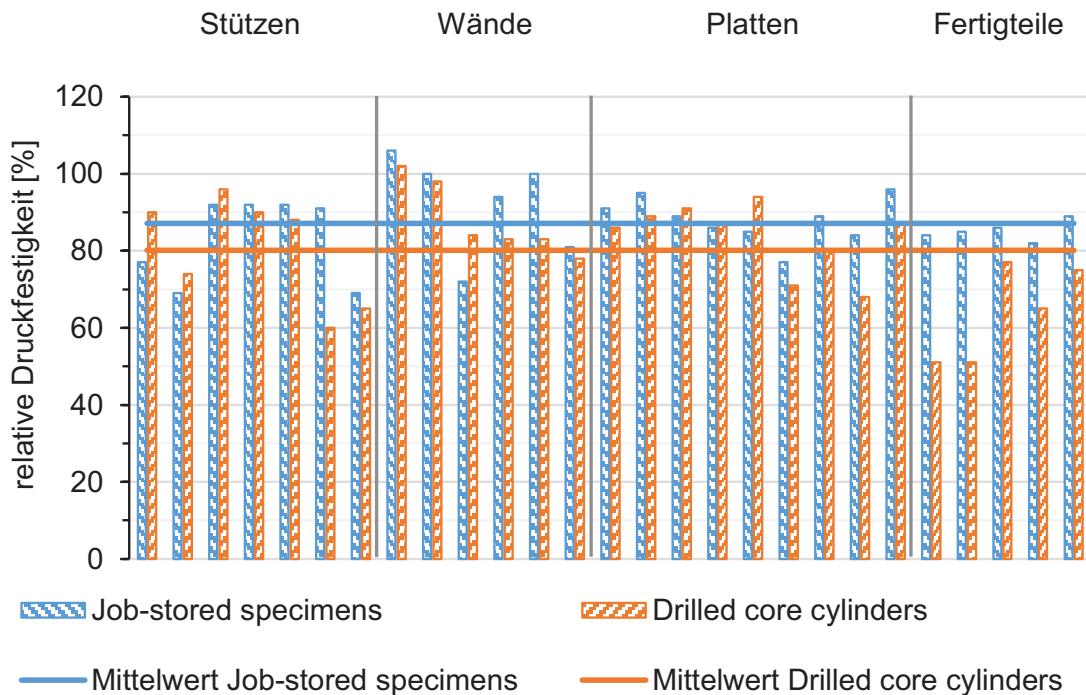


Abb. 7.2 Relative Betondruckfestigkeiten, bestimmt an „Job-stored test specimens“ und „Core cylinder test specimens drilled from structures“ bezogen auf die Festigkeit von „Standard test specimens“, nach *Petersons 1968*

Aussagen zum charakteristischen Wert der Festigkeitsverhältnisse sind nicht enthalten. Es wird lediglich darauf verwiesen, dass aufgrund der Streuung der charakteristische Wert des Festigkeitsverhältnisses deutlich niedriger ist.

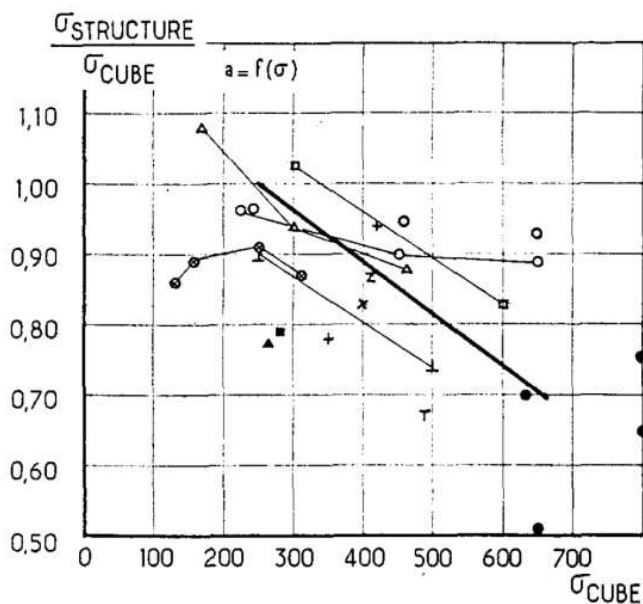
Als wesentliche Faktoren, welche das Verhältnis zwischen Betondruckfestigkeit von Laborprüfkörpern und des eingebauten Bauwerkbetons beeinflussen, werden folgende Punkte aufgezählt:

- Festigkeit,
- Erhärtingsbedingungen/Nachbehandlung (Temperatur, Feuchtigkeit, etc.),
- Typ und Abmessungen des Bauteils,
- Zementart,
- Verdichtung,
- Art des Zuschlags.

Mittels einer getrennten Auswertung wird in den nachfolgenden Kapiteln der Einfluss der einzelnen Parameter beschrieben.

7.4.3.2 Einfluss der Festigkeitsklasse

In Abb. 7.3 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zur Korrelation der Druckfestigkeit von Bohrkernen und Laborprobekörpern in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit der Laborprobekörper dargestellt.



Hinweis:

Die verschiedenen Symbole beschreiben die von Petersons betrachteten Untersuchungen. Jeder Punkt stellt das Ergebnis einer kompletten Bauwerksuntersuchung als Mittelwert dar. Weitere Hinweise zu den Literaturstellen sind direkt Petersons 1968 zu entnehmen.

Abb. 7.3 Korrelation zwischen Druckfestigkeit des Bauwerkbetons $\sigma_{\text{STRUCTURE}}$ und der Festigkeit des Laborprobekörpers (Würfel) σ_{CUBE} [kg/cm²] in Abhängigkeit von der Festigkeit des Laborprobekörpers (Würfel) aus Petersons 1968

Die Größe von „ σ_{CUBE} “ beschreibt die Druckfestigkeit des Laborprüfkörpers und „ $\sigma_{\text{STRUCTURE}}$ “ die Druckfestigkeit des Bauwerkbetons, geprüft am Bohrkern.

Aus den dargestellten Untersuchungen geht hervor, dass das Verhältnis zwischen der Druckfestigkeit des Bauwerkbetons und der Druckfestigkeit des Laborprüfkörpers mit ansteigender Druckfestigkeit abnimmt. Bei einer kleinen Würfeldruckfestigkeit von $\sigma_{\text{CUBE}} \approx 250 \text{ kg/cm}^2$ liegt das Verhältnis bei ca. 0,95 während für höhere

Würfeldruckfestigkeiten von $\sigma_{\text{CUBE}} \approx 600 \text{ kg/cm}^2$ das Verhältnis bis ca. 0,70 abfällt. Der in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* enthaltene Wert $f_{\text{ck}} / f_{\text{ck, is}} = 1/0,85$ liegt somit im mittleren Bereich der in Abb. 7.3 dargestellten Versuchsergebnisse.

Weitere Hintergrundinformationen zu den beschriebenen Untersuchungsergebnissen wie z. B. genaue Probekörpergeometrie, Lagerungsart und Prüfmethode liegen nicht vor. Ein Vergleich der charakteristischen Werte ist nicht möglich, da die Einzelwerte der Untersuchungen ebenfalls nicht vorliegen.

7.4.3.3 Einfluss der Nachbehandlung/Erhärtingsbedingungen

In Tab. 7.6 ist der Einfluss der Nachbehandlungsart sowie Erhärtingsbedingungen auf die Betondruckfestigkeit des Bauwerkbetons und somit auch auf das Verhältnis der Druckfestigkeit von Bohrkernen und unter Laborbedingungen hergestellten Probekörpern nach *Petersons 1968* dargestellt.

Tab. 7.6 Einfluss der Nachbehandlung/Erhärtingsbedingungen auf die Betondruckfestigkeit des Bauwerkbetons bezogen auf die Festigkeit des Laborprobekörpers nach *Petersons 1968*

	Nachbehandlungsart/ Erhärtingsbedingungen	Festigkeitsniveau		
		Niedrig	Mittel	Hoch
1	Schutz der Betonoberseite vor Austrocknung während des ersten Tages, danach Standardmethode der Nachbehandlung.	1,00		1,00
2	Wasserlagerung während des ersten Tages, danach Standardmethode der Nachbehandlung.	1,05		1,10
3	keine feuchte Nachbehandlung; kleinste Querschnittshöhe größer als 15 cm.	0,80		0,95
4	keine feuchte Nachbehandlung; kleinste Querschnittshöhe kleiner als 15 cm.	0,70		0,85
5	niedrige Temperatur während der Erhärting (6 bis 12°C).		1,15	
6	hohe Temperatur während der Erhärting (ca. 35°C).		0,85	
7	sehr hohe Temperatur während der Erhärting (ca. 65°C).		0,75	
8	Nachbehandlung in Dampf		0,85	

Die mit „1“ gekennzeichnete Nachbehandlungsmethode wurde dabei als Standardmethode, die in *Petersons 1968* nicht näher definiert ist, festgelegt, wodurch der zugehörige Einflussfaktor zu 1,0 gesetzt wird.

Die in Tab. 7.6 dargestellten Werte zeigen einen deutlichen Einfluss der Nachbehandlung (Feuchtegehalt und Umgebungstemperatur innerhalb des ersten Tages) auf die Betondruckfestigkeit.

7.4.3.4 Einfluss von Bauteiltyp und Abmessungen

In Abb. 7.4 ist der Einfluss der Lage der Bohrkernentnahmestelle auf das Ergebnis der Druckfestigkeitsuntersuchung dargestellt. Die am Bohrkern ermittelte Druckfestigkeit wird dabei in Bezug auf den direkt unter der Bauteiloberseite – also randnah – bestimmten Wert der Betondruckfestigkeit in Prozentwerten angegeben.

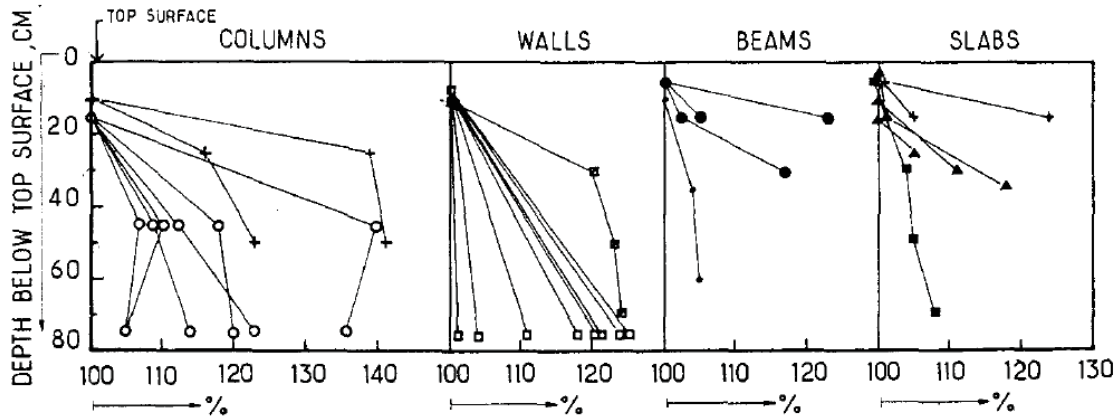


Abb. 7.4 Veränderung der Betondruckfestigkeit mit der Tiefe der Entnahmestelle aus *Petersons 1968*

Unabhängig vom Bauteiltyp ist festzustellen, dass die Druckfestigkeit der an der Bauteiloberseite entnommenen Bohrkern die kleinsten Werte annimmt. Der Zuwachs der Festigkeit mit zunehmender Bauteiltiefe ist im oberen Bereich am größten.

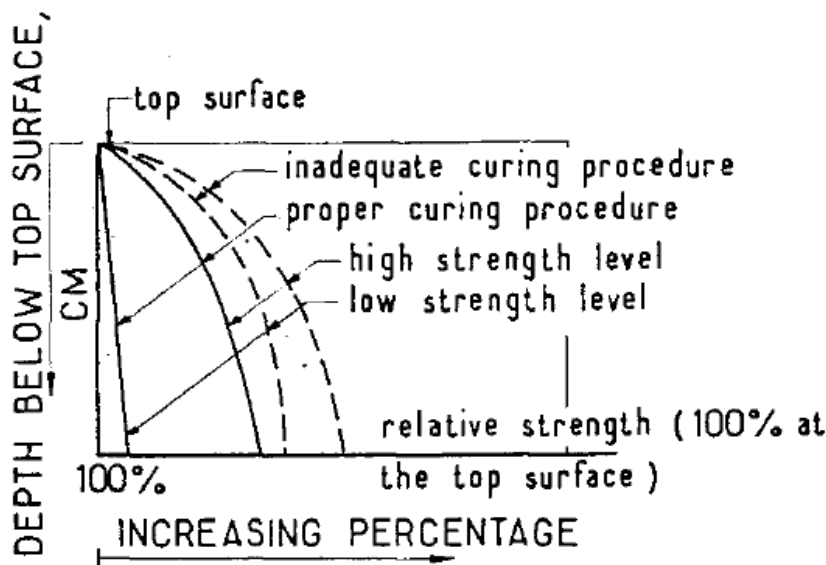


Abb. 7.5 Einfluss der Nachbehandlungsart und des Festigkeitsniveaus auf die Veränderung der Betondruckfestigkeit mit der Tiefe der Entnahmestelle aus *Petersons 1968*

In Abb. 7.5 ist der Einfluss der Nachbehandlungsart und des Festigkeitsniveaus auf die Veränderung der Betondruckfestigkeit mit der Tiefe der Entnahmestelle dargestellt.

Die schematisch dargestellten Verläufe zeigen deutlich, dass mit höherer Qualität der Nachbehandlung sowie mit sinkendem Festigkeitsniveau der Einfluss der vertikalen Lage der Bohrkernentnahmestelle auf die Betondruckfestigkeit abnimmt.

7.4.3.5 Einfluss der Zementart

Die in Petersons aufgeführten Untersuchungen zeigen, dass sowohl Standard-Portlandzemente mit normaler Festigkeitsentwicklung als auch schnell erhärtende Portlandzemente keinen feststellbaren Einfluss auf das Verhältnis der Betondruckfestigkeit des Bauwerkbetons zu dem unter Laborbedingungen hergestellter Laborprobekörper haben.

Lediglich bei langsam erhärtenden Zementen konnte eine im Vergleich zum Laborprobekörper teilweise höhere Betondruckfestigkeit des Bauwerkbetons festgestellt werden. Dabei ist zu beachten, dass das Probekörperalter zum Zeitpunkt der Druckfestigkeitsuntersuchungen an Bohrkernen meist höher lag, als das den Festigkeitsuntersuchungen an Normprobekörpern zugrunde liegenden Alter von 28 Tagen. Grundsätzlich kann bei Zementen mit langsamer Festigkeitsentwicklung, vorausgesetzt, dass ausreichend Feuchtigkeit zur Verfügung steht, ein über eine wesentlich längere Zeit anhaltender Festigkeitszuwachs beobachtet werden als bei Zementen mit normaler oder schneller Festigkeitsentwicklung.

7.4.3.6 Einfluss der Verdichtung

Die von Petersons ausgewerteten Untersuchungen zeigen keinen allgemeingültigen Einfluss der Art der Verdichtung auf das Festigkeitsverhältnis. Vielmehr hat die Qualität der Verdichtung einen maßgeblichen Einfluss auf die Betondruckfestigkeit. Als Erfahrungsregel ist angegeben, dass durch einen Anstieg des Porenanteils je 1 % Zuwachs die Betondruckfestigkeit um 5 bis 6 % abnimmt, was ungefähr den in den Abschnitten 7.3.2 und 7.3.3 (5 bis 8 %), 7.3.4.2 (7 %) und 7.4.2 (8 %) angegebenen Werten entspricht.

Eine Nachbehandlung durch die aus der Eigenlast des Frischbetons resultierende Druckbelastung sorgt ebenfalls für einen Anstieg der Druckfestigkeit. Dies entspricht auch den in Abschnitt 7.4.3.4 aufgeführten Erkenntnissen zum Einfluss der vertikalen Lage der Bohrkernentnahmestelle auf die Betondruckfestigkeit. Mit steigender Tiefe nimmt die Druckbelastung während der Nachbehandlung zu.

7.4.3.7 Zwischenfazit

Die Untersuchungen von *Petersons 1968* zeigen einen dominanten Einfluss des Festigkeitsniveaus, der Nachbehandlungsart und der Erhärtingsbedingungen, des Bauteiltyps und der Position des Betons im Bauwerk auf das Verhältnis zwischen der Druckfestigkeit des Bauwerkbetons, bestimmt am Bohrkern, und der Festigkeit eines Laborprobekörpers.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass die hier beschriebene Druckfestigkeit des Laborprobekörpers an würfelförmigen Probekörpern mit unterschiedlicher Kantenlänge, welche von den derzeit definierten Probekörperabmessungen abweichen, bestimmt wurde. Bei den angegebenen Werten handelt es sich um Mittelwerte. Weitere Hintergrundinformationen zu den beschriebenen Untersuchungsergebnissen wie z. B. genaue Probekörpergeometrie, Lagerungsart und Prüfalter liegen nicht vor. Ein Vergleich der charakteristischen Werte ist nicht möglich, da die Einzelwerte der Untersuchung nicht dokumentiert sind.

Darüber hinaus werden Effekte einer möglichen Nacherhärtung nicht abschließend betrachtet.

Aus diesem Grund können die dargestellten Ergebnisse auch nicht ohne weitere Überlegungen auf die Nachrechnung bestehender Massivbauwerke übertragen werden.

7.4.4 Untersuchungen von Rostásy

7.4.4.1 Allgemeines

Im Rahmen des vom DAfStb geförderten Forschungsvorhabens V 249, dessen Ergebnisse in *DAfStb 408* veröffentlicht sind, wurden umfangreiche Untersuchungen zur altersabhängigen Beziehung zwischen der Druck- und Zugfestigkeit von Beton durchgeführt. Über die Erkenntnisse zur Korrelation zwischen Druck- und Zugfestigkeit hinaus sind auch Hinweise zum Verhältnis der Festigkeit von Laborprobekörpern und der Festigkeit von Bohrkernen enthalten.

7.4.4.2 Versuchsprogramm

Zum Vergleich der Festigkeiten wurden unter möglichst praxisnahen Bedingungen Betonwände für eine spätere Bohrkernentnahme sowie zugehörige Laborprobekörper hergestellt. Dabei wurden die folgenden Parameter variiert:

- Wasserzementwert,
- Zementart,
- Nachbehandlung,
- Sieblinie,
- Lagerung.

Insgesamt wurden zehn quadratische Wände mit den in Tab. 7.7 beschriebenen Eigenschaften betoniert. In der Regel wurden paarweise jeweils eine Wand für die Lagerung im Freien (FW) und eine für die Lagerung im Labor (LW) hergestellt. Die Verdichtung erfolgte mit einem Innenrüttler.

In Abb. 7.6 sind die beiden Wandarten mit Abmessungen und Bohrkernentnahmestellen dargestellt. Alle Bohrkernentnahmen wurden senkrecht zur Betonierrichtung, d. h. in Wanddickenrichtung, entnommen.

Die Wände wurden jeweils nach 24 Stunden ausgeschalt und gemäß Abb. 7.6 7 Tage nachbehandelt. Nach 7 Tagen wurden die Wände entweder ins Freie gebracht oder weiter bei Laborklima 20°C / 65 % relative Luftfeuchte gelagert. Die Wände wurden von September bis November hergestellt. Weitere Klimadaten sind in *DAfStb 408* nicht enthalten.

Tab. 7.7 Übersicht zu den in *DAfStb 408* verwendeten Versuchswänden

Wand Nr.	Bezeichnung	w/z-Wert	Zementart	Sieblinie	Lagerung
1	LW1	0,48 ^{a)}	PZ	B 16	20 / 65
2	FW1	0,48 ^{a)}	PZ	B 16	im Freien
3	LW2	0,70	PZ	B 16	20 / 65
4	FW2	0,70	PZ	B 16	im Freien
5	LW3	0,70	HOZ	B 16	20 / 65
6	FW3	0,70	HOZ	B 16	im Freien
7	LW4	0,70	PZ	C 4	im Freien ^{b)}
8	LW5	0,50	PZ	B 16	20 / 65
9	FW5	0,50	PZ	B 16	im Freien
10	FW6	0,70	PZ	C 4	im Freien

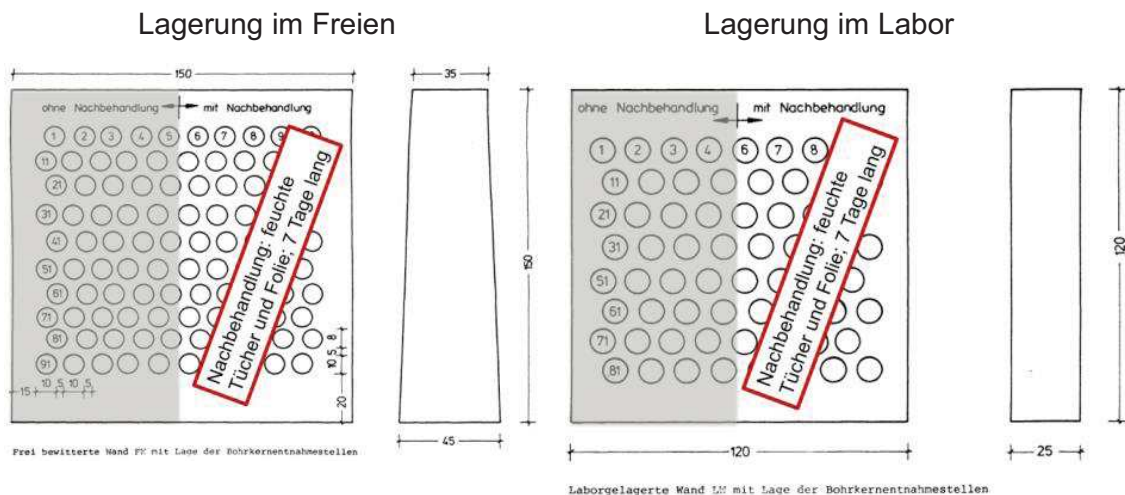
a) geschätzt

b) wurde abweichend im Freien gelagert

Wegen eines Fehlers bei der Feuchtebestimmung der Zuschläge konnte bei Wandpaar 1 die Konsistenz nicht planmäßig erreicht werden, wodurch nur eine unzureichende Verdichtung erfolgen konnte. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse zwar in den Tabellen Tab. 7.8 bis Tab. 7.15 enthalten, werden jedoch für die weitere Auswertung nicht berücksichtigt.

Abweichend von der zuvor erläuterten Bezeichnung der Wände wurde Laborwand LW4 im Freien gelagert, weshalb bei der nachfolgenden Auswertung auch die an LW4 ermittelten Festigkeiten zusammen mit den im Freien gelagerten Wänden ausgewertet wurden. An der Wand FW6 wurden nur stichprobenartige und keine systematischen Untersuchungen durchgeführt.

Weitere Angaben zur Wandherstellung und den verwendeten Betonmischungen sind *DAfStb 408* zu entnehmen.



feuchte Tücher: z. B. mit Wasser getränkte Jutesäcke

Abb. 7.6 Versuchswände nach *DAfStb 408*

Die Bohrkern wurden im Alter von ca. 2, 7, 28, 90 und 360 Tagen entnommen.

Zusätzlich zu den Wänden wurden die folgenden Laborprobekörper hergestellt:

- jeweils drei Würfel (Kantenlänge 150 mm) für die Prüfung der Betondruckfestigkeit im Alter von 2, 7, 28 und 90 Tagen; Lagerung im Freien (Erhärtungswürfel nach *DIN 1048-1:1978-12*),
- drei Würfel (Kantenlänge 150 mm) für die Prüfung der Betondruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen; 7 Tage Lagerung im Wasser und anschließende trockene Lagerung auf einem Lattenrost im Lagerraum bis zur Prüfung (Gütemwürfel nach *DIN 1048-1:1978-12*),
- jeweils drei Zylinder ($h/d = 300/150$ mm) für die Prüfung der Spaltzugfestigkeit im Alter von 2, 7, 28 und 90 Tagen; Lagerung unter Wasser,
- zwölf Zylinder ($h/d = 400/100$ mm) in PVC-Rohren für die Prüfung der Spalt- und zentrischen Zugfestigkeit an 10 cm langen Abschnitten im Alter von 2, 7, 28 und 90 Tagen; Lagerung im Freien im PVC-Rohr.

Die Prüfung der Bohrkern und die der gesondert hergestellten Proben erfolgte zeitgleich unmittelbar nach dem Bohren.

7.4.4.3 Prüfergebnisse

In den nachfolgenden Tabellen Tab. 7.8 bis Tab. 7.15 sowie in Abb. 7.7 bis Abb. 7.14 sind die Ergebnisse der Betonuntersuchungen (Druck- und Spaltzugfestigkeit) im Alter von 28 und ca. 90 Tagen dargestellt. Bei den aufgeführten Werten handelt es sich jeweils um Mittelwerte.

Für die Bestimmung der Druck- oder Spaltzugfestigkeit an den Wänden standen für die Prüfung der Druckfestigkeit zu jedem Prüfzeitpunkt mindestens vier und im Mittel acht Probekörper (Bohrkerne) und für die Prüfung der Spaltzugfestigkeit zu jedem Prüfzeitpunkt mindestens vier und im Mittel neun Probekörper (Bohrkerne) zur Verfügung.

Allgemein ist bei der Bewertung der Ergebnisse der im Vergleich teilweise kleine Stichprobenumfang zu beachten, womit Einflüsse aus der Stichprobenentnahme nicht ausgeschlossen werden können (vgl. Abschnitt 5).

Ein Vergleich der charakteristischen Werte ist nicht möglich, da in *DAfStb 408* nicht alle Einzelwerte angegeben sind.

Druckfestigkeit

Die Berechnung des Verhältnisses der mittleren Druckfestigkeiten basiert auf der Annahme, dass die am Würfel mit einer Kantenlänge $a = 150$ mm bestimmte Druckfestigkeit derjenigen Druckfestigkeit entspricht, die am Bohrkern mit einer Schlankheit $\lambda = h/d = 1,0$ bestimmt wurde. Dies bedeutet, dass keine Umrechnungsfaktoren für unterschiedliche Lagerung und Probekörpergeometrie zu berücksichtigen waren.

Die in Tab. 7.9 sowie in Abb. 7.7 und Abb. 7.8 dargestellten Verhältniszahlen der mittleren Druckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen unterliegen allgemein einer recht großen Streuung. Vernachlässigt man die Ergebnisse der Untersuchungen an

Wandpaar 1, so sind die Werte stets kleiner als eins, was bedeutet, dass die am Bauwerk ermittelte Druckfestigkeit kleiner ist als die am Laborprobekörper bestimmte Druckfestigkeit.

Tab. 7.8 Mittlere Betondruckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen nach *DAfStb 408*

Wandpaar	$\beta_{W150,E,28}$ ^{a)}	$\beta_{W150,G,28}$ ^{b)}	$\beta_{D,LW,28}$ ^{c)}	$\beta_{D,FW,28}$ ^{d)}
[-]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
LW 1/FW 1	38	41	49	48
LW 2/FW 2	41	46	37	32
LW 3/FW 3	31	32	27	24
LW 4	37	43	-	32
LW 5/FW 5	49	57	51	43
FW 6	36	33	-	-

- a) Mittelwert der an unter Laborbedingungen hergestellten Erhärtungswürfeln mit einer Kantenlänge $a = 150$ mm im Alter von 28 d geprüften Betondruckfestigkeiten (Lagerung im Freien)
- b) Mittelwert der an unter Laborbedingungen hergestellten Gütewürfeln mit einer Kantenlänge $a = 150$ mm im Alter von 28 d geprüften Betondruckfestigkeiten (7 Tage Lagerung unter Wasser und anschließende trockene Lagerung)
- c) Mittelwert der an Bohrkernen aus im Labor gelagerten Wänden mit $h/d = 100/100$ mm im Alter von 28 d geprüften Betondruckfestigkeiten
- d) Mittelwert der an Bohrkernen aus im Freien gelagerten Wänden mit $h/d = 100/100$ mm im Alter von 28 d geprüften Betondruckfestigkeiten

Tab. 7.9 Korrelation der mittleren Druckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen nach *DAfStb 408*

Wandpaar	$\beta_{D,LW,28}/\beta_{W150,E,28}$	$\beta_{D,FW,28}/\beta_{W150,E,28}$	$\beta_{D,LW,28}/\beta_{W150,G}$	$\beta_{D,FW,28}/\beta_{W150,G}$
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
LW 1/FW 1	1,29 ^{a)}	1,26 ^{a)}	1,20 ^{a)}	1,17 ^{a)}
LW 2/FW 2	0,90	0,78	0,80	0,70
LW 3/FW 3	0,87	0,77	0,84	0,75
LW 4		0,86		0,74
LW 5/FW 5	1,04	0,88	0,89	0,75
FW 6				
Mittelwert	0,94	0,82	0,85	0,74
	0,84			

- a) Wert wegen unzureichender Verdichtung nicht bei der Bestimmung des Mittelwertes berücksichtigt

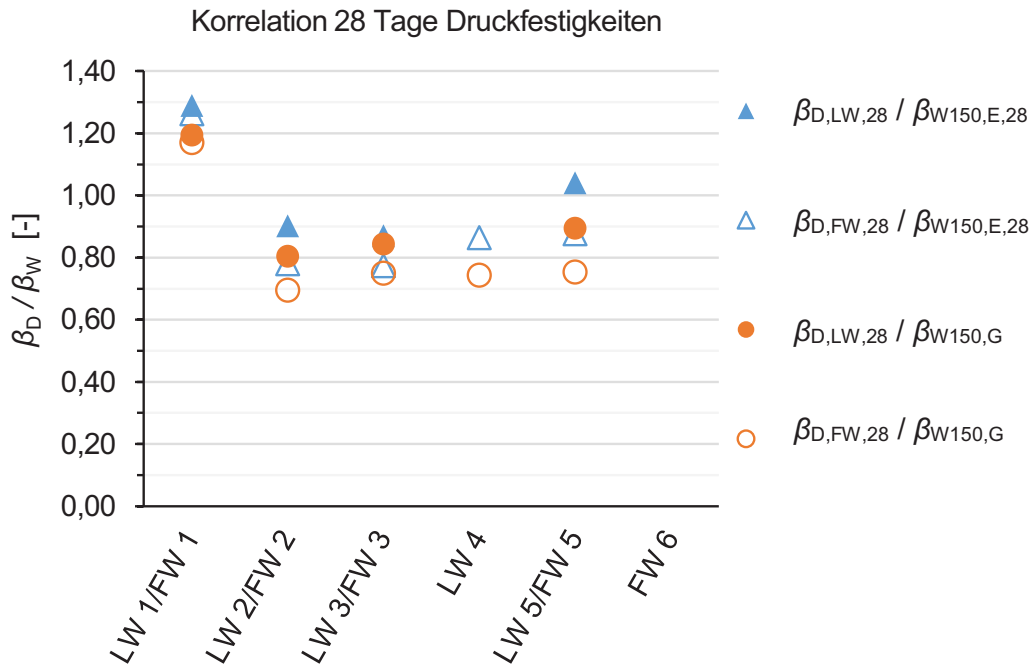


Abb. 7.7 Korrelation zwischen Druckfestigkeit des eingebauten Bauwerkbetons β_D und der Druckfestigkeit des Laborprüfkörpers β_W im Alter von 28 Tagen nach *DAfStb 408*

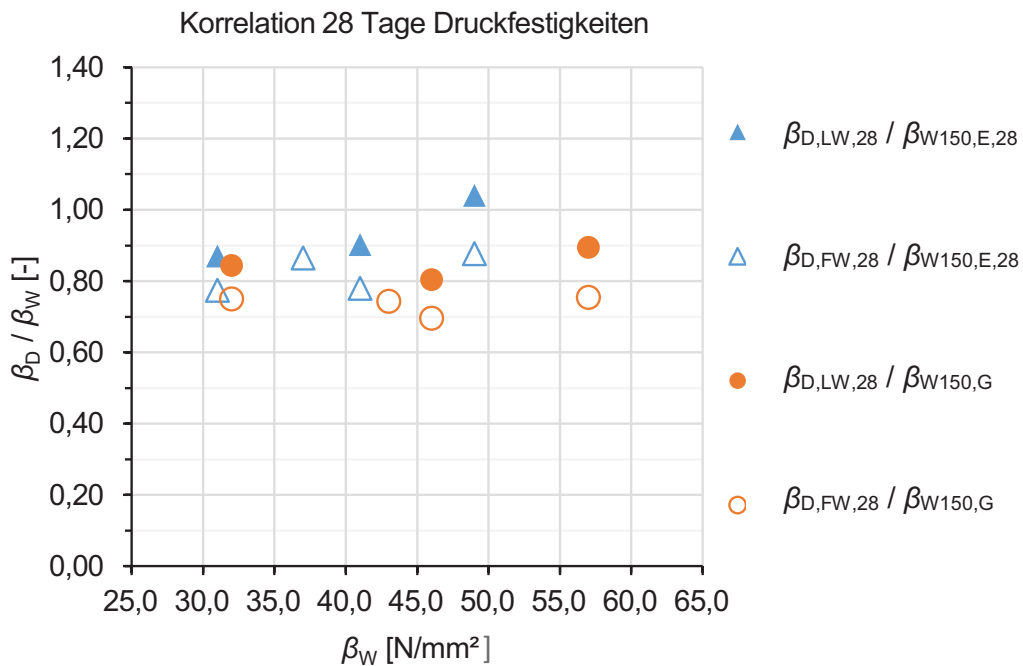


Abb. 7.8 Korrelation zwischen Druckfestigkeit des eingebauten Bauwerkbetons β_D und der Druckfestigkeit des Laborprüfkörpers β_W im Alter von 28 Tagen in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit des Laborprüfkörpers β_W nach *DAfStb 408*

Eine eindeutige Einflussgröße auf das Verhältnis der mittleren Druckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen kann nicht identifiziert werden. Auch eine signifikante Abhängigkeit des Verhältnisses von der Druckfestigkeit des Laborprobekörpers (vgl. Abb. 7.8) lässt sich nicht feststellen. Auffällig ist, dass bei identischer Lagerung von Wand und Laborprobekörper die am Bauwerk/Bohrkern ermittelte Festigkeit im Mittel bei 82 %

($\beta_{D,FW,28}/\beta_{W150,E,28}$) der am Laborprobekörper festgestellten Festigkeit liegt. Inwieweit dies auf Einflüsse durch die Bohrkernentnahme selbst oder auf die unterschiedliche Art der Verdichtung, Mikrorissbildung, „Ausmuscheln“ angeschnittener Gesteinskörnung bei der Druckfestigkeitsprüfung etc. zurückzuführen ist, geht aus den Untersuchungen nicht hervor.

Wie bereits für ein Alter von 28 Tagen festgestellt, unterliegt auch das in Tab. 7.11 sowie in Abb. 7.9 und Abb. 7.10 dargestellte Verhältnis der mittleren Druckfestigkeiten im Alter von ca. 90 Tagen allgemein einer recht großen Streuung. Mit Ausnahme der Werte $\beta_{D,LW,90}/\beta_{W150,G,28}$, welche das Verhältnis der Bauwerksdruckfestigkeit, geprüft an der im Labor gelagerten Wand im Alter von ca. 90 Tagen und der am Gütewürfel im Alter von 28 Tagen geprüften Betondruckfestigkeit beschreiben, ist das Verhältnis der mittleren Druckfestigkeiten im Mittel kleiner als eins.

Eine eindeutige Einflussgröße auf das Verhältnis der mittleren Druckfestigkeiten im Alter von ca. 90 Tagen kann ebenfalls nicht identifiziert werden. Auch eine systematische Abhängigkeit des Verhältnisses von der Druckfestigkeit des Laborprobekörpers (vgl. Abb. 7.10) lässt sich nicht feststellen.

Tab. 7.10 Mittlere Betondruckfestigkeiten im Alter von ca. 90 Tagen nach *DAfStb 408*

Wandpaar	$\beta_{W150,E,90}$ ^{a)}	$\beta_{W150,G,28}$ ^{b)}	$\beta_{D,LW,90}$ ^{c)}	$\beta_{D,FW,90}$ ^{d)}
[-]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]
LW 1/FW 1	- e)	41	- e)	- e)
LW 2/FW 2	42	46	43	37
LW 3/FW 3	39	32	36	30
LW 4	37	43	- e)	37
LW 5/FW 5	56	57	58	47
FW 6	38	33	- e)	- e)

- a) Mittelwert der an unter Laborbedingungen hergestellten Erhärtungswürfeln mit einer Kantenlänge $a = 150$ mm im Alter von ca. 90 d (Alter zwischen 90 und 120 Tagen) geprüften Betondruckfestigkeiten (Lagerung im Freien)
- b) Mittelwert der an unter Laborbedingungen hergestellten Gütewürfeln mit einer Kantenlänge $a = 150$ mm im Alter von 28 d geprüften Betondruckfestigkeiten (7 Tage Lagerung unter Wasser und anschließende trockene Lagerung); wird nachfolgend nicht näher betrachtet
- c) Mittelwert der an Bohrkernen aus im Labor gelagerten Wänden mit $h/d = 100/100$ mm im Alter von ca. 90 d (Alter zwischen 90 und 120 Tagen) geprüften Betondruckfestigkeiten
- d) Mittelwert der an Bohrkernen aus im Freien gelagerten Wänden mit $h/d = 100/100$ mm im Alter von ca. 90 d (Alter zwischen 90 und 120 Tagen) geprüften Betondruckfestigkeiten
- e) Im Alter von 90 Tagen wurden keine Betonuntersuchungen durchgeführt

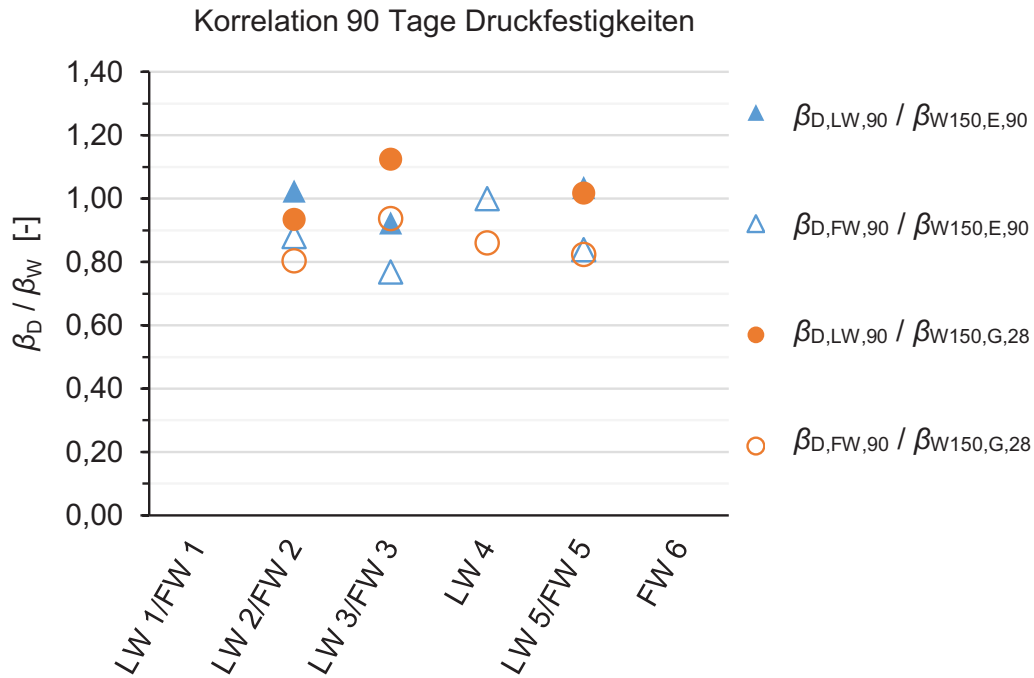


Abb. 7.9 Korrelation zwischen Druckfestigkeit des eingebauten Bauwerkbetons β_D und der Druckfestigkeit des Laborprüfkörpers β_W im Alter von ca. 90 Tagen nach DAfStb 408

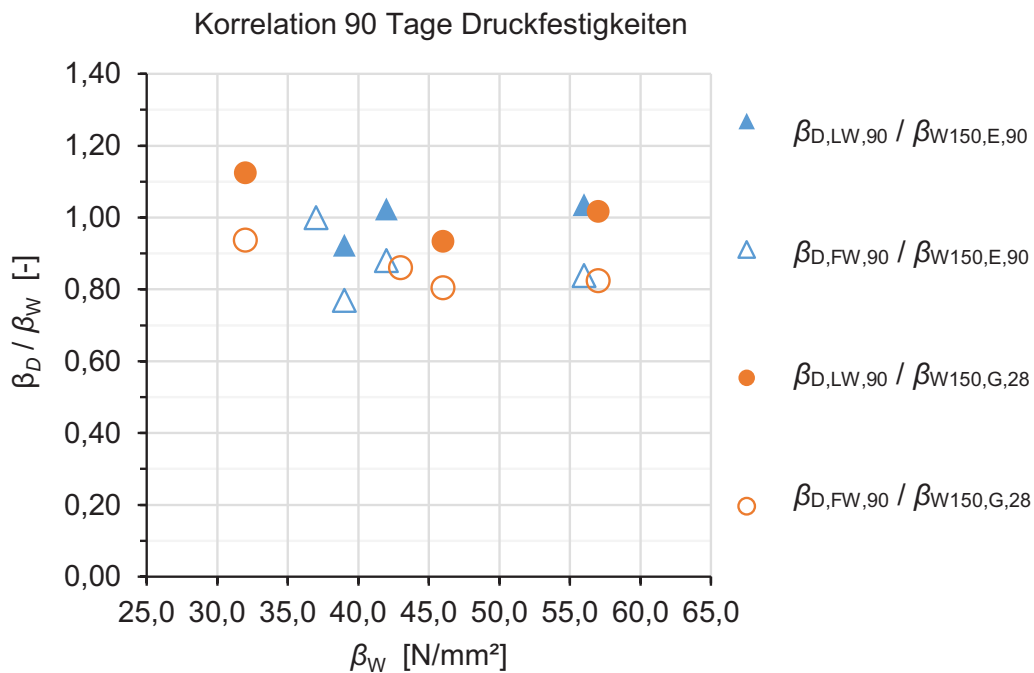


Abb. 7.10 Korrelation zwischen Druckfestigkeit des eingebauten Bauwerkbetons β_D und der Druckfestigkeit des Laborprüfkörpers β_W im Alter von ca. 90 Tagen in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit des Laborprüfkörpers β_W nach DAfStb 408

Tab. 7.11 Korrelation der mittleren Druckfestigkeiten im Alter von ca. 90 Tagen nach
DAfStb 408

Wandpaar	$\beta_{D,LW,90}/\beta_{W150,E,90}$	$\beta_{D,FW,90}/\beta_{W150,E,90}$	$\beta_{D,LW,90}/\beta_{W150,G,28}$	$\beta_{D,FW,90}/\beta_{W150,G,28}$
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
LW 1/FW 1				
LW 2/FW 2	1,02	0,88	0,93	0,80
LW 3/FW 3	0,92	0,77	1,13	0,94
LW 4		1,00		0,86
LW 5/FW 5	1,04	0,84	1,02	0,82
FW 6				
Mittelwert	0,99	0,87	1,03	0,86
	0,94			

Bei identischer Lagerung von Wand und Laborprobekörper ($\beta_{D,FW,90}/\beta_{W150,E,90}$) beträgt die am Bauwerk/Bohrkern ermittelte Festigkeit im Alter von ca. 90 Tagen im Mittel 87 % der am Laborprobekörper festgestellten Festigkeit. Inwieweit dies auf Einflüsse durch die Bohrkernentnahme selbst oder auf die unterschiedliche Art der Verdichtung, Mikrorissbildung, „Ausmuscheln“ angeschnittener Gesteinskörnung bei der Druckfestigkeitsprüfung, etc. zurückzuführen ist, kann nicht aufgeklärt werden.

Spaltzugfestigkeit

Das Verhältnis der mittleren Zugfestigkeiten wird nachfolgend durch Betrachtung der Spaltzugfestigkeiten untersucht. Dabei erfolgte die Prüfung der Spaltzugfestigkeit an Bohrkernen stets so, dass die Bruchfläche senkrecht in der Wand und somit in Betonierichtung lag. Umrechnungsfaktoren für unterschiedliche Lagerung und Probekörpergeometrie wurden nicht berücksichtigt.

Die in Tab. 7.13 und Abb. 7.11 und Abb. 7.12 dargestellten Verhältnismerte der mittleren Spaltzugfestigkeiten im Alter von 28 Tagen unterliegen, wie auch die für die Druckfestigkeit ermittelten Verhältnismerte, allgemein einer recht großen Streuung. Vernachlässigt man die Ergebnisse der Untersuchungen an Wandpaar 1, so liegen die Werte zwischen 0,90 und 1,29 und sind im Mittel größer als eins, was bedeutet, dass die am Bauwerk ermittelte Spaltzugfestigkeit größer als die am Laborprobekörper ermittelte ist. Eine eindeutige Einflussgröße auf das Verhältnis der mittleren Spaltzugfestigkeiten im Alter von 28 Tagen kann nicht identifiziert werden. Auch eine systematische Abhängigkeit des Verhältnisses von der Spaltzugfestigkeit des Laborprobekörpers (vgl. Abb. 7.12) lässt sich nicht feststellen.

Tab. 7.12 Mittlere Spaltzugfestigkeiten im Alter von 28 Tagen nach DAfStb 408

Wandpaar	$\beta_{SZ150,28}$ ^{a)}	$\beta_{SZ100,28}$ ^{b)}	$\beta_{SZ,LW,28}$ ^{c)}	$\beta_{SZ,FW,28}$ ^{d)}
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
LW 1/FW 1	2,75	2,71	3,68	3,65
LW 2/FW 2	2,57	2,93	2,83	2,64
LW 3/FW 3	2,47	2,29	2,39	2,37
LW 4	2,39	2,38	-	2,96
LW 5/FW 5	3,43	3,52	4,08	3,54
FW 6	2,47	2,07	-	2,66

- a) Mittelwert der an unter Laborbedingungen hergestellten Zylindern mit $h/d = 300/150$ mm im Alter von 28 d geprüften Spaltzugfestigkeiten (Lagerung unter Wasser)
- b) Mittelwert der an unter Laborbedingungen hergestellten Zylindern mit $h/d = 100/100$ mm im Alter von 28 d geprüften Spaltzugfestigkeiten (Lagerung im Freien im PVC-Rohr)
- c) Mittelwert der an Bohrkernen aus im Labor gelagerten Wänden mit $h/d = 100/100$ mm im Alter von 28 d geprüften Spaltzugfestigkeiten
- d) Mittelwert der an Bohrkernen aus im Freien gelagerten Wänden mit $h/d = 100/100$ mm im Alter von 28 d geprüften Spaltzugfestigkeiten

Tab. 7.13 Korrelation der mittleren Spaltzugfestigkeiten im Alter von 28 Tagen nach DAfStb 408

Wandpaar	$\beta_{SZ,LW,28}/\beta_{SZ150,28}$	$\beta_{SZ,FW,28}/\beta_{SZ150,28}$	$\beta_{SZ,LW,28}/\beta_{SZ100,28}$	$\beta_{SZ,FW,28}/\beta_{SZ100,28}$
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
LW 1/FW 1	1,34 ^{a)}	1,33 ^{a)}	1,36 ^{a)}	1,35 ^{a)}
LW 2/FW 2	1,10	1,03	0,97	0,90
LW 3/FW 3	0,97	0,96	1,04	1,03
LW 4		1,24		1,24
LW 5/FW 5	1,19	1,03	1,16	1,01
FW 6		1,08		1,29
Mittelwert	1,09	1,07	1,06	1,09
	1,08			

- a) wegen unzureichender Verdichtung nicht beim Mittelwert berücksichtigt

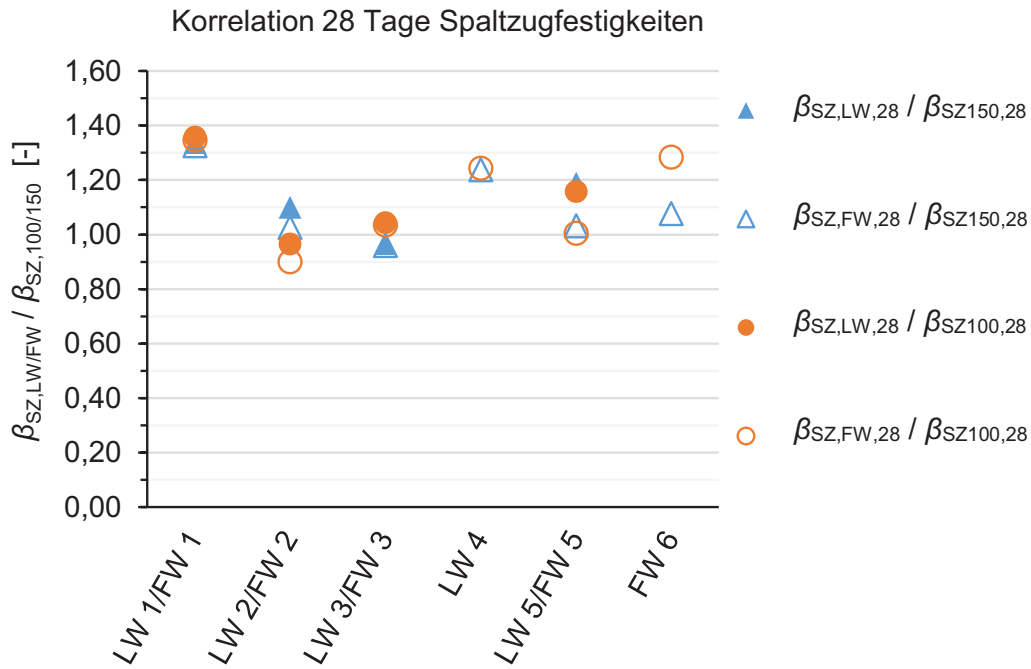


Abb. 7.11 Korrelation zwischen Spaltzugfestigkeit des Bauwerkbetons $\beta_{SZ,LW/FW}$ und der Spaltzugf. des Laborprüfkörpers $\beta_{SZ,100/150}$ im Alter von 28 Tagen nach *DAfStb 408*

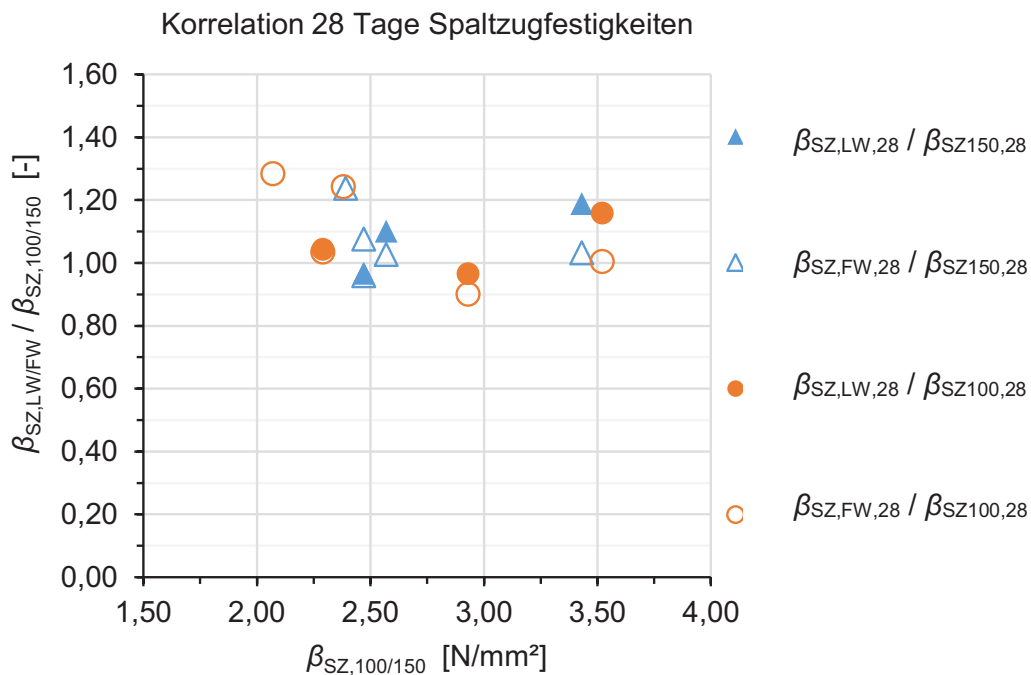


Abb. 7.12 Korrelation zwischen Spaltzugfestigkeit des eingebauten Bauwerkbetons $\beta_{SZ,LW/FW}$ und der Spaltzugfestigkeit des Laborprüfkörpers $\beta_{SZ,100/150}$ im Alter von 28 Tagen in Abhängigkeit von der Spaltzugfestigkeit des Laborprüfkörpers $\beta_{SZ,100/150}$ nach *DAfStb 408*

Tab. 7.14 Mittlere Spaltzugfestigkeiten im Alter von ca. 90 Tagen nach DAfStb 408

Wandpaar	$\beta_{SZ150,90}$ ^{a)}	$\beta_{SZ100,90}$ ^{b)}	$\beta_{SZ,LW,90}$ ^{c)}	$\beta_{SZ,FW,90}$ ^{d)}
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
LW 1/FW 1	- e)	- e)	- e)	- e)
LW 2/FW 2	3,0	3,8	3,20	2,89
LW 3/FW 3	2,8	2,6	2,47	2,52
LW 4	2,2	2,9	- e)	2,85
LW 5/FW 5	3,3	3,7	4,92	3,81
FW 6	2,9	2,4	- e)	3,65

- a) Mittelwert der an unter Laborbedingungen hergestellten Zylindern mit $h/d = 300/150$ mm im Alter von ca. 90 d (Alter zwischen 90 und 120 Tagen) geprüften Spaltzugfestigkeiten (Lagerung unter Wasser)
- b) Mittelwert der an unter Laborbedingungen hergestellten Zylindern mit $h/d = 100/100$ mm im Alter von ca. 90 d (Alter zwischen 90 und 120 Tagen) geprüften Spaltzugfestigkeiten (Lagerung im Freien im PVC-Rohr)
- c) Mittelwert der an Bohrkernen aus im Labor gelagerten Wänden mit $h/d = 100/100$ mm im Alter von ca. 90 d (Alter zwischen 90 und 120 Tagen) geprüften Spaltzugfestigkeiten
- d) Mittelwert der an Bohrkernen aus im Freien gelagerten Wänden mit $h/d = 100/100$ mm im Alter von ca. 90 d (Alter zwischen 90 und 120 Tagen) geprüften Spaltzugfestigkeiten
- e) Im Alter von 90 Tagen wurden keine Betonuntersuchungen durchgeführt

Tab. 7.15 Korrelation der mittleren Spaltzugfestigkeiten im Alter von ca. 90 Tagen nach DAfStb 408

Wandpaar	$\beta_{SZ,LW,90}/\beta_{SZ150,90}$	$\beta_{SZ,FW,90}/\beta_{SZ150,90}$	$\beta_{SZ,LW,90}/\beta_{SZ100,90}$	$\beta_{SZ,FW,90}/\beta_{SZ100,90}$
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
LW 1/FW 1				
LW 2/FW 2	1,07	0,96	0,84	0,76
LW 3/FW 3	0,88	0,90	0,95	0,97
LW 4		1,30		0,98
LW 5/FW 5	1,49	1,15	1,33	1,03
FW 6		1,26		1,52
Mittelwert	1,15	1,11	1,04	1,05
	1,09			

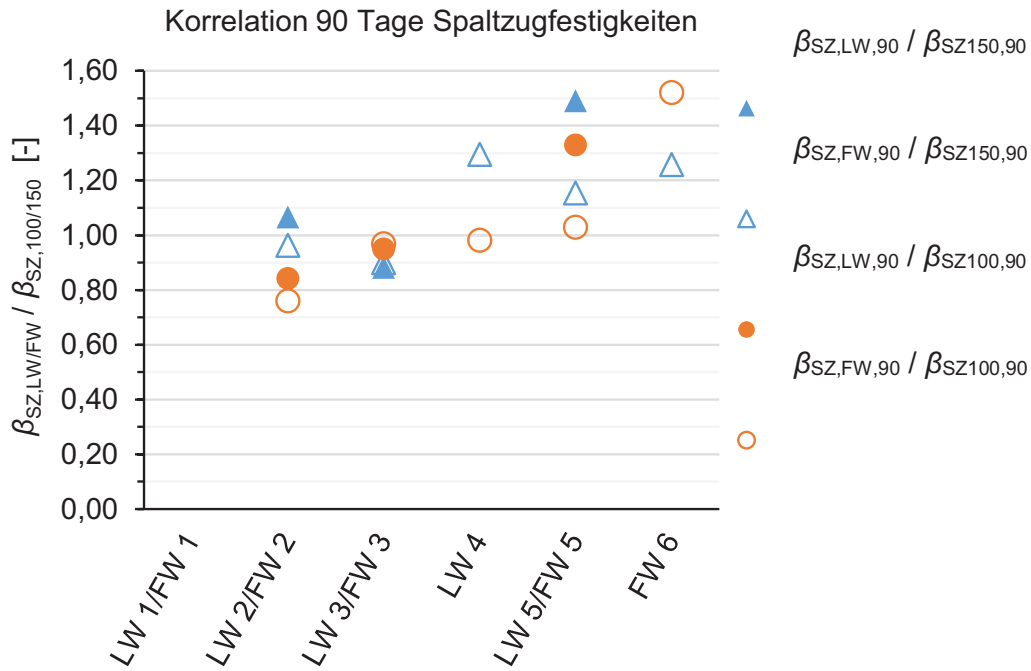


Abb. 7.13 Korrelation zwischen Spaltzugfestigkeit des eingebauten Bauwerkbetons $\beta_{SZ,LW,90}$ und der Spaltzugfestigkeit des Laborprüfkörpers $\beta_{SZ,100/150}$ im Alter von ca. 90 Tagen nach *DAfStb 408*

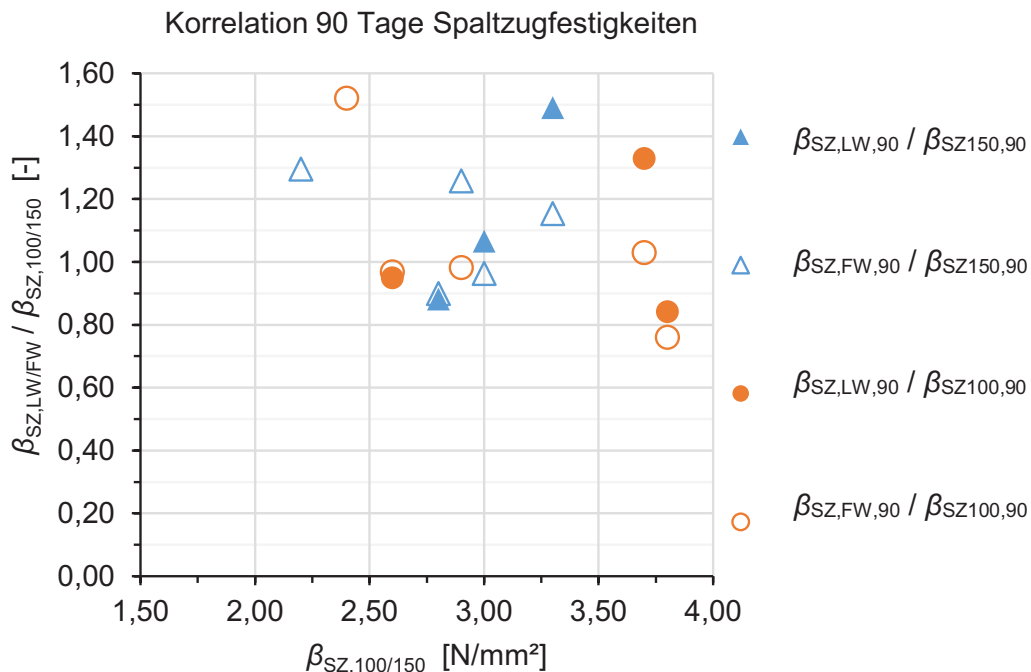


Abb. 7.14 Korrelation zwischen Spaltzugfestigkeit des eingebauten Bauwerkbetons $\beta_{SZ,LW,90}$ und der Spaltzugfestigkeit des Laborprüfkörpers $\beta_{SZ,100/150}$ im Alter von 90 Tagen in Abhängigkeit von der Spaltzugfestigkeit des Laborprüfkörpers $\beta_{SZ,100/150}$ nach *DAfStb 408*

Wie bereits im Alter von 28 Tagen unterliegt auch das in Tab. 7.15 sowie in Abb. 7.13 und Abb. 7.14 dargestellte Verhältnis der mittleren Spaltzugfestigkeiten im Alter von ca. 90 Tagen allgemein einer vergleichsweise großen Streuung. Die Werte liegen

zwischen 0,76 und 1,52 und sind im Mittel größer als eins, was bedeutet, dass die am Bauwerk ermittelte Spaltzugfestigkeit auch im Alter von ca. 90 Tagen größer als die des Laborprobekörpers ist.

Eine eindeutige Einflussgröße auf das Verhältnis der mittleren Spaltzugfestigkeiten im Alter von ca. 90 Tagen kann ebenfalls nicht identifiziert werden. Auch eine systematische Abhängigkeit des Verhältnisses von der Spaltzugfestigkeit des Laborprobekörpers (vgl. Abb. 7.14) liegt nicht vor.

7.4.4.4 Zwischenfazit

Das Verhältnis der mittleren Druckfestigkeiten bestätigt mit dem Wert 0,84 im Alter von 28 Tagen auf Mittelwertniveau den Erwartungswert 0,85 nach *Fingerloos et al. 2016* und *DIN EN 13791:2008-05*. Im Alter von ca. 90 Tagen liegt das Verhältnis auf Mittelwertniveau mit 0,94 über dem Erwartungswert. Hierbei ist zu beachten, dass z. T. die Druckfestigkeit, geprüft an Bohrkernen im Alter von ca. 90 Tagen, mit der an Laborprobekörpern (Gütewürfel) im Alter von 28 Tagen geprüften Druckfestigkeit verglichen wird. Folglich hat die Nacherhärtung einen maßgeblichen Einfluss auf das beschriebene Verhältnis der Druckfestigkeiten.

Das im Alter von 28 oder ca. 90 Tagen mit 1,08 und 1,09 auf Mittelwertniveau ermittelte Verhältnis der mittleren Spaltzugfestigkeiten findet in *DAfStb 408* keine logische Erklärung. Mögliche Ursachen sind eine unzureichende Verdichtung der Laborprobekörper oder eine Verdichtung der Wände mit überdurchschnittlich hoher Qualität, wodurch die Situation auf der Baustelle nicht der Realität entsprechend widergespiegelt wird. Eine Empfehlung für einen Umrechnungsfaktor analog zur Druckfestigkeit kann somit nicht angegeben werden.

Bei der Bewertung der in *DAfStb 408* beschriebenen und hier aufbereiteten Untersuchungen ist zu beachten, dass sämtliche Verhältniswerte auf Mittelwerten beruhen und somit eventuelle Unterschiede in der Streuung zwischen Laborprobekörper und Bauwerkbeton vernachlässigt werden. Ein Vergleich der charakteristischen Werte ist nicht möglich, da in *DAfStb 408* nicht alle Einzelwerte dokumentiert sind.

Somit können speziell zur Beschreibung des für die Nachrechnung entscheidenden Verhältnisses zwischen der charakteristischen Druckfestigkeit f_{ck} des Laborprobekörpers (Zylinder) und des eingebauten Bauwerkbetons $f_{ck, is}$ keine abschließenden Erkenntnisse abgeleitet werden.

7.4.5 Untersuchungen von Bartlett und MacGregor

In den Untersuchungen von *Bartlett u. MacGregor 1996* wird der Zusammenhang zwischen der tatsächlichen Bauwerksdruckfestigkeit und dem an Laborprobekörpern festgelegten Wert der Druckfestigkeit untersucht. Dazu werden die beiden unabhängigen Faktoren F_1 und F_2 verwendet.

Die mittlere Bauwerksdruckfestigkeit wird als eine u. a. von der Qualität der zur Verfügung gestellten Ausgangsstoffe, der Nachbehandlung und dem Bauwerksalter beeinflusste Zufallsgröße beschrieben. Die Einzelwerte der Bauwerksdruckfestigkeit

selbst stellen ebenfalls eine Zufallsgröße dar, die von der Qualität und der Streuung der Ausgangsstoffe sowie der herstellungsbedingten Streuung beeinflusst wird.

Der Faktor F_1 beschreibt gemäß Gleichung (7.2) das Verhältnis zwischen der mittleren, am 28 Tage alten Laborzylinder bestimmten Betondruckfestigkeit f_{cyl} und dem geforderten Wert f_c' .

$$F_1 = \frac{f_{cyl}}{f_c'} \quad (7.2)$$

Der Faktor F_2 beschreibt gemäß Gleichung (7.3) das Verhältnis zwischen der mittleren Bauwerksdruckfestigkeit $f_{c,is}$ und der mittleren, am Laborzylinder bestimmten Betondruckfestigkeit f_{cyl} .

$$F_2 = \frac{f_{c,is}}{f_{cyl}} \quad (7.3)$$

Unterschiedliche Probekörpergeometrien und –größen müssen bei der Bestimmung von F_2 durch Umrechnungsfaktoren angepasst werden.

Durch Kombination der Gleichungen (7.2) und (7.3) kann der Zusammenhang zwischen der mittleren Betondruckfestigkeit des Bauwerkbetons und dem an Laborprobekörpern definierten/geforderten Wert der Druckfestigkeit mit Gleichung (7.4) angegeben werden.

$$f_{c,is} = F_1 \cdot F_2 \cdot f_c' \quad (7.4)$$

Zusätzlich zum Mittelwert wird in den Untersuchungen von Bartlett und MacGregor auch die Streuung der Bauwerksfestigkeit anhand der Streuung der beiden Zufallsvariablen F_1 und F_2 beschrieben.

Für die Bestimmung des Faktors F_1 wurden die Ergebnisse von 3.576 Tests an 108 in Alberta, Kanada, im Zeitraum von 1988 bis 1993 hergestellten Betonsorten betrachtet. Jeder Test besteht dabei aus zwei bis drei Zylinderprüfungen im Alter von 28 Tagen. Insgesamt liegen den Untersuchungen 8.662 Zylinder zugrunde. Der betrachtete Beton wurde sowohl als Ortbeton als auch in Fertigteilen verwendet.

Für den Faktor F_1 werden die in Tab. 7.16 aufgelisteten Parameter angegeben.

Tab. 7.16 Werte für F_1 nach Bartlett u. MacGregor 1996

	F_1	\ln, F_1
Ortbeton		
Mittelwert	1,250	0,234
Standardabweichung	0,131	0,122
Betonfertigteile		
Mittelwert	1,190	0,180
Standardabweichung	0,058	0,053

Für Ortbetone liegt somit die an Zylindern im Alter von 28 Tagen bestimmte Betondruckfestigkeit im Mittel bei 125 % des geforderten Wertes. Für Betonfertigteile liegt der Wert bei 119 %. Eine mögliche Ursache hierfür ist, dass die Hersteller beim Mischungsentwurf immer einen bestimmten Festigkeitsüberschuss einplanen, um den geforderten Wert der 28 Tage Festigkeit auch sicher zu erreichen.

Zur Bestimmung des Faktors F_2 wurden über die Untersuchungen an Normzylindern hinaus die Ergebnisse von Untersuchungen an 1.080 Bohrkernen aus 108 Betonsorten mit einer Festigkeit kleiner als 55 N/mm² ausgewertet. Die Zylinder wurden im Alter von 28 Tagen getestet. Sofern die Betondruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen an würfelförmigen Laborprobekörpern bestimmt wurde, wurde die Zylinderdruckfestigkeit als 80 % des am Würfel geprüften Wertes berechnet. Die Bohrkern zur Bestimmung der Bauwerksdruckfestigkeit wurden im Alter von mindestens 14 Tagen gezogen und im Alter von mindestens 28 Tagen geprüft. Der Bohrkerndurchmesser betrug meist 100 oder 150 mm und mindestens 75 mm. Die Schlankheit der Bohrkern $\lambda = h/d$ lag zwischen eins und zwei. Die in *Bartlett u. MacGregor 1996* betrachteten, an Bohrkernen ermittelten Betondruckfestigkeiten wurden im Hinblick auf den Feuchtezustand sowie eine eventuelle Beschädigung durch den Bohrvorgang auf den Gegenwert eines Standardbohrkerns mit 100 mm Durchmesser und 200 mm Höhe angepasst. Details zu den verwendeten Umrechnungsfaktoren sind in *Bartlett u. MacGregor 1996* nicht enthalten.

In den meisten Fällen wurden die Bohrkern im Bereich der halben Bauteilhöhe von Stützen oder Wänden entnommen. Wurden die Bohrkern aus dem oberen oder unteren Bereich entnommen, wurden die Prüfwerte gemittelt, um die Festigkeit im mittleren Bereich des Bauteils zu erhalten und somit den Einfluss der vertikalen Lage der Entnahmestelle zu neutralisieren.

An einigen Datensätzen konnte auch der Einfluss der Nachbehandlung bewertet werden. Dünne Platten mit unzureichender Feuchte während der Nachbehandlung erreichten im Mittel nur 77 % der an identischen Platten mit ausreichender Feuchte während der Nachbehandlung ermittelten Druckfestigkeit. Für Stützen und Wände wird in *Bartlett u. MacGregor 1996* ein entsprechender Wert von 90 % angegeben.

Die betrachteten Festigkeiten lieferten für den Faktor F_2 die in Gleichung (7.5) beschriebene Beziehung für Betone mit einem Alter von 28 Tagen bis zu einem Jahr. Der experimentell ermittelte Wert für F_2 war für Stützen und Wände stets größer als der entsprechende Wert für flache Balken und Wände. Dieser Effekt wird durch die Größe Z_h in Gleichung (7.5) berücksichtigt. Für Bauteile mit einer Höhe von mindestens 450 mm gilt $Z_h = 1,0$. Für alle andere Fälle gilt $Z_h = 0$. Dieser Effekt kann u. a. durch den größeren Einfluss einer unzureichenden Nachbehandlung auf die Festigkeit von flachen Balken und Platten begründet werden. Zusätzlich wurde festgestellt, dass bei zunehmendem Betonalter a die Bauwerksdruckfestigkeit im Vergleich zur 28 Tage-Festigkeit des Normzylinders zunimmt. Ein Einfluss des Festigkeitsniveaus auf den Faktor F_2 konnte nicht festgestellt werden.

$$F_2 = 0,948 + 0,084 \cdot Z_h + 0,100 \cdot \ln\{a / 28\} \quad (7.5)$$

Die mittlere Bauwerksdruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen liegt somit für flache Balken und Platten bei ca. 95 % und für höhere Bauteile bei 103 % der Zylinderdruckfestigkeit.

Unter Annahme einer logarithmischen Normalverteilung kann F_2 mit Gleichung (7.6) berechnet werden.

$$\ln\{F_2\} = \ln\{0,936 + 0,085 \cdot Z_h + 0,097 \cdot \ln(a/28)\} \quad (7.6)$$

Als weitere Einflussgrößen auf den Faktor F_2 sind die Anteile der Flugasche und des Zements aufgeführt, welche jedoch hier nicht weiter betrachtet werden.

Der Mittelwert der Betondruckfestigkeit des Bauwerkbetons kann somit gemäß Gleichung (7.4) berechnet werden. Die Streuung der Bauwerksfestigkeit setzt sich aus der Streuung der mittleren Bauwerksdruckfestigkeit bei gegebenem f_c' und der Streuung innerhalb des Bauteils selbst zusammen.

Somit beträgt die mittlere Bauwerksdruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen für flache Bauteile ca. 120 % des geforderten Wertes f_c' und für hohe Bauteile ca. 131 %. Für ein Konfidenzniveau (beidseitig) von 95 % liegt das Verhältnis der mittleren Bauwerksdruckfestigkeit und dem geforderten Wert im Alter von 28 Tagen für flache Bauteile zwischen 0,82 und 1,70 und für hohe Bauteile zwischen 0,90 und 1,85. Im Alter von einem Jahr liegt das Verhältnis im Mittel bei 1,33 für flache und 1,44 für hohe Bauteile.

7.4.6 Untersuchungen von Lewandowski

7.4.6.1 Allgemeines

Die Untersuchungen von Lewandowski befassen sich mit dem Vergleich von Bauwerksfestigkeiten mit den Druckfestigkeiten von Standard-Probekörpern. Neben eigenen Untersuchungen beruhen die vorgestellten Ergebnisse auch auf einer Auswertung von verschiedenen Routine-Untersuchungen der Materialprüfanstalt der TU Braunschweig sowie auf einer Auswertung verschiedener Literaturquellen.

7.4.6.2 Literatúrauswertung

In *Lewandowski 1971* ist eine umfassende Zusammenstellung verschiedener Untersuchungen ab Beginn des 20. Jahrhunderts zum Vergleich der Bauwerksdruckfestigkeit mit der Druckfestigkeit von Laborprobekörpern enthalten.

U. a. sind die Ergebnisse historischer Untersuchungen nach *DAfStb 077*, *Petersons 1964* (Betrachtung anderer Untersuchungsergebnisse als in *Petersons 1968* (vgl. Abschnitt 7.4.3), *Campbell u. Tobin 1967*, *Bloem 1968* und *Henzel u. Grube 1966* dargestellt. Wesentliche Erkenntnisse sind nachfolgend zusammengefasst.

In den Jahren 1931 bis 1933 untersuchte Graf (*DAfStb 077*) verschiedene bewehrte und nicht bewehrte quadratische (30 x 30 x 130 cm) und achteckige ($a = 12,4$ cm, $l = 130$ cm) säulenartige Probekörper. Alle Säulen wurden stehend in Stampfbetonbauweise hergestellt. Im Alter von drei Tagen wurden die Säulen

ausgeschalt und bis zur Prüfung im Alter von ca. 28 Tagen mit feuchten Säcken bedeckt. Zusätzlich wurden würfelförmige Probekörper mit einer Kantenlänge von 20 cm hergestellt. Weitere Angaben zur Herstellung, Verdichtung und Lagerung sind in *DAfStb 077* nicht enthalten.

Der Zusammenhang zwischen Säulendruckfestigkeit K_b und Würfelfestigkeit W_b wird gemäß Gleichung (7.7) in Abhängigkeit von der Würfelfestigkeit beschrieben. Je größer die Würfeldruckfestigkeit, desto kleiner das Verhältnis zwischen Säulendruckfestigkeit und Würfelfestigkeit.

$$K_b / W_b = 0,85 - \frac{W_b}{1720} \quad (7.7)$$

mit:

K_b die im zentrischen Druckversuch am unbewehrten säulenartigen Probekörper ermittelte Höchstlast, die auch mit fortschreitender Verkürzung im Versuch nicht überschritten werden konnte,

W_b die Würfelfestigkeit, ermittelt am Würfel mit einer Kantenlänge von 20 cm.

Bei der Bewertung der Ergebnisse von Graf (*DAfStb 077*) ist unbedingt zu beachten, dass der Einfluss aus unterschiedlicher Probekörpergeometrie von Säule und Würfel nicht berücksichtigt wurde. Außerdem kann der Einfluss der Bohrkernentnahme auf den ermittelten Wert der Bauwerksfestigkeit nicht bewertet werden, da die Säulendruckfestigkeit direkt durch Druckfestigkeitsprüfungen an den Säulen bestimmt wurde.

Weitere Erkenntnisse zum Zusammenhang zwischen Säulendruckfestigkeit und Würfelfestigkeit sind in *Petersons 1964* enthalten. Dabei wurden von Petersons sowohl verschiedene vorliegende Untersuchungsergebnisse ausgewertet als auch eigene Untersuchungen an stehend hergestellten Betonsäulen durchgeführt.

Insgesamt werden in *Petersons 1964* 64 aus der Literatur vorliegende Untersuchungen nach Tab. 7.17 betrachtet.

Tab. 7.17 Korrelation zwischen Säulendruckfestigkeit und Würfelfestigkeit –
Literatúrauswertung *Petersons 1964*

Untersuchungen von:	Anzahl Versuche	Festigkeitsbereich σ_{cube}^*	Verhältnis zwischen der Säulendruckfestigkeit und der Würfeldruckfestigkeit		
			Mittelwert	Max	Min
<i>Thomas 1938</i>	7	150	0,67	0,74	0,56
<i>Thomas 1938</i>	14	400	0,61	0,64	0,59
<i>Hognestad 1951</i>	13	120 - 450	0,70	0,85	0,53
<i>Evans u. Lawson 1955</i>	30	185-480	0,69	0,92	0,56

* Kantenlänge 150 mm

Die Messergebnisse liefern ein Verhältnis der Druckfestigkeiten im Bereich von 0,53 bis 0,92 und unterliegen somit einer recht starken Streuung. Hierbei ist zu beachten, dass die in Tab. 7.17 genannten Säulen unter Laborbedingungen hergestellt wurden. Bei unter Baustellenbedingungen hergestellten Säulen sind nach *Petersons 1964* noch größere Streuungen zu erwarten, was damals nicht näher untersucht wurde.

Unter Annahme eines linearen Zusammenhangs kann nach *Petersons 1964* das Verhältnis zwischen Säulendruckfestigkeit σ_u und Würfeldruckfestigkeit σ_{cube} mit Gleichung (7.8) beschrieben werden.

$$\sigma_u = 0,66 \cdot \sigma_{\text{cube}} + 7 \quad (7.8)$$

Wie schon bei den Untersuchungen von Graf (*DAfStb 077*) ist auch bei der Literaturlauswertung nach *Petersons 1964* zu beachten, dass der Einfluss aus unterschiedlicher Probekörpergeometrie nicht berücksichtigt wurde. Der Einfluss einer Bohrkernentnahme kann ebenfalls nicht bewertet werden, da die Säulendruckfestigkeit direkt durch Druckfestigkeitsprüfungen an den Säulen bestimmt wurde.

Über die Literaturlauswertung hinaus sind in *Petersons 1964* auch eigene, von Petersons durchgeführte Untersuchungen an quadratischen (30 x 30 x 300 cm) Stahlbetonsäulen mit variierendem Bewehrungsgehalt dargestellt. Für die Untersuchungen wurden sechs verschiedene Betonmischungen mit einem Sollwert der Würfeldruckfestigkeit zwischen 200 und 600 kp/cm² verwendet. Zusätzlich wurden bei der Betonage jeder Säule aus der jeweiligen Charge neun Zylinder mit $h/d = 300/150$ mm und neun Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm hergestellt. Die Würfel wurden durch Vibration oder händisch (ja nach Betonmischung) und die Zylinder alle händisch verdichtet. Die Laborprobekörper wurden entweder luft- oder wassergelagert. Luftlagerung nach *Petersons 1964* ist wie folgt definiert: Ausschalen im Alter von 24 h, Wasserlagerung für weitere fünf Tage und anschließende Lagerung bis zur Prüfung bei einer Temperatur von 18 - 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von ca. 50 %. Bei der Wasserlagerung wurden die Proben ebenfalls im Alter von 24 h ausgeschalt aber anschließend bis zur Prüfung unter Wasser gelagert. Es wurden je Serie sechs Zylinder und Würfel unter Wasser und drei Zylinder und Würfel trocken gelagert.

Die Stahlbetonsäulen wurden stehend hergestellt und mit einem Innenrüttler verdichtet. Die Säulen wurden in einem Alter von 24 – 48 Stunden ausgeschalt und bis zu einem Alter von 25 Tagen in einem Wasserbad gelagert. Zur Bestimmung der Betondruckfestigkeit der Säulen wurden diese in Prismen mit einer Länge von 300 mm geschnitten, aus denen anschließend Bohrkern mit $h/d = 300/150$ mm entnommen wurden. Vor diesem Hintergrund ist ein Umrechnungsfaktor aus abweichender Geometrie gegenüber den Laborzylindern nicht erforderlich. Die Bohrkern wurden sowohl in Stützenlängsrichtung und somit in Betonierrichtung als auch senkrecht zur Stützenlängsrichtung entnommen.

Zusätzlich zu den stehend hergestellten Säulen wurde zur Verifizierung des Einflusses der Betonierrichtung auch eine Säule liegend hergestellt. In allen weiteren Punkten wurde die Säule wie die stehend hergestellten Probekörper behandelt.

Die Untersuchungen von *Petersons 1964* an den stehend betonierten Stahlbetonsäulen zeigen einen deutlichen Einfluss der Bohrkernentnahmestelle in Stützenlängsrichtung auf die Betondruckfestigkeit. Zur Bestimmung der Verteilung der Betondruckfestigkeit wurden über die Stützenlänge in regelmäßigen Abständen insgesamt neun Bohrkern entnommen. Die Festigkeit in den oberen 60 cm der Stütze, dem sog. Kopfbereich der von Petersons untersuchten Stützen, liegt im Mittel über alle Betonsorten bei ca. 87 % der mittleren Druckfestigkeit der unterhalb des Kopfbereichs liegenden Schichten. Unterhalb des Stützenkopfes konnte keine weitere maßgebende Änderung der Betondruckfestigkeit in Stützenlängsrichtung festgestellt werden. Mit zunehmender Betondruckfestigkeit wurde ein anwachsender Unterschied zwischen Betondruckfestigkeit von Stützenkopf und unteren Schichten festgestellt. Als mögliche Ursache wird die größere Frischbeton-Auflast im unteren Bereich der Stütze und ein Verdunsten des Anmachwassers im Kopfbereich der Stütze genannt.

Der Vergleich der Druckfestigkeiten von senkrecht oder parallel zur Betonierichtung an stehend hergestellten Stahlbetonstützen entnommenen Bohrkernen nach *Petersons 1964* zeigt einen deutlichen Einfluss der Bohrkernentnahmerichtung in Bezug auf die Betonierichtung. Die Druckfestigkeit der senkrecht zur Betonierichtung entnommenen Bohrkern erreicht für die verwendeten Betonmischungen lediglich 84 bis 92 % der Druckfestigkeit von parallel zur Betonierichtung entnommenen Bohrkernen.

Außerdem zeigen die Untersuchungen von Petersons an Stahlbetonsäulen eine deutlich größere Streuung der In-situ-Betondruckfestigkeit, als die der an Laborprobekörpern bestimmten Betondruckfestigkeit. Bei der Bestimmung der Streuung der In-situ-Druckfestigkeit wurden die am Stützenkopf ermittelten Werte der Druckfestigkeit von der Berechnung ausgeschlossen, wodurch eine Beeinflussung der Streuung durch die Festigkeitsverteilung über die Stützenlängsrichtung vermieden wird.

Zum Vergleich von In-situ-Betondruckfestigkeit und Druckfestigkeit von Laborprobekörpern wird in *Petersons 1964* u. a. der 10 %-Quantilwert des Verhältnisses zwischen der In-situ-Betondruckfestigkeit (Einzelwert der Betondruckfestigkeit am Stützenkopf von der Auswertung ausgeschlossen) und der Betondruckfestigkeit von unter Laborbedingungen hergestellten Zylindern angegeben. Je nach Lagerung der Laborprobekörper und Frischbetonkonsistenz liegt das Verhältnis zwischen 0,90 und 1,05. Bei Verwendung eines 5 %-Quantilwertes der Druckfestigkeiten wird sich aufgrund der größeren Streuung der In-situ-Betondruckfestigkeit das Verhältnis weiter verkleinern. Der zugehörige Mittelwert des Verhältnisses liegt bei 1,09, was bedeutet, dass die In-situ-Druckfestigkeit der Stützen im Mittel größer ist als die der zugehörigen Laborprobekörper. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Stützen bis zur Prüfung unter Wasser gelagert wurden und dass die Zylinder nur händisch verdichtet wurden.

Über die Untersuchungen an Stahlbetonsäulen hinausgehend ist in *Petersons 1964* auch eine Datensammlung verschiedener in den Jahren 1958 bis 1962 in Schweden durchgeführten Bauwerksuntersuchungen enthalten. Die wesentlichen Kenndaten der verschiedenen Datensätze sind in Anhang IV.8 in tabellarischer Form zusammengefasst. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt dabei auf der

Betrachtung des Verhältnisses zwischen der In-situ-Betondruckfestigkeit und der Druckfestigkeit von Laborprobekörpern bzw. der Zielfestigkeit der vorliegenden Betonfestigkeitsklasse.

Da die einzelnen Untersuchungen der In-situ-Betondruckfestigkeit an Probekörpern mit unterschiedlicher Form und Abmessung sowie zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt wurden, wurden alle Prüfwerte mithilfe von Umrechnungsfaktoren auf die Druckfestigkeit des Laborwürfels mit einer Kantenlänge von 200 mm im Alter von 28 Tagen umgerechnet. Die so ermittelte Würfeldruckfestigkeit des Bauwerkbetons im Alter von 28 Tagen ($\sigma_{\text{structure, cube, 28}}$) wurde mit der Druckfestigkeit des Laborwürfels im selben Alter (σ_{cube}) sowie mit der Zielfestigkeit der vorliegenden Betonfestigkeitsklasse K verglichen.

Insgesamt werden in *Petersons 1964* 112 verschiedene Datensätze, die sich wie folgt auf verschiedene Bauwerkstypen verteilen, betrachtet: 35 Platten, 26 Wände, 15 Stützen, 20 Fundamente, 4 Balken, 4 Fertigteile, 6 Dammbauwerke und 2 Betonböden. Wie Anhang IV.8 der vorliegenden Arbeit zu entnehmen ist, sind nicht für jedes Bauwerk sowohl Druckfestigkeit des Laborprobekörpers als auch Zielfestigkeit der vorliegenden Betonfestigkeitsklasse bekannt. Die Bauwerke waren zum Zeitpunkt der Untersuchung zwischen 7 Tage und 33 Jahre alt.

Tab. 7.18 Korrelation zwischen In-situ-Betondruckfestigkeit und Druckfestigkeit von Laborprobekörpern bzw. Zielfestigkeit – Kenndaten der Datensammlung nach *Petersons 1964*

Bauwerkstyp	$\sigma_{\text{structure, cube, 28}} / \sigma_{\text{cube}}$						$\sigma_{\text{structure, cube, 28}} / K$					
	Anzahl Bauwerke	Mittelwert	Standardabweichung	Max	Min	10 %-Quantil *	Anzahl Bauwerke	Mittelwert	Standardabweichung	Max	Min	10 %-Quantil *
Platten	13	1,12	0,30	1,64	0,63	0,74	33	0,94	0,23	1,33	0,60	0,65
Wände	10	1,02	0,27	1,35	0,65	0,67	25	1,04	0,24	1,63	0,70	0,73
Stützen	12	0,91	0,15	1,32	0,74	0,72	12	1,03	0,15	1,35	0,86	0,84
Fundamente	11	0,91	0,20	1,34	0,70	0,65	16	1,05	0,24	1,50	0,61	0,74
Balken	3	0,92	0,02	0,95	0,91		1	1,01	-	-	-	
Fertigteile	2	0,80	-	0,90	0,69		3	0,73	0,11	0,83	0,62	
Dammbauwerke	6	1,15	0,20	1,43	0,94		-	-	-	-	-	
Betonböden	-	-	-	-	-		2	0,73	-	0,80	0,65	
Mittelwert		0,98				0,70		0,93				0,74

* Mittelwert – 1,28 · Standardabweichung

In Tab. 7.18 sind die wesentlichen Kenndaten der in *Petersons 1964* betrachteten Bauwerksuntersuchungen getrennt nach Bauwerkstyp aufgelistet. Bei einer Bewertung der dargestellten Ergebnisse ist zunächst auffällig, dass das Verhältnis $\sigma_{\text{structure, cube, 28}}/\sigma_{\text{cube}}$ im Mittel einen größeren Wert als das Verhältnis $\sigma_{\text{structure, cube, 28}}/K$ annimmt. Dies bedeutet, dass die Würfeldruckfestigkeit kleiner als die geforderte Zielfestigkeit der vorliegenden Betonfestigkeitsklasse ist, was auf eine Auswahl von Bauwerken mit unzureichender Qualität der Bauausführung hindeutet.

Getrennt nach Bauwerkstyp liegt das Verhältnis $\sigma_{\text{structure, cube, 28}}/\sigma_{\text{cube}}$ zwischen 0,80 und 1,15 und das Verhältnis $\sigma_{\text{structure, cube, 28}}/K$ zwischen 0,73 und 1,05. Im Mittel ist die tatsächliche In-situ-Betondruckfestigkeit $\sigma_{\text{structure, cube, 28}}$ nach *Petersons 1964* mit 0,98 bzw. 0,93 nur geringfügig kleiner als die Druckfestigkeit des Laborwürfels bzw. die Zielfestigkeit der vorliegenden Betonfestigkeitsklasse. Betrachtet man jedoch die im Anhang IV.8 dargestellten Einzelwerte, so können für das Verhältnis $\sigma_{\text{structure, cube, 28}}/\sigma_{\text{cube}}$ Werte zwischen 0,63 und 1,64 sowie für das Verhältnis $\sigma_{\text{structure, cube, 28}}/K$ Werte zwischen 0,60 und 1,63 festgestellt werden. Die große Streuung zeigt sich auch in den in Tab. 7.18 dargestellten, von Petersons als repräsentativ für die untere Grenze gewählten 10 %-Quantilwerten.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist unbedingt zu beachten, dass je Bauwerk im Mittel nur ca. drei Proben zur Verfügung standen. Zudem basiert die in *Petersons 1964* aufgeführte Datensammlung auf Bauwerksuntersuchungen, die meist infolge unzureichender Qualität der Bauausführung, offenkundiger Mängel bzw. des Fehlens von Kontrollprobekörpern durchgeführt wurden. Darüber hinaus beziehen sich die Verhältniszahlen auf am Würfel mit einer Kantenlänge von 200 mm definierte Druckfestigkeiten und weichen somit von heutigen Definitionen ab.

Weitere Untersuchungen zur Bewertung des Unterschiedes zwischen Bauwerks- und Laborprobekörperdruckfestigkeit wurden von *Campbell u. Tobin 1967* durchgeführt. Dabei wurden unter Laborbedingungen aus insgesamt acht verschiedenen Betonmischungen unbewehrte Platten mit den Abmessungen 6 x 6 ft und einer Dicke von 12 in (ca. 180 x 180 x 30 cm) sowie jeweils 16 Zylinder 6 x 12 in (ca. 15 x 30 cm) hergestellt. Zwei der Mischungen bestanden aus Normal- und sechs aus Leichtbeton. Die Platten wurden nach der Betonage bis zum Abschluss der Untersuchungen im Freien in Folie eingepackt gelagert. Weitere Angaben zur Herstellung der Probekörper sind nicht enthalten.

Die Zylinder wurden zu jeweils gleichen Anteilen unter den in ASTM genannten Randbedingungen oder in Aussparungen in den Platten bis zur Prüfung gelagert. Durch die Lagerung in den Aussparungen erfahren die sog. Baustellenzylinder die gleichen Erhärtungsbedingungen wie die Platten selbst. Zusätzlich wurden zwei bis drei Wochen nach der Betonage Bohrkerne mit einem Durchmesser von 4 und 6 in (ca. 10 und 15 cm) und einer Schlankheit $h/d = 2,0$ entnommen. Die Bohrkerne verblieben bis zur Prüfung in den Platten. Die Untersuchung der Betondruckfestigkeit erfolgte im Alter von 7, 28, 56 und 84 Tagen. In Tab. 7.19 sind die ermittelten Druckfestigkeiten nach 28, 56 und 84 Tagen im Verhältnis zur 28 Tage-Druckfestigkeit des Normzylinders nach ASTM mit $h/d = 300/150$ cm als Mittelwerte dargestellt.

Tab. 7.19 Druckfestigkeiten nach 28, 56 und 84 Tagen im Verhältnis zur 28 Tage-Druckfestigkeit des Normzylinders nach ASTM – Mittelwerte [%] nach *Campbell u. Tobin 1967*

Betonart	28 Tage				56 Tage				84 Tage			
	ASTM-Zylinder	Baustellenzylinder	Bohrkern $d = 15$ cm	Bohrkern $d = 10$ cm	ASTM-Zylinder	Baustellenzylinder	Bohrkern $d = 15$ cm	Bohrkern $d = 10$ cm	ASTM-Zylinder	Baustellenzylinder	Bohrkern $d = 15$ cm	Bohrkern $d = 10$ cm
Normalbeton	100	91,0	88,2	70,4	106,3	93,0	91,8	73,6	106,6	102,7	93,9	75,5
Leichtbeton	100	98,1	86,4	63,8	103,6	100,7	91,8	70,9	106,0	104,0	94,4	71,3

Vergleicht man die Festigkeitsverhältnisse von ASTM- und Baustellenzylindern, zeigen die in Tab. 7.19 dargestellten Ergebnisse bei den Normalbetonen einen größeren Einfluss der Nacherhärtungsbedingungen als bei den Leichtbetonen. Die Druckfestigkeit der Bohrkerne mit einem Durchmesser von 15 cm liegt ca. 10 bis 15 % unterhalb der Druckfestigkeit der „ASTM“-Zylinder. Ein Einfluss der Betonart kann bei einem Bohrkerndurchmesser von 15 cm nicht verzeichnet werden. Die Druckfestigkeit der Bohrkerne mit einem Durchmesser von 10 cm liegt für Normalbetone ca. 25 bis 30 % und für Leichtbetone ca. 30 bis 35 % unterhalb der Druckfestigkeit der „ASTM“-Zylinder.

Weiterhin ist zu erkennen, dass trotz annähernd gleicher Lagerungsbedingungen und Abmessungen die Druckfestigkeit von Bohrkerne kleiner ist als die Druckfestigkeit der Baustellenzylinder. Bei den in *Campbell u. Tobin 1967* betrachteten Leichtbetonen ist dieser Effekt deutlich stärker ausgeprägt als bei den Normalbetonen. Ursächlich hierfür können schädigende Einflüsse aus der Bohrkernentnahme selbst aber auch unterschiedliche Verdichtungsarten von Platte und Zylinder sein, worauf jedoch nicht näher eingegangen wird.

Die an Bohrkerne mit $d = 10$ cm bestimmte Druckfestigkeit liegt für die betrachteten Normalbetone ca. 20 % und für die Leichtbetone ca. 25 % unterhalb der an Bohrkerne mit $d = 15$ cm bestimmten Druckfestigkeit. Diese Beobachtung steht dem durch den Einfluss der Querdehnungsbehinderung während der Druckfestigkeitsprüfung verursachten allgemein gebräuchlichen Ansatz einer steigenden Druckfestigkeit mit kleiner werdenden Probekörperabmessungen entgegen. Daher lässt die Beobachtung den Schluss auf einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss der Bohrkernentnahme zu. Ein schädigender Einfluss aus der Bohrkernentnahme wirkt sich bei kleineren Probekörperabmessungen offenbar viel stärker aus als bei großen Probekörpern.

Weitere Untersuchungen zur Korrelation der In-situ-Betondruckfestigkeit von plattenartigen Bauteilen und Normzylindern sind in *Bloem 1968* dargestellt. Im Detail wurden aus drei verschiedenen Betonmischungen mit Zementen unterschiedlicher Festigkeitsentwicklung und gebrochenem Kalkstein jeweils ein Plattenpaar, d. h. insgesamt sechs Platten, mit den Abmessungen 150 x 270 x 15 cm hergestellt. In jede Platte wurden 36 Kunststoffrohre mit einem Innendurchmesser von 100 mm über die komplette Plattendicke zur Herstellung sog. Push-out-Zylinder eingesetzt. Auf diese

Weise konnten Probekörper zur Untersuchung der In-situ-Betondruckfestigkeit gewonnen werden, ohne diese aus den Platten herausbohren zu müssen. Zusätzlich konnten aus jeder Platte noch 36 Bohrkerne mit $d = 100$ mm über die komplette Plattendicke entnommen werden. Parallel zu den plattenartigen Bauteilen wurden aus jeder der drei Betonmischungen noch 90 Normzylinder mit $h/d = 300/150$ mm hergestellt.

Für jede der drei Betonmischungen wurden nach *Bloem 1968* eine der beiden Platten überdurchschnittlich gut und die andere nicht nachbehandelt. Bei der guten Nachbehandlung wurde auf die Platten schnellstmöglich nach der Betonage ein Nachbehandlungsmittel aufgebracht. Zusätzlich wurden die Platten mit Jutetüchern, welche ständig feucht gehalten wurden, sowie mit einer Plastikfolie abgedeckt. Nach 14 Tagen wurden die Jutetücher und die Plastikfolie entfernt. Im Alter von 28 Tagen wurden die Platten ausgeschalt und angehoben, sodass die Platten allseitig unter gleichen Bedingungen trocknen konnten. Die zweite Platte aus jeder Betonmischung wurde nicht abgedeckt und bereits im Alter von drei Tagen ausgeschalt und angehoben, um die baustellenübliche Praxis, d. h. allseitige Belüftung, zu simulieren. Bei der Lagerung/Nachbehandlung der Normzylinder wird in *Bloem 1968* zwischen fünf verschiedenen Arten unterschieden:

- (1) feuchte Lagerung nach Norm,
- (2) Lagerung unter gleichen Bedingungen wie die gut nachbehandelten Platten,
- (3) Wasserlagerung für zwei Tage im Anschluss an Lagerung nach (2),
- (4) Lagerung unter gleichen Bedingungen wie die schlecht nachbehandelten Platten,
- (5) Wasserlagerung für zwei Tage im Anschluss an Lagerung nach (4).

Die Untersuchung der Betondruckfestigkeit wurde im Alter von 1, 3, 7, 28, 91 und 364 Tagen durchgeführt. Zur Untersuchung der In-situ-Betondruckfestigkeit wurden zu jedem Prüfalter aus jeder Platte sechs Bohrkerne und sechs Push-out-Zylinder entnommen. Jeweils drei Probekörper wurden unmittelbar nach der Entnahme mit der tatsächlich am Bauwerk vorliegenden Feuchte geprüft. Die drei jeweils verbliebenen Probekörper wurden vor der Prüfung für zwei Tage wassergelagert. Hierbei ist zu beachten, dass die Bohrkerne im Trockenbohrverfahren entnommen wurden. Zur Untersuchung der Zylinderdruckfestigkeit wurde je Prüfalter und Nachbehandlungsart an drei Zylindern die Betondruckfestigkeit bestimmt.

In der Summe wurden somit sechs Platten, 270 Normzylinder, 216 Bohrkerne und 216 Push-out-Zylinder betrachtet. Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsuntersuchungen sind in Anhang IV.9 in tabellarischer Form zusammengefasst. Die in Anhang IV.9 angegebenen Druckfestigkeiten der Bohrkerne und Push-out Zylinder entsprechen aufgrund der Abmessung der Probekörper (10 x 15 cm) dem experimentell ermittelten Wert, multipliziert mit einem Umrechnungsfaktor von 0,97 (*Bloem 1968*), wodurch die angegebenen Druckfestigkeiten direkt mit den an den Normzylindern mit $h/d = 2,0$ bestimmten Werten verglichen werden können.

In den nachfolgenden Abb. 7.15 bis Abb. 7.17 sind die am Bohrkern ermittelten Druckfestigkeiten im Verhältnis zur Druckfestigkeit des 28 Tage alten und nach Norm feucht gelagerten Normzylinders unter Berücksichtigung des Einflusses des Probekörperalters dargestellt.

Die in Abb. 7.15 für Betonmischung 1, hergestellt mit schnell erhärtendem Zement, dargestellten Verläufe der In-situ-Druckfestigkeit zeigen, dass auch bei guter Nachbehandlung der Platten die In-situ-Druckfestigkeit, geprüft am trockenen Bohrkern im Alter von 364 Tagen, lediglich ca. 85 % der 28 Tage-Druckfestigkeit des normgelagerten Laborzylinders erreicht, was ungefähr der 7 Tage-Festigkeit des Normzylinders entspricht. Bei schlechter Nachbehandlung der Platten in Kombination mit einer zweitägigen Wasserlagerung der Bohrkern vor der Prüfung fiel die In-situ-Druckfestigkeit bei den in *Bloem 1968* beschriebenen Untersuchungen im Alter von 364 Tagen auf bis zu 46 % der 28 Tage-Druckfestigkeit des normgelagerten Laborzylinders ab. Die wassergelagerten Bohrkernproben aus den schlecht nachbehandelten Platten erzielten hier die geringsten Werte.

Bei den in Abb. 7.16 dargestellten Ergebnissen für Betonmischung 2, welche auf der Verwendung langsam erhärtender Zemente basiert, konnte wie schon bei Betonmischung 1 ein deutlicher Unterschied zwischen der 28 Tage-Druckfestigkeit des normgelagerten Laborzylinders und der In-situ-Betondruckfestigkeit verzeichnet werden. Im Alter von 364 Tagen lag die In-situ-Betondruckfestigkeit je nach Nachbehandlung und Lagerung der Proben zwischen 98 und 51 % der 28 Tage-Druckfestigkeit des normgelagerten Laborzylinders. Auch bei Betonmischung 2 erzielten die wassergelagerten Bohrkernproben aus den schlecht nachbehandelten Platten die kleinsten Werte.

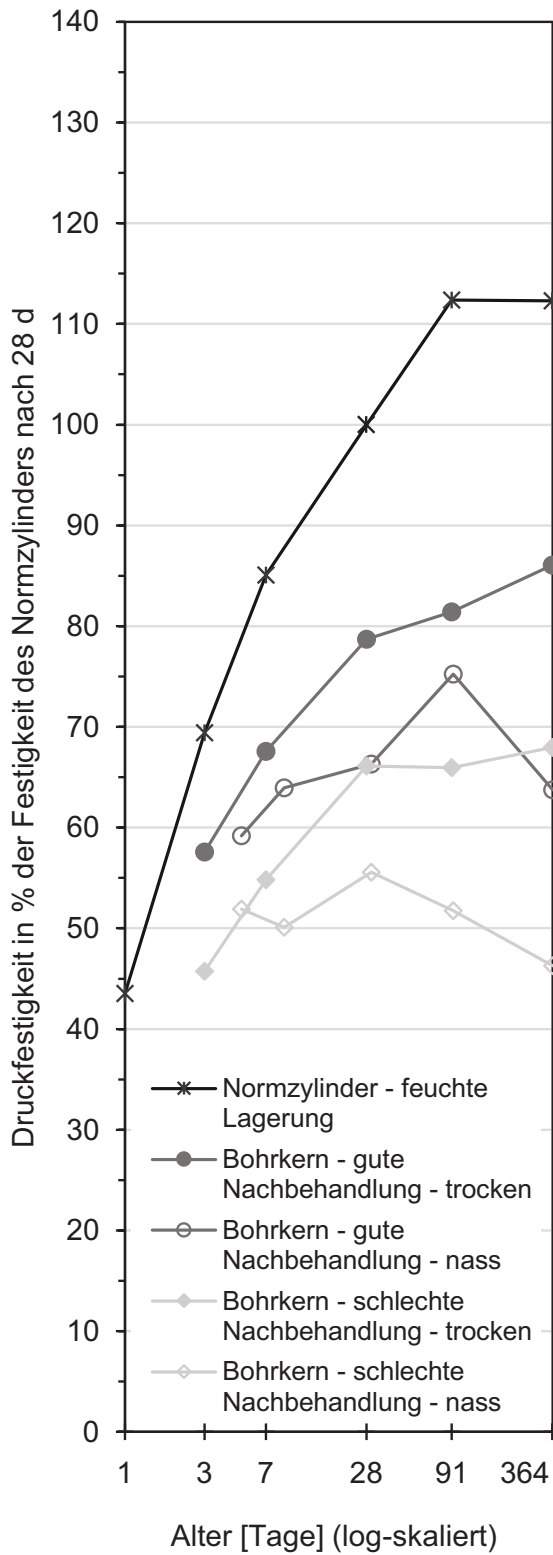


Abb. 7.15 Korrelation der Druckfestigkeiten für Mischung 1 (schnell erhärtender Zement) nach Bloem 1968

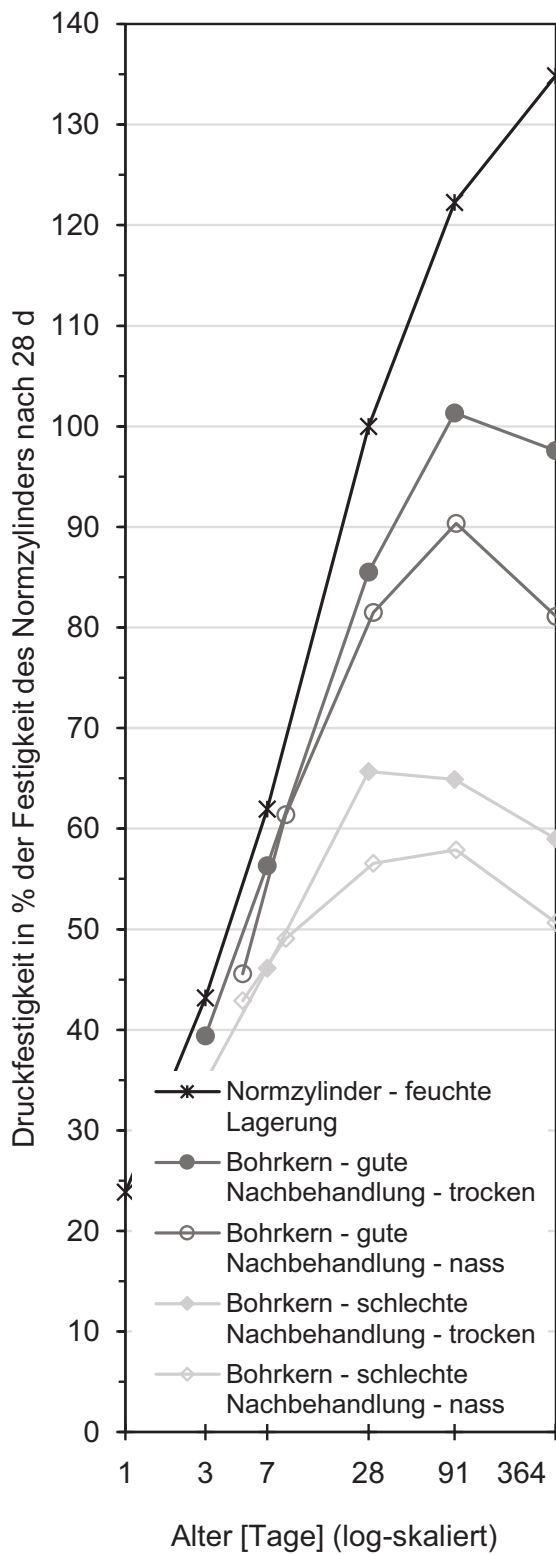


Abb. 7.16 Korrelation der Druckfestigkeiten für Mischung 2 (langsam erhärtender Zement) nach Bloem 1968

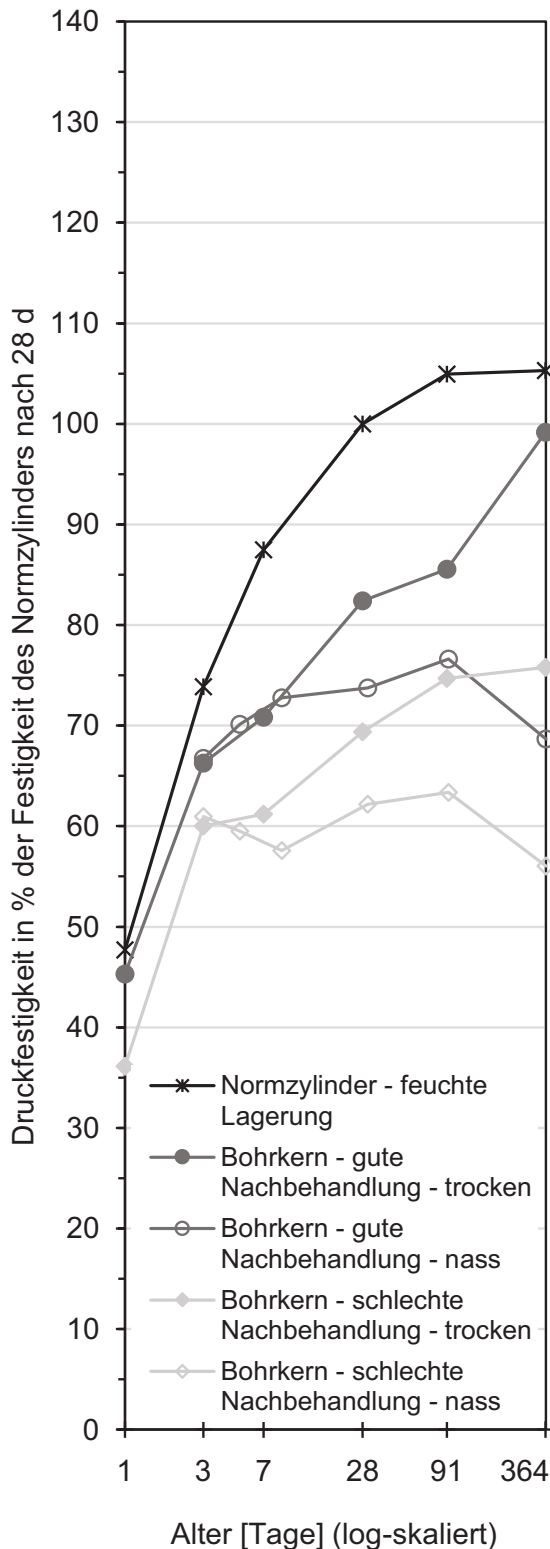


Abb. 7.17 Korrelation der Druckfestigkeiten für Mischung 3 (schnell erhärtender Zement) nach Bloem 1968

Die in Abb. 7.17 dargestellten Ergebnisse für Betonmischung 3, welche auf der Verwendung schnell erhärtender Zemente basiert, zeigen im Alter von 364 Tagen je nach Nahbehandlung und Lagerung der Proben eine In-situ-Beton-druckfestigkeit zwischen 56 und 99 % der 28 Tage-Druckfestigkeit des normgelagerten Laborzylinders. Wie bereits bei den Betonmischungen 1 und 2 erzielten auch bei Betonmischung 3 die wassergelagerten Bohrkernproben aus den schlecht nachbehandelten Platten die kleinsten Werte.

Darüber hinaus wird in Bloem 1968 der Zusammenhang zwischen der am Bohrkern bestimmten Betondruckfestigkeit und der Druckfestigkeit von bauwerksgleich gelagerten Normzylindern sowie der Druckfestigkeit der Push-out-Zylinder betrachtet. In diesem Zusammenhang wurden lediglich die unter Bauwerk-feuchte; d. h. trocken geprüften Proben betrachtet.

Unabhängig vom Probenalter und der Betonmischung konnte bei guter Nachbehandlung der Platten der in Gleichung (7.9) beschriebene lineare Zusammenhang zwischen der Bohrkernfestigkeit C und der Druckfestigkeit der bauwerksgleich gelagerten Normzylinder F festgestellt werden.

$$C \cong 0,90 \cdot F \quad (7.9)$$

Bei schlechter Nachbehandlung der Platten konnte in *Bloem 1968* unabhängig vom Probenalter und der Betonmischung der in Gleichung (7.10) beschriebene lineare Zusammenhang zwischen der Bohrkernfestigkeit C und der Druckfestigkeit der bauwerksgleich gelagerten Normzylinder F ermittelt werden.

$$C \cong 0,80 \cdot F \quad (7.10)$$

Die in den Gleichungen (7.9) und (7.10) dargestellten Zusammenhänge verdeutlichen somit den Einfluss der Qualität der Nachbehandlung auf das Verhältnis der Festigkeiten. Eine schlechtere Nachbehandlung wirkt sich offensichtlich nachteiliger auf die plattenartigen Bauteile aus als auf die bauwerksgleich gelagerten Normzylinder. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass die am bauwerksgleich gelagerten Normzylinder bestimmten Betondruckfestigkeiten nicht ohne weitere Überlegungen mit der Bauwerksfestigkeit gleichgesetzt werden können.

An den Push-out-Zylindern konnte unabhängig vom Probenalter, der Nachbehandlung und der Betonmischung der in Gleichung (7.11) beschriebene lineare Zusammenhang zwischen der Bohrkernfestigkeit C und der Druckfestigkeit der Push-out-Zylinder P festgestellt werden.

$$C \cong 0,93 \cdot P \quad (7.11)$$

Der verbleibende Unterschied von 7 % ist vermutlich zumindest anteilmäßig auf Einflüsse aus der Bohrkernentnahme selbst zurückzuführen. Einerseits können durch die Bohrkernentnahme Mikrorisse im Betongefüge entstehen; andererseits besteht bei Bohrkernen im Unterschied zu geschalteten Zylindern, bei denen alle Gesteinskörner auch an der Oberfläche durch Zementstein umhüllt sind, die Gefahr des sog. Ausmuschelns angeschnittener Gesteinskörner.

Inwieweit die Art der Verdichtung der plattenartigen Bauteile und der Normzylinder das Festigkeitsverhältnis beeinflusst geht aus den in *Bloem 1968* dargestellten Untersuchungen nicht hervor.

Im Gegensatz zu den zuvor vorgestellten Untersuchungen an gesondert hergestellten Probekörpern wurden von *Henzel u. Grube 1966* Untersuchungen an einer Großbaustelle durchgeführt. Als Untersuchungsobjekt stand eine Fundamentplatte mit den Abmessungen 142,5 x 97,5 x 0,8-2,0 m, was einer Fläche von 13.894 m² und unter Berücksichtigung der Verteilung der Plattendicke einem Volumen von ca. 17.500 m³ entspricht, zur Verfügung. Die Bodenplatte wurde in 34 Betonierabschnitten hergestellt, wobei für jeden Abschnitt Beton gleicher Sollzusammensetzung verwendet wurde. Für den Beton mit einem Zielwert der Würfeldruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen ≥ 300 kg/cm² wurden ein Hochofenzement und Mainsand bzw. -kies mit einem Größtkorn von 30 mm verwendet. Bei der Betonage der Fundamentplatte wurde der Frischbeton mit Tauchrüttlern verdichtet. Die Nachbehandlung erfolgte durch Abdecken mit Strohmatte.

Für jeden Betonierabschnitt wurden zur Bestimmung der 90 Tage Festigkeit zwischen drei und neun Probewürfel mit einer Kantenlänge von 200 mm hergestellt. Die

Verdichtung der Würfel erfolgte durch Stampfen. Die Würfel wurden im Alter von zwei Tagen ausgeschalt, anschließend fünf Tage in einer Wärmekiste bei 20°C und 100 % relativer Luftfeuchte und für weitere sieben Tage unter Wasser gelagert. Im verbleibenden Zeitraum bis zur Druckfestigkeitsprüfung im Alter von 90 Tagen wurden die Würfel in einer Prüfhalle bei 20°C gelagert.

Zur Untersuchung der In-situ-Betondruckfestigkeit wurden aus den einzelnen Betonierabschnitten Bohrkerne mit einem Durchmesser $d = 15$ cm und einer Länge zwischen 40 und 80 cm zwischen zwei Tagen und drei Wochen vor der Prüfung entnommen. Die Bohrkerne wurden für die Druckfestigkeitsprüfung auf Probekörper mit $h = d = 15$ cm, d. h. Schlankheit 1,0, zugeschnitten. Die so ermittelte Druckfestigkeit kann nach *Henzel u. Grube 1966* direkt mit der Druckfestigkeit des Würfels mit einer Kantenlänge von 200 mm verglichen werden. Ein signifikanter Einfluss der Höhenlage der Bohrkernentnahmestelle auf die In-situ-Betondruckfestigkeit konnte nicht festgestellt werden, weshalb keine gesonderte Anpassung erfolgte.

Die wesentlichen Kenngrößen der in *Henzel u. Grube 1966* beschriebenen Untersuchungen sind in Tab. 7.20 zusammengefasst. Als Gesamtmittel der Verhältnismerte wird ein Wert von 0,79 angegeben.

Tab. 7.20 Kenndaten der Untersuchungen von Henzel und Grube im Alter von 90 Tagen nach *Henzel u. Grube 1966*

	Druckfestigkeit			
	Probenanzahl	Mittelwert	Standardabweichung	5 %-Quantil*
	[-]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
β_c : Bohrkerne; $h = d = 150$ mm	254	286	43	209
β_w : Würfel; $a = 200$ mm	122	361	45	276
Verhältnismerte β_c / β_w	-	0,79	-	-

* basierend auf einem Konfidenzniveau von 95 % und der Annahme σ_x unbekannt

Über das mittlere Verhältnis von In-situ-Betondruckfestigkeit zur Druckfestigkeit des Laborprobekörpers hinaus wurde in *Henzel u. Grube 1966* aufgrund des großen Stichprobenumfangs auch die Häufigkeitsverteilung aller möglichen Verhältnismerte betrachtet. Dazu wurden sowohl die Bohrkerndruckfestigkeit als auch die Würfeldruckfestigkeit mithilfe einer Normalverteilung mit den an der Stichprobe geschätzten Parametern beschrieben. Die Verteilungsfunktion des Verhältnismerte wurde als Quotient der Verteilungen von Bohrkern- und Würfeldruckfestigkeit ermittelt. Die zugehörigen Quantilwerte des Verhältnismerte sind in Tab. 7.21 angegeben. Der 50 %-Quantilwert stimmt mit dem an den Mittelwerten bestimmten Verhältnis überein.

Tab. 7.21 Quantilwerte des Verhältniswertes β_c / β_w nach Henzel u. Grube 1966

	0,05	0,10	0,20	0,50	0,80	0,90	0,95
Quantilwert β_c / β_w	0,56	0,61	0,67	0,79	0,93	1,01	1,09

Als mögliche Ursache für die geringere In-situ-Betondruckfestigkeit werden in *Henzel u. Grube 1966* geringere Frischbetonverdichtung im Bauwerk, Absondern von Anmachwasser bei der Herstellung von Probewürfeln und die größere Erhärtungstemperatur im Bauwerk genannt.

Bei der Bewertung der Ergebnisse von Henzel und Grube ist trotz des großen Stichprobenumfangs zu beachten, dass die Erkenntnisse lediglich an Untersuchungen eines Bauteils abgeleitet wurden und somit unmittelbar von der vorliegenden Qualität der Bauausführung abhängig sind.

7.4.6.3 Ergebnisse von Routine-Untersuchungen der Materialprüfanstalt der TU Braunschweig

Nachfolgend werden die in *Lewandowski 1971* vorgestellten routinemäßigen Untersuchungen der Betonfestigkeit der Materialprüfanstalt der TU Braunschweig an insgesamt 1.361 Proben (Bohrkerne mit $d = 10$ bzw. 15 cm) von 221 Baustellen zusammenfassend dargestellt. Bei allen Betonen stand die jeweils geforderte Sollbetongüte fest. Anlass für die jeweilige Bauwerksuntersuchung waren fehlende Gütewürfel, mangelhafte Ausführung/Festigkeit, Umbaumaßnahmen oder Erhöhung der Verkehrslasten. Alle Bauwerke waren zum Zeitpunkt der Untersuchung mindestens zwei Monate alt. Weitere Angaben zum Bauwerksalter sind in *Lewandowski 1971* nicht enthalten.

Eine nach Betongüte und Bauteilart geordnete Zusammenstellung des Verhältnisses der am Bohrkern ermittelten Betondruckfestigkeit zur jeweiligen Sollbetongüte ist in Tab. 7.22 dargestellt. Einzelwerte werden nicht genannt. Ein durchgängiger Vergleich mit Würfeldruckfestigkeiten ist nicht möglich, da nicht in allen Fällen, in denen Bohrkerne entnommen wurden, auch Gütewürfel (vgl. Abschnitt 7.4.4.2) hergestellt wurden.

Ein allgemeiner Einfluss des Verhältnisses der Bauwerksfestigkeit zur Sollbetongüte kann aus den betrachteten Betonen nicht abgeleitet werden. Gemittelt über alle Betongüten und Bauteilarten hinweg liegt das mittlere Verhältnis der Bauwerksfestigkeit zur 28-Tage-Sollbetongüte bei 1,01.

Weitere Ergebnisse zum Verhältnis der Würfeldruckfestigkeit zur geforderten Sollbetongüte können *Lewandowski 1971* entnommen werden.

Tab. 7.22 Korrelation zwischen Bauwerksfestigkeit und Sollbetongüte α_{BS} nach
Lewandowski 1971

Betongüte	Bauteilart	Anzahl der Baustellen	α_{BS}		
			Mittelwert	Max	Min
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
B 160	Decken in Einfamilienhäusern	23	0,96	2,14	0,40
	Decken im allg. Hochbau	3	1,06	1,29	0,86
B 225	Decken in Einfamilienhäusern	49	1,22	1,98	0,77
	Decken im allg. Hochbau	54	0,92	1,85	0,52
	Stützen, Unterzüge	5	0,86	1,04	0,52
	Hofbefestigungen usw.	5	0,89	1,03	0,38
B 300	Decken im allg. Hochbau	7	0,86	1,17	0,71
	Stützen, Unterzüge	15	0,77	1,58	0,31
	Hofbefestigungen usw.	16	1,14	1,94	0,73
	Brücken	9	1,20	1,50	0,58
B 400	Fahrbahnen usw.	18	1,26	1,54	0,70
B 450	Stützen, Binder	17	1,01	1,26	0,74

7.4.6.4 Von Lewandowski durchgeführte Untersuchungen

Die von *Lewandowski 1971* durchgeführten Untersuchungen stammen von 21 verschiedenen Bauwerken sowie aus fünf Fertigteilwerken. Insgesamt basieren die Untersuchungen auf 451 Betonwürfeln und 443 Bohrkernen.

Es wurden Würfel mit einer Kantenlänge von 200 mm verwendet, die auf der Baustelle mit Innenrüttlern verdichtet wurden. In Fertigteilwerken wurden die Würfel auf Rütteltischen verdichtet. Die Würfel wurden direkt nach der Betonage unter nassen Säcken und anschließend in Klimakisten bzw. unter feuchten Tüchern gelagert. Ab einem Alter von sieben bis zehn Tagen wurden die Würfel bei ca. 20°C in einer Prüfhalle bis zur Prüfung im Alter von 28 Tagen gelagert.

Die Bauwerksfestigkeit wurde an Bohrkernen mit Durchmessern von 10 oder 15 cm geprüft. Die Bohrkernentnahme erfolgte in einem Alter von 15 bis 22 Tagen. Vor der Prüfung im Alter von 28 Tagen wurden die Bohrkernkerne auf Proben mit einer Schlankheit $\lambda = h/d = 1,0$ abgelängt.

Mittelwerte, Standardabweichungen, Vertrauensbereiche für den Mittelwert sowie 5 %-Quantile und minimale Messwerte der Druckfestigkeitsprüfungen an Würfeln und Bohrkernen sind in *Lewandowski 1971* enthalten. Die Bestimmung der Vertrauensbereiche der Mittelwerte basiert dabei auf der Annahme einer

Normalverteilung. Die Bestimmung der 5 %-Quantile erfolgt mithilfe einer logarithmischen Normalverteilung, da diese nach *Lewandowski 1971* die tatsächlichen Verhältnisse besser abbildet.

Basierend auf den Messdaten wurde der Zusammenhang zwischen Würfeldruckfestigkeit β_w , Bauwerksfestigkeit β_{Bau} und angestrebter Sollbetongüte B bestimmt. Die für die einzelnen Bauteile jeweils ermittelten Verhältniszerte (Mittelwert / 5 %-Quantile / Vertrauensbereich) sind *Lewandowski 1971* zu entnehmen.

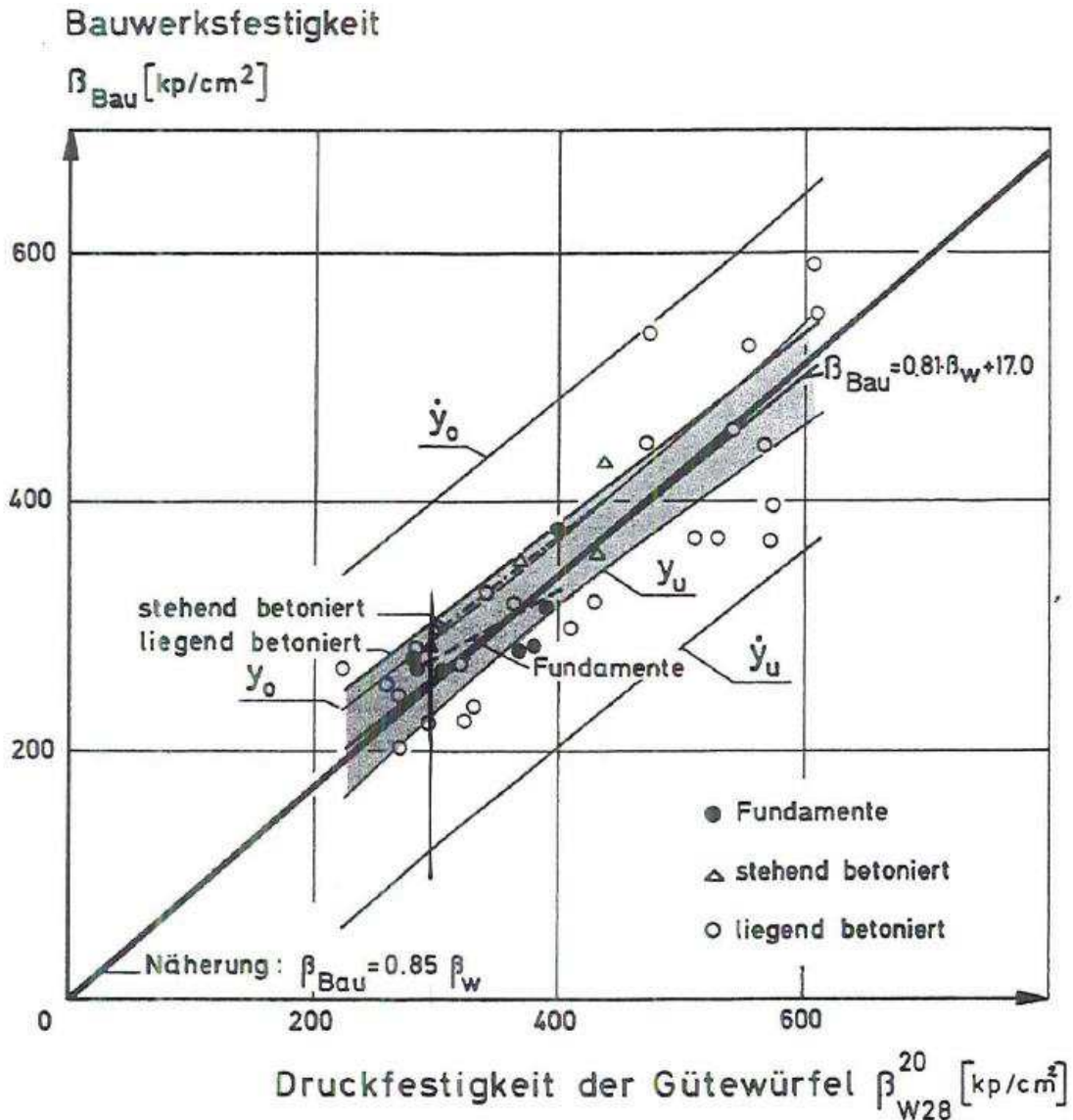


Abb. 7.18 Zusammenhang zwischen der mittleren Bauwerksfestigkeit β_{Bau} und der mittleren Druckfestigkeit der Gütewürfel β_w aus *Lewandowski 1971*

In Abb. 7.18 ist für die in *Lewandowski 1971* betrachteten Betone der Zusammenhang zwischen der mittleren Bauwerksfestigkeit und der mittleren Festigkeit der Gütewürfel dargestellt. Eine Regressionsrechnung mit zusätzlicher Berücksichtigung des Wertepaares $\beta_w = \beta_{\text{Bau}} = 0$ liefert für die mittleren Festigkeiten den in Gleichung (7.12) dargestellten linearen Zusammenhang.

$$\beta_{\text{Bau}} = 17 + 0,81 \cdot \beta_w \tag{7.12}$$

Als Annäherung wird in *Lewandowski 1971* der in Gleichung (7.13) beschriebene Zusammenhang empfohlen.

$$\beta_{\text{Bau}} \cong 0,85 \cdot \beta_{\text{w}} \quad (7.13)$$

In Abb. 7.19 ist das Verhältnis der mittleren Bauwerksfestigkeit zur mittleren Würfeldruckfestigkeit über die mittlere Würfeldruckfestigkeit abgetragen. Eine Abhängigkeit der Korrelation von der mittleren Würfeldruckfestigkeit kann nicht festgestellt werden.

Der Verhältniswert der mittleren Festigkeiten der in *Lewandowski 1971* betrachteten Betone liegt somit zwischen 0,65 und 1,19. Der in Gleichung (7.13) beschriebene Zusammenhang stellt eine gute Näherung des Mittelwertes dar.

Eine erneute Betrachtung der in *Lewandowski 1971* genannten Festigkeiten führt zu der in Abb. 7.20 dargestellten Korrelation der 5 %-Quantile von Bauwerks- und Würfeldruckfestigkeit.

Das mittlere Verhältnis der 5 %-Quantile der Bauwerks- und Würfeldruckfestigkeit der in *Lewandowski 1971* betrachteten Betone entspricht mit 0,85 dem Verhältnis der Mittelwerte der Festigkeiten. Die Einzelwerte streuen jedoch viel stärker und liegen in einem Bereich von 0,47 bis 1,86. Mit steigendem 5 %-Quantilwert der Würfeldruckfestigkeit nimmt die Korrelation leicht ab. Das Bestimmtheitsmaß (Kennzahl zur Beurteilung der Anpassungsgüte eines Regressionsmodells, die nicht kleiner als 0 und nicht größer als 1 werden kann; je größer der Wert, desto besser die Anpassungsgüte) der linearen Regression liegt jedoch lediglich bei 0,4203.

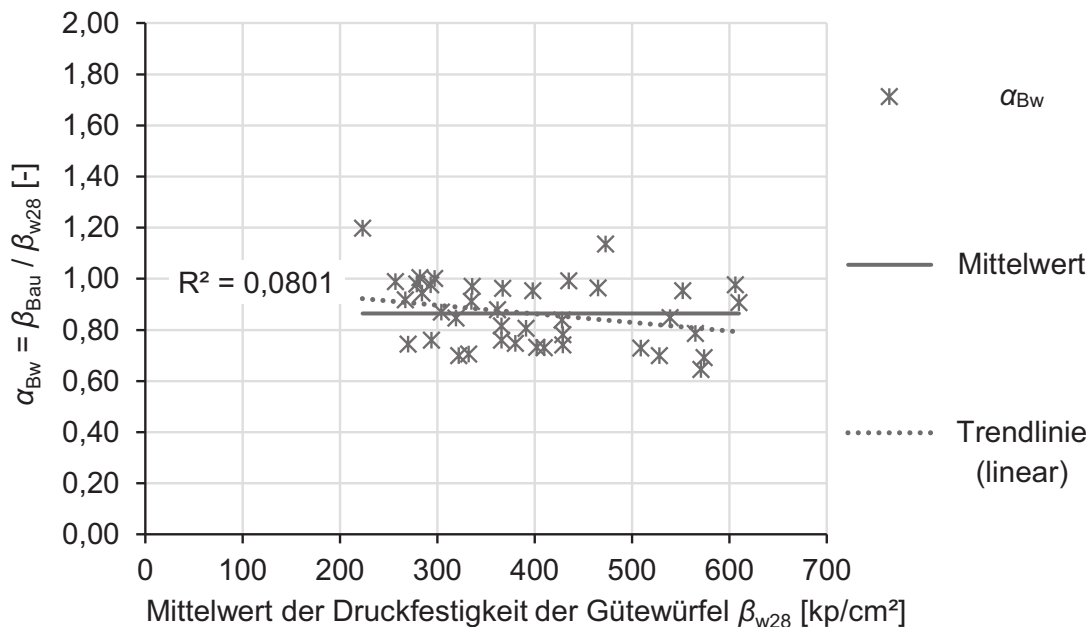


Abb. 7.19 Verhältnis der mittleren Bauwerksfestigkeit zur mittleren Würfeldruckfestigkeit nach *Lewandowski 1971*

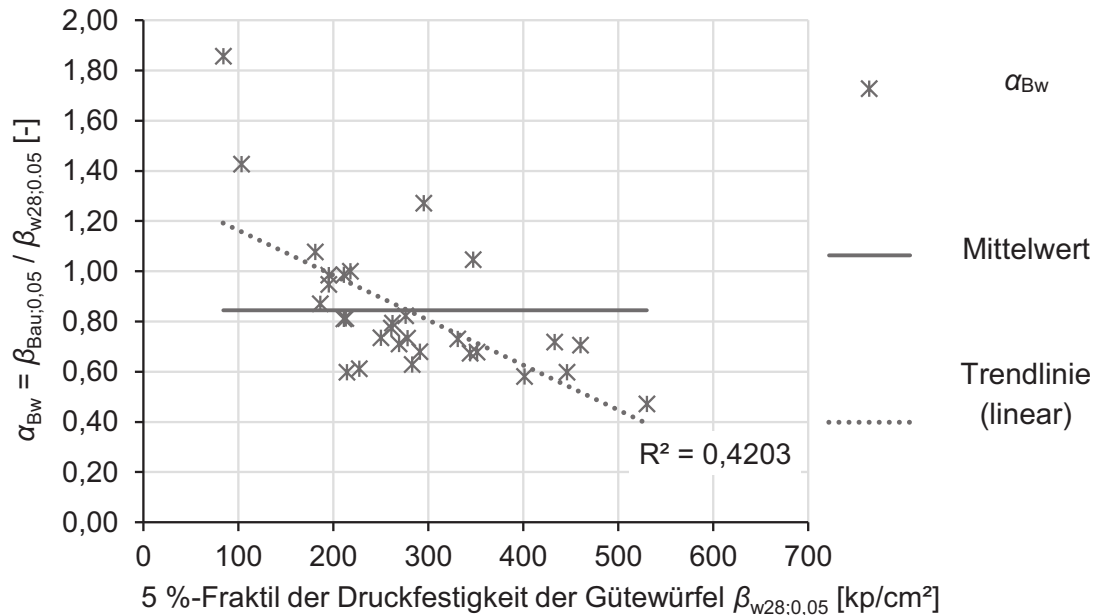


Abb. 7.20 Verhältnis der 5 %-Quantile der Bauwerksfestigkeit und Würfelfestigkeit nach Lewandowski 1971

Betrachtet man zusätzlich die Korrelation zwischen der Bauwerksfestigkeit und der Sollbetongüte im Alter von 28 Tagen, so kann aus den in *Lewandowski 1971* dargestellten Untersuchungen ein mittleres Verhältnis der 5 %-Quantile der Bauwerksfestigkeit zur Sollbetongüte von 0,73 abgeleitet werden.

Weiterhin zeigen die Untersuchungen von Lewandowski, dass mit zunehmender Betongüte, sowohl bei Gütewürfeln als auch bei der Bauwerksfestigkeit das Verhältnis zur Sollfestigkeit abnimmt.

Bei der Bewertung der Untersuchungsergebnisse von Lewandowski ist unbedingt zu beachten, dass die an Bohrkernen mit einem Durchmesser von 100 mm oder 150 mm und einer Schlankheit von 1,0 geprüfte Betondruckfestigkeit mit der Druckfestigkeit von Würfeln mit einer Kantenlänge von 200 mm gleichgesetzt wurde. Demzufolge müsste das Verhältnis der Bauwerks- zur Würfelfestigkeit zur Übertragbarkeit auf heute übliche Festigkeitsdefinitionen mit dem Verhältnis der Druckfestigkeit des 150er Würfels zur Druckfestigkeit des 200er Würfels $f_{c,cube150}/f_{c,cube200} = 1,05$ abgemindert werden.

Weitere Angaben, u. a. zum Verhältnis zwischen Bauwerksfestigkeit und Sollbetongüte, können *Lewandowski 1971* entnommen werden.

7.4.7 Zwischenfazit

Durch die vorgestellten Untersuchungen konnten zahlreiche Einflussgrößen auf das Verhältnis zwischen der In-situ-Druckfestigkeit und der Festigkeit von Laborprobekörpern identifiziert werden:

- Zusammensetzung der Betonmischung und Zementart

Die Wahl der Zementart hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Hydratationswärmeentwicklung, welche bedingt durch thermische

- Eigenspannungen zu einer (Mikro-)Rissbildung führen kann. Massige Bauteile haben im Vergleich zu anderen Bauteilarten oft eine kleinere In-situ-Druckfestigkeit.
- Bauwerksalter zum Zeitpunkt der Untersuchung
Bedingt durch eine Nacherhärtung steigt die In-situ-Druckfestigkeit im Vergleich zu der an Laborprobekörpern im Alter von 28 Tagen bestimmten Betondruckfestigkeit mit zunehmendem Alter an.
 - Art und Qualität der Verdichtung
Eine ggf. unzureichende oder im Vergleich zum Laborprobekörper schlechtere Verdichtung kann zu einem erhöhten Luftporenanteil führen, was sich in einer Abnahme der In-situ-Betondruckfestigkeit widerspiegelt.
 - Art und Qualität der Nachbehandlung des Bauwerkbetons
Eine unzureichende Nachbehandlung führt zu einer Reduzierung der In-situ-Betondruckfestigkeit.
 - Bohrkernentnahmerichtung
An in Betonierrichtung entnommenen Bohrkernen kann meist eine höhere Druckfestigkeit als an senkrecht zur Betonierrichtung entnommenen Bohrkernen ermittelt werden. Ursache hierfür ist ein eventuelles „Bluten“ des Betons in Kombination mit Hohlraumbildung unterhalb der Gesteinskörnung. An plattenartigen Bauteilen mit Bohrkernentnahmerichtung parallel zur Betonierrichtung kann daher oft ein größeres Verhältnis zwischen In-situ-Betondruckfestigkeit und Laborprobekörperdruckfestigkeit ermittelt werden als an anderen Bauteilen mit Bohrkernentnahmerichtung senkrecht zur Betonierrichtung.
 - Einfluss der Bohrkernentnahme selbst
Die an Bohrkernen aus dem Bauteil ermittelte In-situ-Druckfestigkeit ist fast immer kleiner als die an identisch gelagerten Laborprobekörpern bestimmte Druckfestigkeit. Mit sinkendem Bohrkern Durchmesser nimmt der Unterschied tendenziell zu.
 - Einfluss der Festigkeitsklasse/des Festigkeitsniveaus
Bei höherer Festigkeitsklasse nimmt das Verhältnis zwischen In-situ-Betondruckfestigkeit und Druckfestigkeit des Laborprobekörpers tendenziell ab.
 - Einfluss der vertikalen Lage der Bohrkernentnahmestelle innerhalb des Bauteils
Im oberen Bereich von vertikal ausgeprägten Bauteilen ist die Druckfestigkeit meist kleiner als in den darunter liegenden Bereichen.

Es ist unbedingt zu beachten, dass eine eindeutige Abgrenzung der einzelnen Einflussgrößen versuchsbedingt nur schwer möglich ist. Vielmehr handelt es sich jeweils um eine Überlagerung mehrerer Effekte. Deshalb ist eine exakte mathematische Erfassung bzw. Bewertung einzelner Einflussgrößen mit vertretbarem

Aufwand nicht möglich. Viele der genannten Einflussgrößen (z. B. die Nachbehandlung) können bei der Betrachtung von Bestandtragwerken in aller Regel nicht mehr bewertet werden.

Die vorgestellten Untersuchungen unterscheiden sich in der jeweils betrachteten Bauteilart und dem Betonalter zum Zeitpunkt der Untersuchung. Darüber hinaus wurden für die Bestimmung der Laborprobekörperfestigkeit Probekörper mit unterschiedlicher Form, Abmessung und Lagerung verwendet. Es wurden sowohl Würfel als auch Zylinder eingesetzt. Die Laborprobekörper wurden entweder unter Wasser oder unter Laborklima gelagert. Unabhängig davon wurde die an Bohrkernen bestimmte In-situ-Betondruckfestigkeit jeweils mithilfe von Umrechnungsfaktoren auf die Festigkeitsdefinition des jeweiligen Laborprobekörpers angepasst.

In den Abb. 7.21 bis Abb. 7.23 sind die Ergebnisse der vorgestellten Untersuchungen zusammengefasst.

Allgemein wird dabei in Untersuchungen im Alter von 28 Tagen und Untersuchungen im Alter von einem Jahr unterschieden. Darüber hinaus wird zwischen einem Vergleich der mittleren und einem Vergleich der charakteristischen Druckfestigkeiten, beschrieben durch den 5 %-Quantilwert, unterschieden. Die Auswertung erfolgt sowohl getrennt nach der jeweiligen Bauteilart als auch bauteilartübergreifend. Einflüsse aus unterschiedlicher Probekörpergeometrie wurden durch Umrechnungsfaktoren eliminiert. Von den vorgestellten Untersuchungen wurden in den Abb. 7.21 bis Abb. 7.23 lediglich diejenigen berücksichtigt, bei denen die In-situ-Betondruckfestigkeit an aus dem Bauwerk / -teil entnommenen Proben bestimmt wurde, wodurch stets der Einfluss der Probekörperentnahme berücksichtigt wird. Untersuchungen, bei denen die In-situ-Druckfestigkeit durch Prüfungen am ganzen Bauteil erfolgte, werden nicht betrachtet. Außerdem sind die in *Petersons 1964* beschriebenen Untersuchungen an Stahlbetonsäulen, die bis zur Prüfung unter Wasser gelagert wurden, ebenfalls nicht enthalten, da diese Lagerung bzw. Nachbehandlung keinen baustellentypischen Zustand abbildet.

Allgemein stellt jeder einzelne Datenpunkt der Abb. 7.21 bis Abb. 7.23 das Ergebnis einer kompletten Untersuchung dar. Es werden also dabei Druckfestigkeitsuntersuchungen an jeweils mehreren Laborprobekörpern und an aus dem Bauwerk entnommenen Probekörpern erfasst.

Das Verhältnis zwischen der geplanten Druckfestigkeit und der tatsächlich erreichten Festigkeit wird nicht gesondert betrachtet.

In Abb. 7.21 ist das Verhältnis zwischen der mittleren Bauwerksdruckfestigkeit und der mittleren Laborprobekörperfestigkeit im Alter von 28 Tagen dargestellt. In Tab. 7.23 sind die zugehörigen statistischen Kenngrößen für die einzelnen Bauteilarten sowie für die Gesamtheit aller Ergebnisse angegeben. Das Verhältnis streut in einem sehr großen Bereich zwischen 0,51 und 1,64. Das mittlere Verhältnis beträgt 0,89 und ist bei allen hier betrachteten Bauteilarten kleiner als 1,0. Die zugehörigen 5 %- und 10 %-Quantilwerte, welche basierend auf einer Normalverteilung nach dem in *DIN EN 1990:2010-12* enthaltenen Verfahren berechnet wurden, liegen für die Gesamtheit aller Untersuchungen mit 0,60 und 0,66 deutlich unterhalb des *DIN EN 1992-1-1:2011-01* zugrunde liegenden Wertes von 0,85. Ein allgemeingültiger

Einfluss der Bauteilart kann nicht festgestellt werden. Tendenziell nimmt das Verhältnis mit zunehmender Festigkeit leicht ab. Bei der Bewertung der Untersuchungen an Balken ist zu beachten, dass lediglich drei Datensätze vorlagen.

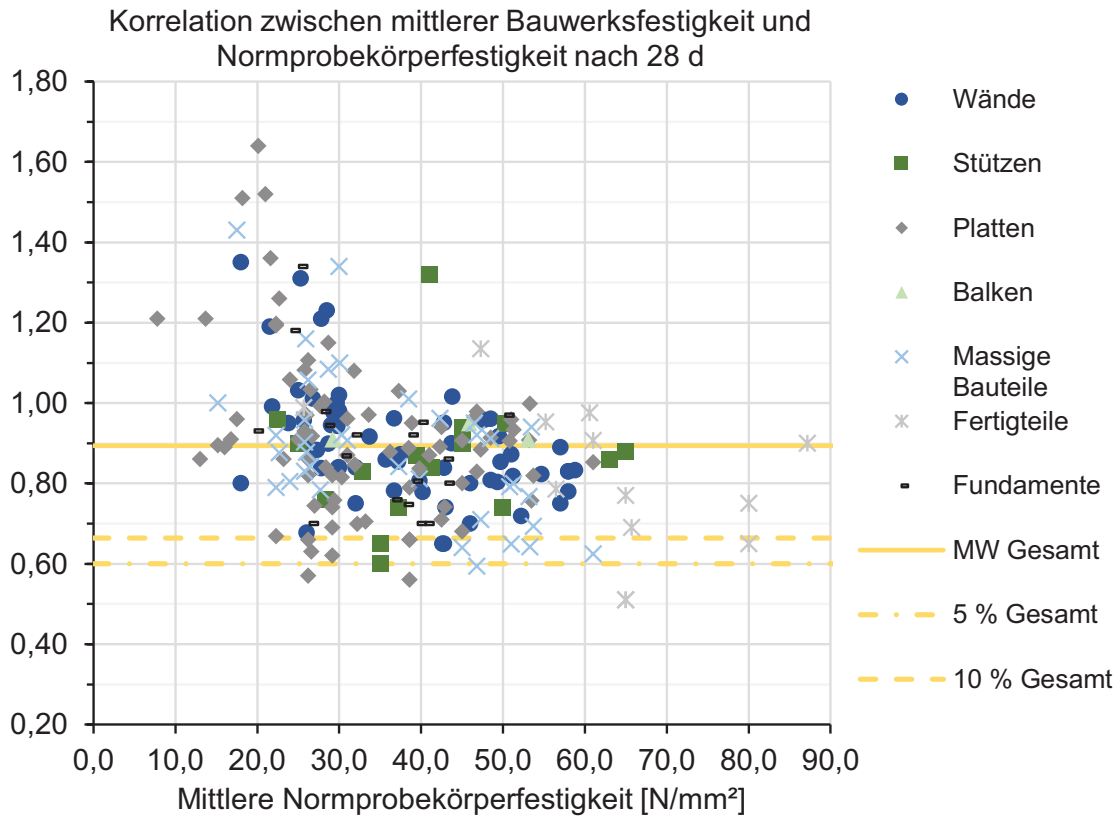


Abb. 7.21 Korrelation zwischen mittlerer Bauwerksfestigkeit und Laborprobekörperfestigkeit nach 28 d

Tab. 7.23 Korrelation zwischen mittlerer Bauwerksfestigkeit und Laborprobekörperfestigkeit im Alter von 28 Tagen – Statistische Kenngrößen

		Gesamt	Wände	Stützen	Platten	Balken	massige Bauteile	Fertigteile	Fundamente
n	[-]	224	59	16	78	3	37	13	18
MW	[-]	0,89	0,90	0,86	0,92	0,92	0,89	0,81	0,89
Min	[-]	0,51	0,65	0,60	0,56	0,91	0,59	0,51	0,70
Max	[-]	1,64	1,35	1,32	1,64	0,95	1,43	1,14	1,34
s_x	[-]	0,18	0,15	0,16	0,21	0,02	0,18	0,19	0,17
v_x	[-]	0,20	0,16	0,19	0,23	0,03	0,21	0,23	0,19
$X_{5\%}$	[-]	0,60	0,66	0,57	0,58	0,85	0,59	0,46	0,59
$X_{10\%}$	[-]	0,66	0,71	0,64	0,65	0,88	0,65	0,54	0,66

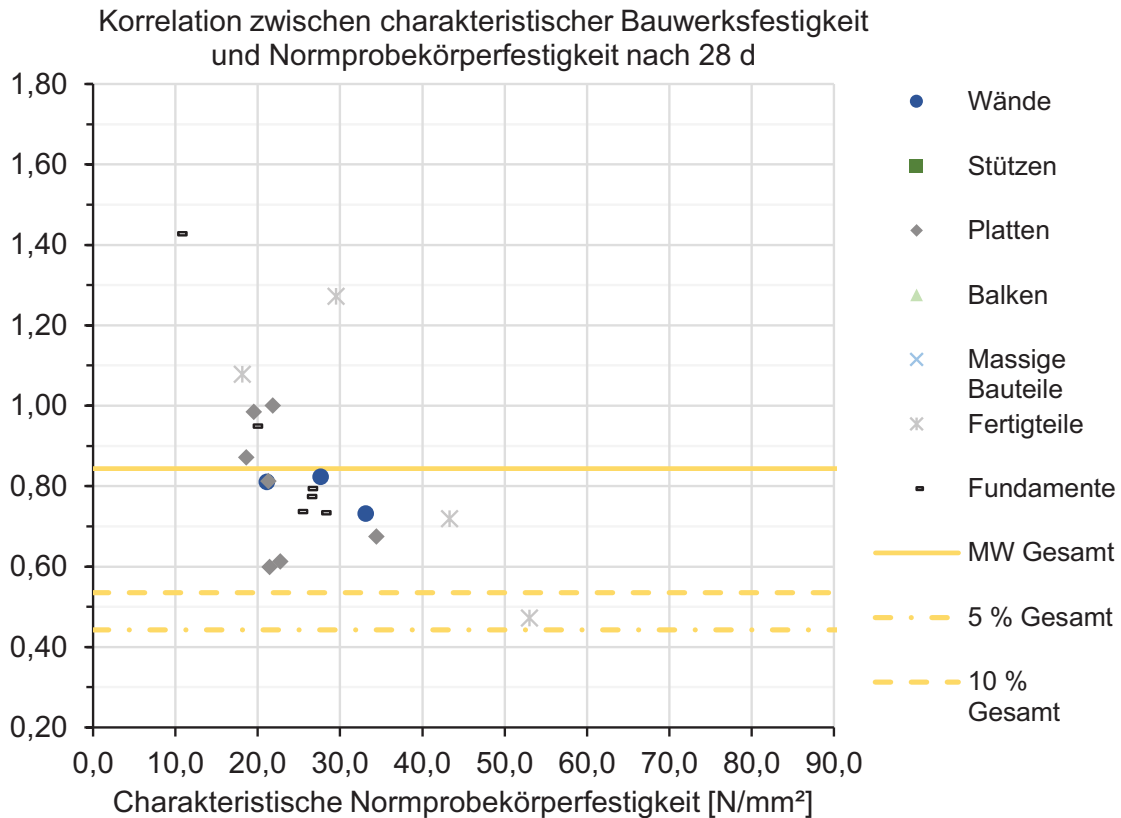


Abb. 7.22 Korrelation zwischen charakteristischer Bauwerksfestigkeit und Laborprobekörperfestigkeit nach 28 d

Tab. 7.24 Korrelation zwischen charakteristischer Bauwerksfestigkeit und Laborprobekörperfestigkeit im Alter von 28 Tagen – Statistische Kenngrößen

		Gesamt	Wände	Stützen	Platten	Balken	massige Bauteile	Fertigteile	Fundamente
n	[-]	20	3		7			4	6
MW	[-]	0,84	0,79		0,79			0,88	0,90
Min	[-]	0,47	0,73		0,60			0,47	0,73
Max	[-]	1,43	0,82		1,00			1,27	1,43
s_x	[-]	0,23	0,05		0,17			0,36	0,27
v_x	[-]	0,27	0,06		0,21			0,40	0,30
$X_{5\%}$	[-]	0,44	0,62		0,44			-0,06	0,32
$X_{10\%}$	[-]	0,54	0,69		0,54			0,27	0,48

In Abb. 7.22 ist das Verhältnis zwischen der charakteristischen Bauwerksdruckfestigkeit und der charakteristischen Laborprobekörperfestigkeit im Alter von 28 Tagen dargestellt. Diese Größe ist direkt vergleichbar mit dem in DIN EN 1992-1-1:2011-01 beschriebenen Zusammenhang $f_{ck} / f_{ck, is} = \gamma_{conv} = 1,15$.

Der Datenumfang ist deutlich geringer als bei dem Vergleich der mittleren Festigkeiten, was damit zu begründen ist, dass in den meisten der vorliegenden historischen Untersuchungen lediglich die Mittelwerte der Festigkeiten angegeben sind. Quantilwerte bzw. Einzelwerte, die für eine statistische Bewertung erforderlich wären, sind nur in den wenigsten Fällen angegeben.

Der Mittelwert des Verhältnisses der charakteristischen Festigkeiten im Alter von 28 Tagen liegt mit 0,84 leicht unterhalb des Mittelwertes des Verhältnisses der Mittelwerte (0,89). Dies deutet darauf hin, dass die Bauwerksfestigkeit in größerem Maß als die Druckfestigkeit der zugehörigen Laborprobekörper streut. Die Einzelwerte streuen zwischen 0,47 und 1,43. Auch hier kann mit zunehmender Druckfestigkeit des Laborprobekörpers ein leichter Rückgang des Verhältnisses verzeichnet werden. Die 5 %- und 10 %-Quantilwerte des Verhältnisses der charakteristischen Festigkeiten liegen mit 0,44 und 0,54 für die Gesamtheit aller Untersuchungen deutlich unterhalb des in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* enthaltenen Wertes von 0,85. Ein allgemeingültiger Einfluss der Bauteilart kann nicht festgestellt werden.

Neben der Betrachtung des Festigkeitsverhältnisses im Alter von 28 Tagen wurde in einigen der hier vorgestellten Untersuchungen auch noch das Verhältnis der Druckfestigkeiten in höherem Alter bis zu einem Jahr betrachtet. Exemplarisch ist in Abb. 7.23 das Verhältnis zwischen der mittleren Bauwerksdruckfestigkeit und der mittleren Laborprobekörperfestigkeit im Alter von jeweils 365 Tagen dargestellt. In Tab. 7.25 sind die zugehörigen statistischen Kenngrößen für die einzelnen Bauteilarten sowie für die Gesamtheit aller Ergebnisse angegeben.

Auch hier streut der Verhältniswert in einem sehr großen Bereich zwischen 0,38 und 1,46. Das mittlere Verhältnis beträgt 0,93 und ist bei allen hier betrachteten Bauteilarten, zu denen Daten vorliegen, kleiner als 1,0. Die zugehörigen 5 %- und 10 %-Quantilwerte, welche basierend auf einer Normalverteilung nach dem in *DIN EN 1990:2010-12* enthaltenen Verfahren berechnet wurden, liegen für die Gesamtheit aller Untersuchungen mit 0,63 und 0,70 unterhalb des *DIN EN 1992-1-1:2011-01* zugrunde liegenden Wertes von 0,85. Ein allgemeingültiger Einfluss der Bauteilart sowie des Festigkeitsniveaus kann nicht festgestellt werden.

Auf einen Vergleich der Bauwerksfestigkeit im Alter von 365 Tagen mit der Laborprobekörperfestigkeit im Alter von 28 Tagen wird verzichtet, da dadurch hauptsächlich die Nacherhärtung des Betons bewertet werden kann. Ein Vergleich der charakteristischen Festigkeiten im Alter von 365 Tagen ist nicht möglich, da in den vorliegenden Untersuchungen hierzu keine Angaben enthalten sind.

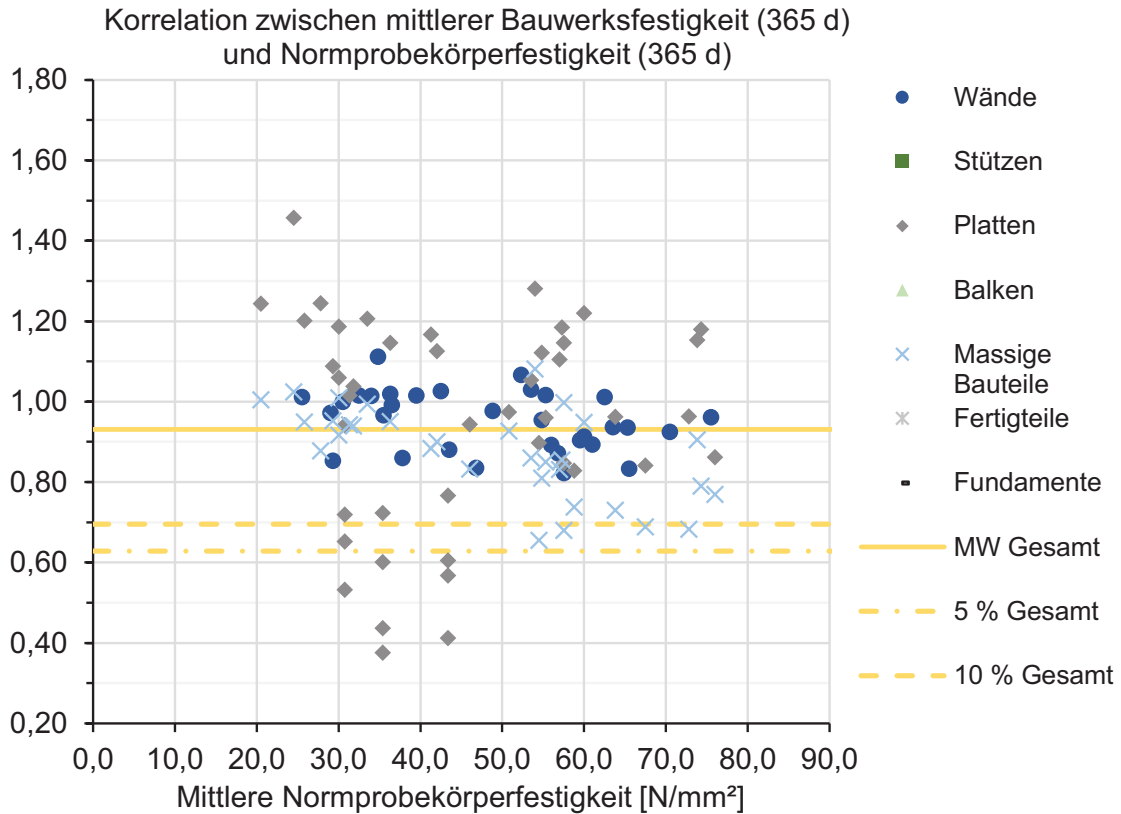


Abb. 7.23 Korrelation zwischen mittlerer Bauwerksfestigkeit und Laborprobekörperfestigkeit nach 365 d

Tab. 7.25 Korrelation zwischen mittlerer Bauwerksfestigkeit und Laborprobekörperfestigkeit im Alter von 365 Tagen – Statistische Kenngrößen

		Gesamt	Wände	Stützen	Platten	Balken	massige Bauteile	Fertigteile	Fundamente
n	[-]	108	32		44		32		
MW	[-]	0,93	0,95		0,96		0,87		
Min	[-]	0,38	0,82		0,38		0,66		
Max	[-]	1,46	1,11		1,46		1,08		
s_x	[-]	0,18	0,07		0,26		0,11		
v_x	[-]	0,20	0,08		0,27		0,13		
$X_{5\%}$	[-]	0,63	0,83		0,53		0,69		
$X_{10\%}$	[-]	0,70	0,86		0,62		0,73		

Allgemein ist bei der Bewertung und Verallgemeinerung der hier vorgestellten historischen Untersuchungen zu beachten, dass ein großer Anteil der Ergebnisse auf Bauwerksuntersuchungen, die meist infolge unzureichender Qualität der Bauausführung, offenkundiger Mängel bzw. des Fehlens von Kontrollprobekörpern

durchgeführt wurden, basieren (vgl. z. B. Datensammlung nach *Petersons 1964* – Tab. 7.18).

Im Hinblick auf die Bewertung der Betondruckfestigkeit von Bestandstragwerken für eine Nachrechnung ist zu beachten, dass weniger das Verhältnis der Festigkeiten im Alter von 28 Tagen, als das Verhältnis in höherem Alter eine Rolle spielt. Zur Bewertung dessen kann exemplarisch das in einigen der vorgenannten Untersuchungen sowie in Abb. 7.23 und in Tab. 7.25 beschriebene Verhältnis der mittleren Druckfestigkeiten im Alter von 365 Tagen verwendet werden, da zu diesem Zeitpunkt meist bereits der überwiegende Anteil der Nacherhärtung abgeschlossen ist.

Zur Anwendbarkeit des in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* für ein Betonalter von 28 Tagen beschriebenen Zusammenhangs $f_{ck} / f_{ck,18} = \gamma_{conv} = 1,15$ bei höherem Betonalter liegen jedoch bisher keine Erkenntnisse vor. Es existieren lediglich einige Untersuchungen, die das Verhältnis der mittleren Festigkeiten im Alter von 365 Tagen betrachten.

Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit und des DAfStb-Forschungsprojektes V 496 die im nachfolgenden Abschnitt 7.5 beschriebenen umfangreichen Untersuchungen an wandartigen Bauteilen mit einem Alter von bis zu einem Jahr durchgeführt.

Zur Beschreibung des Verhältnisses der Zugfestigkeit von Laborprobekörpern und Bauwerkbeton liegen bisher nur die Untersuchungen von Rostásy (*DAfStb 408*) vor, welche jedoch in einem sehr weiten Bereich streuen. Einflussgrößen auf das Verhältnis konnten in *DAfStb 408* nicht eindeutig identifiziert werden. Die hier vorgestellten Ergebnisse für das Verhältnis der Druckfestigkeiten können somit nicht ohne weitere Überlegungen auch auf die Zugfestigkeit übertragen werden. Hierzu sind zukünftige Forschungsanstrengungen erforderlich.

7.5 Eigene experimentelle Untersuchungen

7.5.1 Versuchsprogramm

7.5.1.1 Allgemeines

Die in Abschnitt 7.4 zusammengefassten früheren Untersuchungen zeigen, dass das Verhältnis zwischen Bauwerksdruckfestigkeit und Druckfestigkeit genormter Probekörper in einem großen Bereich streut. Die Untersuchungen, welche größtenteils im Alter von 28 Tagen durchgeführt wurden, beziehen sich in vielen Fällen auf den Vergleich der mittleren Festigkeiten. Ein Vergleich der charakteristischen Werte (5 %-Quantile) wurde nur in wenigen Fällen vorgenommen.

Darüber hinaus basieren die in Abschnitt 7.4 aufgelisteten Untersuchungen aufgrund ihres Alters auch meist auf Laborprobekörpern mit heute nicht mehr gebräuchlichen Abmessungen. Infolgedessen ist das in früheren Untersuchungen ermittelte Verhältnis der Druckfestigkeiten oft mit einem Umrechnungsfaktor anzupassen, der die Festigkeitsunterschiede zwischen historischen und aktuell verwendeten Laborprobekörpern berücksichtigt.

Explizite Untersuchungen, die den in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* implementierten Umrechnungsfaktor $f_{ck} / f_{ck, is} = \gamma_{conv} = 1,15$ bestätigen und eine Aussage über das zugehörige Konfidenzniveau enthalten, liegen nicht vor.

Da speziell bei der Nachrechnung bestehender Massivbauwerke das Verhältnis der Druckfestigkeiten unter Berücksichtigung der über die 28 Tage-Festigkeit hinausgehenden Nacherhärtung benötigt wird, wurden im Rahmen dieser Arbeit umfangreiche Betonuntersuchungen im Alter von ca. einem Jahr durchgeführt. Nach diesem Zeitraum ist die Nacherhärtung, wie in Abb. 7.24 dargestellt, weitgehend abgeschlossen.

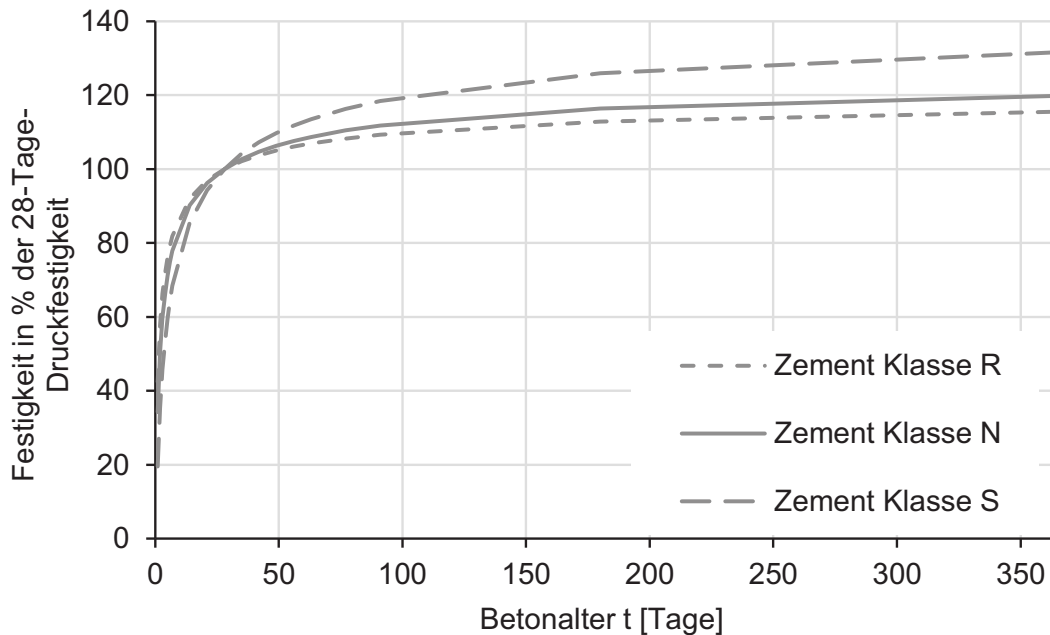


Abb. 7.24 Zeitabhängige Entwicklung der Betondruckfestigkeit nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01*

Zusätzlich wurden auch umfangreiche Untersuchungen im Alter von 28 Tagen durchgeführt, um eine mögliche Aussage über das dem Umrechnungsfaktor $f_{ck} / f_{ck, is} = \gamma_{conv} = 1,15$ nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* zugrunde liegende Konfidenzniveau ableiten zu können.

Zusätzlich zum Verhältnis der Druckfestigkeiten wurde in geringem Umfang auch die Korrelation zwischen dem am Bauwerk und dem am Laborprobekörper bestimmten E-Modul untersucht.

Der Einfluss von Stahleinschlüssen in Bohrkernen ist nicht Gegenstand der beschriebenen Untersuchungen. Sämtliche hier betrachteten Bohrkernkerne waren frei von Bewehrung.

Da anhand der vorliegenden Untersuchungen in Anlehnung an Abb. 1.1 besonders die Anwendbarkeit des Umrechnungsfaktors 0,85 zwischen Bauwerks- und Laborprobekörperfestigkeit auf Bestandsbetone mit einem Herstelljahr vor ca. 1980 bewertet werden sollte, wurde als Standardbeton eine für den Zeitraum von ca. 1970 bis 1980 typische Betonzusammensetzung gewählt.

Basierend auf einer Anfrage beim VDZ (Verein Deutscher Zementwerke e.V.) zu den Marktanteilen der verschiedenen Zementarten nach Tab. 7.26 wurde die in Tab. 7.27 beschriebene Betonmischung als Standardbetonzusammensetzung gewählt.

Tab. 7.26 Ergebnis einer VDZ-Anfrage: historische Marktanteile verschiedener Zementarten

Jahr	CEM I	CEM II/A-S oder B-S	CEM III	CEM IV
	Portlandzement	Portlandhüttenzement (Eisenportlandzement)	Hochofenzement	Puzzolanzement (Trass)
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]
1960	70	16	11	< 5
1970	73	11	14	< 5
1980	75	8	16	< 5

Tab. 7.27 Standardbetonzusammensetzung – Betonmischung 1 (B1)

Sollwerte	Ausgangsstoffe	Art	Gehalt
	[-]	[-]	[kg/m ³]
C25/30	Zuschlag	Rheinsand	691
		Rheinkies 2/8	521
Gesteinskörnung rund		Rheinkies 8/16	654
	Zement	CEM I 32,5 R	310
Größtkorn 16 mm	Wasser	Trinkwasser	180
		w/z [-]	0,58
Konsistenzklasse F3		Ausbreitmaß ^{*)} [mm]	460
		Konsistenzklasse ^{*)} [-]	F3

*) Istwert

Außer der Standardbetonmischung wurden zur Variation der zu untersuchenden Parameter die in den nachfolgenden Tabellen Tab. 7.28 bis Tab. 7.31 dargestellten Betonmischungen gewählt. Bei Betonmischung 4 wurde wegen der mangelnden Verfügbarkeit beim Transportbetonhersteller anstatt eines CEM I ein CEM II verwendet.

Tab. 7.28 Betonmischung 2 (B2)

Sollwerte	Ausgangsstoffe	Art	Gehalt
	[-]	[-]	[kg/m³]
C16/20 Gesteinskörnung rund Größtkorn 16 mm Konsistenzklasse F3	Zuschlag	Rheinsand	699
		Rheinkies 2/8	527
		Rheinkies 8/16	661
	Zement	CEM I 32,5 R	270
	Wasser	Trinkwasser	185
		w/z [-]	0,69
		Ausbreitmaß*) [mm]	430
		Konsistenzklasse*) [-]	F3

*) Istwert

Tab. 7.29 Betonmischung 3 (B3)

Sollwerte	Ausgangsstoffe	Art	Gehalt
	[-]	[-]	[kg/m³]
C40/50 Gesteinskörnung rund Größtkorn 16 mm Konsistenzklasse F3	Zuschlag	Rheinsand	651
		Rheinkies 2/8	491
		Rheinkies 8/16	616
	Zement	CEM I 32,5 R	400
	Wasser	Trinkwasser	190
	Zusatzmittel	Betonverflüssiger	2,40
		w/z [-]	0,48
		Ausbreitmaß*) [mm]	480
		Konsistenzklasse*) [-]	F3

*) Istwert

Tab. 7.30 Betonmischung 4 (B4)

Sollwerte	Ausgangsstoffe	Art	Gehalt
	[-]	[-]	[kg/m ³]
C25/30 Gesteinskörnung gebrochen Größtkorn 16 mm Konsistenzklasse F3	Zuschlag	Rheinsand	691
		Edelsplitt 2/8	508
		Edelsplitt 8/16	677
	Zement	CEM II B-S 42,5 N	310
	Wasser	Trinkwasser	180
		w/z [-]	0,58
		Ausbreitmaß ^{*)} [mm]	480
		Konsistenzklasse ^{*)} [-]	F3

*) Istwert

Tab. 7.31 Betonmischung 5 (B5)

Sollwerte	Ausgangsstoffe	Art	Gehalt
	[-]	[-]	[kg/m ³]
C25/30 Gesteinskörnung rund Größtkorn 32 mm Konsistenzklasse F3	Zuschlag	Rheinsand	650
		Rheinkies 2/8	304
		Rheinkies 8/16	439
		Rheinkies 16/32	516
	Zement	CEM I 32,5 R	290
	Wasser	Trinkwasser	170
		w/z [-]	0,59
		Ausbreitmaß ^{*)} [mm]	430
		Konsistenzklasse ^{*)} [-]	F3

*) Istwert

Insgesamt wurden drei verschiedene Versuchsreihen durchgeführt. Ausgehend von der Standardbetonzusammensetzung (Tab. 7.27) wurde jeweils der Einfluss der Gesteinskörnung, des Größtkorndurchmessers, der Betonfestigkeitsklasse und der Bauteildicke untersucht.

Darüber hinaus wurden der Einfluss der Bohrkernentnahmerichtung bezogen auf die Betonierichtung sowie die Festigkeitsverteilung über die Bauteilhöhe betrachtet.

7.5.1.2 Versuchsreihe 1 - Kleinprobekörper zur Entnahme von Bohrkernen

Bei Versuchsreihe 1 wurde untersucht, in welchem Umfang die Bohrkernentnahme selbst sowie das „Ausmuscheln“ (vgl. Abb. 3.5) von angeschnittenen Gesteinskörnern und die damit einhergehende Querschnittsschwächung die Prüfwerte der Betondruckfestigkeit beeinflussen.

Hierzu wurden aus den verschiedenen Betonsorten im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der Technischen Universität Kaiserslautern (TUK) jeweils 15 quaderförmige Bauteile nach Abb. 7.25 hergestellt. Wie auch die Laborzylinder wurden die Quader ebenfalls auf dem Rütteltisch verdichtet. Nach dem Ausschalen im Alter von einem Tag wurden die Quader bis zu einem Alter von 28 Tagen unter Wasser gelagert. Im Alter von ca. 28 Tagen wurden aus den Quadern Bohrkern mit $h/d = 300/150$ mm herausgebohrt. Nach dem Vorbereiten nach *DIN EN 12504-1:2009-07* wurde an den Bohrkernen im Alter von ca. 28 Tagen im wassergesättigten Zustand die Druckfestigkeit nach *DIN EN 12390-3:2009-07* geprüft. Die an den Bohrkernen ermittelten Festigkeitswerte wurden mit den an jeweils 15 Laborzylindern bestimmten Festigkeitswerten verglichen. Die Laborzylinder wurden jeweils aus derselben Betonmischung wie die Quader hergestellt, auf dem Rütteltisch verdichtet, im Alter von einem Tag nach *DIN EN 12390-2:2009-08* ausgeschalt, bis zur Prüfung im Alter von 28 Tagen unter Wasser gelagert, nach *DIN EN 12390-3:2009-07* für die Prüfung der Druckfestigkeit vorbereitet und im wassergesättigten Zustand nach *DIN EN 12390-3:2009-07* geprüft. Die einzigen verbleibenden Unterschiede zwischen Bohrkern und Laborzylinder und somit auch die einzigen zu untersuchenden Parameter bei Versuchsreihe 1 sind somit der Einfluss der Bohrkernentnahme selbst sowie das „Ausmuscheln“ von angeschnittenen Gesteinskörnern bei der Druckfestigkeitsprüfung.

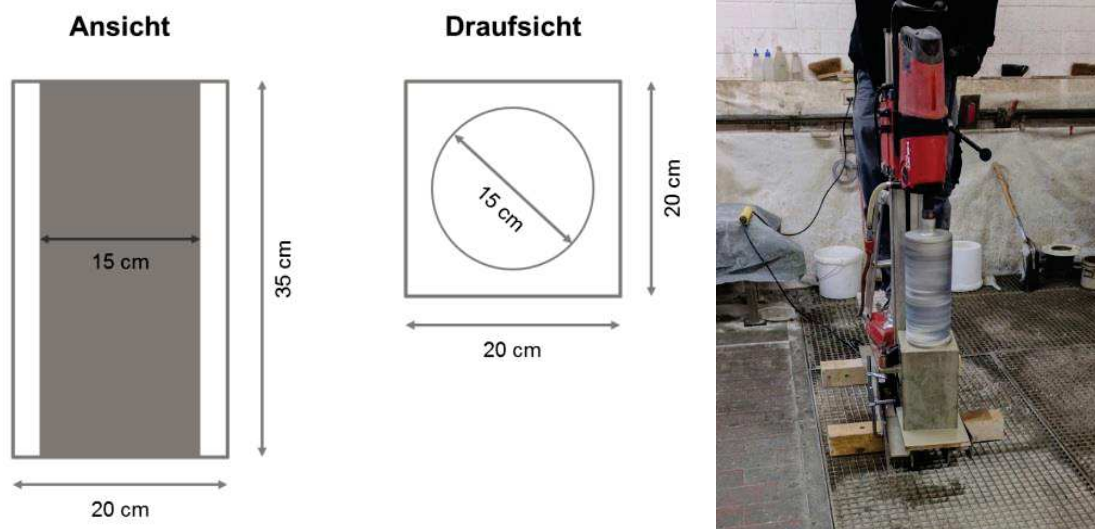


Abb. 7.25 Betonquader zur Bohrkernentnahme für Versuchsreihe 1

7.5.1.3 Versuchsreihe 2 – Wandartige Bauteile bei 28 d Laborlagerung

Bei Versuchsreihe 2 wurde der Unterschied zwischen der Druckfestigkeit von genormten Prüfkörpern und der tatsächlichen Bauwerksdruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen untersucht.

Hierzu wurden aus den verschiedenen Betonsorten (vgl. Tab. 7.27 bis Tab. 7.31) wandartige Bauteile mit einer Dicke von 35 cm entsprechend Abb. 7.26 hergestellt. Zusätzlich wurde aus Betonsorte 1 eine Wand mit einer Dicke von 65 cm angefertigt.

Die Herstellung der Wände erfolgte stehend unter möglichst baustellennahen Bedingungen im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der Technischen Universität Kaiserslautern (TUK). Die Verdichtung erfolgte stets mit einem Innenrüttler. Alle Wände wurden bis zur Bohrkernentnahme im Alter von 28 Tagen in Laborräumen bei einer Temperatur von ca. 20°C gelagert.

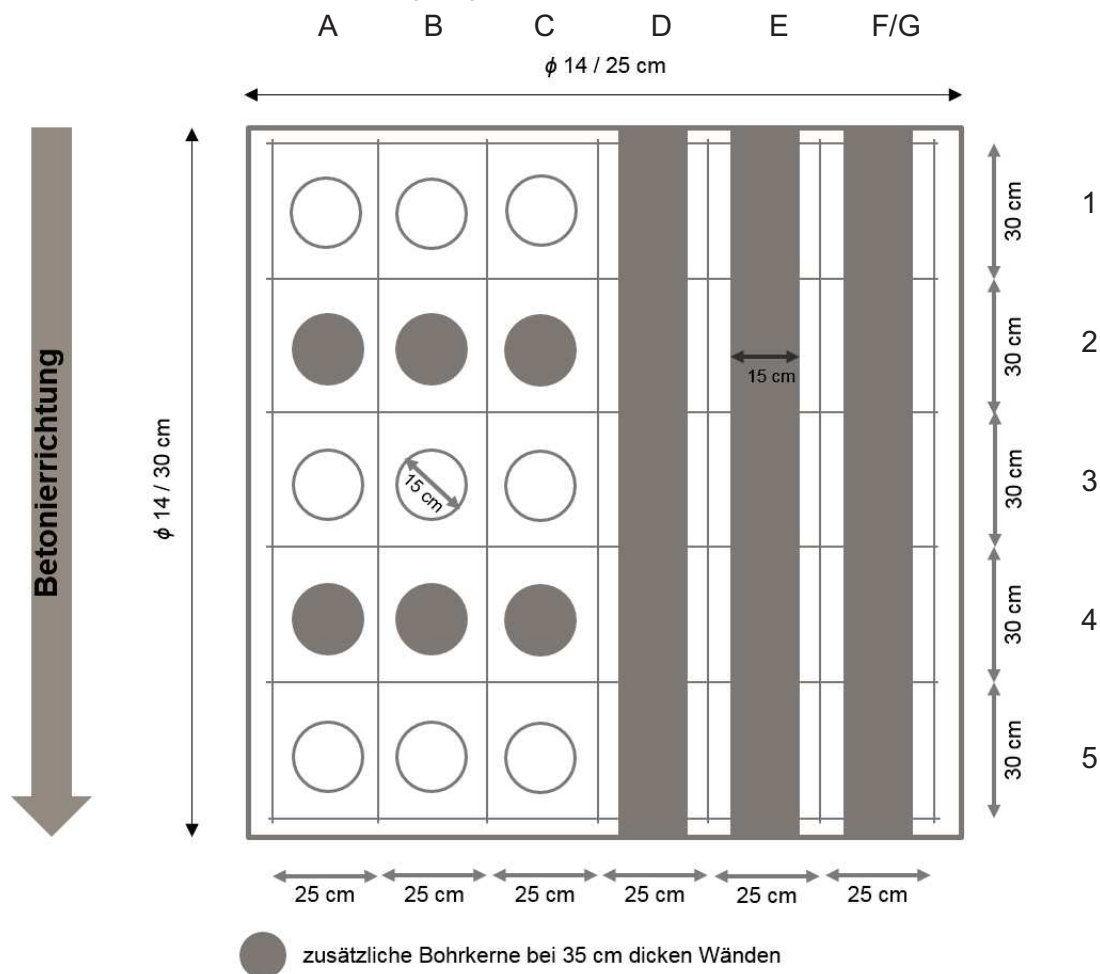


Abb. 7.26 Wandartige Bauteile zur Bohrkerntnahme, $d = 35$ cm und $d = 65$ cm

Die Bohrkerntnahme erfolgte gemäß Abb. 7.26 und Abb. 7.27, womit für jede Wand ca. 15 senkrecht zur Betonierichtung und 15 in Betonierichtung (drei Bohrkernentnahme mit $h/d \approx 1500/150$ mm (siehe Abb. 7.28), welche in jeweils fünf Probekörper mit $h/d \approx 300/150$ mm zerteilt wurden) entnommene Probekörper mit $h/d \approx 300/150$ mm für die Prüfung der Druckfestigkeit nach *DIN EN 12390-3:2009-07* zur Verfügung standen. Die bei den Wänden mit $d = 65$ cm senkrecht zur Betonierichtung entnommenen Bohrkernentnahme mit $h/d \approx 650/150$ mm wurden jeweils in zwei Probekörper

mit $h/d \approx 300/150$ mm zerteilt. Alle Bohrkern wurden direkt nach der Entnahme gemäß *DIN EN 12504-1:2009-07* vorbereitet und im Alter von ca. 28 Tagen im bauwerksfeuchten Zustand geprüft.

Die Bezeichnung der Bohrkern erfolgte dabei entsprechend der vertikalen (Achse A bis G) und horizontalen (Achse 1 bis 5) Entnahmestelle. Achse 1 stellt die der Bauteiloberseite am nächsten gelegene Achse dar. Aus Achse A bis C wurden jeweils die Bohrkern senkrecht zur Betonierichtung entnommen. Aus Achse D bis G wurden zufällig drei Achsen zur Entnahme der Bohrkern in Betonierichtung ausgewählt.



Abb. 7.27 Wand nach der Bohrkernentnahme



Abb. 7.28 Bohrkern mit $h/d \approx 1500/150$ mm

Zusätzlich zu den bereits für Versuchsreihe 1 hergestellten Laborzylindern, welche bis zur Prüfung im Alter von 28 Tagen unter Wasser gelagert wurden, wurden für jede Betonsorte aus der gleichen Charge 15 weitere Zylinder hergestellt, die auf dem Rütteltisch verdichtet, im Alter von einem Tag ausgeschalt und bis zur Prüfung im Alter von 28 Tagen wie die Wände im Labor gelagert wurden.

Somit können basierend auf Versuchsreihe 2 folgende Parameter bewertet werden:

- Einfluss der Nachbehandlung auf die Korrelation zwischen der Druckfestigkeit von genormten Prüfkörpern und der tatsächlichen Bauwerksdruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen,
- Einfluss der Bohrkernentnahmerichtung (bezogen auf die Betonierichtung) auf die am Bohrkern ermittelte Druckfestigkeit,
- Verlauf der Druckfestigkeit über die Bauteilhöhe,
- Art der Verdichtung (Rütteltisch / Innenrüttler),
- Mikrorissbildung durch Schwindspannungen und
- Einfluss der Bewehrung auf die Verarbeitung des Frischbetons.

7.5.1.4 Versuchsreihe 3 – Wandartige Bauteile bei 365 d Lagerung im Freien

Wie bereits bei Versuchsreihe 2 wird der Unterschied zwischen der Druckfestigkeit von genormten Prüfkörpern und der tatsächlichen Bauwerksdruckfestigkeit untersucht – jedoch im Alter von ca. 365 Tagen unter freier Bewitterung.

Über die für die Versuchsreihe 2 hergestellten wandartigen Bauteile und Laborprobekörper hinaus wurden aus der Betonmischung 1 zusätzlich eine Wand mit $d = 35$ cm und eine Wand mit $d = 65$ cm hergestellt. Beide Wände wurden direkt nach der Betonage für 365 Tage im Freien gelagert. Temperatur, Luftfeuchte und Niederschlagsmenge können Anhang IV.1 entnommen werden.

Parallel zu den Wänden wurden 15 Zylinder hergestellt, die auf dem Rütteltisch verdichtet, im Alter von einem Tag ausgeschalt, bis zu einem Alter von 28 Tagen unter Wasser gelagert und anschließend bis zur Prüfung im Alter von ca. 365 Tagen wie die Wände im Freien gelagert wurden. Darüber hinaus wurden 15 weitere Zylinder hergestellt, die direkt nach dem Ausschalen bis zur Prüfung im Alter von ca. 365 Tagen im Freien gelagert wurden.

Über die bereits bei Versuchsreihe 2 zu bewertenden Parameter hinaus kann anhand von Versuchsreihe 3 somit besonders das Verhältnis der Druckfestigkeit von genormten Prüfkörpern und der tatsächlichen Bauwerksdruckfestigkeit unter Berücksichtigung der über die 28 Tage-Festigkeit hinausgehenden Nacherhärtung bewertet werden.

Eine Zusammenfassung der durchgeführten Untersuchungen ist in Tab. 7.32 enthalten.

In der Summe wurden sechs Wände mit $d = 35$ cm, zwei Wände mit $d = 65$ cm, 75 Quader $20 \times 20 \times 35$ cm sowie 180 Zylinder mit $h/d \approx 300/150$ mm hergestellt. Aus den Wänden und Quadern wurden in der Summe 315 Bohrkerne mit $h/d \approx 300/150$ mm entnommen.

Tab. 7.32 Versuchsmatrix

			Anzahl Normzylinder			Bohrkerne
	Gesteinskörnung	Größtkorn	28 d- Lagerung im Wasser	28 d- Wasser 337d 20° C	Lagerung an Standort Wand	150/300 mm
	Konsistenz	Wanddicke				
Normzylinder vs. Bohrkern (Versuchsreihe 1)	Standardmischung		15			15 ¹⁾
	C25/30 (B1)					
	rund	16				
	F3	35	15			15 ¹⁾
	Variation Betonfestigkeitsklasse					
	C16/20 (B2)					
	rund	16	15			15 ¹⁾
	F3	35				
	C40/50 (B3)					
	rund	16	15			15 ¹⁾
	F3	35				
	Variation Gesteinskörnung					
	C25/30 (B4)		15			15 ¹⁾
	gebrochen	16				
	F3	35				
	Variation Größtkorn		15			15 ¹⁾
C25/30 (B5)						
rund	32					
F3	35					

Hinweis: Legende siehe Fortsetzung Tab. 7.32

Tab. 7.32 Fortsetzung

			Anzahl Normzylinder			Bohrkerne
	Gesteinskörnun	Größtkorn	28 d- Lagerung im Wasser	28 d- Wasser 337d 20° C	Lagerung an Standort Wand	150/300 mm
	Konsistenz	Wanddicke				
Wände im Labor: Prüfung nach 28 Tagen (Versuchsreihe 2)	Standardmischung					
	C25/30 (B1)					
	rund	16				
	F3	35				
	Variation Betonfestigkeitsklasse					
	C16/20 (B2)					
	rund	16				
	F3	35				
	C40/50 (B3)					
	rund	16				
	F3	35				
	Variation Gesteinskörnung					
	C25/30 (B4)					
	gebrochen	16				
	F3	35				
	Variation Größtkorn					
	C25/30 (B5)					
	rund	32				
F3	35					
Variation Wanddicke						
C25/30 (B1)						
rund	16					
F3	65					
Wände im Freien: Prüfung nach 365 d (Versuchsreihe 3)	Standardmischung			15	15	30 ²⁾
	C25/30 (B1)					
	rund	16				
	F3	35				
	Variation Wanddicke					
	C25/30 (B1)					
rund	16					
F3	65					
		Summe	75	15	90	315

1) aus Betonprisma l/b/h = 20/20/35 cm

2) jeweils 15 Bohrkerne senkrecht zur und in Betonierichtung

7.5.2 Versuchsergebnisse

7.5.2.1 Allgemeines

Sämtliche Einzelwerte der Druckfestigkeitsprüfungen sowie die zugehörigen statistischen Kenngrößen sind den Anhängen IV.2 bis IV.6 zu entnehmen. Zusätzlich sind dort Angaben zu Probekörperabmessungen, tatsächlichem Prüfalter und Dichte enthalten. Somit können die Daten durch alle Interessierten unter Berücksichtigung der genannten Rahmenbedingungen untersucht und interpretiert werden.

Die 5 %-Quantilwerte der Druckfestigkeiten basieren auf einer logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12*. Eventuelle Unterschiede zwischen geplanter Druckfestigkeit gemäß gewählter Druckfestigkeitsklasse und Festigkeit des wassergelagerten Normzylinders werden nachfolgend nicht betrachtet.

7.5.2.2 Streuung der Betondruckfestigkeit

Da bei der Bewertung des Verhältnisses zwischen der In-situ-Druckfestigkeit und der Druckfestigkeit von Laborprobekörpern neben den Mittelwerten auch 5 %-Quantilwerte der Druckfestigkeiten betrachtet werden, sind in den nachfolgenden Abbildungen Abb. 7.29 bis Abb. 7.31 die Variationskoeffizienten der an unterschiedlichen Probekörperarten ermittelten Festigkeiten dargestellt.

Allgemein kann für alle Betonmischungen und Probekörperarten eine sehr geringe Streuung festgestellt werden. Die Variationskoeffizienten liegen zwischen 1,3 % und 6,9 %. Betrachtet man die Untersuchungen im Alter von 28 Tagen, so kann für die an Bohrkernen aus den wandartigen Bauteilen geprüfte In-situ-Druckfestigkeit eine höhere Streuung festgestellt werden als für die zugehörigen Laborprobekörper. Die an den aus Quadern entnommen Bohrkernen bestimmte Druckfestigkeit streut in einem ähnlichen Bereich wie die der Laborprobekörper (vgl. Abb. 7.29).

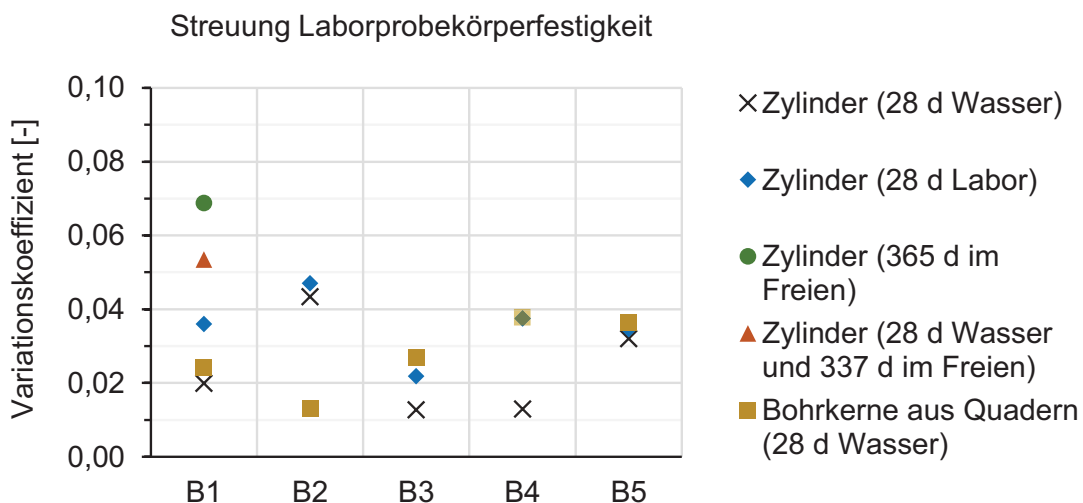


Abb. 7.29 Streuung der Laborprobekörperfestigkeiten (Betonmischung B1-5)

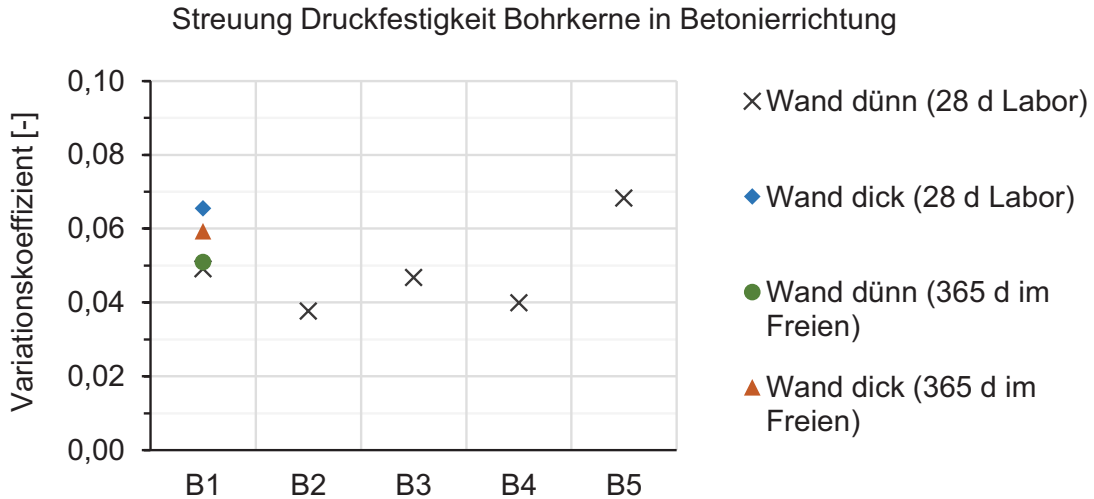


Abb. 7.30 Streuung der Druckfestigkeit der Bohrkerne in Betonierichtung (Betonmischung B1-5)

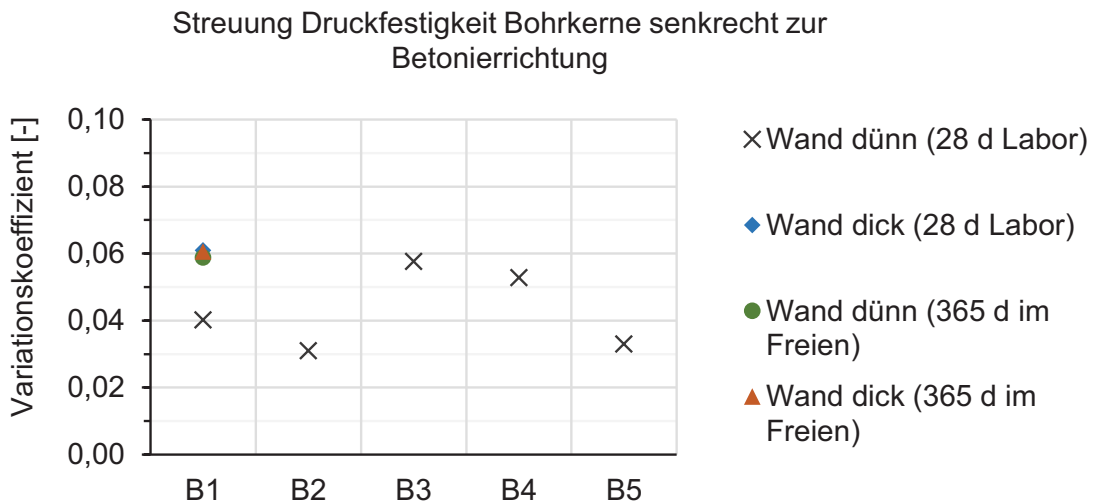


Abb. 7.31 Streuung der Druckfestigkeit der Bohrkerne senkrecht zur Betonierichtung (Betonmischung B1-5)

Mögliche Ursachen für die höhere Streuung der In-situ-Druckfestigkeit können u. a. die unterschiedliche Verdichtungsart sowie die Bohrkernentnahme selbst sein. Zunehmende Bauteildicke und zunehmendes Probekörperalter führen zu einem Anstieg der Streuung. Die Bohrkernentnahmerichtung hat keinen messbaren Einfluss auf die Streuung (vgl. Abb. 7.30 und Abb. 7.31).

7.5.2.3 Einfluss der Bohrkernentnahme

In Abb. 7.32 ist der Einfluss der Bohrkernentnahme sowie des „Ausmuschelns“ - nur durch Adhäsion in der Bohrkernmantelfläche verbleibender Gesteinskörner - auf das Verhältnis der Bauwerksfestigkeit zur zugehörigen Laborprobekörperfestigkeit dargestellt. Weitere Einflussgrößen sind dabei nicht zu berücksichtigen, da die im Rahmen von Versuchsreihe 1 hergestellten Probekörper zur Bohrkernentnahme identisch zu Laborprobekörpern verdichtet und gelagert wurden. Es ist jedoch zu

beachten, dass stets der in *DIN EN 12504-1:2009-07* geforderte Höchstwert des Verhältnisses des Größtkorndurchmessers der Gesteinskörnung zum Bohrkerndurchmesser von 1:3 eingehalten wurde. Zur Beurteilung der Auswirkungen eines Größtkorndurchmessers größer als $1:3 \cdot \text{Bohrkerndurchmesser}$ liegen derzeit keine abschließenden Forschungsergebnisse vor.

In Abb. 7.32 ist das Verhältnis der jeweiligen mittleren Druckfestigkeiten (Mittelwert über jeweils 15 Einzelwerte) sowie das Verhältnis der jeweiligen charakteristischen Werte (berechnet mit einer logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12*) dargestellt. Zusätzlich sind jeweils Mittelwert und 5 %-Quantilwert des Verhältnisses über alle fünf Betonmischungen hinweg angegeben. Die 5 %-Quantilwerte wurden basierend auf einer Normalverteilung nach dem in *DIN EN 1990:2010-12* enthaltenen Verfahren berechnet.

Das Verhältnis der Mittelwerte liegt für die hier betrachteten Betone zwischen 0,94 und 1,06. Der zugehörige Mittelwert liegt bei 1,0 und der 5 %-Quantilwert bei 0,87. Das Verhältnis der 5 %-Quantilwerte liegt zwischen 0,92 und 1,06. Der zugehörige Mittelwert liegt bei 0,99 und der 5 %-Quantilwert bei 0,86. Ein „Ausmuscheln“ angeschnittener Gesteinskörner konnte bei keinem der Bohrkernbeobachtet werden.

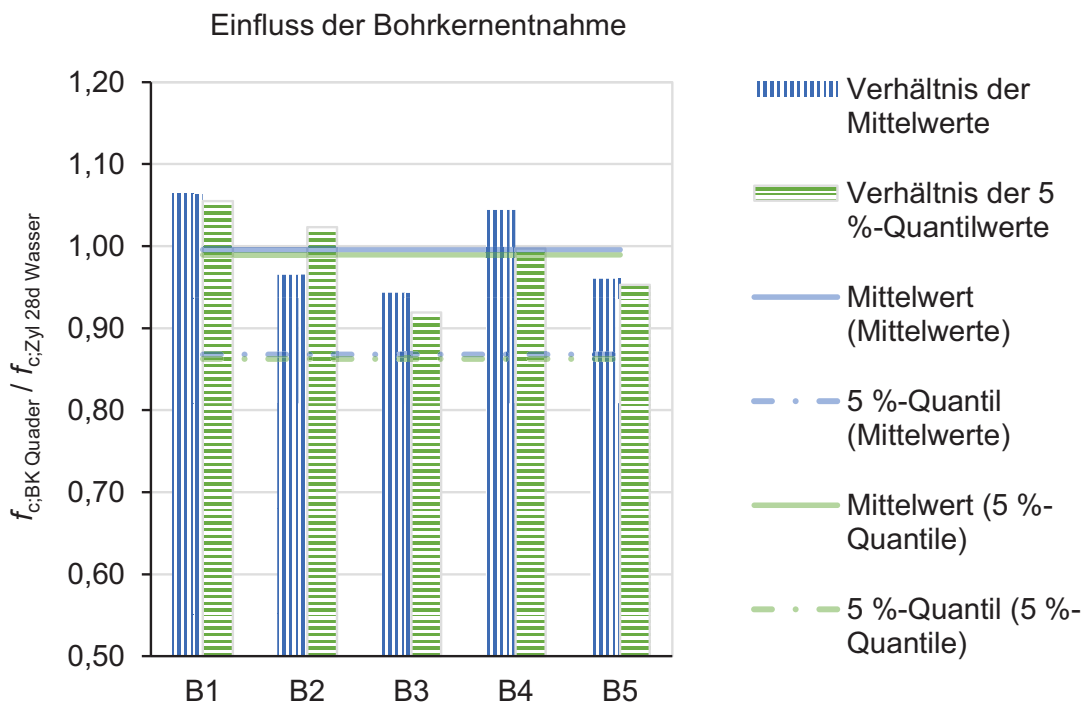


Abb. 7.32 Einfluss der Bohrkernentnahme

Dies deutet auf einen vernachlässigbaren Einfluss der Bohrkernentnahme hin, vorausgesetzt das Verhältnis zwischen Größtkorndurchmesser der Gesteinskörnung und Bohrkerndurchmesser wurde entsprechend nach *DIN EN 12504-1:2009-07* gewählt. Weiterhin ist zu beachten, dass die Bohrkernentnahme unter idealen Bedingungen, also mit sachgerecht befestigtem Bohrgerät, entnommen werden konnten. Bei der Bohrkernentnahme am Bestandstragwerk kann der Einfluss der Bohrkernentnahme im Einzelfall auch größer ausfallen.

7.5.2.4 Festigkeitsverlauf über die Bauteilhöhe

Die nachfolgend aufgeführten Ergebnisse beruhen auf Untersuchungen an Wänden mit $d = 35$ cm im Alter von ca. 28 Tagen.

In Abb. 7.33 ist der Verlauf der Betondruckfestigkeit über die Bauteilhöhe, basierend auf den senkrecht zur Betonierichtung entnommenen Bohrkernen dargestellt. Die abgebildeten Werte resultieren jeweils aus dem Mittelwert der drei in einer Höhenlage entnommenen Bohrkern. Als Bezugsgröße dient die an den drei Bohrkernen aus Achse 1 bestimmte mittlere Druckfestigkeit.

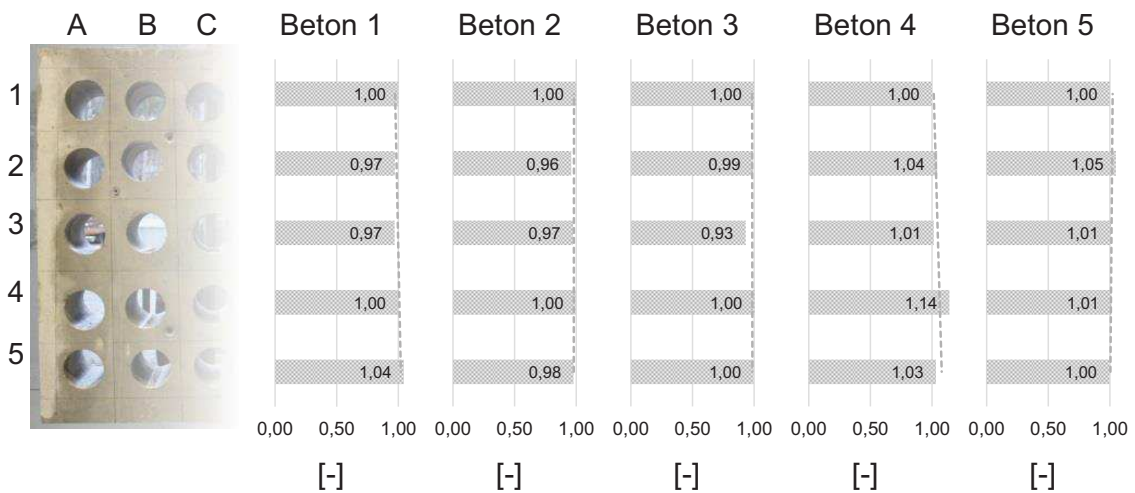


Abb. 7.33 Verlauf der Betondruckfestigkeit über die Bauteilhöhe, basierend auf den senkrecht zur Betonierichtung entnommenen Bohrkernen

In Abb. 7.34 ist der Verlauf der Betondruckfestigkeit über die Bauteilhöhe, basierend auf den parallel zur Betonierichtung entnommenen Bohrkernen dargestellt. Die abgebildeten Werte resultieren jeweils aus dem Mittelwert der drei in einer Höhenlage entnommenen Bohrkern. Als Bezugsgröße dient die an den drei Bohrkernen aus Achse 1 bestimmte mittlere Druckfestigkeit.

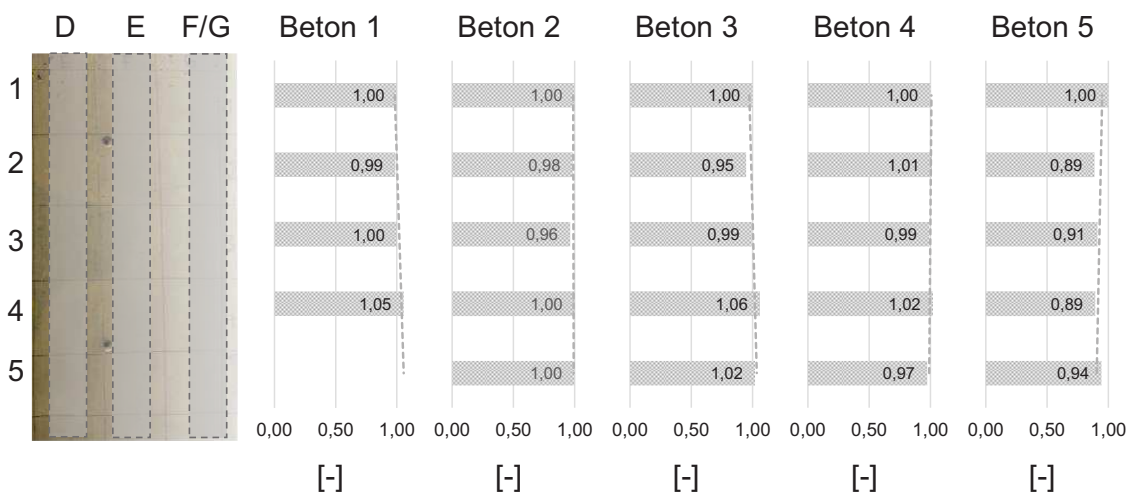


Abb. 7.34 Verlauf der Betondruckfestigkeit über die Bauteilhöhe, basierend auf den parallel zur Betonierichtung entnommenen Bohrkernen

Unabhängig von der Bohrkernentnahmerichtung kann die bei in vertikaler Richtung ausgeprägten Bauteilen zu erwartende Festigkeitszunahme mit ansteigender

Entfernung vom oberen Bauteilende nicht beobachtet werden. Die Festigkeit bleibt über die komplette Bauteilhöhe nahezu unverändert. Mögliche Ursache kann die mit 1,50 m recht geringe Höhe der wandartigen Bauteile sein.

Infolgedessen ist für die weitere Auswertung der im Rahmen dieser Versuchsserie gewonnenen Ergebnisse auch keine Anpassung der In-situ-Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit von der vertikalen Lage der Entnahmestelle erforderlich.

7.5.2.5 Einfluss der Bohrkernentnahmerichtung in Bezug auf die Betonierichtung

Die nachfolgend aufgeführten Ergebnisse beruhen auf Untersuchungen an Wänden mit $d = 35$ cm bzw. $d = 65$ cm. In Abb. 7.35 ist der Einfluss der Bohrkernentnahmerichtung auf die Betondruckfestigkeit in einem Alter von 28 Tagen dargestellt. Da die Höhenlage der Bohrkernentnahmestelle bei den hier betrachteten wandartigen Bauteilen wie zuvor gezeigt offensichtlich einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Druckfestigkeit hat, wird für jede Betonmischung jeweils die mittlere Druckfestigkeit aller senkrecht zur Betonierichtung mit der mittleren Druckfestigkeit aller parallel zur Betonierichtung entnommenen Bohrkern verglichen. Auf einen Vergleich der charakteristischen Werte wird verzichtet, da dadurch nicht nur der Einfluss der Bohrkernentnahmerichtung sondern auch eventuelle Unterschiede in der Streuung berücksichtigt würden. Die in Abb. 7.35 dargestellten Werte entsprechen jeweils dem Verhältnis der Druckfestigkeit von senkrecht zur Betonierichtung entnommenen Bohrkernen zu parallel zur Betonierichtung entnommenen Kernen.

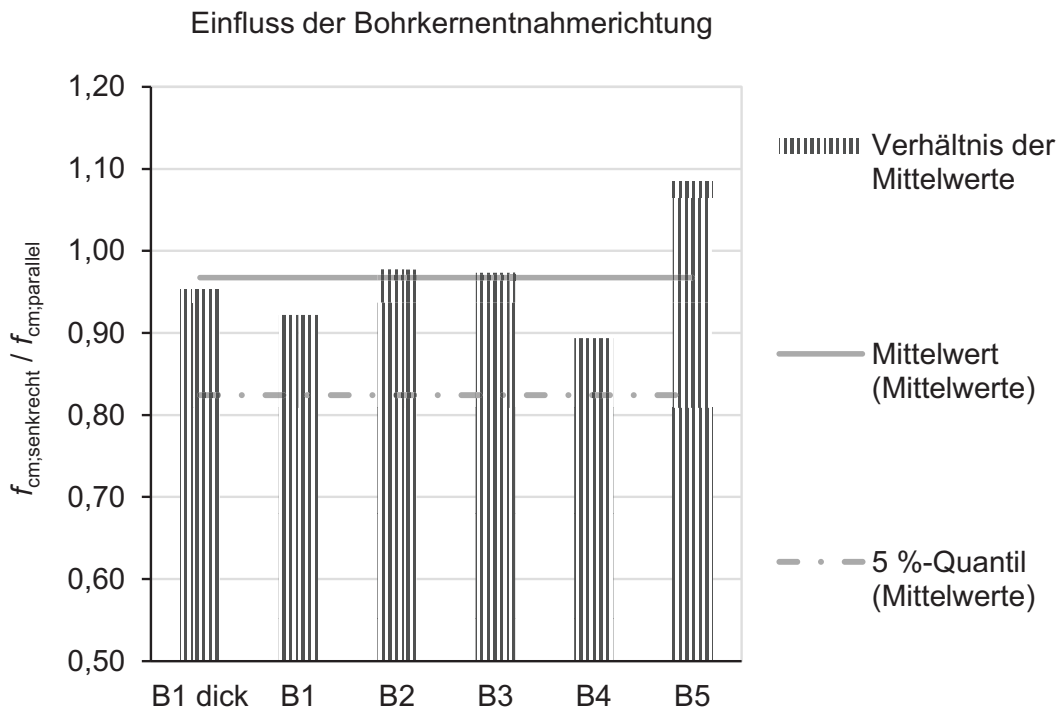


Abb. 7.35 Einfluss der Bohrkernentnahmerichtung im Alter von 28 Tagen

Das Verhältnis liegt in einem Bereich zwischen 0,89 und 1,08 und im Mittel bei 0,97. Im Mittel ist die Druckfestigkeit von senkrecht zur Betonierichtung entnommenen Bohrkernen somit 3 % geringer als die von parallel entnommenen Bohrkernen.

Für Betonmischung 2 und 3, welche sich hauptsächlich in der Festigkeitsklasse unterscheiden, kann kein nennenswerter Unterschied festgestellt werden. Die Betonfestigkeitsklasse hat offensichtlich keinen maßgeblichen Einfluss auf das betrachtete Verhältnis. Für gebrochene Gesteinskörnung (B4) konnte der größte Unterschied festgestellt werden. Bei einem Größtkorn von 32 mm (B5) war die Druckfestigkeit senkrecht zur Betonierichtung ca. 8 % größer als parallel zur Betonierichtung. Die Bauteildicke hat keinen messbaren Einfluss auf das betrachtete Verhältnis. Ein allgemeingültiger Einfluss des Größtkorndurchmessers sowie der Art der Gesteinskörnung kann jedoch nicht abgeleitet werden, da der Umfang der Untersuchungen zu gering ist.

Bei den Untersuchungen im Alter von 365 Tagen (Versuchsreihe 3) konnte für die dicke Wand ein Verhältnis der Druckfestigkeit senkrecht zur Betonierichtung zur Druckfestigkeit in Betonierichtung von 1,04 und für die dünne Wand ein Verhältnis von 1,00 ermittelt werden.

7.5.2.6 Verhältnis der Druckfestigkeit von Bauwerkbeton und Laborprobekörpern im Alter von 28 Tagen

Aufbauend auf der Bewertung einzelner Einflussgrößen wird nachfolgend direkt die In-situ-Druckfestigkeit mit der Druckfestigkeit von Laborprobekörpern verglichen. Zunächst wird ein Probekörperalter und Bauwerksalter von 28 Tagen betrachtet. Es werden lediglich die senkrecht zur Betonierichtung entnommenen Bohrkerne berücksichtigt, da dies zumindest bei Wänden die praxisübliche Entnahmerichtung darstellt. Da die Höhenlage der Bohrkernentnahmestelle bei den hier betrachteten wandartigen Bauteilen offensichtlich einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Druckfestigkeit hat, werden jeweils die aus allen Höhenlagen entnommenen Bohrkerne ohne weitere Anpassung für den Festigkeitsvergleich verwendet. Im Rahmen von Versuchsreihe 2 wurden für alle Betonmischungen Wände mit einer Dicke von 35 cm sowie für Betonmischung 1 eine zusätzliche Wand mit einer Dicke von 65 cm hergestellt. Die Lagerung der Wände erfolgte bis zur Bohrkernentnahme und Prüfung in Laborräumen.

Das Verhältnis der In-situ-Druckfestigkeit zur Druckfestigkeit von Laborprobekörpern, die abweichend von der normativen Regelung wie die Wände 28 Tage im Labor gelagert wurden, ist in Abb. 7.36 dargestellt.

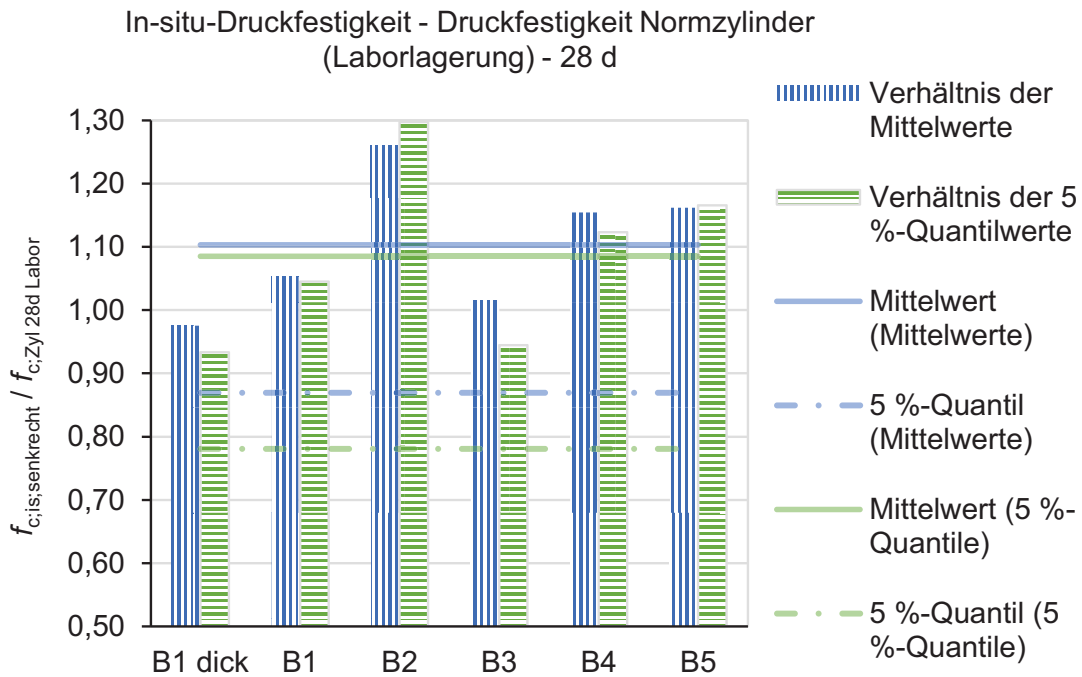


Abb. 7.36 Verhältnis der 28-Tage-In-situ-Druckfestigkeit zur Druckfestigkeit von Laborprobekörpern (28 Tage Laborlagerung)

Die Ergebnisse zeigen, dass die an Laborprobekörpern bestimmte Druckfestigkeit keinesfalls die tatsächlich im Bauteil vorliegende Druckfestigkeit widerspiegelt. Die zugehörigen Laborprobekörper wurden unter bauteilgleichen Bedingungen gelagert. Bedingt durch eine Überlagerung verschiedener Effekte, wie z. B. Art der Verdichtung, Bohrkernentnahmerichtung und Einfluss der Bohrkernentnahme selbst, streut sowohl das Verhältnis der Mittelwerte als auch das Verhältnis der 5 %-Quantilwerte der Druckfestigkeiten in einem sehr großen Bereich (siehe Abb. 7.36). Eine mögliche Ursache für die im Mittel ca. 10 % höheren In-situ-Druckfestigkeit stellen die Erhärtungsbedingungen dar.

Sowohl die Wände als auch die Normzylinder wurden nach dem Ausschalen bis zur Prüfung im Alter von 28 Tagen ohne weitere Nachbehandlung im Labor gelagert. Gemessen am Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen, welches bei den Zylindern um ein Vielfaches größer ist als bei den Wänden, können die Normzylinder sehr viel schneller austrocknen. Dies kann zu einer Beeinträchtigung der Hydratation führen, was eine mögliche Ursache für eine im Vergleich zur In-situ-Festigkeit kleinere Druckfestigkeit der Laborprobekörper sein könnte. Sowohl der Art der Gesteinskörnung als auch der Festigkeit(-sklasse) können keine verifizierbaren Einflüsse zugeordnet werden.

Das Verhältnis der In-situ-Druckfestigkeit zur Druckfestigkeit von Laborprobekörpern, die bis zur Untersuchung im Alter von 28 Tagen unter Wasser gelagert wurden, ist in Abb. 7.37 dargestellt. Auch hier werden zur Bewertung der In-situ-Druckfestigkeit lediglich die senkrecht zur Betonierichtung entnommenen Bohrkern herangezogen.

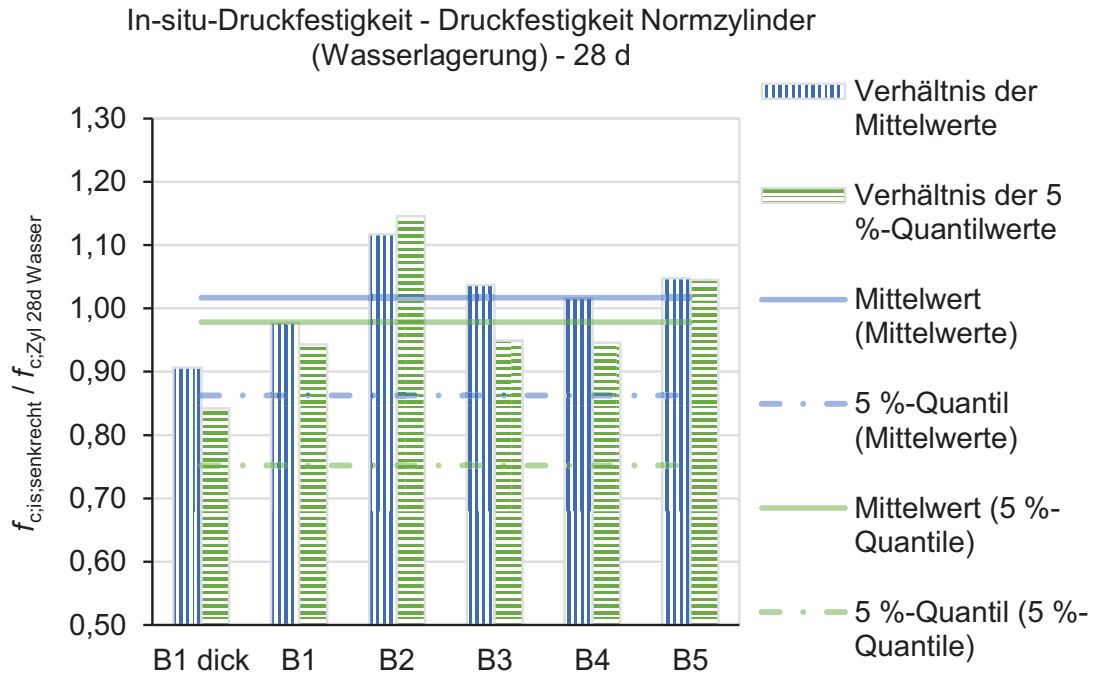


Abb. 7.37 Verhältnis der In-situ-Druckfestigkeit zur Druckfestigkeit von Laborprobekörpern (28 Tage Wasserlagerung)

Auch bei einer Wasserlagerung der Laborprobekörper bis zur Prüfung ist ein Unterschied zwischen der In-situ-Druckfestigkeit und der Druckfestigkeit von Laborprobekörpern feststellbar. Im Vergleich zu der Abb. 7.36 zugrunde liegenden Laborlagerung wirkt sich die Wasserlagerung offensichtlich günstig auf die Druckfestigkeit der Laborprobekörper aus. Der Mittelwert des Verhältnisses der mittleren Festigkeiten liegt mit 1,02 deutlich unterhalb des entsprechenden Wertes 1,10 bei einer Laborlagerung der Zylinder. Entgegen der Theorie nach *DIN 1045-2:2008-08* ist bei den hier betrachteten Untersuchungen die Druckfestigkeit des unter Wasser gelagerten Probekörpers im Mittel größer als die des trocken gelagerten Probekörpers. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die hier zugrunde liegende Laborlagerung von der Definition nach *DIN EN 12390-2:2009-08* (bei Prüfung im Alter von 28 Tagen: 1 Tag Schalung, 6 Tage Wasser, 21 Tage in einem geschlossenen Raum bei 15 bis 22°C und einer relativen Luftfeuchte von $(65 \pm 5) \%$) abweicht.

Darüber hinaus ist in Abb. 7.37 das Verhältnis zwischen den 5 %-Quantilwerten der Bauwerksfestigkeit und der Laborprobekörperfestigkeit bei Wasserlagerung im Alter von 28 Tagen dargestellt. Diese Größe ist direkt vergleichbar mit dem in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* beschriebenen Zusammenhang $f_{ck} / f_{ck, is} = \gamma_{conv} = 1,15$. Der Mittelwert des Verhältnisses der 5 %-Quantilwerte liegt für die hier betrachteten Bauteile bei 0,98. Der zugehörige 5 %-Quantilwert liegt mit 0,75 deutlich unterhalb des in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* enthaltenen Wertes. Analog zu den in Abschnitt 7.4 beschriebenen früheren Untersuchungen deutet dies darauf hin, dass der in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* enthaltene Werte $f_{ck} / f_{ck, is} = \gamma_{conv} = 1,15$ als Mittelwert, auf der sicheren Seite liegend, definiert wurde.

Die Variation der Wanddicke bei Betonmischung 1 bei sonst identischen Bedingungen zeigt, dass bei größeren Querschnittsabmessungen die In-situ-Druckfestigkeit abnimmt. Eine mögliche Ursache hierfür sind durch die größere Hydratationswärmeentwicklung bedingte thermische Eigenspannungen, welche zu einer erhöhten Mikrorissbildung führen können.

Sowohl der Art der Gesteinskörnung als auch der Festigkeit können keine verifizierbaren Einflüsse zugeordnet werden.

7.5.2.7 Verhältnis der Druckfestigkeit von Bauwerkbeton im Alter von 365 Tagen und Laborprobekörpern

Über die Bewertung der in-situ-Druckfestigkeiten an Wänden im Alter von 28 Tagen hinaus wurden aus Betonmischung 1 im Rahmen von Versuchsreihe 3 auch Wände für eine Untersuchung im Alter von 365 Tagen hergestellt. Zur Bewertung der Laborprobekörperfestigkeit wurden zusätzlich Zylinder für eine 28-tägige Wasserlagerung und anschließende Lagerung beim Bauteil für 337 Tage sowie Zylinder für eine 365-tägige Lagerung beim Bauteil hergestellt.

Auch hier werden lediglich die senkrecht zur Betonierichtung entnommenen Bohrkernkerne berücksichtigt. Die Höhenlage der Bohrkernentnahmestelle wird nicht gesondert bewertet.

In Abb. 7.38 ist das Verhältnis zwischen der In-situ-Druckfestigkeit und der Druckfestigkeit von Laborprobekörpern dargestellt. Bei den Laborprobekörpern wird dabei unterschieden zwischen einer Prüfung im Alter von 28 Tagen in Verbindung mit einer 28-tägigen Wasserlagerung sowie einer Prüfung im Alter von 365 Tagen, bei der die Laborprobekörper entweder 28 Tage im Wasser und anschließend 337 Tage im Freien beim Bauteil oder 365 Tage im Freien beim Bauteil gelagert wurden. Es ist jeweils das Verhältnis der mittleren Festigkeiten sowie das Verhältnis der 5 %-Quantilwerte dargestellt.

Betrachtet man zunächst das Verhältnis der In-situ-Druckfestigkeit im Alter von 365 Tagen zur Festigkeit von Laborprobekörpern im Alter von 28 Tagen bei 28-tägiger Wasserlagerung, so ist ein deutlicher Einfluss der Nacherhärtung zu verzeichnen. Die mittlere Bauwerksfestigkeit übersteigt die mittlere Festigkeit der Laborprobekörper für die verwendete Zementart um 17 bis 23 %. Der Vergleich der 5 %-Quantilwerte der Festigkeiten liefert einen Festigkeitsunterschied von 9 bis 15 %.

Der Vergleich der In-situ-Druckfestigkeit im Alter von 365 Tagen mit der Festigkeit von Laborprobekörpern mit einem Alter von ebenfalls 365 Tagen liefert deutlich geringere Werte. Je nach Lagerung der Laborprobekörper liegt das Verhältnis der mittleren Festigkeiten zwischen 0,90 und 0,99 und das Verhältnis der 5 %-Quantilwerte zwischen 0,89 und 1,01. Ursächlich für den Unterschied zum Festigkeitsvergleich mit Laborprobekörpern im Alter von 28 Tagen und durchgehender Wasserlagerung ist, dass bei der Verwendung von Laborprobekörpern mit einem Alter von 365 Tagen sowohl die wandartigen Bauteile, als auch die Laborprobekörper über einen Zeitraum von 365 Tagen nacherhärten können.

Somit wird deutlich, dass auch bei älteren Betonen, hier exemplarisch am Alter von 365 Tagen betrachtet, die In-situ-Druckfestigkeit geringer ist als die an gleichalten

Laborprobekörpern bestimmte Festigkeit. Die Einflüsse aus Bohrkernentnahme, unterschiedlicher Verdichtungsart, Art der Nachbehandlung und Bohrkernentnahmerichtung bleiben bestehen.

Für die dicken Wände kann bei sonst identischen Bedingungen eine kleinere In-situ-Druckfestigkeit bestimmt werden als für die dünnen Wände. Eine mögliche Ursache hierfür sind durch die größere Hydratationswärmeentwicklung bedingte thermische Eigenspannungen, welche zu einer erhöhten Mikrorissbildung führen können.

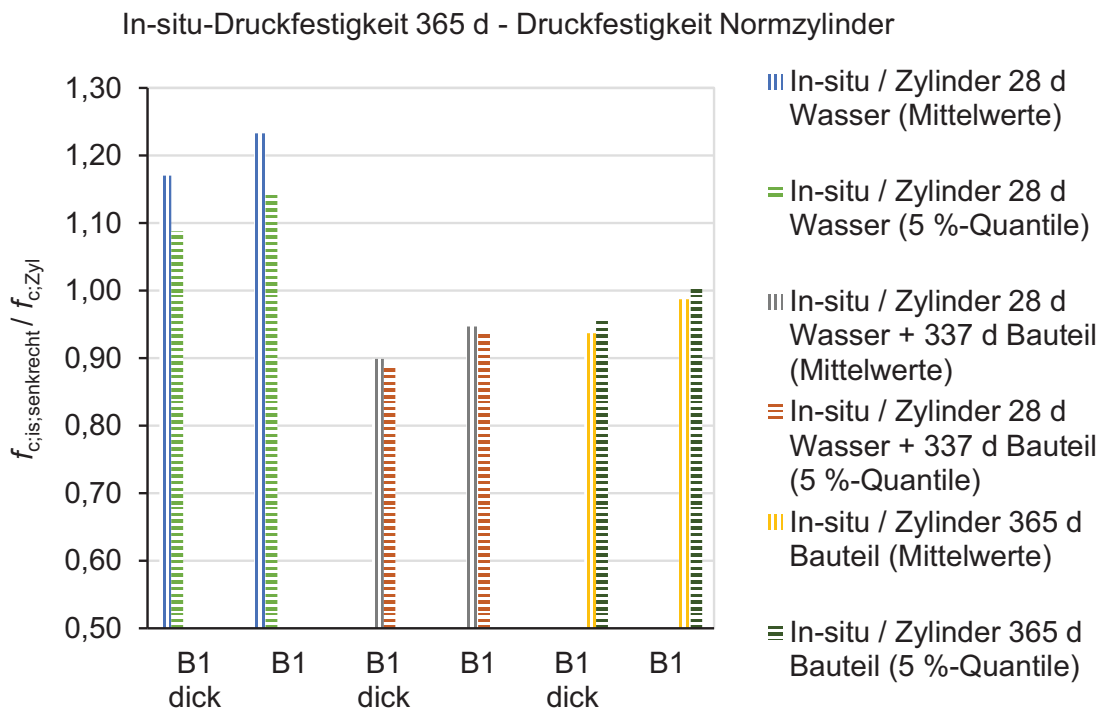


Abb. 7.38 Verhältnis der In-situ-Druckfestigkeit (365 d) zur Druckfestigkeit von Laborprobekörpern

7.6 Experimentelle Ermittlung der Korrelation des E-Moduls von Bohrkernen aus Bauwerkbeton und genormten Probekörpern

Über die Untersuchung der Betondruckfestigkeit hinaus wurden im Rahmen des DAfStb-Forschungsprojektes V 496 auch an den aus Betonmischung 1 hergestellten Wänden und Laborprobekörpern im Alter von 365 Tagen Untersuchungen zum Verhältnis des E-Moduls von Bauwerkbeton zum E-Modul von Laborprobekörpern durchgeführt. Sämtliche Einzelwerte der E-Modul-Prüfungen sind Anhang IV.7 zu entnehmen.

In Tab. 7.33 sind die mittleren E-Moduli der verschiedenen im Alter von 365 Tagen geprüften Probekörperarten dargestellt. Den jeweiligen Mittelwerten liegen vier bis sechs Einzelwerte zugrunde. Die Bohrkern zur E-Modulprüfung wurden in mittlerer Höhenlage (Achse 2 bis 4) aus den Wänden entnommen, weswegen der Einfluss der Höhenlage der Bohrkernentnahmestelle auf das Ergebnis der E-Modul-Prüfung als vernachlässigbar eingestuft werden kann.

Zur Bewertung der E-Moduli des Bauwerkbetons wurde der mittlere an Zylindern, die wie die Wände 365 Tage im Freien gelagert wurden, im Alter von 365 Tagen bestimmte E-Modul als Vergleichsgröße verwendet.

Tab. 7.33 Vergleich E-Modul Bauwerkbeton und Laborprobekörper

		Zylinder / 365 d im Freien	Zylinder / 28 d Wasser + 337 d im Freien	Bohrkerne / Wand dünn / 365 d im Freien / senkrecht	Bohrkerne / Wand dünn / 365 d im Freien / parallel	Bohrkerne / Wand dick / 365 d im Freien / senkrecht	Bohrkerne / Wand dick / 365 d im Freien / parallel
$E_{cm,i}$	[N/mm ²]	30400	31160	29780	31080	28166	27850
$E_{cm,i}$							
$\frac{E_{cm,i}}{E_{cm; Zyl; 365 d \text{ im Freien}}}$	[-]	1,00	1,03	0,98	1,02	0,93	0,92

Für die vergleichsweise dünne Wand entspricht der E-Modul des Bauwerkbetons nahezu dem E-Modul der zugehörigen Laborprobekörper. Bei der dicken Wand hingegen erreicht der E-Modul des Bauwerkbetons lediglich 92 bis 93 % des E-Moduls der zugehörigen Laborprobekörper. Als mögliche Ursache hierfür kommen die Qualität der Verdichtung sowie Mikrorissbildung infolge thermischer Eigenspannungen aus Hydratationswärme in Frage. Ein Einfluss der Bohrkernentnahmerichtung kann nicht festgestellt werden.

7.7 Zwischenfazit

7.7.1 Druckfestigkeit

Sowohl die durchgeführte Literaturrecherche als auch die Untersuchungen an wandartigen Bauteilen deuten auf einen teilweise signifikanten Unterschied zwischen der tatsächlich am Bauwerk vorliegenden In-situ-Druckfestigkeit und der Festigkeit der zugehörigen Laborprobekörper hin. Dabei spielen u. a. die Zusammensetzung der Betonmischung einschließlich der gewählten Zementart, das Bauwerksalter, die Verdichtung, die Nachbehandlung, die Bohrkernentnahme, die Bohrkernentnahmerichtung in Bezug auf die Betonierichtung, die Festigkeit, die Bauteilart sowie die Lage der Bohrkernentnahmestelle eine Rolle.

Die durchgeführten Untersuchungen lassen auf einen bei sachgerechtem Vorgehen vernachlässigbaren Einfluss des Bohrvorganges bei der Bohrkernentnahme rückschließen. Unter sachgerecht ist in diesem Zusammenhang eine ausreichende Befestigung und Führung des Bohrgerätes während der Bohrkernentnahme sowie die Einhaltung des in *DIN EN 12504-1:2009-07* geforderten Höchstwertes des

Verhältnisses des Größtkorndurchmessers der Gesteinskörnung zum Bohrkern-durchmesser von 1:3 zu verstehen.

Sowohl die in der Literatur dokumentierten als auch die eigenständig durchgeführten Untersuchungen weisen einen nicht vernachlässigbaren Einfluss der Bohrkernentnahmerichtung in Bezug auf die Betonierrichtung auf. Bei den Untersuchungen an wandartigen Bauteilen wurde senkrecht zur Betonierrichtung eine im Mittel um 3 % niedrigere Druckfestigkeit als parallel zur Betonierrichtung bestimmt. Dieser Wert liegt innerhalb des in *DIN EN 13791:2008-05* angegebenen Wertebereichs von 0 bis 8 %.

Darüber hinaus kann an den im Rahmen der Literaturrecherche bewerteten Untersuchungen an Stützen und Wänden ein Einfluss der Höhenlage der Bohrkernentnahmestelle auf die Druckfestigkeit festgestellt werden. Direkt an der Bauteiloberseite wird zumeist die kleinste Druckfestigkeit bestimmt. Im unteren Bauteilbereich ändert sich die Druckfestigkeit meist nur noch geringfügig. Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen an wandartigen Bauteilen mit einer Höhe von 1,50 m konnte ein derartiger Effekt nicht beobachtet werden, was vermutlich durch die geringe Bauteilhöhe zu begründen ist.

Weiterhin geht aus der Literaturrecherche hervor, dass mit Zunahme des Porenvolumens um ca. 1 % die Druckfestigkeit um bis zu 8 % abnimmt.

Für die zuvor genannten Parameter ist eine detaillierte und getrennte Bewertung des jeweiligen Einflusses schwierig, da versuchsbedingt meist nur eine Überlagerung verschiedener Effekte beobachtet werden kann. Dies spiegelt sich auch in den Bemessungsregeln von Neubauwerken wider.

Der Bemessung von Neubauwerken liegt nach *Fingerloos et al. 2016* ein pauschales Verhältnis $f_{ck} / f_{ck, is} = \gamma_{conv} = 1,15$ ($f_{ck, is} / f_{ck} = 0,87$) zugrunde, welches im Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_C = 1,50$ enthalten ist. f_{ck} beschreibt dabei den charakteristischen Wert der Laborprobekörperdruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen und $f_{ck, is}$ die zugehörige charakteristische In-situ-Betondruckfestigkeit. Entsprechende Regelungen sind in *DIN EN 13791:2008-05* enthalten, in welcher für das Verhältnis der Druckfestigkeit von Bauwerkbeton zur charakteristischen Druckfestigkeit von genormten Probekörpern ein Wert von 0,85 angegeben wird.

Die Zusammenfassung früherer Untersuchungen über alle Bauteilarten hinweg zeigt für einen Vergleich der mittleren Festigkeiten im Alter von 28 Tagen eine sehr große Streubreite. Das Verhältnis zwischen mittlerer In-situ- und Laborprobekörperdruckfestigkeit liegt in einem Bereich zwischen 0,51 und 1,64. Der zugehörige Mittelwert liegt mit 0,89 leicht oberhalb des normativ festgelegten Wertes 0,85. Die 5 %- und 10 %-Quantilwerte des Verhältnisses liegen mit 0,60 und 0,66 deutlich unterhalb des Wertes 0,85. Tendenziell kann mit zunehmender Druckfestigkeit eine leichte Abnahme des Verhältnisses verzeichnet werden. Ein allgemeingültiger Einfluss der Bauteilart (z. B. Wand, Stütze etc.) ist nicht feststellbar. Das Verhältnis der 5 %-Quantilwerte der In-situ- und der Laborprobekörperdruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen liegt bei den betrachteten historischen Untersuchungen in einem Bereich zwischen 0,47 und 1,43. Der zugehörige Mittelwert entspricht mit 0,84 nahezu dem

normativ festgelegten Wert 0,85. Die 5 %- und 10 %-Quantilwerte liegen mit 0,44 und 0,54 ebenfalls deutlich unterhalb.

Der normativ festgelegte Wert nach *DIN EN 13791:2008-05* basiert somit offensichtlich auf dem mittleren Verhältnis der 5 %-Quantilwerte der Druckfestigkeiten bei einem Probekörperalter von 28 Tagen. Die Streuung des Verhältnisses wird offensichtlich nicht im Umrechnungsfaktor $\gamma_{\text{conv}} = 1,15$ berücksichtigt.

Die eigenen Untersuchungen an wandartigen Bauteilen zeigen, dass dieser Wert das Verhältnis der In-situ-Druckfestigkeit zur Druckfestigkeit von Laborprobekörpern mit ausreichender Genauigkeit beschreibt. Das Verhältnis der 5 %-Quantilwerte der Festigkeiten bei 28-tägiger Wasserlagerung der Laborprobekörper liegt in einem Bereich von 0,84 bis 1,15 und im Mittel bei 0,98. Der normativ festgelegte Wert von 0,85 liegt damit auf der sicheren Seite.

Grundsätzlich ist bei der Bewertung der in Abschnitt 7.5 beschriebenen Untersuchungen an wandartigen Bauteilen und zugehörigen Laborprobekörpern zu beachten, dass die Bauteile unter baustellenähnlichen Bedingungen im Labor hergestellt wurden. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die Bauteile während der Lagerung bis zu einem Alter von 365 Tagen unbelastet waren. Der Einfluss von Dauerlasten, welche sich durch (Mikro-) Rissbildung auf die In-situ-Druckfestigkeit auswirken können, ist somit nicht Gegenstand der hier durchgeführten Untersuchungen.

Bei der Nachrechnung von Bestandtragwerken spielt jedoch weniger das Verhältnis der In-situ- zur Laborprobekörperfestigkeit im Alter von 28 Tagen eine Rolle, als vielmehr das Verhältnis im Alter von mehreren Jahren. Im Rahmen verschiedener früherer Untersuchungen wurde das Verhältnis der mittleren In-situ- zur mittleren Laborprobekörperdruckfestigkeit im Alter von 365 Tagen betrachtet. Auch im Alter von 365 Tagen konnte ein deutlicher Unterschied zwischen der tatsächlichen In-situ-Druckfestigkeit und der Druckfestigkeit der zugehörigen Laborprobekörper festgestellt werden. Das Verhältnis liegt in einem Bereich zwischen 0,38 und 1,46. Der Mittelwert beträgt 0,93. Die Werte für das 5 %- und 10 %-Quantil sind mit 0,63 und 0,70 wieder deutlich kleiner.

Diese Beobachtungen können auch auf Betone mit einem Alter von mehreren Jahren übertragen werden, da in einem Alter von 365 Tagen meist ein Großteil der Nacherhärtung bereits abgeschlossen ist.

Ein Vergleich der In-situ-Druckfestigkeit im Alter von 365 Tagen mit der Laborprobekörperfestigkeit im Alter von 28 Tagen ist wenig zielführend, da die Auswirkungen der Nacherhärtung dominieren.

Für ein Alter von 365 Tagen oder mehr lagen bisher keine Untersuchungen zum Verhältnis der 5 %-Quantilwerte der In-situ- und Laborprobekörperdruckfestigkeit vor, weshalb im Rahmen der eigenen, an wandartigen Bauteilen durchgeführten Untersuchungen auch ein Probekörperalter von 365 Tagen betrachtet wurde. Für das Verhältnis der 5 %-Quantilwerte der Festigkeiten konnte ein Wertebereich von 0,89 bis 1,01 ermittelt werden. Bedingt durch u. a. Art der Verdichtung, Bohrkernentnahme und Richtung der Bohrkernentnahme in Bezug auf die Betonierichtung ist somit auch im

Alter von 365 Tagen oder mehr ein Unterschied zwischen der In-situ- und der Laborprobekörperdruckfestigkeit zu berücksichtigen.

Bei der Bestimmung des Nachrechnungswertes der Betondruckfestigkeit durch Umrechnung historischer Festigkeitsdefinitionen, wie z. B. in Abschnitt 3.4.2 beschrieben, ist somit grundsätzlich der Unterschied zwischen der Druckfestigkeit von Laborprobekörpern und der tatsächlich am Bauwerk vorliegenden In-situ-Druckfestigkeit zu berücksichtigen. Das für ein Probekörperalter von 28 Tagen definierte Verhältnis von 0,85 beschreibt auch das Verhältnis der Festigkeiten im Alter von mehreren Jahren mit ausreichender Genauigkeit. Auf eine Anpassung des für den Neubaufall in der ständigen und vorübergehenden Bemessungssituation definierten Teilsicherheitsbeiwertes der Betondruckfestigkeit $\gamma_c = 1,50$ kann deshalb verzichtet werden.

Bei der Bestimmung des Nachrechnungswertes der In-situ-Druckfestigkeit durch Bohrkernentnahme und anschließender Druckfestigkeitsprüfung darf bei Verwendung des für den Neubaufall in der ständigen und vorübergehenden Bemessungssituation definierten Teilsicherheitsbeiwertes der Betondruckfestigkeit $\gamma_c = 1,50$ der 5 %-Quantilwert der In-situ-Betondruckfestigkeit mit dem Faktor $1/0,85$ erhöht werden. Dadurch wird berücksichtigt, dass im Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_c = 1,50$ der Unterschied zwischen In-situ- und Laborprobekörperdruckfestigkeit enthalten ist, der bei Bestimmung der In-situ-Betondruckfestigkeit am Bauwerk direkt erfasst wird.

Allgemein zeigen die beschriebenen Untersuchungen einen teilweise erheblichen Effekt der Nacherhärtung. Um diesen Festigkeitszugewinn zu berücksichtigen, ist es daher in aller Regel lohnenswert, die tatsächlich am Bauwerk vorliegende Druckfestigkeit durch Bohrkernentnahme am Bauwerk zu bestimmen.

7.7.2 Zugfestigkeit

Die Untersuchungen von Rostásy (*DAfStb 408*) zeigen, dass das für die Druckfestigkeit ermittelte Verhältnis nicht ohne weitere Überlegungen auf die Betonzugfestigkeit übertragen werden kann. Die vorliegenden Ergebnisse streuen in einem sehr großen Bereich und sind im Mittel größer als 1,0. Dies bedeutet, dass die am Bauwerk vorliegende Betonzugfestigkeit größer als die an Laborprobekörpern bestimmte ist. Die Ableitung einer allgemeingültigen Aussage hieraus ist für die Praxis nicht zu empfehlen, da in *DAfStb 408* hierfür keine Begründung genannt wird und der Umfang der vorliegenden Untersuchungen sehr gering ist.

Die in *Thiele u. Weber 2016*, *Weber u. Thiele 2016* und *Weber u. Thiele 2018* beschriebenen Untersuchungen (vgl. Kapitel 9) bestätigen hingegen den in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* für 28 Tage-Festigkeitsangegebenen Zusammenhang zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit auch für an Bohrkernen aus Bestandtragwerken bestimmte In-situ-Festigkeitswerte. Demzufolge liegt basierend auf dem zuvor bestätigten Verhältnis von In-situ-Druckfestigkeit und Druckfestigkeit des Normprobekörpers von 0,85 auch die In-situ-Zugfestigkeit unterhalb der an Normprobekörpern bestimmten.

7.7.3 E-Modul

Die Untersuchungen des E-Moduls an wandartigen Bauteilen im Alter von 365 Tagen liefern für das Verhältnis des E-Moduls des Bauwerkbetons zum E-Modul der Laborprobekörper Werte zwischen 0,92 und 1,02. Speziell bei dickeren Wänden (im Versuch $d = 65$ cm) ist ein Unterschied zwischen dem E-Modul des Bauwerkbetons und dem der Laborprobekörper festzustellen.

Für die Bemessung wandartiger Bauteile wird daher ein Verhältnis des E-Moduls des Bauwerkbetons zum E-Modul von Laborprobekörpern von 1,0 empfohlen. Bauteile mit großen Querschnittsdicken sind gesondert durch Untersuchungen am Bauwerk zu beurteilen, wenn der E-Modul einen maßgebenden Einfluss auf das Ergebnis der Nachrechnung hat.

Ein Einfluss der Bohrkernentnahmerichtung auf den E-Modul des Bauwerkbetons kann, wie in Abschnitt 7.6 gezeigt, nicht festgestellt werden.

Allgemein ist jedoch zu beachten, dass sowohl für die am Bauwerk anzutreffende Zugfestigkeit als auch für den E-Modul die Datengrundlage bisher wenig umfangreich ist, weshalb zur Absicherung der Erkenntnisse weitere Untersuchungen erforderlich sind.

8 Dauerstandseffekte bei der Bestimmung des Nachrechnungswertes der In-situ-Betondruckfestigkeit

8.1 Einführung in die Thematik

Gemäß *DIN EN 1992-1-1:2011-01* ist die an genormten Laborprüfkörpern nach *DIN EN 12390 - Teil 1-3* ermittelte Betondruckfestigkeit mit dem auch als Dauerstandsbeiwert bezeichneten Faktor $\alpha_{cc} = 0,85$ abzumindern, wodurch der Unterschied zwischen Kurzzeit- und Dauerstandsfestigkeit berücksichtigt wird. Die Hintergründe zu diesem sich ausschließlich auf den Neubaufall beziehenden Faktor wurden bereits in *Brachmann et al. 2016* gründlich aufbereitet.

Aufgrund verschiedener last- und/oder zeitabhängigen Einflussgrößen kann der im Neubaufall anzusetzende Dauerstandsbeiwert $\alpha_{cc} = 0,85$ nicht ohne weitere Überprüfung auch auf die Bestimmung des Nachrechnungswertes der Betondruckfestigkeit übertragen werden. Bisher ungeklärt ist in diesem Zusammenhang vor allem, ob durch eine Bestimmung der Betondruckfestigkeit an aus im Gebrauchszustand langanhaltend belasteten Bestandstragwerken entnommenen Bohrkernen bereits Dauerstandseffekte erfasst werden.

Hinweise zum Umgang mit dem Faktor α_{cc} bei einer Bestimmung des Nachrechnungswertes der Betondruckfestigkeit basierend auf einer Untersuchung an aus dem Bauteil entnommenen Bohrkernen liegen bisher nicht vor. In *DAfStb 619* wird bis dato auf der sicheren Seite liegend empfohlen, auch für die Bestimmung des Nachrechnungswertes der Betondruckfestigkeit $\alpha_{cc} = 0,85$ zu verwenden.

Zur Bewertung von Dauerstandseffekten bei der Bestimmung des Nachrechnungswertes der In-situ-Betondruckfestigkeit wurden im Rahmen des vom DBV (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E. V.) geförderten Forschungsprojektes 313 im Zuge dieser Arbeit die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen durchgeführt.

8.2 Normative Regelungen zur Berücksichtigung von Dauerstandseffekten nach DIN EN 1992-1-1

Betonkonstruktionen sind in der Regel während ihrer Nutzungszeit ruhenden, sich nur wenig ändernden Beanspruchungen ausgesetzt. Bei hohen, über längere Zeiträume wirkenden Druckspannungen neigt Beton zu einer Mikrorissbildung, welche die maximal dauerhaft aufnehmbare Druckspannung reduziert. Je höher das Spannungsniveau, desto kürzer die Zeit bis zum Versagen. Als Dauerstandsfestigkeit ist in diesem Zusammenhang die Druckspannung definiert, die der Beton beliebig lange ertragen kann. Für das Verhältnis zwischen der Dauerstandsfestigkeit und der Druckfestigkeit bei kurzzeitiger Beanspruchung - wie sie im Zuge der Materialprüfung wirkt - wird in *Fingerloos et al. 2016* in Anlehnung an Abb. 8.1 für einen ab einem Alter von 28 Tagen belasteten Beton ein Wert von ca. 80 % angegeben.

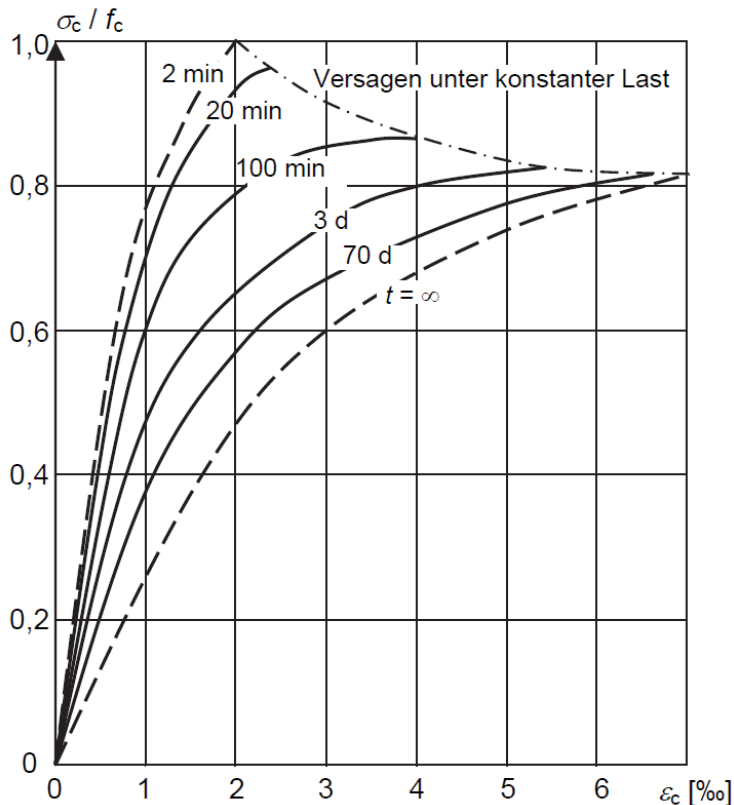


Abb. 8.1 Spannungs-Dehnungslinie für verschiedene Belastungsdauern aus Rüschi 1960

Zur Bestimmung des Bemessungswertes der Betondruckfestigkeit ist gemäß Gleichung (7.1) nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* die an genormten Laborprüfkörpern definierte Betondruckfestigkeit mit dem Faktor $\alpha_{cc} = 0,85$ zu multiplizieren. Für unbewehrte Betonbauteile gilt $\alpha_{cc} = 0,70$. Nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* ist α_{cc} als Beiwert zur Berücksichtigung von Langzeitauswirkungen auf die Betondruckfestigkeit und von ungünstigen Auswirkungen durch die Art der Beanspruchung definiert.

Bei einer Bestimmung der Betondruckfestigkeit in einem Alter von $t > 28$ Tagen ist nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* der Beiwert α_{cc} mit dem Faktor k_t abzumindern, wobei in diesem Zusammenhang für α_{cc} gemäß *EN 1992-1-1:2004-12* ein Wert von 1,0 gilt, was auf einem Belastungsbeginn nicht später als 28 Tage basiert. Der empfohlene Wert nach *EN 1992-1-1:2004-12* beträgt $k_t = 0,85$. Nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* ist k_t entsprechend der Festigkeitsentwicklung im Einzelfall festzulegen. Durch den Faktor k_t wird das Nacherhärtungspotenzial zur Kompensation von Dauerstandseffekten (vgl. Abb. 8.3) berücksichtigt, welches bei einer Bestimmung der Betondruckfestigkeit im Alter von nicht mehr als 28 Tagen größer ist als zu einem späteren Zeitpunkt. Bei einer Verwendung des in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* empfohlenen Wertes $\alpha_{cc} = 0,85$ und einer Bestimmung der Betondruckfestigkeit für ein Alter von bis zu 91 Tagen, ist nach *Fingerloos et al. 2016* eine weitere Reduktion des Dauerstandsbeiwertes mit dem Faktor k_t nicht erforderlich.

Nach *DAfStb 600* werden in dem Faktor $\alpha_{cc} = 0,85$ zusätzlich zu den Dauerstandseffekten auch die deterministisch beschreibbaren Unterschiede zwischen der am Probekörper ermittelten Druckfestigkeit und der Festigkeit im Bauteil (d. h. der Unterschied zwischen der Zylinderdruckfestigkeit und der tatsächlichen, einachsialen

Druckfestigkeit im Bauteil (vgl. *Zilch u. Zehetmaier 2008*) berücksichtigt. Der Ansatz nach *DAfStb 600* ist auf frühere Normausgaben wie z. B. *DIN 1045-1:2008-08* (siehe Abschnitt 8.3.3) sowie *Bonzel et al. 1972* (siehe Abschnitt 8.3.2) zurückzuführen. In der aktuell in Deutschland anzuwendenden *DIN EN 1992-1-1:2011-01* ist kein entsprechender Hinweis enthalten. Unterschiede zwischen der Bauwerks- und der Normprobekörperfestigkeit werden nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* wie in Kapitel 7 beschrieben über den Teilsicherheitsbeiwert γ_c erfasst.

8.3 Aufarbeitung früherer Untersuchungen und verschiedener Regelwerke

8.3.1 Untersuchungen von Rüschi et al.

8.3.1.1 Allgemeines

In *Brachmann et al. 2016* werden zur Klärung der Herkunft des in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* enthaltenen Dauerstandsbeiwertes $\alpha_{cc} = 0,85$ Untersuchungen von Rüschi aus den Jahren 1956 (*Rüschi 1956*) und 1960 (*Rüschi 1960*) sowie Grasser aus dem Jahr 1968 (*Grasser 1968*) zum Einfluss der Belastungsdauer auf die Betondruckfestigkeit zusammengefasst. Als Einflussgrößen werden dabei die folgenden Parameter aufgeführt:

- Belastungsart (Art der Lastaufbringung),
- Belastungsniveau,
- Betonfestigkeitsklasse und Zusammensetzung,
- Nacherhärtung und
- Gefügelockerung

welche im Nachfolgenden näher erläutert werden.

8.3.1.2 Belastungsart (Art der Lastaufbringung)

Bei der Bewertung des Einflusses der Belastungsart wird in *Rüschi 1956* zwischen einer weg- und einer kraftgesteuerten Lastaufbringung unterschieden. Bei weggesteuerten Versuchen mit einem konstanten Dehnungsniveau (d. h. nach Aufbringung der Last konstante Dehnung) konnte das maximale Belastungsniveau (Last bezogen auf die im Kurzzeitversuch ermittelte Versagenslast, welche dem Wert 100 % entspricht) jeweils nur für eine sehr kurze Zeit gehalten werden.

Für identische Versagenszeitpunkte, d. h. gleiche Belastungsdauer, konnte für kraftgesteuerte Versuche mit einem konstanten Belastungsniveau ca. 5 bis 10 % niedrigere Versagenslasten als bei weggesteuerten Versuchen mit konstantem Dehnungsniveau festgestellt werden.

Der tatsächlich am Bauwerk vorliegende Zustand kann in den meisten Fällen durch eine kraftgesteuerte Lastaufbringung mit konstantem Lastniveau beschrieben werden.

8.3.1.5 Nacherhärtung

Ausgehend von einer Betondruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen, welche als Bezugsgröße dem Wert 100 % entspricht, wird in *Brachmann et al. 2016* für ein Alter von 90 Tagen für hochfesten Zement eine Festigkeitssteigerung von ca. 10 % und für normalen Zement eine Steigerung um ca. 22 % angegeben (für Betone nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* siehe Abb. 7.24).

8.3.1.6 Gefügelockerung

Bedingt durch Querkzugspannungen können nach *DAfStb 232* unter Dauerbelastungen Gefügelockerungen oder –zerstörungen entstehen. Durch Überschreitung der Betonzugfestigkeit können sich Mikrorisse bilden. Tendenziell gilt: Je höher das Belastungsniveau ist, desto größer ist die Länge der Mikrorisse. Durch die Vereinigung mehrerer Mikrorisse kann es zur Makrorissbildung und damit einhergehend zum Dauerstandsversagen kommen.

8.3.1.7 Überlagerung von Nacherhärtung und Gefügelockerung

Durch Überlagerung der beiden gegenläufigen Effekte aus Nacherhärtung und Gefügelockerung bildet sich in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung, der Zementart und dem Zeitpunkt der Belastung wenige Tage nach dem Belastungsbeginn ein Minimum der aufnehmbaren Last aus. In Abb. 8.3 ist der schematische Festigkeitsverlauf für im Alter von 28 Tagen belastete Probekörper dargestellt. Bis zu einer Belastungsdauer von ca. 10 Tagen überwiegt der Einfluss der durch die Dauerlast verursachten Gefügelockerung. Bei weiter fortschreitendem Alter steigt die Druckfestigkeit bedingt durch die Nacherhärtung wieder an. Im Alter von mehreren Jahren kann sich bedingt durch die Gefügelockerung erneut ein Wendepunkt ausbilden. Die Festigkeit sinkt jedoch gemäß Abb. 8.3 nur in geringem Maße. Für übliche Bemessungszeiträume unterschreitet die Druckfestigkeit das im Alter von ca. 10 Tagen vorliegende Minimum jedoch nicht.

Vergleichbare Effekte werden auch in *DAfStb 232* im Rahmen einer Zusammenfassung der in *DAfStb 198* beschriebenen Untersuchungen beobachtet. Wie Abb. 8.4 zu entnehmen ist, nimmt sowohl für ein mit T_1 gekennzeichnetes Belastungsalter von 28 bis 31 Tagen als auch für ein Belastungsalter von 48 bis 57 Tagen die Festigkeit über die Dauer $t_x - T_1$, wo sie, bedingt durch die Gefügelockerung, ihr Minimum erreicht, zunächst ab. Für höhere Belastungsdauern steigen die Kurven wieder an, was bedeutet, dass die Festigkeitssteigerung durch die Nacherhärtung dominiert.

Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass bedingt durch Nacherhärtung und Gefügelockerung auch das Betonalter bei Erstbelastung die Dauerstandsfestigkeit beeinflusst.

Ein Dauerstandsversagen tritt somit üblicherweise innerhalb eines bestimmten Belastungszeitraumes, der auch als kritische Standzeit bezeichnet wird, auf. Sofern innerhalb der kritischen Standzeit kein Bruch eintritt, besteht bei unverändertem Belastungsniveau auch in höherem Alter keine Gefahr des Dauerstandsversagens mehr.

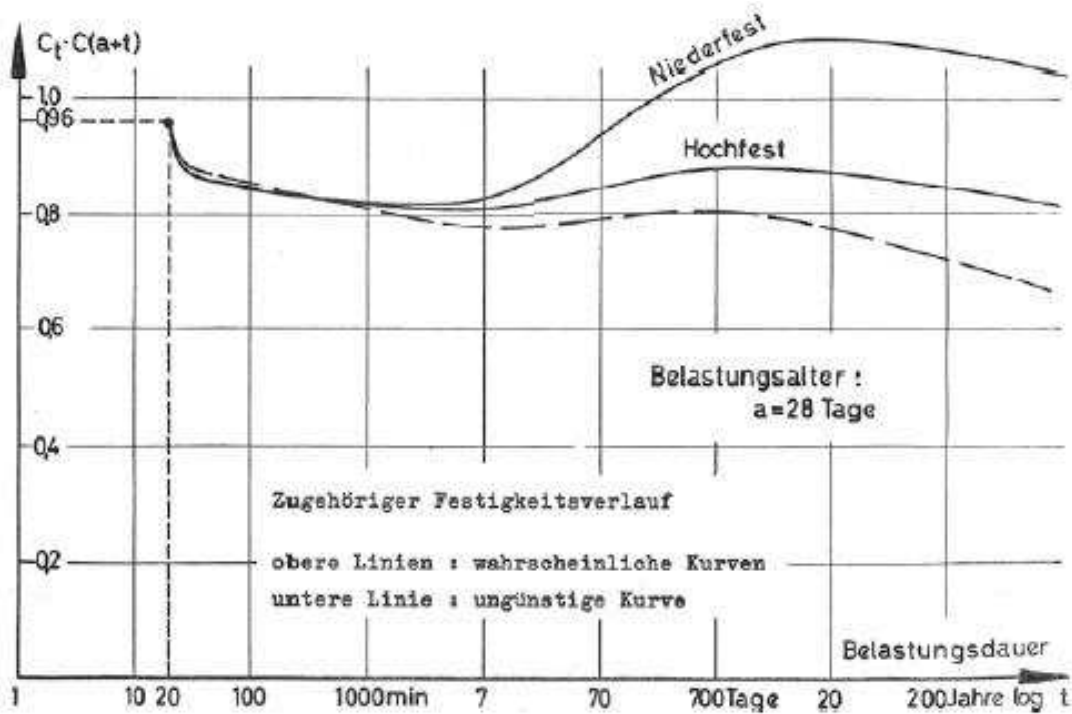


Abb. 8.3 Schematischer Verlauf der Druckfestigkeit unter Dauerlast aus Rüsç et al. 1961

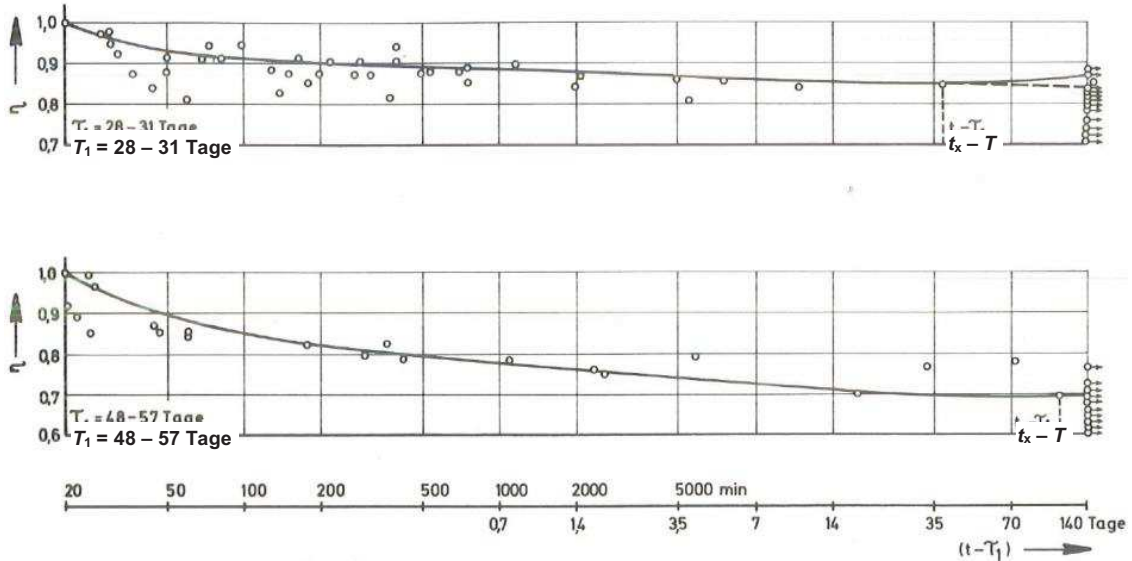


Abb. 8.4 Festigkeitsabfall unter Dauerlast aus DAfStb 232 und DAfStb 198

8.3.2 DIN 1045:1972

In *DIN 1045:1972-01* wird zwischen der Nennfestigkeit des Betons β_{WN} und dem Rechenwert β_R , welcher 70 % der Nennfestigkeit beträgt, unterschieden. Die am Laborwürfel definierte Betonnennfestigkeit ist zur Ermittlung der für die Bemessung maßgebenden, größtmöglichen Druckspannung des Betons noch abzumindern, um eine ausreichende Tragwerkszuverlässigkeit gewährleisten zu können. Nach *Bonzel et al. 1972* wird durch die Abminderung der Unterschied zwischen der gegenüber der Würfeldruckfestigkeit verminderten Prismenfestigkeit sowie die verminderte Dauerstandsfestigkeit gegenüber der Kurzzeitfestigkeit berücksichtigt.

Der Unterschied zwischen der Würfeldruckfestigkeit und der Prismenfestigkeit wird in *Bonzel et al. 1972* mit dem Faktor 0,85 und die verminderte Dauerstandsfestigkeit mit dem Faktor 0,82 beschrieben. Das Produkt aus beiden Werten beträgt 0,70.

8.3.3 DIN 1045-1:2008

Für den Bemessungswert der Betondruckfestigkeit wird in *DIN 1045-1:2008-08* der bereits in Gleichung (7.1) genannte Zusammenhang aufgeführt. Der Faktor α_{cc} , welcher in *DIN 1045-1:2008-08* lediglich als α bezeichnet ist, wird dort als Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung von Langzeitauswirkungen auf die Druckfestigkeit sowie zur Umrechnung zwischen Zylinderdruckfestigkeit und einachsialer Druckfestigkeit des Betons beschrieben. Für Normalbeton wird für α ein Wert von 0,85 angegeben. Eine weitere Aufgliederung des Faktors α ist nicht enthalten.

8.3.4 fib Model Code for Concrete Structures 2010 (MC 2010)

Im *fib Model Code 2010* wird zur Berechnung des Bemessungswertes der Betondruckfestigkeit ebenfalls der bereits in Gleichung (7.1) nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* beschriebene Zusammenhang genannt. Der Faktor α_{cc} wird dabei als Beiwert zur Berücksichtigung von Langzeitauswirkungen auf die Betondruckfestigkeit und von ungünstigen Auswirkungen durch die Art der Beanspruchung definiert. Für normale Bemessungssituationen wird ein Wert von 1,0 empfohlen. Als Begründung hierfür wird genannt, dass durch den Anstieg der Druckfestigkeit über 28 Tage hinaus die Auswirkungen der mit einer Dauerbelastung einhergehenden Gefügelockerung kompensiert werden können.

8.3.5 Neuregelung nach prEN 1992-1-1:2017

Zur Bestimmung des Bemessungswertes der Betondruckfestigkeit wird in *prEN 1992-1-1:2017-10* der in Gleichung (8.1) angegebene Zusammenhang genannt. Im Vergleich zu dem in Gleichung (7.1) beschriebenen, bisher gebräuchlichen Zusammenhang zur Berechnung des Bemessungswertes der Betondruckfestigkeit wurde der Faktor k_{tc} ergänzt, welcher nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* (vgl. Abschnitt 8.2) mit 1,0 nicht gesondert zu berücksichtigen ist. Vor diesem Hintergrund erfolgt in *prEN 1992-1-1:2017-10* auch eine Neudefinition der Faktoren α_{cc} und k_{tc} . Der Einfluss hoher Dauerlasten wird über den Faktor k_{tc} berücksichtigt, während der Faktor α_{cc} den Unterschied zwischen der ungestörten Zylinderdruckfestigkeit und der effektiven, tatsächlich am Bauwerk vorliegenden Druckfestigkeit beschreiben soll. Zugehörige Hintergrundberichte oder Forschungsergebnisse, welche die Wahl und Definition der beiden Faktoren α_{cc} und k_{tc} bestätigen sind nicht bekannt. Inwieweit im Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_c = 1,50$ ebenfalls Unterschiede zwischen der Bauwerks- und der Normprobekörperdruckfestigkeit enthalten sind, geht aus dem vorliegenden Entwurf *prEN 1992-1-1:2017-10* nicht hervor.

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot k_{tc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (8.1)$$

mit:

γ_c Teilsicherheitsbeiwert für Beton; nach *prEN 1992-1-1:2017-10* gilt für die ständige und vorübergehende Bemessungssituation $\gamma_c = 1,50$

α_{cc} Faktor zur Berücksichtigung des Unterschiedes zwischen der ungestörten Zylinderdruckfestigkeit und der effektiven, tatsächlich am Bauteil vorliegenden Druckfestigkeit

k_{tc} Faktor zur Berücksichtigung des Effektes hoher Dauerlasten auf die Betondruckfestigkeit

Der Faktor α_{cc} wird mit dem in Gleichung (8.2) und Abb. 8.5 dargestellten Zusammenhang in Abhängigkeit von der charakteristischen Betondruckfestigkeit für den definierten Anwendungsbereich von *DIN EN 1992-1-1:2011-01* beschrieben.

$$\alpha_{cc} = \left(\frac{30 \text{ MPa}}{f_{ck}} \right)^{1/3} \leq 1,0 \quad (8.2)$$

Für den Faktor k_{tc} , welcher im jeweiligen Nationalen Anhang landestypisch festgelegt werden kann, wird in *prEN 1992-1-1:2017-10* der Wert 1,0 empfohlen.

Im Vergleich zu *DIN EN 1992-1-1:2011-01* führt *prEN 1992-1-1:2017-10* ab $f_{ck} \approx 50 \text{ N/mm}^2$ zu einer deutlich größeren Abminderung der Betondruckfestigkeit.

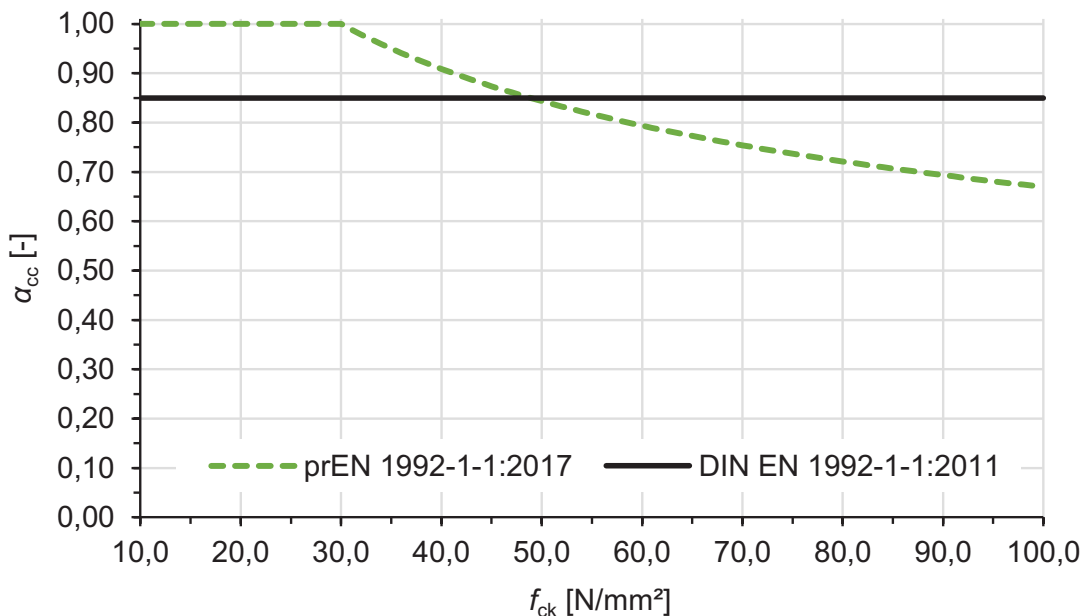


Abb. 8.5 α_{cc} nach *prEN 1992-1-1:2017-10*

Eine Bewertung des Bemessungsergebnisses nach *prEN 1992-1-1:2017-10* allein basierend auf der Neudefinition des Faktors α_{cc} ist jedoch wenig zielführend. Stattdessen wären insbesondere bei Betonen mit höherer Festigkeit weitere Größen wie z. B. die zulässige Betonstauchung zu berücksichtigen, was jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass *prEN 1992-1-1:2017-10* bisher lediglich im Entwurfsstatus vorliegt. Zugehörige Anwendungs- und Erläuterungsdokumente stehen ebenfalls noch nicht zur Verfügung

Vor diesem Hintergrund liegt den nachfolgend beschriebenen eigenen Untersuchungen der in Gleichung (7.1) beschriebene Zusammenhang nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* mit der Annahme, dass α_{cc} nur Langzeitauswirkungen auf die Betondruckfestigkeit und ungünstige Auswirkungen durch die Art der Beanspruchung berücksichtigt, zugrunde.

8.4 Eigene experimentelle Ermittlung der Dauerstandsfestigkeit von Bestandsbetonen

8.4.1 Ausgangslage

Die in Abschnitt 8.3 beschriebenen Untersuchungen und die für den Neubaufall gültigen normativen Ansätze zum Umgang mit Dauerstandseffekten bei der Bestimmung des Bemessungswertes der Betondruckfestigkeit beziehen sich ausschließlich auf Untersuchungen an nicht vorbelasteten, gesondert hergestellten Laborprobekörpern. Inwieweit diese Erkenntnisse auch auf die Bestimmung des Nachrechnungswertes der Betondruckfestigkeit f_{ca} , basierend auf einer Druckfestigkeitsprüfung an Bohrkernen übertragbar sind, war bisher noch nicht abschließend geklärt. Besonders der Einfluss der am Bestandstragwerk vorliegenden Vorbelastung auf die Dauerstandsfestigkeit war noch zu bewerten. In diesem Zusammenhang stellte sich auch die Frage, inwieweit Effekte der Gefügelockerung durch Vorbelastung des Bestandstragwerks oder Eigenspannungen bereits bei der Bestimmung der Kurzzeitfestigkeit an Bohrkernen miterfasst werden.

Zur Klärung dieser Fragen wurden die nachfolgend erläuterten Untersuchungen der Betondruckfestigkeit an bestehenden Stahlbetonbauwerken durchgeführt.

8.4.2 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm umfasst die experimentelle Untersuchung der In-situ-Betondruckfestigkeit durch Bohrkernentnahme und anschließende Druckfestigkeitsprüfung. Es wurden an sieben verschiedenen Hoch- und Ingenieurbauwerken in Stahlbetonbauweise mit unterschiedlicher Vorbelastungsart (Biegung oder Druck) Untersuchungen durchgeführt. Alle Bauwerke unterlagen einer überwiegend statischen Vorbelastung. Weitere Informationen zu den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Bauwerken, wie z. B. Bauwerksart, In-situ-Druckfestigkeit, Art der Vorbelastung, Karbonatisierung, sind in Anhang V enthalten. Angaben zu dem am Bauwerk vorliegenden Belastungsniveau waren nicht möglich, da zu keinem der untersuchten Bauwerke eine Bestandsstatik vorlag.

Aus jedem Bauwerk oder Bauwerksteil sollten mindestens zehn Bohrkern mit einer Schlankheit $h/d \geq 2,0$ entnommen werden. Für die Prüfung wurden die Bohrkern zur Ermittlung der Kurzzeit- oder Dauerstandsfestigkeit in zwei Probekörper mit $h/d = 1,0$ zerteilt werden. Bedingt durch eine zu geringe Bauteildicke konnten nicht bei allen Bauwerken oder Bauwerksteilen Bohrkern mit einer Schlankheit $h/d \geq 2,0$

entnommen werden, weshalb in manchen Fällen mindestens 20 Bohrkern mit $h/d \geq 1,0$ entnommen wurden, aus denen Probekörper mit einer Schlankheit $h/d = 1,0$ vorbereitet wurden. Zur weiteren Erläuterung werden nachfolgend zunächst die Ergebnisse der Druckfestigkeitsuntersuchungen an dem in Anhang V (Tab. V. 1 und Tab. V. 2) beschriebenen Bauwerk „Stützen TUK“ betrachtet.

In Abb. 8.6 sind für das Untersuchungsobjekt „Stützen TUK“ die In-situ-Druckfestigkeiten der beiden aus einem Bohrkern gewonnenen Probekörper gegenübergestellt. An Teil 1 wurde dabei jeweils die Kurzzeitdruckfestigkeit bestimmt. Teil 2 der Bohrkern wurde zunächst für die Dauerstandsversuche verwendet. Kam es während des Dauerstandsversuchs nicht zum Bruch des Probekörpers, konnte im Anschluss zusätzlich noch die Kurzzeitdruckfestigkeit bestimmt werden. Für das Untersuchungsobjekt „Stützen TUK“ war dies bei vier Probekörpern der Fall. Hinweise zum jeweiligen Belastungsniveau sind Abb. V.1 sowie Tab. V.15 zu entnehmen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich auch die an zwei aus einem Bohrkern gewonnenen Probekörpern unter gleichen Bedingungen ermittelten Kurzzeitfestigkeiten unterscheiden, weshalb auch dem zuvor beschriebenen Vorgehen, basierend auf einer Entnahme von mindestens 20 Bohrkernen mit einer Schlankheit $h/d \geq 1,0$, eine ausreichende Genauigkeit zugemessen werden kann.

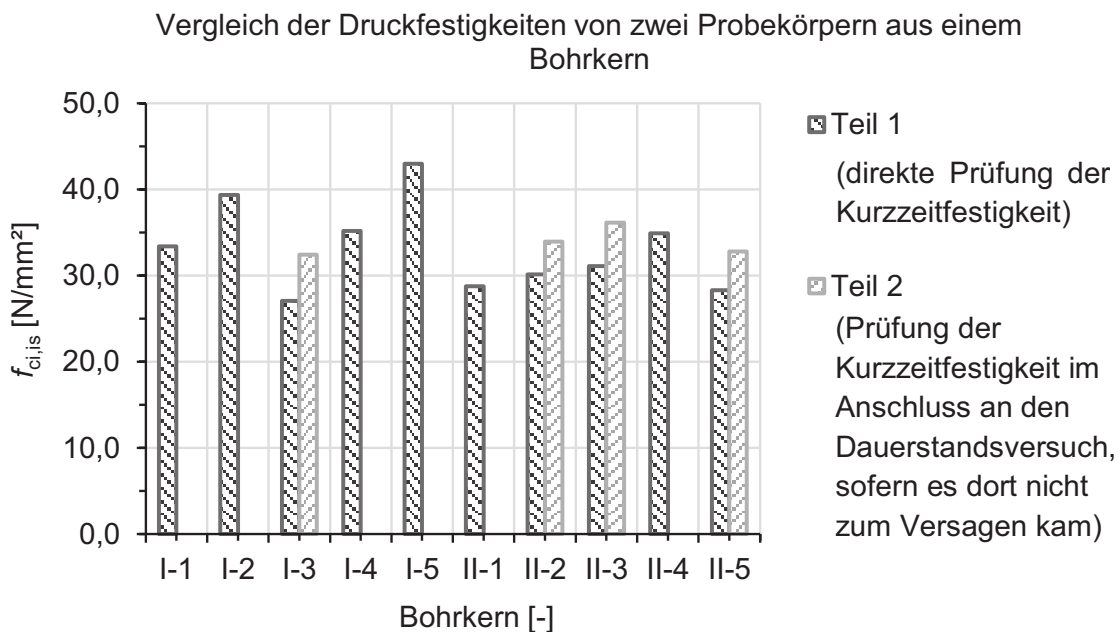


Abb. 8.6 „Stützen TUK“ - Vergleich der Kurzzeit-Druckfestigkeit von zwei Probekörpern aus einem Bohrkern

Infolgedessen wurde bei allen weiteren Untersuchungen zur Festlegung des geplanten Belastungsniveaus die mittlere im Kurzzeitversuch bestimmte Druckfestigkeit verwendet. Eine Festlegung des geplanten Belastungsniveaus im Einzelfall, basierend auf der am zugehörigen Bohrkernteil ermittelten Kurzzeitdruckfestigkeit, führt nicht zu einer Erhöhung der Genauigkeit im Hinblick auf das Erreichen des geplanten Belastungsniveaus. Der Einfluss der Vorbelastung auf die im Kurzzeitversuch ermittelte Druckfestigkeit wird in Abschnitt 8.5 und Abb. 8.14 beschrieben.

Für alle betrachteten Bauwerke erfolgte sowohl die Bestimmung der Kurzzeit- als auch der Dauerstandsfestigkeiten im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der Technischen Universität Kaiserslautern (TUK). Es wurden lediglich zentrische Druckversuche durchgeführt.

Bei der Auswertung wird zwischen überwiegend druck- und überwiegend biegebeanspruchten Bauteilen unterschieden. Darüber hinaus wird der Einfluss der Lagerungsart in Hinblick auf den Feuchtegehalt der Probe auf die Dauerstandsfestigkeit bewertet. Aspekte der Ermüdung werden hier nicht betrachtet.

8.4.3 Versuchsdurchführung

Zunächst wurde an jeweils mindestens zehn Probekörpern mit $h/d = 1,0$, d. h. zusätzlich entnommenen Bohrkernen oder bei Bohrkernen mit $h/d = 2,0$ den jeweils zugehörigen Bohrkernteilen die Kurzzeitdruckfestigkeit nach *DIN EN 12390-3:2009-07* mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von $0,6 \text{ MPa/s}$ ermittelt. Anschließend wurden an den verbliebenen Probekörpern Dauerstandsversuche auf unterschiedlichen Belastungsniveaus durchgeführt. Als geplantes Belastungsniveau wurden 70, 80 und 90 % der zuvor ermittelten Kurzzeitfestigkeit gewählt. Als Bezugsgröße wurde entweder die mittlere Kurzzeitfestigkeit des Prüfbereichs oder bei Bohrkernen mit $h/d = 2,0$ die Kurzzeitfestigkeit des zugehörigen Probekörpers verwendet.

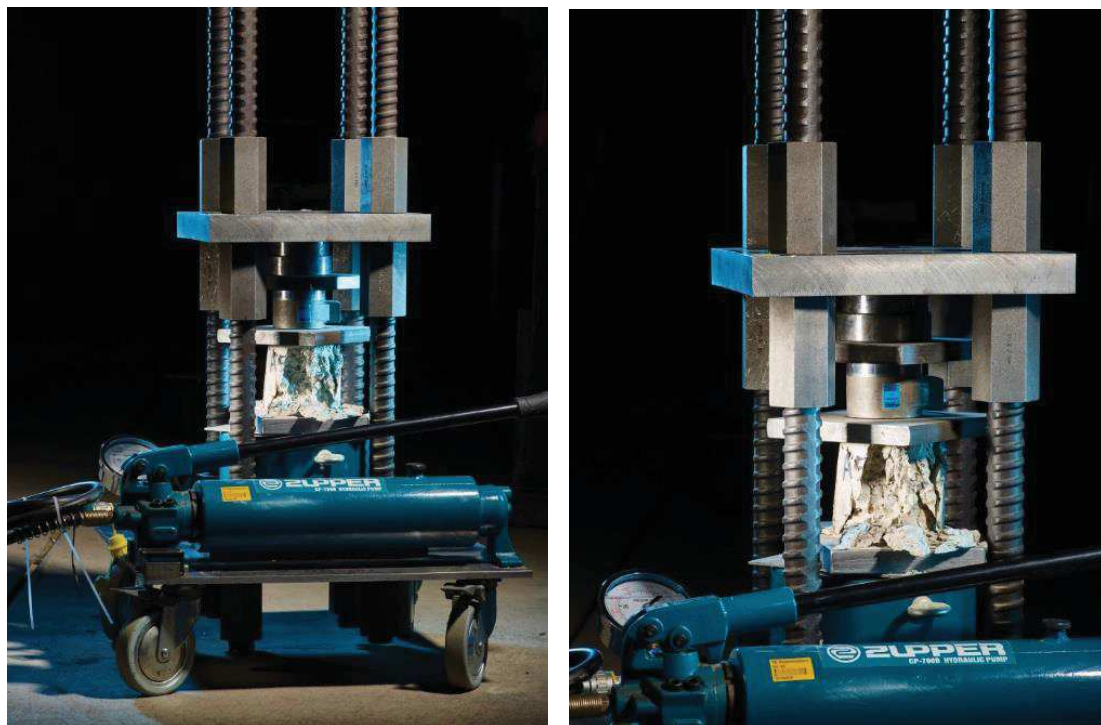


Abb. 8.7 Prüfstand zur Bestimmung der Dauerstandsdruckfestigkeit

Die Probekörper wurden kraftgesteuert mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von ca. $0,6 \text{ MPa/s}$ bis auf das jeweils gewünschte Belastungsniveau beansprucht. Da die Last bei allen Versuchsserien bis auf die Serie „Wand Technische Werke Ludwigshafen“ mit einer Handpumpe aufgebracht wurde, war eine exakte Einhaltung der Belastungsgeschwindigkeit nicht möglich.

Anschließend wurde bei den ersten beiden Versuchsserien („Wand Technische Werke Ludwigshafen“ und „Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt“) das Belastungsniveau für weitere zwei bis drei Tage konstant gehalten. Da bei diesen Versuchsreihen am zweiten und dritten Tag keine Versagen infolge Dauerlast beobachtet werden konnte, wurde bei den weiteren Versuchsreihen aus versuchstechnischen Gründen die Standzeit auf mind. 30 Stunden reduziert. Kam es innerhalb des genannten Zeitraums nicht zum Bruch des Probekörpers, so kann basierend auf den Ergebnissen davon ausgegangen werden, dass das jeweilige Belastungsniveau dauerhaft aufgenommen werden kann. Zur abschließenden und abgesicherten Klärung wären jedoch hierzu gesonderte Untersuchungen mit einer Standzeit von mehreren Tagen bis Wochen erforderlich.

Die planmäßige Belastung ist in Abb. 8.8 exemplarisch für einen Probekörper mit $h = d = 100 \text{ mm}$ und eine Druckfestigkeit von 30 N/mm^2 bis zu einer Dauer von 1.000 Sekunden dargestellt.

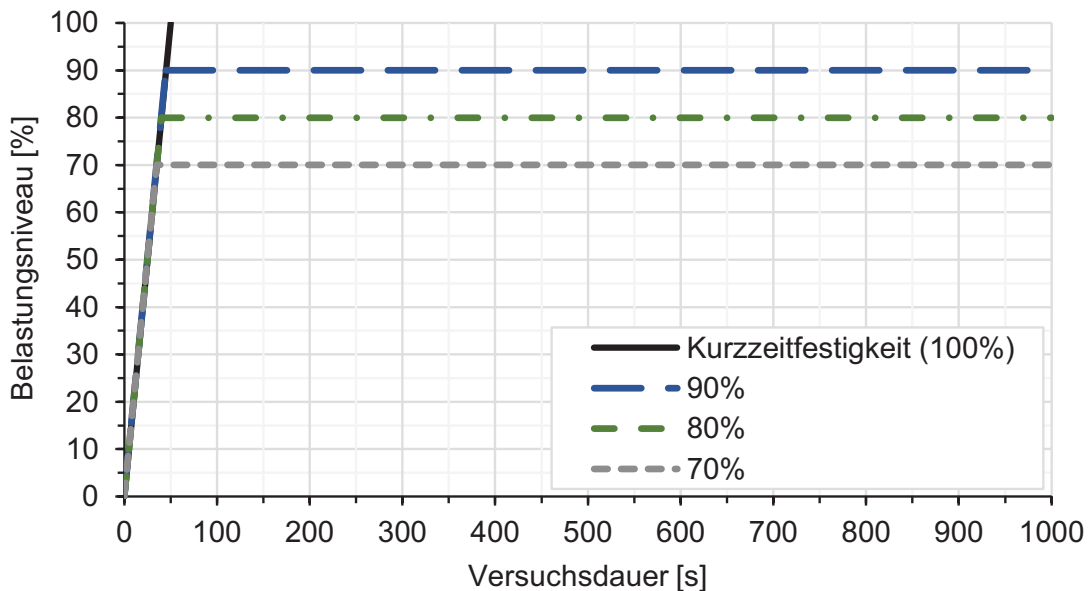


Abb. 8.8 Geplante Lastaufbringung und Belastungsniveaus

8.4.4 Versuchsergebnisse

8.4.4.1 Allgemeines

Im Anhang V.1 der vorliegenden Arbeit sind die Ergebnisse der Untersuchung der Kurzzeitdruckfestigkeit für jedes Bauwerk in tabellarischer Form zusammengefasst. Neben den Einzelprüfwerten und den zugehörigen Probekörperabmessungen sind dort auch Hinweise zum jeweiligen Bauwerk, der Betonart, der Vorbelastungsart und der Lagerung der Probekörper bis zur Prüfung enthalten.

Die Ergebnisse der Untersuchung der Dauerstandsdruckfestigkeit (nachfolgend als Dauerstandsversuche bezeichnet) sind in Anhang V.2 zusammengefasst.

Bei den Dauerstandsversuchen konnten insgesamt drei verschiedene Versagensarten beobachtet werden: Kurzzeitversagen (KZV), Dauerstandsversagen (DV) und kein Versagen während des Dauerstandsversuchs (kV).

Kurzzeitversagen

Unter Kurzzeitversagen ist ein Versagen des Probekörpers vor Erreichen des geplanten Belastungsniveaus von 70, 80 oder 90 % der im Kurzzeitversuch bestimmten Druckfestigkeit zu verstehen. Im Unterschied zum geplanten Belastungsniveau liegt bei Kurzzeitversagen das tatsächliche Belastungsniveau bei 100 % der Kurzzeitdruckfestigkeit des jeweiligen Probekörpers. Ursächlich hierfür ist die Streuung der Einzelwerte der Betondruckfestigkeit innerhalb eines Prüfbereichs. Durch die Streuung können sich die jeweiligen Einzelwerte jedoch teilweise deutlich unterscheiden. Als Maß hierfür kann der in Abb. 8.9 für jedes Bauwerk dargestellte Variationskoeffizient verwendet werden.

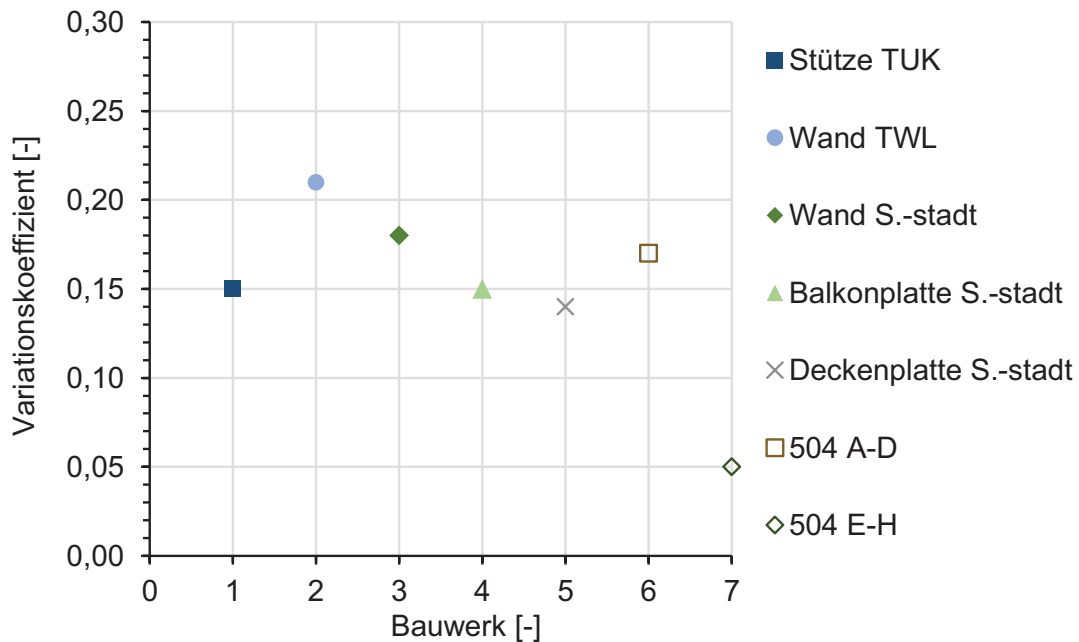


Abb. 8.9 Variationskoeffizienten der im Kurzzeitversuch bestimmten Betondruckfestigkeit

Dauerstandsversagen

Unter Dauerstandsversagen ist ein Versagen des Probekörpers nach Erreichen des geplanten Belastungsniveaus während der planmäßigen Belastungsdauer zu verstehen. Inwieweit das jeweils geplante Belastungsniveau, bedingt durch die Streuung der Einzelwerte der Betondruckfestigkeit, auch dem tatsächlichen Belastungsniveau entspricht, kann nicht näher bestimmt werden.

Kein Versagen während des Dauerstandsversuchs

Bei all denjenigen Versuchen, die nicht der Versagensart Kurzzeitversagen oder Dauerstandsversagen zugeordnet werden können, trat während des Dauerstandsversuchs, d. h. im Zeitraum von mindestens 30 Stunden, kein Versagen ein, weshalb im Anschluss an den Dauerstandsversuch durch weitere Steigerung der Last noch die tatsächliche Kurzzeitdruckfestigkeit des jeweiligen Probekörpers bestimmt werden konnte. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde dabei entsprechend *DIN EN 12390-3:2009-07* zu 0,6 MPa/s gewählt. Durch den Quotienten aus der im Versuch tatsächlich dauerhaft aufgebracht Last und der tatsächlichen, im

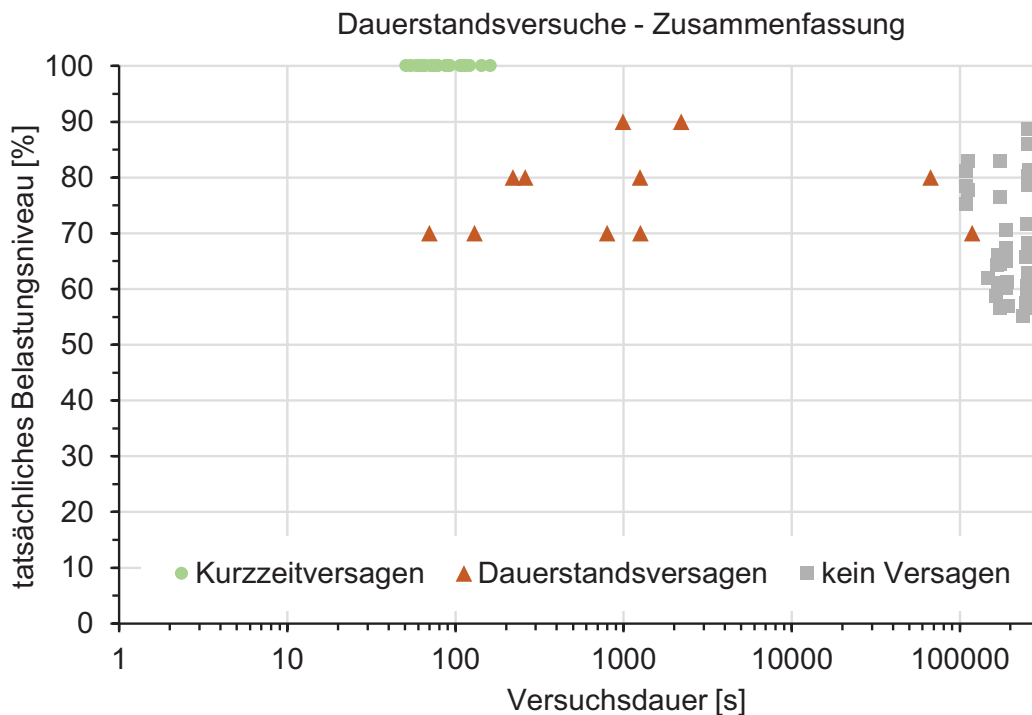
Kurzzeitversuch bestimmten Versagenslast kann das tatsächliche Belastungsniveau ermittelt werden.

In Anhang V.2 ist zunächst je Bauwerk für jeden der durchgeführten Versuche die Last-Versuchsdauer-Kennlinie dargestellt. Zur Beschreibung des Belastungsniveaus wird dabei der tatsächliche Wert verwendet. Eventuelle Schwankungen im gewünschten Belastungsniveau sind durch das händische Nachpumpen zu begründen.

Darüber hinaus sind im Anhang V.2 die Zahlenwerte verschiedener Versuchskenndaten in tabellarischer Form zusammengefasst.

Die Einzelwerte sind aufgrund der Messrate von bis zu 20 Hz in der vorliegenden Arbeit nicht enthalten, können jedoch bei dem Verfasser angefragt werden.

In Abb. 8.10 sind die Versuchsdauer und das zugehörige tatsächliche Belastungsniveau für alle untersuchten Probekörper abgebildet. Zunächst wird lediglich zwischen den drei oben genannten Versagensarten Kurzzeitversagen, Dauerstandsversagen und kein Versagen unterschieden.



Erreichen des Belastungsniveaus beobachtet werden. Inwieweit das geplante Belastungsniveau dem tatsächlichen entspricht, kann nicht näher bestimmt werden.

Um eventuelle Einflussgrößen auf die Dauerstandsfestigkeit verifizieren zu können, werden die Untersuchungsergebnisse nachfolgend getrennt nach der Lagerungsart der Probekörper bis zur Prüfung und nach der Art der Vorbelastung bewertet.

8.4.4.2 Einfluss der Lagerungsart der Probekörper

In Abb. 8.11 ist die Versuchsdauer und das zugehörige tatsächliche Belastungsniveau unter Berücksichtigung des Einflusses der Lagerungsart abgebildet. Über die drei oben genannten Versagensarten Kurzzeitversagen, Dauerstandsversagen und kein Versagen hinaus wird dabei zusätzlich zwischen Lagerung trocken und Lagerung nass unterschieden.

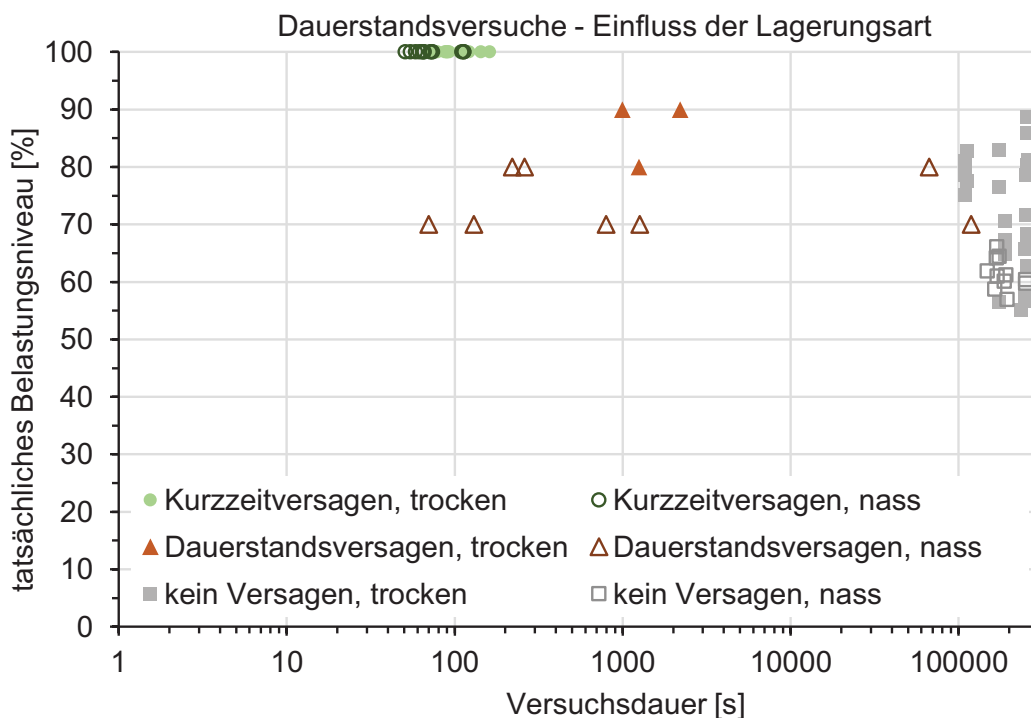


Abb. 8.11 Dauerstandsversuche – Einfluss der Lagerungsart

Bei bis zur Prüfung nach *DIN EN 12390-2:2009-08* nass gelagerten und während des Dauerstandsversuchs nicht gegen einen Feuchtigkeitsverlust versiegelten Probekörpern konnte lediglich bei den Belastungsniveaus 70 und 80 % ein Dauerstandsversagen festgestellt werden. Ab einem geplanten Belastungsniveau von 90 % kam es stets zum direkten Versagen (Kurzzeitversagen). Kein Versagen konnte lediglich bis zu einem tatsächlichen Belastungsniveau von 66 % beobachtet werden. Bei höheren Belastungsniveaus konnte lediglich bei trocken gelagerten Probekörpern ein Dauerstandsversagen oder kein Versagen beobachtet werden. Darüber hinaus trat bei wassergesättigten Proben ein eventuelles Dauerstandsversagen meist nach kürzeren Standzeiten auf. Offensichtlich führen die aus den wassergefüllten Poren resultierenden Querspannungen ähnlich wie bei der Bestimmung der Kurzzeitdruckfestigkeit (vgl. Abschnitt 3.4.2.3) zu einem früheren Versagen als bei trocken gelagerten Proben.

Eine mögliche Ursache für die im Vergleich zu trocken gelagerten Probekörpern recht niedrigen Werte des tatsächlichen Belastungsniveaus bei der Versagensart „kein Versagen“ liegt vermutlich im Feuchtezustand der Proben. Während die Kurzzeitdruckfestigkeit bei der Lagerungsart „nass“ am wassergesättigten Probekörper geprüft wurde, unterlagen die Probekörper zur Bestimmung der tatsächlichen Versagenslast im Anschluss an den Dauerstandsversuch über die gesamte Standzeit des Dauerstandsversuchs einem Feuchtigkeitsverlust. Wie in Abschnitt 3.4.2.3 beschrieben, kann an trockenen Probekörpern allgemein eine größere Druckfestigkeit festgestellt werden als an wassergesättigten. In Abb. 8.12 ist die Entwicklung der Probekörpermasse dargestellt. Die erste Messung erfolgte dabei direkt nach der Entnahme des Probekörpers aus dem Wasserbecken. Vorab wurde lediglich freies Wasser an der Bohrkernoberfläche abgewischt. Der Verlauf der Probekörpermasse deutet auf einen deutlichen Feuchtigkeitsverlust besonders während der ersten ca. 100 Stunden hin, womit dem Feuchtezustand der Proben ein maßgebender Einfluss auf die im Anschluss an den Dauerstandsversuch (sofern dort kein Versagen auftrat) ermittelte Kurzzeitdruckfestigkeit zugemessen werden kann.

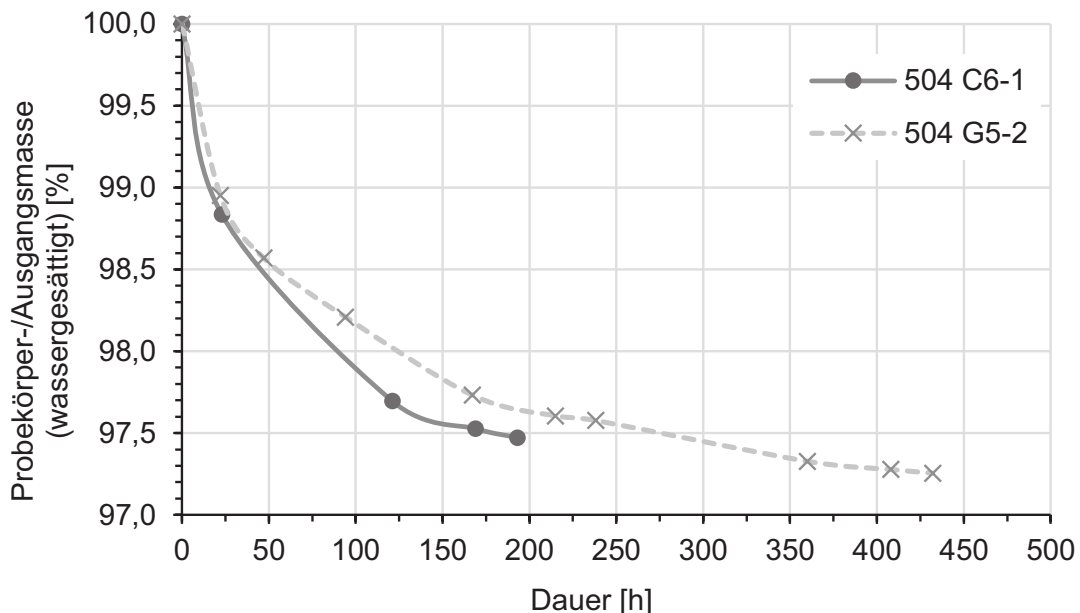


Abb. 8.12 Entwicklung der Probekörpermasse der Proben 504 C6-1 und 504 G5-2 nach Entnahme der Proben aus dem Wasserbad in Bezug auf die Anfangsmasse

8.4.4.3 Einfluss der Art der Vorbelastung

In Abb. 8.13 sind die Versuchsdauer und das zugehörige tatsächliche Belastungsniveau unter besonderer Berücksichtigung der Art der Vorbelastung am Bauwerk oder Bauwerksteil für alle untersuchten Probekörper abgebildet. Eine weitere Differenzierung zwischen Druck- und Zugzone bei durch Biegung vorbelasteten Bauteilen ist dabei nicht möglich, da die tatsächliche Ausbildung von Zug- und Druckzone sowie die Lage von Rissen aufgrund der Streuung der Materialkennwerte nicht exakt vorhersagbar ist.

Allgemein kann lediglich an aus durch Druckkräfte vorbelasteten Bauteilen entnommenen Bohrkernen ein Dauerstandsversagen beobachtet werden. Bei den

Dauerstandsversuchen an aus biegebeanspruchten Bauteilen entnommenen Bohrkernen konnte hingegen diese Versagensart nicht verzeichnet werden.

Im Sinne einer allgemeingültigen Bewertung der in Abb. 8.13 dargestellten Ergebnisse ist zusätzlich die Bohrkernentnahmerichtung zu berücksichtigen. Bei allen druckbelasteten Bauteilen (z. B. Stützen und Wände) erfolgte die Bohrkernentnahme senkrecht zur Betonierrichtung und bei allen biegebeanspruchten Bauteilen (z. B. Decken) parallel zur Betonierrichtung.

Die Ableitung allgemeingültiger Erkenntnisse zum Einfluss der Art der Vorbelastung aus den durchgeführten Untersuchungen ist nur schwer möglich, da eine Differenzierung der Einflüsse aus Art der Vorbelastung und Bohrkernentnahmerichtung basierend auf den durchgeführten Untersuchungen nicht möglich ist.

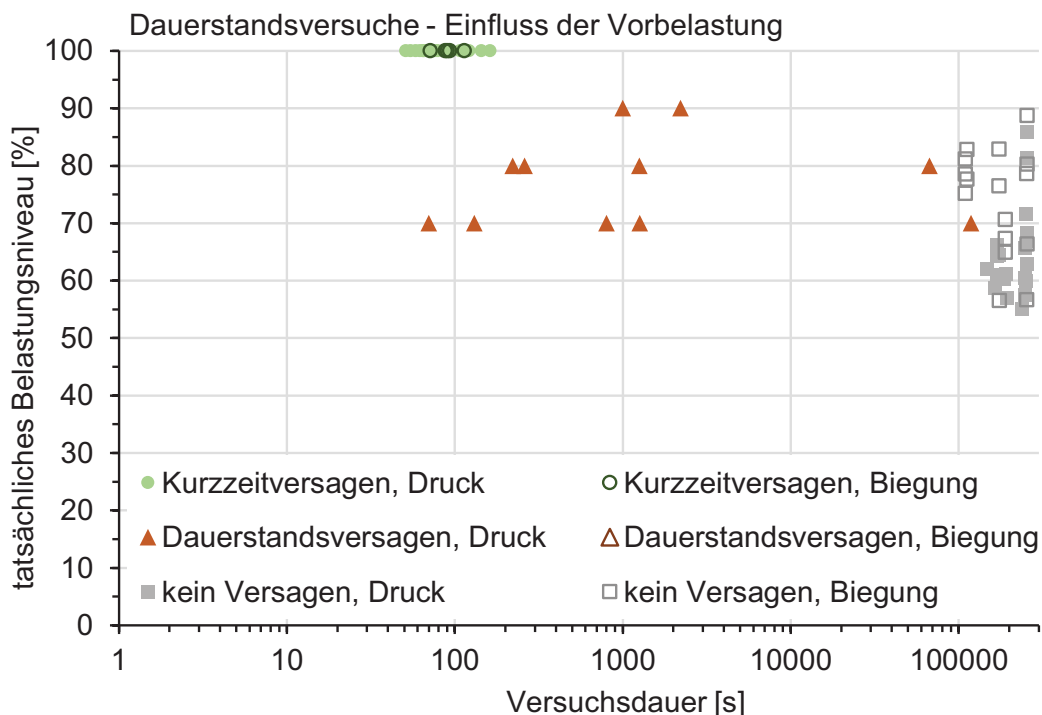


Abb. 8.13 Dauerstandsversuche – Einfluss der Art der Vorbelastung

8.5 Zwischenfazit

Trotz der am Bauwerk vorliegenden Dauerlast konnten im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen von Bohrkernen Unterschiede zwischen der Kurzzeit- und der Dauerstandsfestigkeit beobachtet werden. Dies bedeutet, dass durch die am Bauwerk im Gebrauchszustand vorliegende Dauerlast entweder keine oder keine maßgebenden Mikrorisse oder Gefügelockerung verursacht werden oder diese im Rahmen der Untersuchung der Kurzzeitdruckfestigkeit an Bohrkernen keinen Einfluss haben.

Zur Bewertung des Einflusses der Vorbelastung auf die Kurzzeitdruckfestigkeit ist in Abb. 8.14 für alle Probekörper, bei denen es während des Dauerstandsversuchs nicht zum Versagen kam, das Verhältnis zwischen der im Anschluss an den

Dauerstandsversuch im Kurzzeitversuch ermittelten Betondruckfestigkeit $f_{ci,kv}$ zur mittleren Kurzzeitdruckfestigkeit jedes Datensatzes f_{cm} nach Anhang V.1 in Abhängigkeit vom tatsächlichen Belastungsniveau dargestellt.

Aufgrund der in Abb. 8.9 beschriebenen Streuung der Betondruckfestigkeit unterliegen auch die in Abb. 8.14 dargestellten Ergebnisse einer recht großen Streubreite. Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass tendenziell mit ansteigendem tatsächlichen Belastungsniveau während des Dauerstandsversuches die im Anschluss an den Dauerstandsversuch ermittelte Kurzzeitdruckfestigkeit in Bezug auf die mittlere Kurzzeitdruckfestigkeit jedes Datensatzes f_{cm} nach Anhang V.1 kleinere Werte annimmt. Dieses Verhalten lässt den Schluss zu, dass die an Bohrkernen aus Bestandtragwerken ermittelte In-situ-Betondruckfestigkeit durch das Niveau der Vorbelastung des Bestandtragwerks beeinflusst wird. Jedoch führen offensichtlich lediglich sehr hohe dauerhafte Vorbelastungen, wie sie im Bestand bei bestimmungsgemäßer Nutzung nicht vorliegen, zu einer Beeinflussung der im Kurzzeitversuch geprüften Druckfestigkeit.

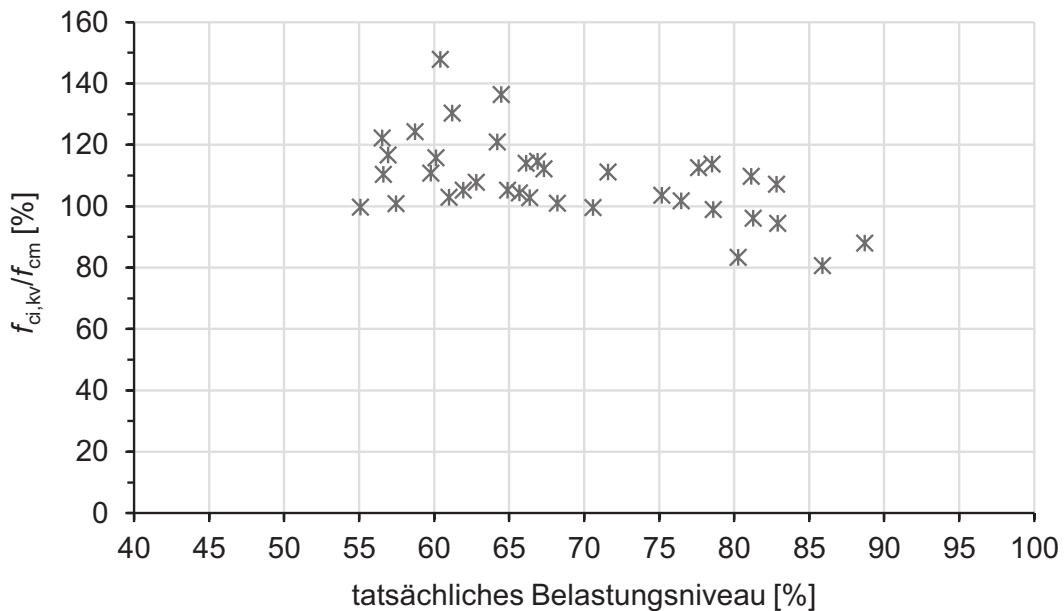


Abb. 8.14 Beeinflussung der Kurzzeitdruckfestigkeit durch eine Vorbelastung

Weiterhin kam es bei den durchgeführten Untersuchungen bei einem tatsächlichen Dauerlastniveau von bis zu 89 % der im Kurzzeitversuch ermittelten mittleren Druckfestigkeit nicht zum Bruch des Probekörpers während des Dauerstandsversuchs. Bei höherem tatsächlichen Belastungsniveau kam es stets zum Versagen der Probe – entweder während der Lastaufbringung in Form eines Kurzzeitversagens oder als Dauerstandsversagen. Ein Dauerstandsversagen konnte bei allen geplanten Belastungsniveaus 70, 80 und 90 % beobachtet werden. Der tatsächliche Wert des Belastungsniveaus ist aufgrund der Streuung der Betondruckfestigkeit nicht zielsicher zu ermitteln. Basierend auf der Tatsache, dass bei zahlreichen Versuchen für ein tatsächliches Belastungsniveau von bis zu 89 % kein Versagen während des Dauerstandsversuchs auftrat, ist davon auszugehen, dass speziell bei Dauerstandsversagen bei einem geplanten Belastungsniveau von 70 oder

80 % der tatsächliche Wert des Belastungsniveaus, aufgrund der Streuung der Betondruckfestigkeit deutlich höher lag.

Die hier beschriebenen Untersuchungen zeigen somit, dass auch bei der Bewertung der In-situ-Druckfestigkeit sowie bei der Bestimmung des Nachrechnungswertes der Betondruckfestigkeit f_{ca} die Einflüsse von Dauerstandseffekten zu berücksichtigen sind. Lediglich bei sehr hoher Vorbelastung oberhalb des Gebrauchslastniveaus ist davon auszugehen, dass Dauerstandseffekte bereits im Rahmen der Prüfung der Kurzzeitdruckfestigkeit teilweise mit erfasst werden.

Für die Bestimmung des Nachrechnungswertes der Betondruckfestigkeit f_{ca} mit Bestimmung der In-situ-Betondruckfestigkeit an Bohrkernproben kann somit basierend auf den hier dargestellten Ergebnissen die Verwendung des im Neubaufall nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* gültigen Dauerstandsbeiwertes $\alpha_{cc} = 0,85$ empfohlen werden. Ein Vernachlässigen des Dauerstandsbeiwertes $\alpha_{cc} = 0,85$ bei der Bestimmung des Nachrechnungswertes der Betondruckfestigkeit ist nicht gerechtfertigt.

Sofern zukünftig mit dem Faktor α_{cc} , wie in *prEN 1992-1-1:2017-10* beschrieben, über die Dauerstandseffekte hinaus auch Unterschiede zwischen der Zylinderdruckfestigkeit und der tatsächlich am Bauwerk vorliegenden Druckfestigkeit erfasst werden sollen, sind die in Kapitel 7 und 8 der vorliegenden Arbeit erläuterten Untersuchungen in Kombination zu betrachten. Zusätzlich ist die Zusammensetzung des Teilsicherheitsbeiwertes $\gamma_c = 1,50$ nach *prEN 1992-1-1:2017-10* zu überprüfen, um eine doppelte Berücksichtigung des Unterschiedes zwischen der Bauwerks- und Normprobekörperfestigkeit zu vermeiden.

9 Ableitung mechanischer Kennwerte von Bestandsbetonen aus der In-situ-Druckfestigkeit

9.1 Korrelation von Betondruck- und Zugfestigkeit

9.1.1 Allgemeines

In der in Deutschland für die Bemessung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken aktuell bauaufsichtlich eingeführten *DIN EN 1992-1-1:2011-01* sind Angaben zur Korrelation zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit enthalten. Diese Regeln beziehen sich jedoch ausschließlich auf im Neubaufall verwendete Betone nach *DIN EN 206-1:2001-07*.

Aufgrund verschiedener last- und zeitabhängiger Einflüsse kann die Gültigkeit der in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* aufgeführten Beziehung zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit für Bestandsbetone nicht ohne weitere Überlegungen vorausgesetzt werden.

Die Beeinflussung der Betondruck- und Zugfestigkeit durch z. B. Nacherhärtung und Karbonatisierung ist bisher noch nicht abschließend erforscht. Die in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* definierte Betonzugfestigkeit bezieht sich auf Untersuchungen an dauerhaft (d. h. bis zur Prüfung im Alter von 28 Tagen) nass gelagerten Probekörpern. Hinzu kommt, dass die tatsächlich am Bauwerk vorliegende Betonzugfestigkeit durch Mikrorissbildung infolge thermisch-hygrischer Eigenspannungen wesentlich von der an Laborprobekörpern bestimmten Betonzugfestigkeit abweichen kann.

Über den u. a. für eine Nachrechnung bestehender Tragwerke sowie die Bemessung von Befestigungsmitteln erforderlichen Zusammenhang zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit in einem Alter $\gg 28$ d liegen bisher keine abschließenden Erkenntnisse vor. Deshalb wurden im Rahmen des von der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) geförderten Forschungsprojektes (SWD-10.08.18.7-13.01) Untersuchungen an historischen Tragwerken in Massivbauweise durchgeführt. Dazu wurden, basierend auf dem in Kapitel 3 beschriebenen Vorgehen jeweils sehr umfangreiche Bauwerksuntersuchungen durch Bohrkernentnahmen zur Prüfung der Betondruckfestigkeit bzw. Spaltzugfestigkeit durchgeführt.

Die nachfolgend aufgeführten Untersuchungsergebnisse wurden im Rahmen des o. g. BBR Forschungsprojektes, dessen Ergebnisse in *Thiele u. Weber 2016* zusammengefasst sind, erarbeitet. Wesentliche Inhalte wurden bereits in *Weber u. Thiele 2016* und *Weber u. Thiele 2018* veröffentlicht.

9.1.2 Korrelation zwischen Druck- und Zugfestigkeit nach DIN EN 1992-1-1 und fib Model Code 2010

Für Betone mit einer Festigkeitsklasse $\leq C50/60$ ist in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* der Zusammenhang zwischen Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit f_{ctm} und charakteristischer Druckfestigkeit f_{ck} nach Gleichung (9.1) beschrieben.

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (9.1)$$

mit:

f_{ctm} Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit des Betons

f_{ck} charakteristische Zylinderdruckfestigkeit des Betons nach 28 Tagen

Der 5 % Quantilwert der zentrischen Betonzugfestigkeit $f_{ctk;0,05}$ kann nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* entsprechend Gleichung (9.2) aus dem Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit berechnet werden.

$$f_{ctk;0,05} = 0,7 \cdot f_{ctm} \quad (9.2)$$

Zusätzlich ist in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* der 95 % Quantilwert der zentrischen Zugfestigkeit $f_{ctk;0,95}$ gemäß Gleichung (9.3) definiert.

$$f_{ctk;0,95} = 1,3 \cdot f_{ctm} \quad (9.3)$$

Die in Gleichung (9.2) und (9.3) genannten Umrechnungsfaktoren zwischen Mittelwert und charakteristischem Wert der zentrischen Betonzugfestigkeit basieren unter Berücksichtigung des in *DIN EN 1990:2010-12* enthaltenen Auswerteverfahrens (vgl. Abschnitt 3.7.3) mit einer Normalverteilung nach Gleichung (3.10) auf einem Variationskoeffizienten $v_x \approx 0,18$ (d. h. $0,7 = 1 - k_n \cdot v_x = 1 - 1,64 \cdot 0,18$). Es ist zu prüfen, ob durch diese Annahme auch die Streuung der Zugfestigkeit von Bestandsbetonen ausreichend genau abgedeckt wird.

Der zuvor beschriebene Zusammenhang zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* ist in identischer Form in *fib Model Code 2010* enthalten.

9.1.3 Frühere Untersuchungen und normative Regelungen

9.1.3.1 Historische Untersuchungen

Der in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* genannte Zusammenhang zwischen Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit f_{ctm} und charakteristischer, auf den Normzylinder bezogenen Betondruckfestigkeit f_{ck} ist auf Untersuchungen aus den 1960er und 1970er Jahren von Heilmann (*Heilmann 1969*) und Rüschi (*Rüschi 1975*) zurückzuführen.

Die in *Heilmann 1969* beschriebenen Untersuchungen bestätigen, dass zwischen Druck- und Zugfestigkeit kein linearer Zusammenhang besteht. Stattdessen wird die in Gleichung (9.4) in allgemeiner Form angegebene Beziehung zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit empfohlen.

$$\beta_z = c \cdot \beta_D^{2/3} \quad (9.4)$$

mit:

β_z Betonzugfestigkeit

Ableitung mech. Kennwerte von Bestandsbetonen aus der In-situ-Druckfestigkeit

β_D	Betondruckfestigkeit
c	Koeffizient in Abhängigkeit von der Prüfmethode, der Probekörpergeometrie und der Streuung

Das Verhältnis wird nach *Heilmann 1969* maßgeblich durch die zur Bestimmung der Betonzugfestigkeit verwendete Prüfmethode, d. h. zentrische Zugfestigkeit, Biegezugfestigkeit oder Spaltzugfestigkeit sowie durch die jeweilige Probekörperform beeinflusst. Darüber hinaus ist die Streuung der Zugfestigkeit nicht identisch mit der Streuung der Betondruckfestigkeit. In der Regel streut die Zugfestigkeit stärker als die Druckfestigkeit. Lokale Fehlstellen wirken sich meist viel stärker auf die Zugfestigkeit aus, als auf die Druckfestigkeit. Hinzu kommen infolge des Schwindens entstehende Eigenspannungen, welche ebenfalls einen größeren Einfluss auf die Zugfestigkeit als auf die Druckfestigkeit haben.

Weitere Einflussgrößen sind nach *Heilmann 1969* und *Rüsch 1975* die Form der Zuschläge, das Betonalter, der Wasserzementwert sowie die verwendete Zementart. Abb. 9.1 zeigt das Ergebnis der Untersuchungen von *Heilmann 1969* bzgl. des Zusammenhangs zwischen Betondruckfestigkeit β_W und zentrischer Zugfestigkeit β_Z .

Die Größe β_W beschreibt dabei den Mittelwert der am Würfel mit einer Kantenlänge von 200 mm geprüften Betondruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen. Der Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit wird durch β_Z beschrieben.

Setzt man für die Korrelation zwischen Betondruck- und Betonzugfestigkeit einen Zusammenhang gemäß Gleichung (9.4) voraus, so gilt nach Abb. 9.1 für die Zugfestigkeit im Mittel $c_{\text{Mittel}} = 0,52$.

Für $c_{\text{min}} = 0,36$ liegt die mittlere zentrische Zugfestigkeit von lediglich 5 % der untersuchten Daten unterhalb des mit Gleichung (9.4) beschriebenen Zusammenhangs. Entsprechend überschreiten für $c_{\text{max}} = 0,68$ lediglich 5 % der untersuchten Daten die mittlere zentrische Zugfestigkeit nach Gleichung (9.4).

Allgemein kann aufgrund der in Abb. 9.1 dargestellten Daten der Zusammenhang zwischen Betondruck- und Betonzugfestigkeit in Form von Gleichung (9.4) bestätigt werden.

Für einen Vergleich mit dem in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* enthaltenen Zusammenhang nach Gleichung (9.1) ist zu beachten, dass dieser sich auf die charakteristische Betondruckfestigkeit f_{ck} (5 %-Quantil) geprüft am Normzylinder mit $\lambda = h/d = 300/150$ mm und den Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit f_{ctm} bezieht.

Eine Umrechnung der in Abb. 9.1 dargestellten Daten auf charakteristische Werte ist nicht möglich, da die dazu erforderlichen Einzelwerte der Festigkeitsprüfungen nicht vorliegen.

Da sich die in *Heilmann 1969* aufgeführten Ergebnisse ausschließlich auf Untersuchungen an Laborprobekörpern im Alter von ca. 28 Tagen beziehen, geben sie somit nur wenig Aufschluss zur Korrelation zwischen Druck und Zugfestigkeit von Bestandsbetonen.

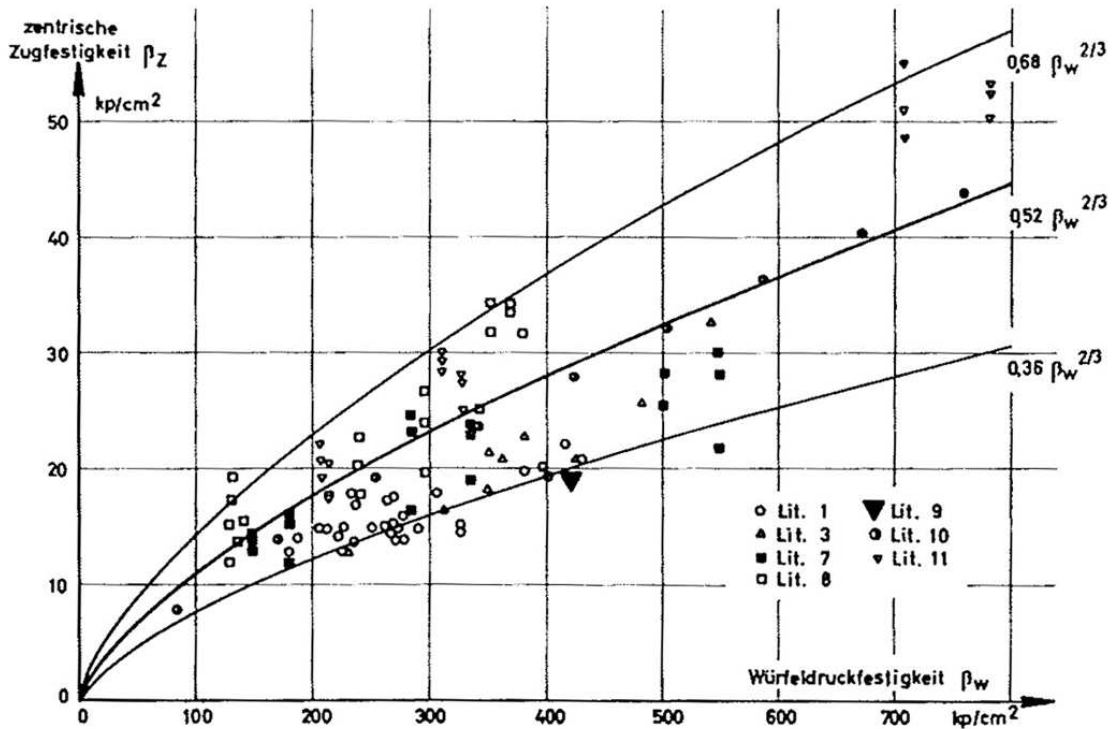


Abb. 9.1 Korrelation zwischen zentrischer Betonzugfestigkeit β_z und Würfeldruckfestigkeit β_D des Betons im Alter von 28 Tagen nach Heilmann 1969

Weitere Untersuchungen zur altersabhängigen Beziehung zwischen Druck- und Zugfestigkeit von Bauwerkbeton sind im *DAfStb 408* zusammengefasst. Die dort dargestellten Versuchsergebnisse beziehen sich dabei auf Untersuchungen an gesondert hergestellten, unter verschiedenen Bedingungen gelagerten Wänden im Alter von bis zu einem Jahr. Im Ergebnis wird im *DAfStb 408* ebenfalls ein Zusammenhang zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit gemäß Gleichung (9.4) empfohlen. Bestandsbetone im Alter von mehreren Jahren oder Jahrzehnten werden jedoch auch in *DAfStb 408* nicht betrachtet.

9.1.3.2 Regelungen nach DIN 1045 bis 2001

Der in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* genannte Zusammenhang zwischen Druck- und Zugfestigkeit des Betons ist erstmals gleichlautend in *DIN 1045-1:2001-07* enthalten.

In *DIN 1045:1988-07* wird lediglich zur Beschränkung der Rissbreite unter Gebrauchslast der in Gleichung (9.5) beschriebene Zusammenhang zwischen der Biegezugfestigkeit des Betons β_{bZ} und der Nennfestigkeit des Betons empfohlen, welcher ebenfalls dem in Gleichung (9.4) genannten Format entspricht.

$$\beta_{bZ} = 0,25 \cdot \beta_{WN}^{2/3} \quad (9.5)$$

Die vorherigen Ausgaben *DIN 1045:1978-12* und *DIN 1045:1972-01* beinhalten ebenfalls nur im Rahmen der Beschränkung der Rissbreite unter Gebrauchslast allgemeine Hinweise zur Verminderung der Rissbildung. Die unter Gebrauchslast im Zustand I berechnete Vergleichzugspannung σ_v darf den in Gleichung (9.6) nach *DIN 1045:1978-12* beschriebenen Wert nicht übersteigen. Gleichung (9.6a) gilt dabei

Ableitung mech. Kennwerte von Bestandsbetonen aus der In-situ-Druckfestigkeit

für normale Anforderungen an die Dichtheit und Gleichung (9.6b) für besonders hohe Anforderungen an die Dichtheit. Somit folgen auch Gleichung (9.6a) und (9.6b) dem in Gleichung (9.4) beschriebenen Format.

$$\sigma_V = \begin{cases} 0,46 \cdot \sqrt[3]{\beta_{WN}^2} & (9.6a) \\ 0,35 \cdot \sqrt[3]{\beta_{WN}^2} & (9.6b) \end{cases}$$

Auch *DIN 1045:1972-01* unterscheidet bei der Bestimmung der zulässigen Vergleichzugspannung je nach Anforderung an die Dichtheit. Für normale Anforderungen an die Dichtheit gilt der in Gleichung (9.7a) und für besonders hohe Anforderungen der in Gleichung (9.7b) gemäß Gleichung (9.4) beschriebene Zusammenhang. Somit waren die nach *DIN 1045:1972-01* zulässigen Vergleichzugspannungen mehr als doppelt so groß wie die nach *DIN 1045:1978-12* zulässigen.

$$\sigma_V = \begin{cases} \sqrt[3]{\beta_{WN}^2} & (9.7a) \\ 0,75 \cdot \sqrt[3]{\beta_{WN}^2} & (9.7b) \end{cases}$$

In älteren Ausgaben der DIN 1045 mit Erscheinungsdatum vor 1972 sind keine Hinweise zum Zusammenhang zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit enthalten.

9.1.4 Regelung nach BAW TbW

Abweichend von dem in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* beschriebenen Zusammenhang zwischen Druck- und Zugfestigkeit wird in *BAW 2016* zwischen der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit und dem 5 %-Quantilwert der zentrischen Zugfestigkeit der in Gleichung (9.8) beschriebene Zusammenhang empfohlen. Während das Verhältnis zwischen Mittelwert und 5 %-Quantilwert der zentrischen Betonzugfestigkeit im Vergleich zu *DIN EN 1992-1-1:2011-01* (siehe Gleichung (9.2)) unverändert bleibt, liegt dem Ansatz nach *BAW 2016* zugrunde, dass die mittlere Zugfestigkeit lediglich 50 % des nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* (siehe Gleichung (9.1)) aus der charakteristischen Betondruckfestigkeit berechneten Wertes beträgt.

$$f_{ctk;0,05;is} = 0,70 \cdot 0,15 \cdot f_{ck}^{2/3} = 0,105 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (9.8)$$

Der Ansatz basiert ausschließlich auf Untersuchungen an Bauwerken im Zuständigkeitsbereich der Bundesanstalt für Wasserbau. Zudem ist zu berücksichtigen, dass der Herleitung des Ansatzes, wie in Abschnitt 3.7.7 beschrieben, eine auf einem Konfidenzniveau von 95 % basierende statistische Auswertung (sowohl für die Druck- als auch für die Zugfestigkeit) zugrunde liegt.

Eine eigene Bewertung der Untersuchungsdaten der BAW mit den in *DIN EN 1990:2010-12* enthaltenen statistischen Verfahren ist nicht möglich, da die Einzelwerte der Untersuchungen seitens der BAW bisher nicht veröffentlicht wurden.

9.1.5 Experimentelle Untersuchungen an bestehenden Beton-, Stahlbeton- und Spannbetontragwerken

9.1.5.1 Versuchsprogramm

Zur Bewertung der Korrelation zwischen Druck- und Zugfestigkeit von Bestandsbetonen wurden an insgesamt 40 Bauwerken/Bauteilen in Beton-, Stahlbeton- oder Spannbetonbauweise des Hoch- und Ingenieurbaus experimentelle Untersuchungen durch Bohrkernentnahme und anschließende Festigkeitsprüfung durchgeführt.

Von den 40 hier betrachteten Bauwerksuntersuchungen wurden 10 eigenständig durchgeführt. Die verbleibenden 30 Untersuchungen entstammen der Literatur und einer Anfrage auf nationaler Ebene. Ein wesentlicher Anteil der Daten entstammt dabei *Meiswinkel 2012*, wo verschiedene Untersuchungsergebnisse an Wasserbauwerken durch die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) betrachtet wurden.

Die Ergebnisse der Bauwerksuntersuchungen sind in Anhang I (Druckfestigkeit) und Anhang VI.1 (Zugfestigkeit) zusammengefasst. Über verschiedene Kenngrößen des jeweils betrachteten Bauwerkbetons hinaus sind dort für die selbst durchgeführten Untersuchungen auch sämtliche Einzelprüfwerte, Hinweise zur Lagerung, die Parameter der Stichprobe sowie eine statistische Bewertung der Stichproben basierend auf einer logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* dargestellt.

Der Bohrkerndurchmesser wurde bei den selbst durchgeführten Untersuchungen entsprechend *DIN EN 12504-1:2009-07* stets größer als der dreifache Größtkorndurchmesser d_{\max} gewählt. Nach der Vorbereitung der Probekörper mit einem Verhältnis von $\lambda = h/d = 1,0$ durch Nassschneiden und Schleifen wurde die einachsiale Druckfestigkeit nach *DIN EN 12390-3:2009-07* oder die Spaltzugfestigkeit nach *DIN EN 12390-6:2010-09* geprüft. Auf die direkte Prüfung der zentrischen Zugfestigkeit wurde aufgrund der zu erwartenden größeren Fehleranfälligkeit durch u. a. ungewollte Exzentrizitäten verzichtet.

Die in Anhang VI.1 für die selbst durchgeführten Untersuchungen angegebene Karbonatisierungstiefe beschreibt die Dicke der karbonatisierten Schicht in Bohrkernentnahmerichtung. Um einen Einfluss der Karbonatisierung auszuschließen, wurde diese Schicht bei der Vorbereitung der Probekörper, sofern aus geometrischen Gründen möglich, durch Nassschneiden und Schleifen abgetrennt. Für die verbleibenden Probekörper wird der Einfluss der Karbonatisierung in Abschnitt 9.1.6.3 gesondert bewertet.

Die Prüfergebnisse der In-situ-Betondruck- und Zugfestigkeit wurden nicht mit einem Ausreißertest bewertet.

Mit einer Ausnahme von vier Datensätzen standen zur Prüfung der Druckfestigkeit je Bauwerk mindestens 10 und im Mittel 25 Bohrkern zur Verfügung. Für die Prüfung der Spaltzugfestigkeit lagen mit einer Ausnahme von drei Datensätzen je Bauwerk mindestens 10 und im Mittel 24 Bohrkern vor. Durch den jeweils relativ großen

Ableitung mech. Kennwerte von Bestandsbetonen aus der In-situ-Druckfestigkeit

Stichprobenumfang ist somit die statistische Belastbarkeit der Ergebnisse gewährleistet.

Das Alter der Bauwerke lag zum Zeitpunkt der Prüfung zwischen 28 und 96 Jahren.

9.1.5.2 Bewertung der Versuchsergebnisse

Die statistische Bewertung sowohl der Druckfestigkeits- als auch der Zugfestigkeitsuntersuchung erfolgte, aufbauend auf den in Abschnitt 5 beschriebenen Untersuchungen, basierend auf einer logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* (vgl. Abschnitt 3.7.3).

Da sich der in Gleichung (9.1) nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* beschriebene Zusammenhang zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit auf Untersuchungen an wassergelagerten Normzylindern mit $h/d = 2,0$ bezieht, müssen die am Bohrkern mit $h/d = 1,0$ bestimmte In-situ-Betondruckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit zunächst auf die entsprechenden Normprobekörperfestigkeiten umgerechnet werden. Einen wesentlichen Einfluss haben die Probekörpergeometrie, die Bohrkernschlankheit, das Prüfverfahren sowie die Lagerungsbedingungen. Die Abweichung zwischen der an Bohrkernen und Laborprobekörpern bestimmten Festigkeit, wie in Kapitel 7 erläutert, wurden im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen nicht gesondert berücksichtigt.

Die aus Probekörpergeometrie, Bohrkernschlankheit und Lagerungsbedingungen resultierende Umrechnung der Betondruckfestigkeit erfolgte mit den in Abschnitt 3.4.2 genannten Umrechnungsfaktoren.

Auf die Spaltzugfestigkeit hat hingegen nach *Malárics 2011* der Feuchtezustand einen vernachlässigbaren Einfluss, weshalb keine gesonderte Umrechnung erforderlich ist.

Der aus dem Prüfverfahren resultierende Unterschied zwischen zentrischer Betonzugfestigkeit und Spaltzugfestigkeit wurde mit dem in Gleichung (9.9) beschriebenen Zusammenhang nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* berücksichtigt.

$$f_{ct} = 0,9 \cdot f_{ct,sp} \quad (9.9)$$

9.1.5.3 Statistische Kenndaten der untersuchten Betone

In Abb. 9.2 ist der Variationskoeffizient v_x der Druckfestigkeit der im vorliegenden Kapitel betrachteten Bestandsbetone in Abhängigkeit vom Mittelwert der am Bohrkern mit einer Schlankheit $\lambda = h/d = 1,0$ geprüften In-situ-Betondruckfestigkeit, getrennt nach dem Umfang der Stichprobe n , dargestellt. Sowohl für Hoch- und Ingenieurbauwerke als auch für massige Bauteile kann mit zunehmendem Mittelwert der am Bohrkern geprüften In-situ-Betondruckfestigkeit eine Abnahme des empirischen Variationskoeffizienten verzeichnet werden, was den bereits in Kapitel 4 betrachteten Untersuchungen entspricht.

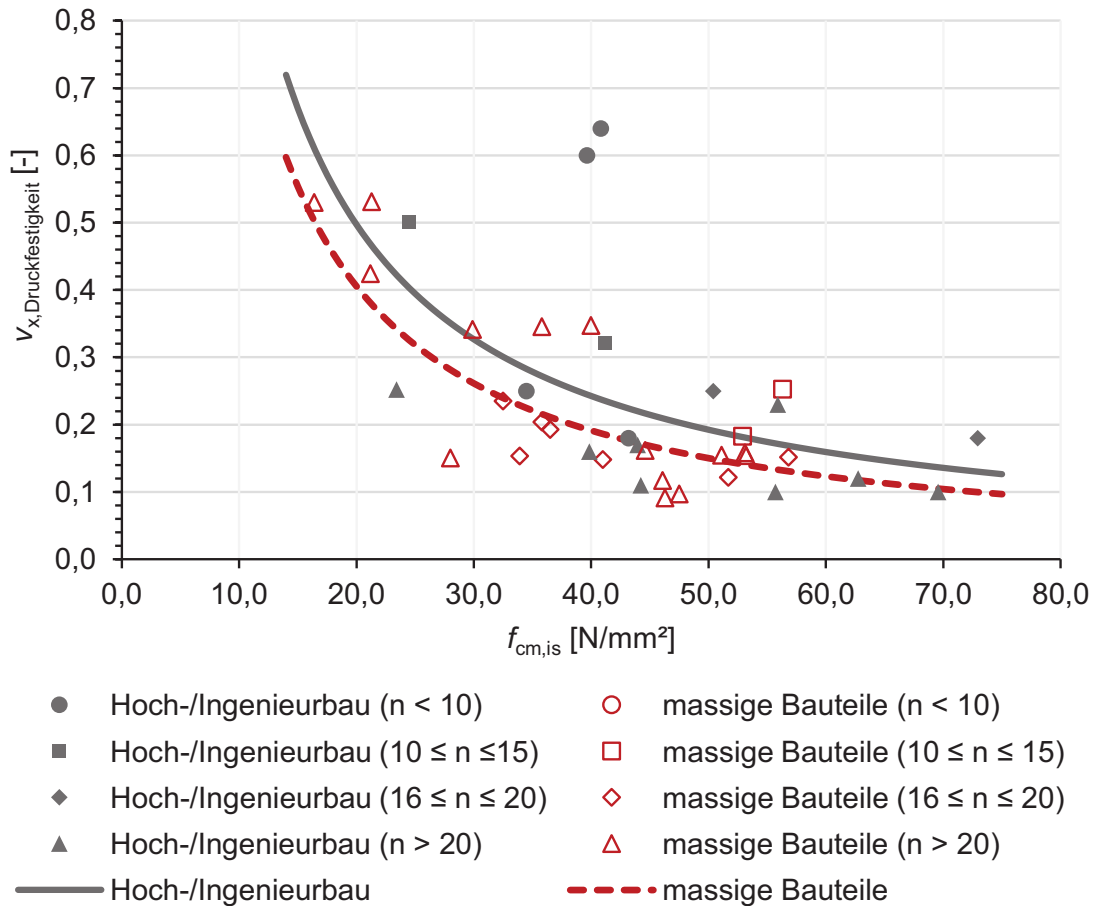


Abb. 9.2 Variationskoeffizient v_x der Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom Mittelwert der In-situ-Betondruckfestigkeit (Diagramm verändert gegenüber Weber u. Thiele 2016)

Der Mittelwert des Variationskoeffizienten der In-situ-Betondruckfestigkeit der untersuchten Hoch- und Ingenieurbauwerke liegt bei 0,26, wobei die Einzelwerte zwischen 0,10 und 0,64 liegen. Der Variationskoeffizient der In-situ-Betondruckfestigkeit übersteigt lediglich bei in Stampfbetonbauweise hergestellten Bauteilen den Wert 0,30. Für die massigen Bauteile ergibt sich ein mittlerer Variationskoeffizient der Betondruckfestigkeit von 0,23. Die Einzelwerte liegen zwischen 0,09 und 0,53.

In Abb. 9.3 ist der Variationskoeffizient der In-situ-Spaltzugfestigkeit der untersuchten Bestandsbetone in Abhängigkeit vom Mittelwert der am Bohrkern mit einer Schlankheit $\lambda = h/d = 1,0$ geprüften Spaltzugfestigkeit, getrennt nach dem Umfang der Stichprobe n , dargestellt.

Auch bei der Spaltzugfestigkeit nimmt der Variationskoeffizient sowohl für Hoch- und Ingenieurbauwerke als auch für massige Bauteile mit zunehmendem Mittelwert der am Bohrkern geprüften Spaltzugfestigkeit ab.

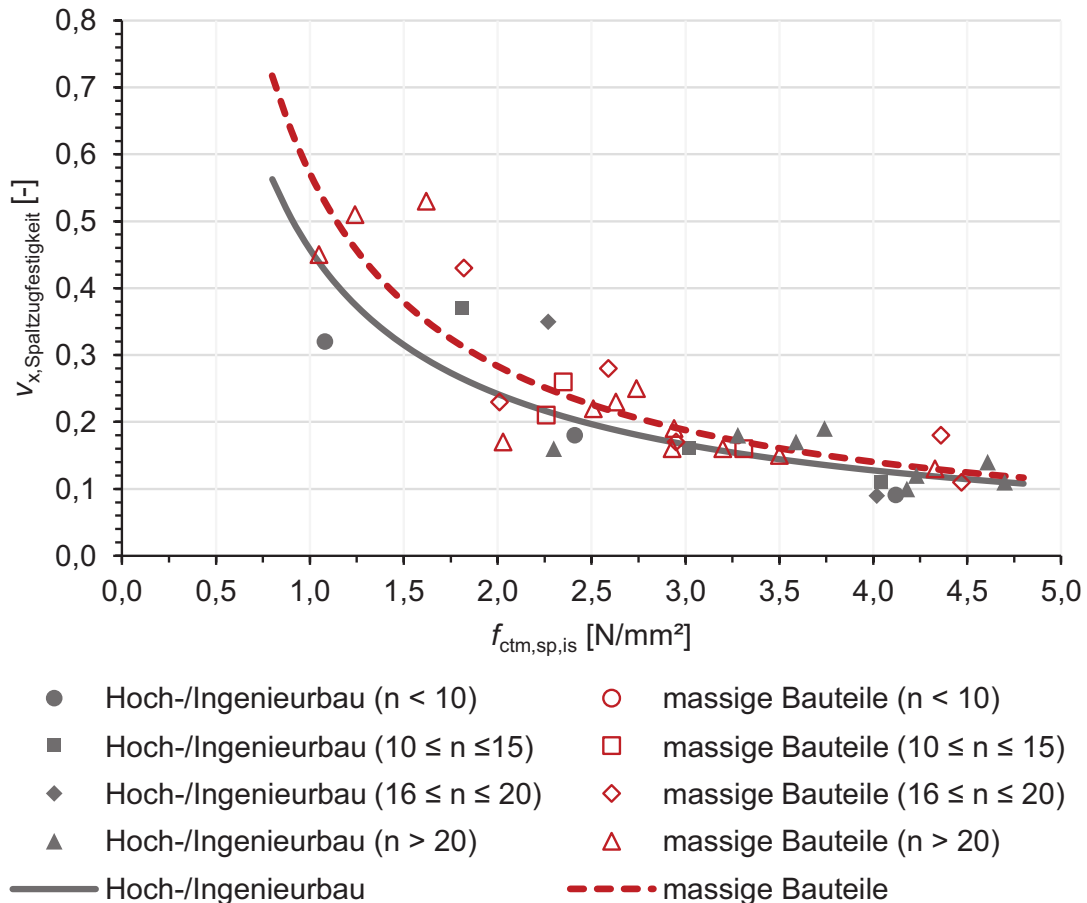


Abb. 9.3 Variationskoeffizient v_x der Spaltzugfestigkeit in Abhängigkeit vom Mittelwert der In-situ-Spaltzugfestigkeit (Diagramm verändert gegenüber Weber u. Thiele 2016)

Der Mittelwert des Variationskoeffizienten der In-situ-Spaltzugfestigkeit der untersuchten Hoch- und Ingenieurbauwerke liegt bei 0,18. Die Einzelwerte liegen dabei in einem Bereich von 0,09 bis 0,37. Variationskoeffizienten größer als 0,20 konnten lediglich bei in Stampfbetonbauweise hergestellten Bauteilen festgestellt werden. Bei den massigen Bauteilen ergibt sich ein mittlerer Variationskoeffizient der Spaltzugfestigkeit von 0,25, wobei die Einzelwerte zwischen 0,11 und 0,53 liegen.

Allgemein kann somit für das Maß der Streuung von Bestandsbetonen kein eindeutiger Unterscheid zwischen der In-situ-Betondruckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit festgestellt werden. Beide Größen streuen ungefähr im gleichen Maße.

9.1.6 Experimentell ermittelte Korrelation zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit

9.1.6.1 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

In den nachfolgenden Abbildungen Abb. 9.4 bis Abb. 9.6 ist die experimentell ermittelte Korrelation zwischen der In-situ-Betondruck- und Zugfestigkeit dargestellt. Jeder Punkt beschreibt das Ergebnis der Untersuchungen an einem Bauwerk.

Auf der Abszisse ist jeweils die charakteristische In-situ-Betondruckfestigkeit (5 %-Quantil), angepasst mit den in Abschnitt 3.4.2 genannten Umrechnungsfaktoren auf

den nassgelagerten Normzylinder mit $\lambda = h/d = 2,0$ aufgetragen. Die statistische Auswertung erfolgte auf Basis einer logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12*.

Auf der Ordinate ist jeweils die zentrische In-situ-Betonzugfestigkeit $f_{ct, is}$, welche nach Gleichung (9.9) aus der experimentell am Bauwerk bestimmten In-situ-Spaltzugfestigkeit berechnet wurde, dargestellt. Eine aus Probekörpergeometrie oder Lagerungsart resultierende Anpassung ist, wie in Abschnitt 9.1.5.2 beschrieben, nicht erforderlich.

Ein Umrechnungsfaktor zwischen Bohrkern- (in-situ) und Laborprobekörperfestigkeit, wie in Kapitel 7 beschrieben, wurde sowohl für die Druck- als auch für die Zugfestigkeit nicht gesondert berücksichtigt.

In Abb. 9.4 ist das arithmetische Mittel der zentrischen In-situ-Betonzugfestigkeit $f_{ctm, is}$, berechnet aus der experimentell ermittelten Spaltzugfestigkeit, dem theoretischen, nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* gemäß Gleichung (9.1) aus der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit berechneten Mittelwert der zentrischen Betonzugfestigkeit, gegenübergestellt.

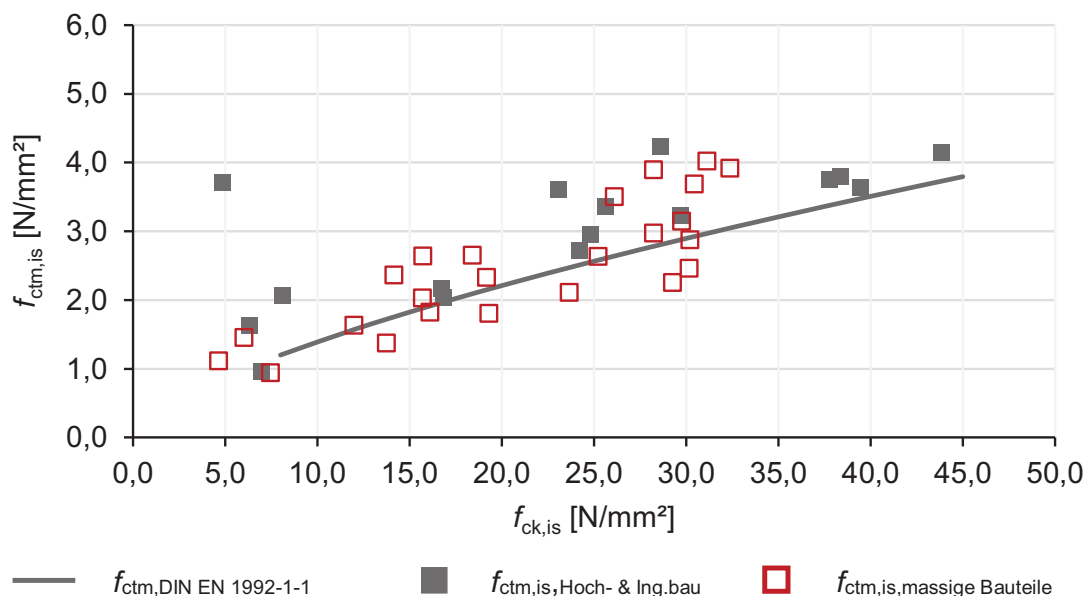


Abb. 9.4 Korrelation zwischen charakteristischer In-situ Betondruckfestigkeit $f_{ck, is}$ und Mittelwert der zentrischen In-situ Betonzugfestigkeit $f_{ctm, is}$ (Diagramm verändert gegenüber *Weber u. Thiele 2016*)

Die Verteilung der Punkte in Abb. 9.4 zeigt, dass der für den Neubaufall in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* beschriebene Zusammenhang zwischen Mittelwert der zentrischen Betonzugfestigkeit und charakteristischer Betondruckfestigkeit auch im Mittel auf Bestandsbetone übertragbar ist. Die zentrische In-situ-Betonzugfestigkeit liegt im Mittel nur leicht oberhalb der mit Gleichung (9.1) aus der charakteristischen Betondruckfestigkeit berechneten. Im Einzelfall sind aber auch teilweise nicht vernachlässigbare Abweichungen von den mit Gleichung (9.1) berechneten Werten möglich.

In Abb. 9.5 ist der 5 %-Quantilwert der zentrischen In-situ-Betonzugfestigkeit $f_{ctk; 0,05, is}$, berechnet aus der experimentell ermittelten zentrischen Spaltzugfestigkeit, dem

Ableitung mech. Kennwerte von Bestandsbetonen aus der In-situ-Druckfestigkeit

rechnerisch nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* gemäß Gleichung (9.1) und Gleichung (9.2), aus der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit berechneten 5 %-Quantilwert der zentrischen Betonzugfestigkeit gegenübergestellt.

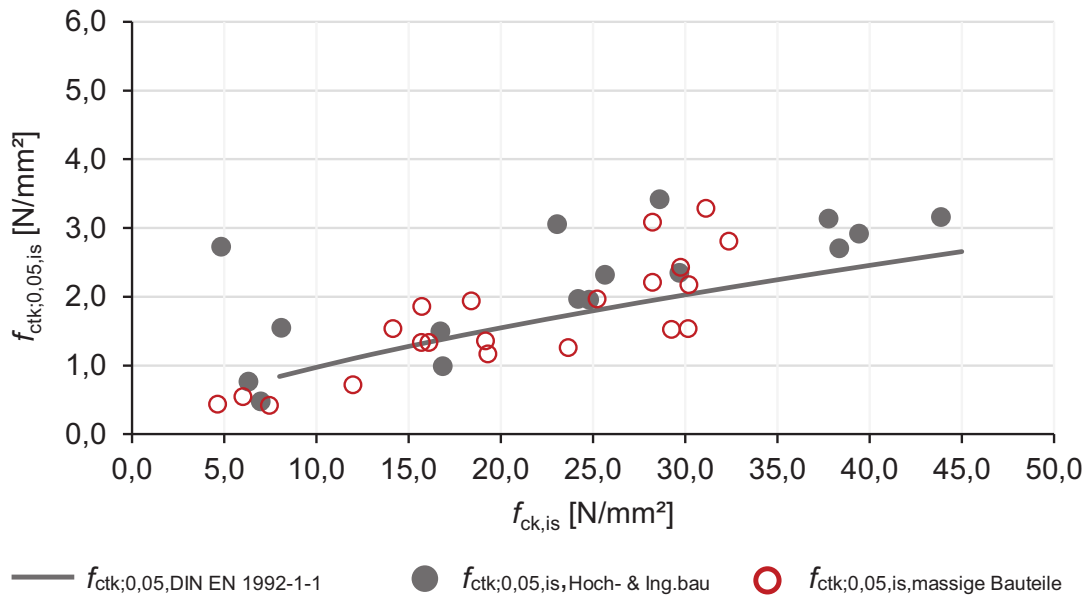


Abb. 9.5 Korrelation zwischen charakteristischer In-situ Betondruckfestigkeit $f_{ck, is}$ und 5 %-Quantilwert der zentrischen In-situ Betonzugfestigkeit $f_{ctk;0,05, is}$ (Diagramm verändert gegenüber *Weber u. Thiele 2016*)

Der mit den für den Neubaufall gültigen Gleichungen (9.1) und (9.2) aus der charakteristischen Betondruckfestigkeit berechnete 5 %-Quantilwert der zentrischen Betonzugfestigkeit unterschätzt den basierend auf Bauwerksuntersuchungen ermittelten 5 %-Quantilwerte der zentrischen In-situ-Betonzugfestigkeit, wie in Abb. 9.5 gezeigt, im Mittel nur leicht und liefert somit tendenziell auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse.

Durch die Anwendung von Gleichung (9.1) und (9.2) zur Berechnung des 5 %-Quantilwertes der zentrischen Betonzugfestigkeit aus der charakteristischen Betondruckfestigkeit werden somit die in Abb. 9.2 und Abb. 9.3 dargestellten tatsächlichen Werte des Variationskoeffizienten der Betondruckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit der untersuchten Betone mit ausreichender Genauigkeit erfasst. Bei einer auf Untersuchungen am Bauwerk basierenden Berechnung des 5 %-Quantilwertes der In-situ-Betonzugfestigkeit sollte jedoch stets die an der Stichprobe ermittelte Streuung durch eine eigene statistische Auswertung berücksichtigt werden, da diese wie in Abb. 9.3 am Beispiel der Spaltzugfestigkeit dargestellt, den Gleichung (9.2) zugrunde liegenden Wert $v_x \approx 0,18$ teilweise erheblich übersteigt.

Der aus der experimentell ermittelten zentrischen Spaltzugfestigkeit berechnete 95 %-Quantilwert der zentrischen In-situ-Betonzugfestigkeit $f_{ctk;0,95, is}$ ist in Abb. 9.6 dargestellt.

Wie bereits der 5 %-Quantilwert unterschätzt auch der mit der für den Neubaufall gültigen Gleichungen (9.1) und (9.3) aus der charakteristischen Betondruckfestigkeit berechnete 95 %-Quantilwert der zentrischen Betonzugfestigkeit den basierend auf Bauwerksuntersuchungen ermittelten 95 %-Quantilwert der zentrischen In-situ-

Betonzugfestigkeit, wie in Abb. 9.6 gezeigt, im Mittel leicht und liefert damit tendenziell geringfügig auf der unsicheren Seite liegende Ergebnisse.

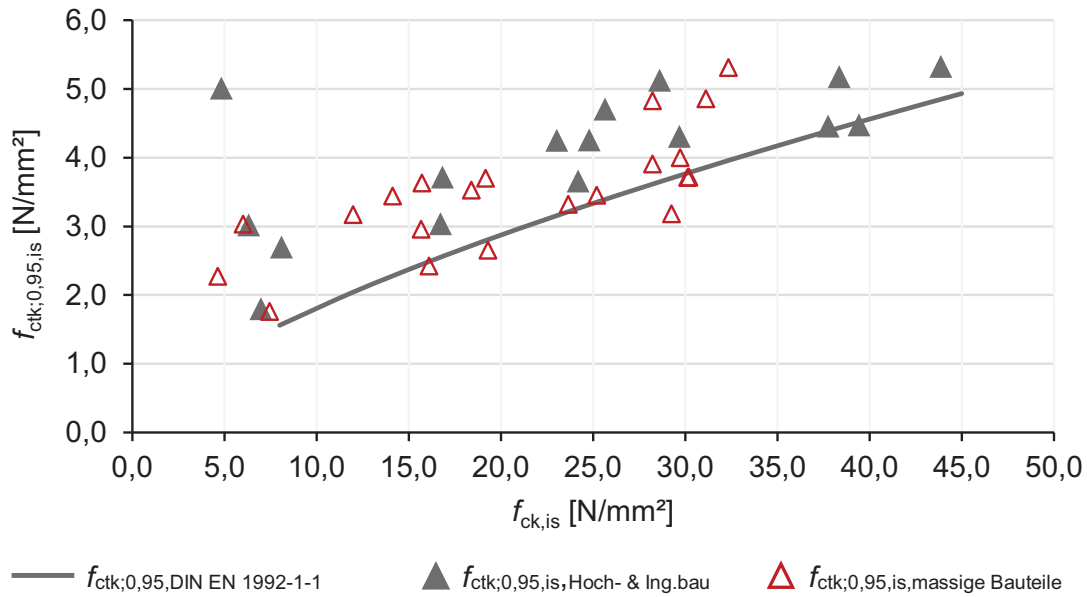


Abb. 9.6 Korrelation zwischen charakteristischer In-situ Betondruckfestigkeit $f_{ck,is}$ und 95 %-Quantilwert der zentrischen In-situ Betonzugfestigkeit $f_{ctk;0,95,is}$ (Diagramm verändert gegenüber *Weber u. Thiele 2016*)

Allgemein werden auch bei einer Berechnung des 95 %-Quantilwertes der zentrischen In-situ-Betonzugfestigkeit gemäß Gleichung (9.1) und (9.3) die tatsächliche Streuung der In-situ-Betondruckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit der untersuchten Betone ausreichend genau abgedeckt. Im Einzelfall sollte jedoch die tatsächliche Streuung berücksichtigt werden, da sie den Gleichung (9.3) zugrunde liegenden Wert $\nu_x \approx 0,18$ teilweise erheblich übersteigt.

Zur Identifizierung eines eventuellen Einflusses auf das Verhältnis zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit von Bestandsbetonen werden nachfolgend die Karbonatisierungstiefe sowie das Bauwerksalter betrachtet.

9.1.6.2 Einfluss des Bauwerksalters auf den Zusammenhang zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit

Das Bauwerksalter schließt neben verschiedenen last- und zeitabhängigen Einflüssen auch die Güte und den Umfang der zum Zeitpunkt der Herstellung durchzuführenden Betonüberwachung mit ein. Eine Zusammenstellung der zum Zeitpunkt der Herstellung in Deutschland durchzuführenden Betonüberwachung ab dem Jahr 1904 kann Abschnitt 4.2.3.4 entnommen werden.

In Abb. 9.7 ist die Abweichung zwischen der experimentell auf Basis der In-situ-Spaltzugfestigkeit und der rechnerisch nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* aus der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit nach Gleichung (9.1) bestimmten mittleren zentrischen Zugfestigkeit in Abhängigkeit vom Baujahr dargestellt. Die Abweichung wird dabei als relative Größe, bezogen auf die rechnerisch bestimmte mittlere zentrische Zugfestigkeit, angegeben. Ein positiver Wert bedeutet dabei, dass die am Bauwerk ermittelte zentrische In-situ-Zugfestigkeit größer ist als die nach

Ableitung mech. Kennwerte von Bestandsbetonen aus der In-situ-Druckfestigkeit

DIN EN 1992-1-1:2011-01 aus der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit berechnete. Die Werte streuen im Bereich von einer Unterschreitung von ca. 20 % bis hin zu einer Überschreitung von ca. 70 %. Ein allgemeiner Einfluss des Bauwerksalters auf die Größe der Abweichung kann aufgrund der durchgeführten Untersuchungen nicht festgestellt werden. Ein systematischer Einfluss des Herstellungszeitraums entsprechend den in Abschnitt 9.1.3.2 für die verschiedenen Normausgaben beschriebenen Zusammenhänge zwischen Druck- und Zugfestigkeit kann ebenfalls nicht festgestellt werden.

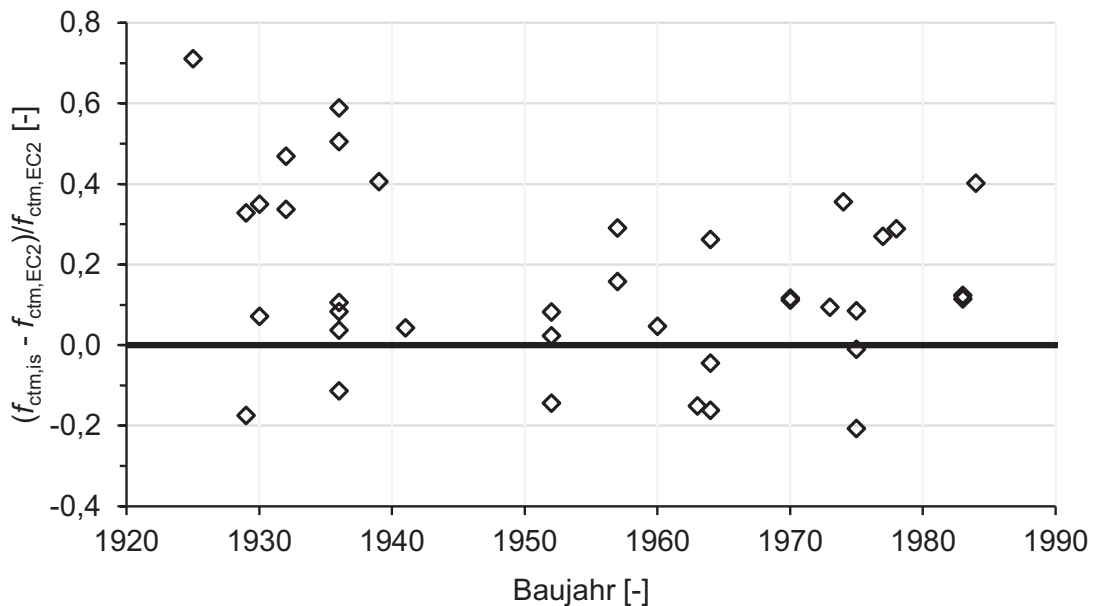


Abb. 9.7 Einfluss des Baujahrs auf die Abweichung zwischen der experimentell ermittelten und nach DIN EN 1992-1-1 aus der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit berechneten mittleren zentralen Zugfestigkeit (Diagramm verändert gegenüber Weber u. Thiele 2016)

Weiterhin ist in Abb. 9.8 für die in Abschnitt 9.1 und Anhang VI.1 betrachteten Betone die Streuung der In-situ-Betondruck- bzw. Spaltzugfestigkeit in Abhängigkeit vom Baujahr dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die teilweise sehr großen Variationskoeffizienten speziell bei Bauwerken, die vor ca. 1940 erstellt wurden, auftreten. Allgemein nehmen sowohl die Streuung der Betondruckfestigkeit als auch die Streuung der Spaltzugfestigkeit mit jüngerem Baujahr ab.

Wie bereits in Abschnitt 4.2.3.4 erläutert, ist die große Streuung jedoch nicht in einer schlechten oder mangelhaften Überwachung der Bauausführung, sondern vielmehr in der Ausführungsart (Stampfbetonbauweise) zu suchen.

Speziell bei der Untersuchung älterer Betone aus einem Zeitraum vor ca. 1940 sollte die tatsächlich am Bauwerk vorliegende Streuung berücksichtigt werden.

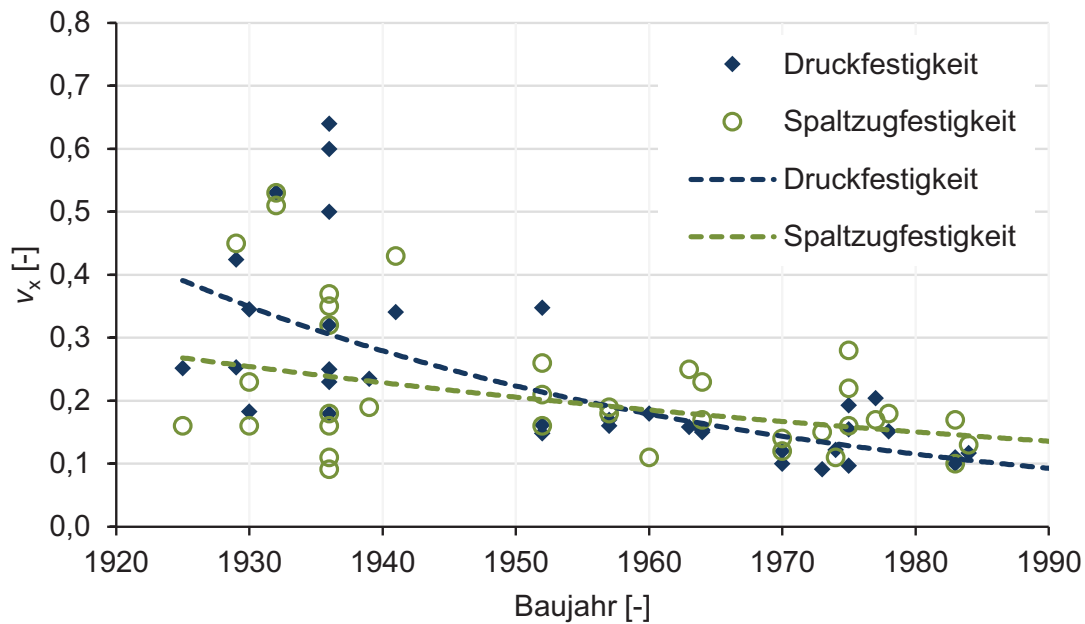


Abb. 9.8 Einfluss des Baujahrs auf die Streuung der In-situ-Betondruckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit (Diagramm verändert gegenüber Weber u. Thiele 2016)

9.1.6.3 Einfluss der Karbonatisierung auf den Zusammenhang zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit

Bei drei der untersuchten Bauwerkbetone konnte eine tiefgehende Karbonatisierungsschicht bis hin zur vollständigen Karbonatisierung der Probekörper festgestellt werden, welche im Rahmen der Vorbereitung der Probekörper nicht entfernt wurde. In Abb. 9.9 sind der Mittelwert sowie der 5 %- und 95 %-Quantilwert der zentrischen In-situ-Betonzugfestigkeit $f_{ct, is}$, berechnet aus der experimentell ermittelten zentrischen Spaltzugfestigkeit den rechnerisch nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* gemäß Gleichung (9.1), (9.2) und (9.3) aus der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit berechneten Werten der zentrischen Betonzugfestigkeit gegenübergestellt.

Basierend auf den Untersuchungsdaten der drei betrachteten Bauwerkbetone kann kein maßgeblicher und allgemeingültiger Einfluss der Karbonatisierung auf die Korrelation zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit festgestellt werden. Auch für karbonatisierte Betone stimmen die nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* auf Grundlage der Betondruckfestigkeit berechneten Werte der zentrischen Betonzugfestigkeit weitestgehend mit den experimentell ermittelten Werten der Betonzugfestigkeit überein. Lediglich der tatsächliche 95 %-Quantilwert der zentrischen In-situ-Betonzugfestigkeit wird bei einer Berechnung aus der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit in allen drei Fällen leicht unterschätzt. Eine mögliche Ursache hierfür ist jedoch weniger die Karbonatisierung, sondern eher die in Tab. 9.1 dargestellte, recht hohe Streuung, welche den Gleichung (9.2) und (9.3) zugrunde liegenden Wert $v_x \approx 0,18$ teilweise deutlich überschreitet.

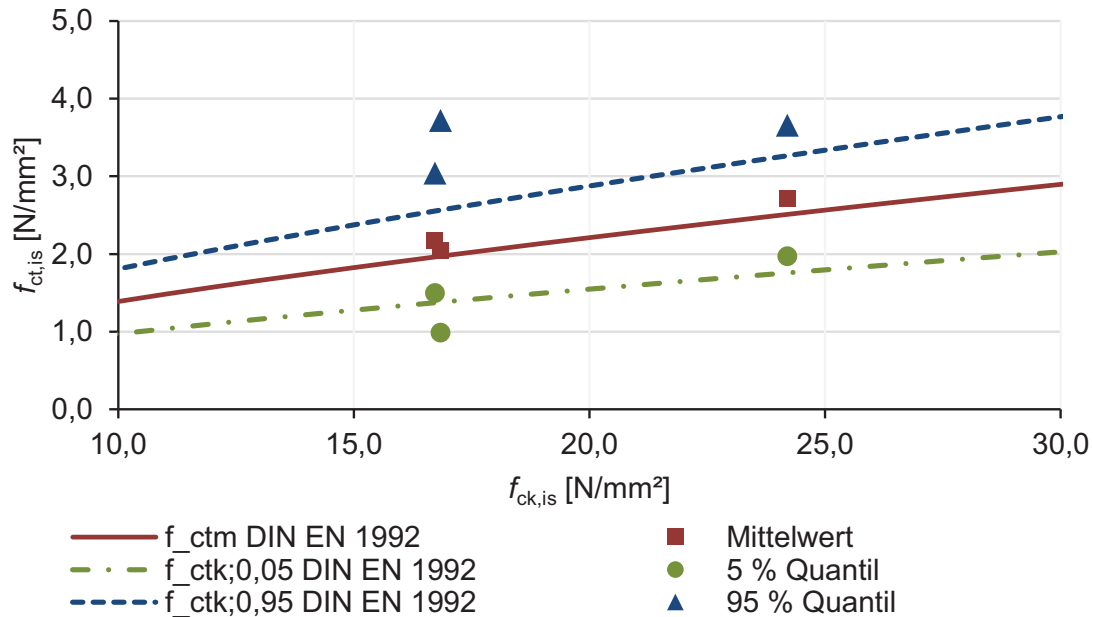


Abb. 9.9 Korrelation zwischen charakteristischer In-situ Betondruckfestigkeit $f_{ck, is}$ und zentrischer In-situ Betonzugfestigkeit $f_{ct, is}$ für karbonatisierte Betone (Diagramm verändert gegenüber *Weber u. Thiele 2016*)

Tab. 9.1 Variationskoeffizient der karbonatisierten Bauwerkbetone

Bauwerk	$V_x, \text{Druckfestigkeit}$	$V_x, \text{Spaltzugfestigkeit}$
	[-]	[-]
Lautertalbrücke Pfeiler A, Kaiserslautern	0,18	0,16
Lautertalbrücke Pfeiler D, Kaiserslautern	0,32	0,35
Lautertalbrücke Pfeiler E, Kaiserslautern	0,25	0,18

9.1.7 Zwischenfazit

Die im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen an Bestandstragwerken zeigen, dass das bereits in *Heilmann 1969* und *Rüsch 1975* dargestellte Modell zur Beschreibung der Korrelation zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit nach Gleichung (9.4), welches mit einem Vorfaktor $c = 0,30$ auch in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* enthalten ist, im Mittel auch bei Bestandsbetonen anwendbar ist. Dennoch ist bei Bestandsbetonen im Einzelfall bei einer Berechnung der mittleren zentrischen Zugfestigkeit aus dem charakteristischen Wert der Betondruckfestigkeit zu berücksichtigen, dass der nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* berechnete Wert die tatsächlich am Bauwerk vorliegende mittlere zentrische Zugfestigkeit sowohl über- als auch unterschätzen kann.

Im Hinblick auf das allgemeine Streuverhalten von Bestandsbetonen zeigen die Untersuchungen, dass sowohl mit steigendem Mittelwert der In-situ-Betondruckfestigkeit als auch der In-situ-Spaltzugfestigkeit der Variationskoeffizient abnimmt, was den bereits in Kapitel 4 beschriebenen Untersuchungen entspricht.

Des Weiteren konnte ein Einfluss des Baujahrs auf das Maß der Streuung festgestellt werden. Je früher das Bauwerk errichtet wurde, desto größere Streuungen sind möglich. Speziell bei Bauwerken, die vor ca. 1940 errichtet wurden, sind Variationskoeffizienten weit über 0,20 möglich. Die Ursache hierfür liegt jedoch nicht in einer mangelhaften Überwachung der Bauausführung, sondern eher in der verwendeten Stampfbetonbauweise.

Grundsätzlich sollte daher besonders bei älteren Betonen aus einem Zeitraum vor ca. 1940 zur Bestimmung des 5 %- bzw. 95 %-Quantilwertes die tatsächliche Streuung der Zugfestigkeit berücksichtigt werden, da diese den Gleichungen (9.2) und (9.3) zugrunde liegenden Wert $v_x \approx 0,18$ teilweise erheblich übersteigt.

Sowohl dem Bauwerksalter als auch einer eventuellen Karbonatisierung kann kein maßgebender Einfluss auf das Verhältnis zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit zugemessen werden.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass unabhängig vom Bauwerksalter Über- bzw. Unterschreitungen des nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* aus der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit berechneten Mittelwertes der zentrischen Zugfestigkeit in gleichem Maße möglich sind. Auch die untersuchten karbonatisierten Betone zeigen keine systematischen Abweichungen zu den nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* aus der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit berechneten Werten.

Eine Reduzierung des Rechenwertes der zentrischen Zugfestigkeit von Bestandsbetonen, wie in *BAW 2016* entsprechend Gleichung (9.8) empfohlen, scheint basierend auf den im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachteten Untersuchungen an Hoch-, Ingenieurbauwerken und massigen Bauteilen nicht erforderlich. Allgemein liegt somit die Vermutung nahe, dass das in *BAW 2016* empfohlene Vorgehen hauptsächlich auf die statistische Auswertung mit einem Konfidenzniveau von 95 % zurückzuführen ist.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* beschriebene Korrelation zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit auch zur Abschätzung der Zugfestigkeit von Bestandsbetonen geeignet ist. Spielt die tatsächlich am Bauwerk vorliegende Zugfestigkeit eine wesentliche Rolle, wie z. B. bei der Bemessung von Befestigungsmitteln oder die Nachrechnung der Querkrafttragfähigkeit, empfiehlt es sich, die Zugfestigkeit des Bauwerkbetons durch Probeentnahme am Bauwerk zu bestimmen.

9.2 Korrelation von Betondruckfestigkeit und Elastizitätsmodul

9.2.1 Allgemeines

Über die Angaben zur Korrelation zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit hinaus sind in der in Deutschland für die Bemessung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken aktuell bauaufsichtlich eingeführten *DIN EN 1992-1-1:2011-01* auch Angaben zum Zusammenhang zwischen Betondruckfestigkeit und Elastizitätsmodul enthalten. Diese Regeln beziehen sich jedoch ausschließlich auf im Neubaufall verwendete Betone nach *DIN EN 206-1:2001-07*.

Ableitung mech. Kennwerte von Bestandsbetonen aus der In-situ-Druckfestigkeit

Die Gültigkeit der in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* aufgeführten Beziehung zwischen Betondruckfestigkeit und Elastizitätsmodul kann aufgrund verschiedener last- und zeitabhängiger Einflüsse für Bestandsbetone nicht ohne weitere Überlegungen vorausgesetzt werden. Einflüsse aus Mikrorissbildung infolge thermisch-hygrischer Eigenspannungen, Nacherhärtung und Karbonatisierung sind noch nicht abschließend erforscht.

Zur Bewertung des Zusammenhangs zwischen Betondruckfestigkeit und Elastizitätsmodul von Bestandsbetonen wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die nachfolgend erläuterten Untersuchungen durchgeführt. Die Bauwerksuntersuchungen basieren dabei auf einer Bohrkernentnahme mit anschließender Prüfung der Betondruckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls.

9.2.2 Korrelation zwischen Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul nach DIN EN 1992-1-1

Nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* wird der Zusammenhang zwischen dem mittleren Elastizitätsmodul E_{cm} und dem Mittelwert der Betondruckfestigkeit f_{cm} nach Gleichung (9.10) beschrieben. E_{cm} ist dabei der Sekantenmodul bei einer Spannung $\sigma_c \approx 0,4 \cdot f_{cm}$ definiert und beschreibt somit die Steifigkeit des ungerissenen Betons.

$$E_{cm} = 22.000 \cdot (f_{cm} / 10)^{0,3} \quad (9.10)$$

mit:

E_{cm} 28-Tage-Wert des mittleren Elastizitätsmoduls des Betons als Sekante

f_{cm} Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit des Betons nach 28 Tagen

Allgemein ist jedoch zu beachten, dass wie in *DAfStb 600* und *Fingerloos et al. 2016* erläutert, die mit Gleichung (9.10) berechneten 28-Tage-Werte des mittleren E-Moduls lediglich für Betonsorten mit quarzhaltigen Gesteinskörnungen (Quarze als dominierende Mineralart, wie z. B. Quarzsand) gelten. Die Begründung hierfür liegt darin, dass der E-Modul des Betons durch die E-Moduln der Gesteinskörnung und Zementsteinmatrix sowie durch den Verbund zwischen Zementstein und Gesteinskörnung maßgebend beeinflusst wird. Der E-Modul der Gesteinskörnung streut in einem sehr großen Bereich zwischen ca. 10.000 N/mm² bei Sandstein und ca. 90.000 N/mm² bei Basalt, weshalb der E-Modul der Gesteinskörnung bei der Festlegung des E-Moduls des Betons unbedingt zu berücksichtigen ist.

Der Tangentenmodul E_c im Ursprung der Spannungs-Dehnungs-Linie wird in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* mit $1,05 E_{cm}$ angegeben.

9.2.3 Weitere normative Regelungen

9.2.3.1 Regelungen nach DIN 1045-1:2008

In *DIN 1045-1:2008-08* sind ebenfalls Angaben zum Zusammenhang zwischen der Betondruckfestigkeit und dem Elastizitätsmodul enthalten, wobei zwischen Tangenten- und Sekantenmodul unterschieden wird.

Ableitung mech. Kennwerte von Bestandsbetonen aus der In-situ-Druckfestigkeit

Der Zusammenhang zwischen dem mittleren Tangentenmodul E_{c0m} und der charakteristischen Betondruckfestigkeit f_{ck} wird in *DIN 1045-1:2008-08* entsprechend Gleichung (9.11) beschrieben.

$$E_{c0m} = 9500 \cdot (f_{ck} + 8)^{1/3} \quad (9.11)$$

mit:

E_{c0m} 28-Tage-Wert des mittleren Elastizitätsmoduls des Betons als Tangente im Ursprung der Spannungs-Dehnungs-Linie

f_{ck} charakteristische Zylinderdruckfestigkeit des Betons nach 28 Tagen

Der Zusammenhang zwischen dem mittleren Tangentenmodul E_{c0m} und dem mittleren Sekantenmodul E_{cm} wird in *DIN 1045-1:2008-08* entsprechend Gleichung (9.12) beschrieben.

$$E_{cm} = \alpha_i \cdot E_{c0m} \quad (9.12)$$

mit:

E_{cm} 28-Tage-Wert des mittleren Elastizitätsmoduls des Betons als Sekante bei einer Spannung $\sigma_c \approx 0,4 \cdot f_{cm}$ (*DAfStb 525:2010*)

α_i Beiwert nach Gleichung (9.13)

$$\alpha_i = (0,8 + 0,2 \cdot f_{cm} / 88) \leq 1,0 \quad (9.13)$$

Der in *DIN 1045-1:2008-08* beschriebene Zusammenhang zwischen Betondruckfestigkeit und Elastizitätsmodul wird in *BAW 2016* auch für Bestandsbetone empfohlen.

9.2.3.2 Regelungen nach DIN 1045-1:2001

Die in *DIN 1045-1:2001-07* enthaltenen Angaben zum Zusammenhang zwischen Betondruckfestigkeit und Elastizitätsmodul entsprechend den zuvor beschriebenen Beziehungen nach *DIN 1045-1:2008-08*.

9.2.3.3 Regelungen nach DIN 1045:1988

In *DIN 1045:1988-07* sind sog. Rechenwerte für den Elastizitätsmodul des Betons entsprechend Tab. 9.2 angegeben. Die Zuordnung der Festigkeitsklasse nach *DIN 1045:1988-07* zu einer aktuellen Festigkeitsdefinition nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* erfolgte basierend auf *DAfStb 616*.

Ableitung mech. Kennwerte von Bestandsbetonen aus der In-situ-Druckfestigkeit

Tab. 9.2 Rechenwerte des Elastizitätsmoduls des Betons nach *DIN 1045:1988-07*

Festigkeitsklasse nach DIN 1045:1988	B 10	B 15	B 25	B 35	B 45	B 55
$f_{ck,cyl}$ nach DIN EN 1992-1-1 [N/mm ²]	8,0	12,0	20,0	27,5	35,5	43,5
Elastizitätsmodul E_b [N/mm ²]	22.000	26.000	30.000	34.000	37.000	39.000

9.2.3.4 Regelungen nach DIN 1045:1978

Die in *DIN 1045:1978-12* enthaltenen Angaben zum Zusammenhang zwischen Betondruckfestigkeit und Elastizitätsmodul entsprechend den zuvor beschriebenen Beziehungen nach *DIN 1045:1988-07*.

9.2.3.5 Regelungen nach DIN 1045:1972

In *DIN 1045:1972-01* sind ebenfalls sog. Rechenwerte für den Elastizitätsmodul des Betons entsprechend Tab. 9.3 angegeben. Die Zuordnung der Festigkeitsklasse nach *DIN 1045:1972-01* zu einer aktuellen Festigkeitsdefinition nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* erfolgte wieder basierend auf *DAfStb 616*.

Tab. 9.3 Rechenwerte des Elastizitätsmoduls des Betons nach *DIN 1045:1972-01*

Festigkeitsklasse nach DIN 1045:1972	Bn 100	Bn 150	Bn 250	Bn 350	Bn 450	Bn 550
$f_{ck,cyl}$ nach DIN EN 1992-1-1 [N/mm ²]	8,0	12,0	20,0	27,5	35,5	43,5
Elastizitätsmodul E_b [kp/cm ²] *	220.000	260.000	300.000	340.000	370.000	390.000

* 10 kp/cm² = 1 N/mm²

Nach *Bonzel et al. 1972* entsprechen die in Tab. 9.3 angegebenen Werte des Elastizitätsmoduls dem gerundeten Mittelwert des Elastizitätsmoduls von normalen Betonsorten, ermittelt als Sekantenmodul bei einer erstmaligen Belastung mit etwa $1/3 \beta_{wN}$ (Mindestwert der Druckfestigkeit β_{wN} jedes Würfels – Erläuterung siehe *DAfStb 616*), gemessen nach einer Belastungsdauer von 10 Minuten.

9.2.3.6 Regelungen nach DIN 1045:1959

In *DIN 1045:1959-11* wird der Elastizitätsmodul unabhängig von der Güteklasse des Betons angegeben.

Für die Spannungsermittlung und für das Bemessen der Bauteile wird ein Verhältnis der Elastizitätsmaße von Stahl und Beton $n = 15$, was $E_b = 140.000 \text{ kg/cm}^2$ entspricht, angegeben. Für die Umrechnung der Einheiten gilt $10 \text{ kg/cm}^2 = 1 \text{ N/mm}^2$.

Für die Berechnung der unbekanntenen Größen statisch unbestimmter Tragwerke und der elastischen Formänderungen aller Tragwerke wird in *DIN 1045:1959-11* ein für Druck und Zug gleich großes Elastizitätsmaß $E_b = 210.000 \text{ kg/cm}^2$ angegeben.

Die Werte entsprechen, wie in Abb. 9.10 dargestellt, der von der Belastung abhängigen Neigung der Tangente an die Spannungs-Dehnungs-Linie des Betons.

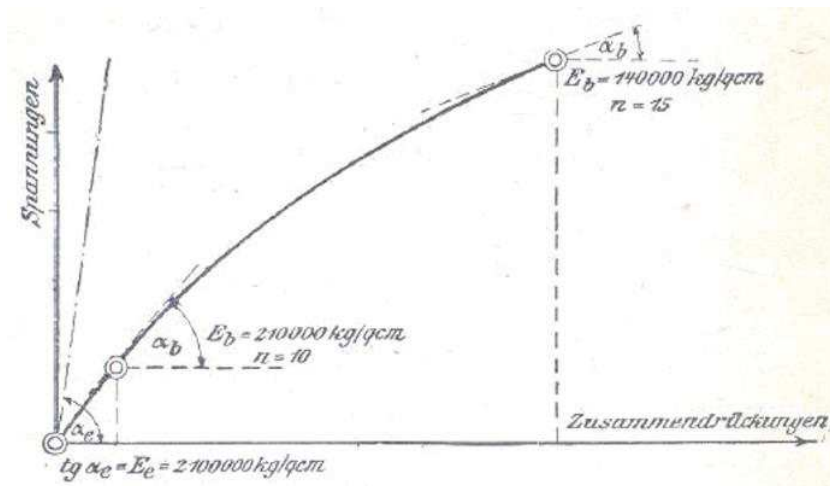


Abb. 9.10 Spannungs-Dehnungs-Linie für gedrückten Beton nach *DIN 1045:1959-11* und Gehler u. Palen 1952

Die in *DIN 1045:1959-11* angegebenen Regelungen zum sog. Elastizitätsmaß des Betons sind in gleichlautender Form bereits in *DIN 1045:1943-03* enthalten.

9.2.3.7 Regelungen nach MC 2010

In *fib Model Code 2010* wird für Normalbetone im Alter von 28 Tagen der Elastizitätsmodul als mittlerer Tangentenmodul im Ursprung der Spannungs-Dehnungs-Linie entsprechende Gleichung (9.14) angegeben.

$$E_{ci} = 21.500 \cdot \alpha_E \cdot (f_{cm} / 10)^{0,3} \quad (9.14)$$

mit:

f_{cm} 28-Tage-Wert der mittleren Betondruckfestigkeit

α_E Beiwert zur Berücksichtigung des Typs der Gesteinskörnung nach Tab. 9.4

Tab. 9.4 Beiwerte α_E zur Berücksichtigung des Typs der Gesteinskörnung bei der Bestimmung des Elastizitätsmoduls nach *fib Model Code 2010*

Gesteinskörnung	Basalt	Quarzite	Kalkstein	Sandstein
α_E [-]	1,2	1,0	0,9	0,7

Zur Berücksichtigung plastischer Dehnungen und Verformungen wird für elastische Berechnungen in *fib Model Code 2010* ein reduzierter Elastizitätsmodul E_c nach Gleichung (9.15) empfohlen, was dem in *DIN 1045-1:2008-08* enthaltenen Vorgehen zur Berechnung des mittleren Sekantenmoduls entspricht.

$$E_c = (0,8 + 0,2 \cdot f_{cm} / 88) \cdot E_{ci} \quad (9.15)$$

9.2.4 Eigene experimentelle Untersuchungen an bestehenden Beton-, Stahlbeton- und Spannbetontragwerken

9.2.4.1 Versuchsprogramm

Zur Bewertung der Korrelation zwischen der Druckfestigkeit und dem Elastizitätsmodul von Bestandsbetonen wurden an insgesamt 14 Bauwerken in Beton-, Stahlbeton- oder Spannbetonbauweise des Hoch- und Ingenieurbaus experimentelle Untersuchungen durch Bohrkernentnahme und anschließender Prüfung der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls durchgeführt.

Von den 14 hier betrachteten Bauwerksuntersuchungen wurden zehn selbst durchgeführt. Die verbleibenden vier Untersuchungen (Lautertalbrücke Pfeiler B bis C) entstammen der Literatur und einer Anfrage auf nationaler Ebene.

Die Ergebnisse der Bauwerksuntersuchungen sind in Anhang I (Druckfestigkeit) und Anhang VI.2 (Elastizitätsmodul) zusammengefasst. Über verschiedene Kenngrößen des jeweils betrachteten Bauwerkbetons hinaus sind dort auch sämtliche Einzelprüfwerte, Hinweise zur Lagerung und zur Art der Gesteinskörnung sowie die Parameter der Stichprobe dargestellt.

Der Bohrkerndurchmesser wurde bei den selbst durchgeführten Untersuchungen entsprechend *DIN EN 12504-1:2009-07* stets größer als der dreifache Größtkorndurchmesser d_{max} gewählt. Nach der Vorbereitung der Probekörper mit einem Verhältnis von $\lambda = h/d = 2,0$ durch Nassschneiden und Schleifen wurde der Elastizitätsmodul nach *DIN EN 12390-13:2014-06* geprüft. Zur Bestimmung der oberen Prüfspannung wurde an weiteren Probekörpern die Druckfestigkeit nach *DIN EN 12390-3:2009-07* bestimmt. Die Werte sind ebenfalls in Anhang VI.2 angegeben. Die Probekörper zur Prüfung der Druckfestigkeit (für die Bestimmung des Lastniveaus) und des Elastizitätsmoduls wurden unter den gleichen Bedingungen bis zur Prüfung gelagert.

Die Prüfergebnisse wurden nicht mit einem Ausreißertest bewertet.

Zur Prüfung des Elastizitätsmoduls standen je Bauwerk zwischen zwei und 14 und im Mittel ca. sieben Probekörper zur Verfügung. Das Alter der Bauwerke lag zum Zeitpunkt der Prüfung zwischen 43 und 61 Jahren.

9.2.4.2 Bewertung der Versuchsergebnisse

Der in Gleichung (9.10) nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* beschriebene Zusammenhang zwischen Betondruckfestigkeit und Elastizitätsmodul basiert auf Untersuchungen an Normzylindern mit $h/d = 2,0$.

Infolgedessen wurde die am Bohrkern bestimmte In-situ-Betondruckfestigkeit zunächst aufgrund der abweichenden Bohrkernschlankheit wie in Abschnitt 3.4.2 beschrieben auf die entsprechende Zylinderfestigkeit umgerechnet. Die Abweichung zwischen der an Bohrkernen und Laborprobekörpern bestimmten Festigkeit, wie in

Kapitel 7 erläutert, wurden im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen nicht berücksichtigt.

Die experimentell ermittelten Werte des Elastizitätsmoduls wurden nicht gesondert angepasst, da sie bereits direkt an Bohrkernen mit einer Schlankheit $h/d = 2,0$ ermittelt wurden. Eine aus der Art der Lagerung resultierende Umrechnung ist ebenfalls nicht erforderlich, da die Probekörper zur Bestimmung der In-situ-Betondruckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls auf die gleiche Art gelagert wurden.

Allgemein ist bei der Bewertung der Untersuchungsergebnisse zu beachten, dass die in Anhang VI.2 angegebenen, nach *DIN 1048-5:1991-06* oder *DIN EN 12390-13:2014-06* ermittelten Werte des Elastizitätsmoduls dem Sekantenmodul entsprechen.

9.2.5 Experimentell ermittelte Korrelation zwischen Betondruckfestigkeit und Elastizitätsmodul

9.2.5.1 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

In Abb. 9.11 ist die experimentell ermittelte Korrelation zwischen der In-situ-Betondruckfestigkeit und dem Elastizitätsmodul dem theoretischen, nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* gemäß Gleichung (9.10) aus der mittleren In-situ-Betondruckfestigkeit berechneten Mittelwert des Elastizitätsmoduls gegenübergestellt. Jeder Punkt beschreibt das Ergebnis der Untersuchungen an einem Bauwerk.

Auf der Abszisse ist jeweils der Mittelwert der In-situ-Betondruckfestigkeit, angepasst mit den in Abschnitt 3.4.2 genannten Umrechnungsfaktoren auf den Normzylinder mit $\lambda = h/d = 2,0$ aufgetragen. Eine aus der Lagerungsart resultierende Umrechnung wurde nicht durchgeführt.

Auf der Ordinate ist jeweils der experimentell am Bauwerk bestimmte mittlere Elastizitätsmodul $E_{cm, is}$ dargestellt.

Die Verteilung der Punkte in Abb. 9.11 zeigt, dass der für den Neubaufall in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* beschriebene Zusammenhang zwischen dem Mittelwert des Elastizitätsmoduls und dem Mittelwert der Betondruckfestigkeit nur für eine grobe Abschätzung des In-situ-Elastizitätsmoduls geeignet ist. Der mittlere In-situ-Elastizitätsmodul liegt tendenziell leicht unterhalb des mit Gleichung (9.10) nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* aus der mittleren Betondruckfestigkeit berechneten.

Zur Identifizierung eventueller Einflussgrößen auf das Verhältnis zwischen Betondruckfestigkeit und Elastizitätsmodul von Bestandsbetonen wird nachfolgend das Bauwerksalter betrachtet.

Ableitung mech. Kennwerte von Bestandsbetonen aus der In-situ-Druckfestigkeit

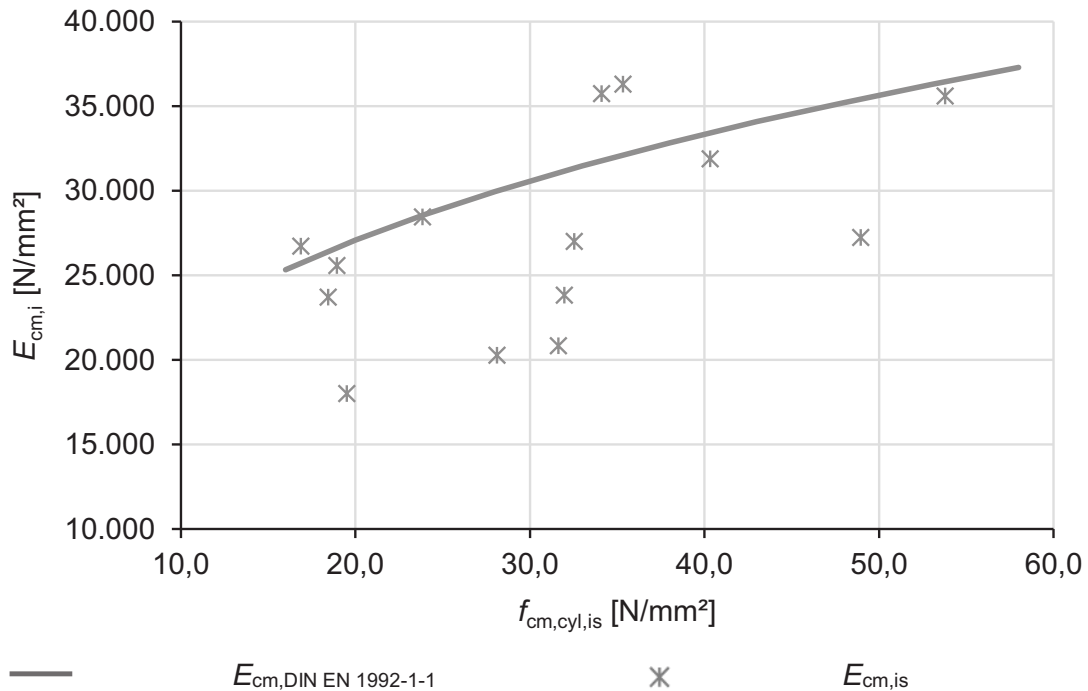


Abb. 9.11 Korrelation zwischen mittlerer In-situ Betondruckfestigkeit (bezogen auf die Schlankheit $\lambda = h/d = 2,0$) $f_{cm,cyl,is}$ und Mittelwert des In-situ-Elastizitätsmoduls $E_{cm,i}$ (bestimmt als Sekantenmodul)

9.2.5.2 Einfluss des Bauwerksalters auf den Zusammenhang zwischen Betondruckfestigkeit und Elastizitätsmodul

Das Bauwerksalter umfasst neben verschiedenen last- und zeitabhängigen Einflüssen auch die Güte und den Umfang der zum Zeitpunkt der Herstellung durchzuführenden Betonüberwachung (vgl. Abschnitt 4.2.3.4).

In Abb. 9.12 ist die Abweichung zwischen dem experimentell und dem rechnerisch nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* aus der mittleren In-situ-Betondruckfestigkeit nach Gleichung (9.10) bestimmten mittleren Elastizitätsmodul in Abhängigkeit vom Baujahr dargestellt. Die Abweichung wird dabei als relative Größe, bezogen auf den rechnerisch bestimmten mittleren Elastizitätsmodul angegeben. Ein positiver Wert bedeutet dabei, dass der am Bauwerk ermittelte In-situ-Elastizitätsmodul größer ist als der nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* aus der mittleren In-situ-Betondruckfestigkeit berechnete. Die Werte streuen im Bereich von einer Unterschreitung von ca. 35 % bis hin zu einer Überschreitung von ca. 15 %. Ein allgemeiner Einfluss des Bauwerksalters auf die Größe der Abweichung kann aufgrund der durchgeführten Untersuchungen nicht festgestellt werden. Ein systematischer Einfluss des Herstellungszeitraums entsprechend den in Abschnitt 9.2.3 für die verschiedenen Normausgaben beschriebenen Zusammenhänge zwischen Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul kann ebenfalls nicht festgestellt werden.

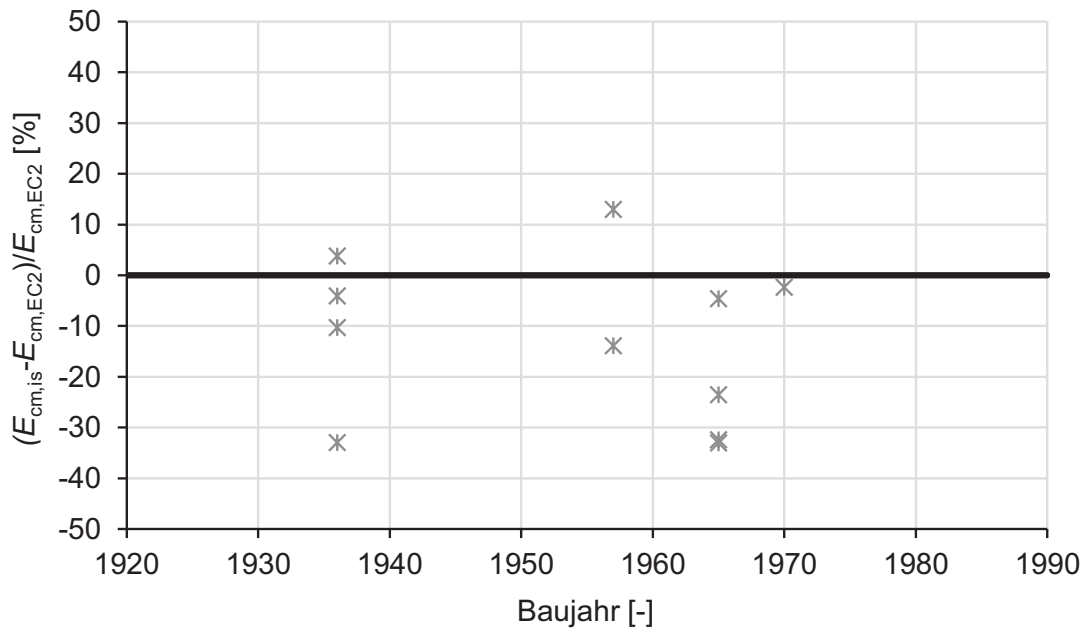


Abb. 9.12 Einfluss des Baujahrs auf die Abweichung zwischen dem experimentell ermittelten und nach DIN EN 1992-1-1 aus der mittleren In-situ-Betondruckfestigkeit berechneten mittleren Elastizitätsmodul

9.2.6 Zwischenfazit

Allgemein kann aufgrund der großen Streubreite der Ergebnisse mit keinem der in Abschnitt 9.2.2 und 9.2.3 beschriebenen Beziehungen nach aktuellen oder früheren Normen der Elastizitätsmodul von Bestandsbetonen zielsicher aus der In-situ-Betondruckfestigkeit abgeleitet werden. Der in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* beschriebene Zusammenhang sollte lediglich zur groben Abschätzung des Elastizitätsmoduls herangezogen werden.

Ein maßgebender Einfluss des Baujahres auf die Abweichung zwischen dem experimentell ermittelten und dem aus der Druckfestigkeit berechneten Elastizitätsmodul konnte nicht festgestellt werden.

Eine mögliche Ursache für die große Streubreite der experimentell ermittelten Werte des Elastizitätsmoduls ist vermutlich, wie in *fib Model Code 2010* beschrieben, im Einfluss der jeweils verwendeten Gesteinskörnung zu suchen. Der in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* beschriebene Zusammenhang ist lediglich für quarzithaltige Gesteinskörnung definiert.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass zur Bewertung des In-situ-Elastizitätsmoduls teilweise lediglich zwei Probekörper zur Verfügung standen, womit ein Einfluss des Stichprobenumfangs vergleichsweise groß ist.

10 Fazit und Ausblick

10.1 Zusammenfassung

10.1.1 Vorgehensweise und Zielsetzung

Im Sinne einer möglichst realitätsnahen Bewertung bestehender Massivbauwerke werden in der vorliegenden Arbeit auf experimentellen Untersuchungen am Bauwerk basierende Verfahren zur Ermittlung mechanischer Kennwerte von Bestandsbetonen erarbeitet. Der inhaltliche Schwerpunkt liegt dabei auf der Bewertung und Neuentwicklung statistischer Auswerteverfahren zur Bestimmung charakteristischer Materialkennwerte.

Um ein grundlegendes Verständnis für die mathematische Bewertung von Stichproben zu schaffen, werden in einem ersten Schritt die erforderlichen statistischen Grundlagen, Begriffe und Konzepte erläutert.

Bevor wesentliche statistische Kenngrößen von Bestandsbetonen aufgeführt werden, erfolgt zunächst eine umfassende Beschreibung des Vorgehens zur Durchführung einer qualifizierten Bestandsaufnahme mit experimenteller Ermittlung der In-situ-Betondruckfestigkeit an aus dem Bauwerk entnommenen Bohrkernen. Über die Festlegung von Prüfbereichen, Stichprobenumfang, Entnahme und Vorbereitung der Probekörper sowie aus der Lagerungsart oder Probekörpergeometrie resultierende Umrechnungsfaktoren hinaus werden auch bestehende statistische Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit dargestellt. Bereits hierbei werden grundlegende Unterschiede in der Vorgehensweise bei den bisherigen Verfahren deutlich.

Auf indirekte Prüfverfahren wie z. B. die Rückprallhammerprüfung wird in dieser Arbeit nicht eingegangen, da mit derartigen Verfahren lediglich die oberflächennahe Betondruckfestigkeit bestimmt wird, welche stark von äußeren Randbedingungen beeinflusst werden kann. Infolgedessen kann nur ein ergänzender Einsatz indirekter Prüfverfahren, z. B. zur Festlegung von Prüfbereichen, empfohlen werden.

10.1.2 Statistische Kenngrößen und Verteilungsart von Bestandsbetonen

Bereits die Untersuchungen von Rüscher et al. aus dem Jahr 1963 (*DAfStb 206*) an Standardproben deuten auf eine Abhängigkeit der Standardabweichung von der mittleren Betondruckfestigkeit hin. Während bei kleinen Druckfestigkeiten bis zu ca. 30 N/mm² mit ansteigender Druckfestigkeit noch ein deutlicher Anstieg der Standardabweichung zu beobachten ist, nimmt sie bei größeren Festigkeiten nach *DAfStb 206* einen nahezu konstanten Wert von ca. 5 N/mm² an.

Zur Wahl der Verteilungsfunktion zeigen die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen an realen Datensätzen, dass je nach Anwendungsfall sowohl die Normal-, als auch die logarithmische Normalverteilung zur statistischen Bewertung von Stichproben in Frage kommen. Während besonders bei kleinem Mittelwert und großer Streuung der Betondruckfestigkeit die Normalverteilung zu teilweise deutlich kleineren Werten der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit führt, sind bei großem Mittelwert in Kombination mit einer kleinen Streuung kaum noch Unterschiede

feststellbar. Grundsätzlich ist bei der Bewertung einer Stichprobe mit einer Normalverteilung die Auftretenswahrscheinlichkeit sehr kleiner Werte viel größer als bei der Verwendung einer logarithmischen Normalverteilung.

Mathematische Signifikanztests, wie z. B. der Shapiro-Wilk-Test, zur Überprüfung einer Stichprobe auf eine bestimmte Verteilungsart sind bedingt durch den meist geringen Stichprobenumfang nur wenig aussagekräftig. Vielmehr empfiehlt sich die Wahl der Verteilungsfunktion basierend auf einer visuellen Bewertung der empirischen Verteilungsfunktion oder in Abhängigkeit von der an der Stichprobe geschätzten Streuung. Besonders bei Variationskoeffizienten $> 0,20$ empfiehlt sich, wie bereits in *Schäper 2010* erläutert, die Anwendung der logarithmischen Normalverteilung, um die tatsächliche Verteilung der In-situ-Betondruckfestigkeit besser zu beschreiben und insbesondere mechanisch unplausible negative Werte zu vermeiden.

Die Untersuchungen an umfangreichen realen Datensätzen zeigen, dass der in *DAfStb 206* genannte Zusammenhang zwischen Mittelwert und Standardabweichung der Betondruckfestigkeit von Normprobekörpern die Standardabweichung der In-situ-Betondruckfestigkeit teilweise erheblich unterschätzt. Ursächlich hierfür sind u. a. verschiedene last- und zeitabhängige Einflüsse, aber auch die Art des Betoneinbaus und die Bauteilabmessungen selbst.

Weiterhin zeigen die Untersuchungen, dass der Variationskoeffizient der In-situ-Betondruckfestigkeit den der Bemessung nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* zugrunde liegenden Wert von 0,15 besonders im Bereich kleiner Festigkeiten teilweise erheblich übersteigt. Mit ansteigendem Mittelwert der In-situ-Betondruckfestigkeit kann ein Rückgang des Variationskoeffizienten festgestellt werden. Besonders große Werte des Variationskoeffizienten der In-situ-Betondruckfestigkeit treten hauptsächlich bei massigen oder in Stampfbetonbauweise hergestellten Bauteilen auf. Bei im üblichen Hochbau meist verwendeten Bauteilen wie Wände, Decken und Stützen ist der Variationskoeffizient der In-situ-Betondruckfestigkeit meist kleiner als 0,20.

Während das Baujahr und damit unmittelbar einhergehend die zum Zeitpunkt der Errichtung normativ durchzuführende Bauüberwachung keinen feststellbaren Einfluss auf die Streuung der In-situ-Druckfestigkeit haben, sollte hingegen der Bohrkerndurchmesser stets mindestens dem dreifachen Größtkorndurchmesser der verwendeten Gesteinskörnung entsprechen. Bei Unterschreitung dieses Wertes ist mit einer erhöhten Streuung zu rechnen.

Im Sinne einer abgesicherten Bewertung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit empfiehlt es sich stets, die Streuung an aus dem Bauwerk entnommenen Proben zu bestimmen.

10.1.3 Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Die bereits bekannten Schwächen des bisher gebräuchlichen statistischen Näherungsverfahrens „Ansatz B“ nach *DIN EN 13791:2008-05* konnten durch statistische Simulationen mit realen Daten bestätigt und insbesondere durch einen Vergleich mit dem tatsächlichen Wert der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit der betrachteten Gesamtheit auch näher beziffert werden. In

Einzelfällen nimmt die Überschätzung Werte von bis zu 40 N/mm² an, was im Hinblick auf die umzusetzende Bauwerkszuverlässigkeit als kritisch einzustufen ist.

Aber auch die statistische Bewertung mit einer Normal- oder logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* kann besonders bei kleinem Stichprobenumfang zu einer sehr großen Streubreite der Ergebnisse führen. Sowohl bei der Normalverteilung als auch bei der logarithmischen Normalverteilung konnten im Rahmen der statistischen Simulationen Überschreitungen von bis zu 40 N/mm² beobachtet werden. Bei dem Maß der Unterschreitung unterschieden sich hingegen beide Verteilungen grundlegend. Bedingt durch den jeweiligen Definitionsbereich konnten mit der Normalverteilungen Unterschreitungen von bis zu 92 N/mm², teilweise einhergehend mit mechanisch unplausiblen negativen 5 %-Quantilwerten, und für die logarithmische Normalverteilung Unterschreitungen von bis zu 33 N/mm² festgestellt werden. Ein Anstieg des Stichprobenumfangs bewirkt bei beiden Verfahren eine deutliche Reduzierung der Streubreite.

Eine Erhöhung des der Auswertung zugrunde liegenden Konfidenzniveaus, wie z. B. in *Schäper 2010* und *BAW 2016* empfohlen, hat nur einen geringen Einfluss auf das Höchstmaß der Fehleinschätzung.

Eine wesentlich höhere Wirksamkeit kann der Begrenzung der Streuung über die Standardabweichung oder dem Variationskoeffizient zugemessen werden, wobei die Begrenzung der Streuung über den Variationskoeffizient zu einer deutlich effektiveren Begrenzung führt, als eine Begrenzung der Streuung über die Standardabweichung.

Ein Mindestwert der Streuung führt zu einer Reduzierung der Überschreitung und ein Maximalwert zu einer Reduzierung der Unterschreitung des tatsächlichen Wertes der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit.

Das neu entwickelte Verfahren mit den modifizierten Ansätzen A und B, welches bereits u. a. in *DAfStb 619* und *DIN EN 13791/A20:2017-02* enthalten ist, führt sowohl zu einer Begrenzung der Über- als auch der Unterschreitung auf ein unkritisches, aber dennoch wirtschaftliches Niveau und insgesamt zu einer sehr geringen Streubreite der möglichen Ergebnisse. Im Vergleich zu den bisherigen Verfahren stellt das neue Verfahren eine deutliche Verbesserung dar, dennoch können Überschreitungen nicht vollumfänglich ausgeschlossen werden.

Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse der in dieser Arbeit durchgeführten statistischen Simulationen zur In-situ-Betondruckfestigkeit, dass die in *Schäper 2010* empfohlene Erhöhung des Zielwertes des Konfidenzniveaus auf 0,90 bei Anwendung der logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* nicht erforderlich ist. Folglich ist die dem Verfahren nach *BAW 2016* zugrunde liegende Erhöhung des Zielwertes des Konfidenzniveaus aus mathematischer Sicht zwar richtig, aber bei der Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit ebenfalls nicht erforderlich. Die durchgeführten Untersuchungen an realen Datensätzen von Betondruckfestigkeitsprüfungen zur logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* deuten auf eine mittlere Unterschreitungswahrscheinlichkeit, welche aufgrund der großen Stichprobenanzahl als Synonym für das Konfidenzniveau verwendet werden kann, von ca. 68 % hin, womit der genannte Richtwert von 0,75 nur geringfügig unterschritten wird.

10.1.4 Anwendbarkeit von Ausreißertests bei der Bestimmung der In-situ-Betondruckfestigkeit

Ein weiterer, wesentlicher Aspekt bei der Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit an aus dem Bauwerk entnommenen Bohrkernen, stellt die Überprüfung aller Einzelwerte auf Zugehörigkeit zu einer Grundgesamtheit dar. Die Vermischung verschiedener Grundgesamtheiten innerhalb einer Stichprobe oder einzelne Extremwerte haben besonders auf klassische Schätzer, wie den Mittelwert und die Standardabweichung, einen maßgeblichen Einfluss. Neben dem Vergleich mechanischer Kennwerte oder der Probekörperbeschaffenheit kommen hierzu auch sog. mathematische Ausreißertests in Frage. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass viele über das Bauingenieurwesen hinaus gebräuchliche Ausreißertests aufgrund der meist sehr kleinen Stichproben nur bedingt für eine Überprüfung von experimentell an Bohrkernen ermittelten Druckfestigkeiten geeignet sind. So führt z. B. auch der in *E DIN EN 13791:2018-06* enthaltene Ausreißertest nach Grubbs nur in sehr wenigen Fällen zu einer Identifizierung einzelner Extremwerte als Ausreißer. Ursache hierfür ist, dass sich z. B. der Ausreißertest nach Grubbs zur Bewertung der Abweichung eines Einzelwertes von der Masse der Daten auf nicht robuste Schätzer, wie z. B. Mittelwert und Standardabweichung, bezieht.

Vor diesem Hintergrund wurde ein neuer, auf robusten Schätzern der Lage und Streuung basierender Ausreißertest, welcher in der vorliegenden Arbeit als medianbasierter Ausreißertest bezeichnet wird, entwickelt. Basierend auf einem zweistufigen Verfahren können unabhängig vom Umfang der Stichprobe und der Anzahl an Extremwerten sowohl auffällige Werte, als auch Ausreißer zu einem bestimmten Signifikanzniveau identifiziert werden.

10.1.5 Zusammenhang der Druckfestigkeiten von Bohrkernen aus Bauwerkbeton und genormten Probekörpern

Im Hinblick auf die Bewertung der Übertragbarkeit des in den Eurocodes implementierten semiprobabilistischen Sicherheitskonzeptes auf die Nachrechnung bestehender Massivbauwerke gilt es weiterhin, auch den Unterschied zwischen der an aus dem Bauwerk entnommenen Proben bestimmten Druckfestigkeit und der Druckfestigkeit zugehöriger Normprobekörper für Bestandsbetone zu überprüfen.

Dem für die Bemessung im Neubaufall kalibrierten Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_c = 1,50$ liegt dabei ein Verhältnis $f_{ck} / f_{ck, is} = \gamma_{conv} = 1,15$ zugrunde, welches sich auf ein Untersuchungsalter von 28 Tagen bezieht.

Die Ursache für die Abweichung zwischen Normprobekörperdruckfestigkeit und Druckfestigkeit des Bauwerkbetons liegt u. a. in der unterschiedlichen Art der Verdichtung, Qualität der Nachbehandlung, Bluten des Frischbetons, Mikrorissbildung, Einflüsse aus der Entnahme und Vorbereitung der Bohrkern, Höhenlage der Bohrkernentnahmestelle oder Verhältnis zwischen Bohrkernentnahmerichtung und Betonierichtung.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass auch bei Bestandsbetonen das Verhältnis zwischen Normprobekörper- und Bauwerksdruckfestigkeit mit dem Wert $f_{ck} / f_{ck, is} = 1,15$ mit ausreichender Genauigkeit

beschrieben wird. Eine getrennte Bewertung des Einflusses der vorgenannten Parameter ist versuchsbedingt nur schwierig möglich, da meist nur eine Überlagerung verschiedener Effekte bewertet werden kann.

10.1.6 Dauerstandeffekte bei der Bestimmung des Nachrechnungswertes der In-situ-Betondruckfestigkeit

Eine weitere Einflussgröße bei der Bewertung der Druckfestigkeit von Bestandsbetonen stellen die im Neubaufall nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* mit dem Faktor $\alpha_{cc} = 0,85$ beschriebenen Dauerstandeffekte dar. Bisher wurde der Einfluss von am Bestandstragwerk vorliegenden Dauerlasten auf die an Bohrkernen geprüfte Kurzzeitdruckfestigkeit noch nicht gesondert bewertet.

Die hierzu im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass auch bei der Bewertung der In-situ-Betondruckfestigkeit, basierend auf aus dem Bauwerk entnommenen Proben, die Einflüsse von Dauerstandeffekten, wie bereits im Neubaufall mit dem Faktor $\alpha_{cc} = 0,85$ gesondert zu berücksichtigen sind.

10.1.7 Ableitung mechanischer Kenngrößen aus der In-situ-Betondruckfestigkeit

Über die Kenntnis der In-situ-Betondruckfestigkeit hinaus, gilt es im Rahmen der Bewertung und Nachrechnung bestehender Massivbauwerke in vielen Fällen auch die Zugfestigkeit oder den Elastizitätsmodul von Bestandsbetonen zu bestimmen.

In *DIN EN 1992-1-1:2011-01* sind Zusammenhänge zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit sowie zwischen Betondruckfestigkeit und Elastizitätsmodul definiert. Diese Zusammenhänge beziehen sich jedoch ausschließlich auf die im Neubaufall verwendeten Betone nach *DIN EN 206-1:2001-07*. Inwieweit infolge last- oder zeitabhängiger Einflüsse eine Übertragbarkeit dieser Beziehungen auch auf Bestandsbetone gegeben ist, wurde bisher nicht untersucht.

Aus den in dieser Arbeit beschriebenen experimentellen Untersuchungen geht hervor, dass der in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* enthaltene Zusammenhang zwischen Betondruck- und Zugfestigkeit im Mittel auch auf Bestandsbetone übertragbar ist. Jedoch ist zu beachten, dass im Einzelfall erhebliche Abweichungen (sowohl Über-, als auch Unterschreitungen) möglich sind. Eine allgemeine Reduzierung der aus der Betondruckfestigkeit errechneten Betonzugfestigkeit von Bestandsbetonen um 50 % gegenüber dem in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* definierten Wert, wie z. B. in *BAW 2016* empfohlen, scheint basierend auf den durchgeführten Untersuchungen nicht angezeigt.

Spielt die tatsächlich am Bauwerk vorliegende Zugfestigkeit eine entscheidende Rolle bei der Nachrechnung, wie z. B. bei der Nachrechnung von Befestigungsmitteln, so sollte in jedem Fall die Zugfestigkeit direkt an aus dem Bauwerk entnommenen Proben experimentell ermittelt werden.

Zwischen dem Elastizitätsmodul und der Druckfestigkeit von Bestandsbetonen konnte kein eindeutiger Zusammenhang ermittelt werden. Der in *DIN EN 1992-1-1:2011-01*

beschriebene Zusammenhang kann lediglich für eine grobe Abschätzung des Elastizitätsmoduls aus der In-situ-Betondruckfestigkeit verwendet werden.

10.2 Bestimmung des Nachrechnungswertes der Betondruckfestigkeit

Als Synonym zu dem im Neubaufall anzusetzenden Bemessungswert der Betondruckfestigkeit f_{cd} wird bei der Nachrechnung von Bestandstragwerken der Nachrechnungswert der Betondruckfestigkeit f_{ca} (assessment value) verwendet, welcher dem in Abb. 1.3 beschriebenen Vorgehen folgend zu bestimmen ist.

Unter Berücksichtigung der in dieser Arbeit erläuterten Untersuchungen zum Unterschied zwischen Bauwerks- und Normprobekörperdruckfestigkeit sowie zum Einfluss von Dauerstandeffekten, ist für eine Nachrechnung mit dem in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* für den Neubaufall in der ständigen und vorübergehenden Bemessungssituation definierten Teilsicherheitsbeiwert der Betondruckfestigkeit $\gamma_{C,EC2} = 1,50$ der Nachrechnungswert der Betondruckfestigkeit f_{ca} gemäß Gleichung (10.1) zu bestimmen. Durch den Faktor $1/0,85$ wird dabei der Unterschied zwischen Bauwerks- und Normprobekörperdruckfestigkeit erfasst.

$$f_{ca} = \alpha_{cc} \cdot \frac{1}{0,85} \cdot \frac{f_{ck, is, BK}}{\gamma_{C, EC2}} \quad (10.1)$$

mit:

α_{cc} Beiwert zur Berücksichtigung von Langzeitauswirkungen auf die Betondruckfestigkeit und von ungünstigen Auswirkungen durch die Art der Beanspruchung:

$\alpha_{cc} = 0,85$ für Stahlbetonbauteile

$\alpha_{cc} = 0,70$ für unbewehrte Betonbauteile

$f_{ck, is, BK}$ charakteristische am Bohrkern bestimmte In-situ-Betondruckfestigkeit bezogen auf den Normzylinder mit $h/d = 300/150$ mm unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3.4.2 beschriebenen Umrechnungsfaktoren

$\gamma_{C, EC2}$ Teilsicherheitsbeiwert für Beton nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01*

Für eine Nachrechnung mit modifizierten Teilsicherheitsbeiwerten wie z. B. im DBV-Merkblatt „Modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für Stahlbetonbauteile“ (*DBV 2013*) beschrieben, ist der Nachrechnungswert der Betondruckfestigkeit f_{ca} gemäß Gleichung (10.2) zu bestimmen.

$$f_{ca} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck, is, BK}}{\gamma_{C, mod}} \quad (10.2)$$

mit:

α_{cc} Beiwert zur Berücksichtigung von Langzeitauswirkungen auf die Betondruckfestigkeit und von ungünstigen Auswirkungen durch die Art der Beanspruchung:

$\alpha_{cc} = 0,85$ für Stahlbetonbauteile

$\alpha_{cc} = 0,70$ für unbewehrte Betonbauteile

$f_{ck, is, BK}$ charakteristische am Bohrkern bestimmte In-situ-Betondruckfestigkeit, bezogen auf den Normzylinder mit $h/d = 300/150$ mm unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3.4.2 beschriebenen Umrechnungsfaktoren

$\gamma_{C, mod}$ Teilsicherheitsbeiwert für Beton nach DBV-Merkblatt „Modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für Stahlbetonbauteile“ (DBV 2013)

Anmerkung: Im modifizierten Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{C, mod}$ nach DBV 2013 wird der Faktor $1/0,85$ zur Beschreibung des Unterschiedes zwischen Bauwerks- und Normprobekörperdruckfestigkeit bereits berücksichtigt.

Allgemein ist bei von DBV 2013 abweichenden modifizierten Teilsicherheitsbeiwerten in jedem Fall zu prüfen, ob der Unterschied zwischen Bauwerks- und Normprobekörperdruckfestigkeit bereits im modifizierten Teilsicherheitsbeiwert enthalten ist oder ob dieser gesondert zu berücksichtigen ist.

10.3 Ausblick

Ein Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit lag auf der Entwicklung eines neuen statistischen Auswerteverfahrens zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit, basierend auf der experimentellen Prüfung von aus dem Bestandsbauwerk entnommenen Betonproben. Als wesentliche Grundlage zur Herleitung des neuen Verfahrens wurden dabei umfangreiche reale Datensätze der Druckfestigkeitsprüfung an Bohrkernen verwendet, womit insbesondere im Vergleich zu rein theoretischen Betrachtungen auch der Einfluss der tatsächlichen Streuung der In-situ-Betondruckfestigkeit mit erfasst werden kann.

Das neue Verfahren mit den vom Stichprobenumfang und dem Variationskoeffizienten abhängigen modifizierten Ansätzen A und B ist inzwischen bereits in DAfStb 619, DIN EN 13791/A20:2017-02 und DBV 2016 enthalten, womit einer Überprüfung der praktischen Anwendbarkeit des neuen Verfahrens nichts mehr im Wege steht. Sollte sich das neue Verfahren in der Praxis durchsetzen, sei angeraten, dies auch im Zuge der Überarbeitung der EN 13791:2007, deren Entwurf E DIN EN 13791:2018-06 auf nationaler Ebene bereits vorliegt, zu implementieren.

Darüber hinaus sollte in Erwägung gezogen werden, die im Rahmen dieser Arbeit angelegte Datenbank zu großen realen Datensätzen der experimentellen Druckfestigkeitsprüfung an Bohrkernen zukünftig mit weiteren Daten fortzuschreiben. Aus einer derartigen Datenbank könnten umfangreiche Informationen über die statistischen Kenngrößen von Bestandsbetonen abgeleitet werden, welche zukünftig als Vorinformationen bei der statistischen Bewertung von Stichproben verwendet werden könnten.

Vor dem Hintergrund, dass die durchgeführten Untersuchungen abschließende Erkenntnisse zum Unterschied zwischen Bauwerks- und Normprobekörperfestigkeit sowie zum Einfluss von Dauerstandeffekten auf die experimentell bestimmte In-situ-Betondruckfestigkeit an aus dem Bauwerk entnommenen Proben liefern, empfiehlt sich in diesen Punkten eine Aktualisierung des DAfStb-Heftes 619 „Sachstandbericht

Bauen im Bestand – Teil II: Bestimmung charakteristischer Betondruckfestigkeiten und abgeleiteter Kenngrößen im Bestand“ (DAfStb 619). Das dort basierend auf theoretischen Überlegungen bereits richtigerweise empfohlene Vorgehen zur Bestimmung des Nachrechnungswertes der Betondruckfestigkeit kann durch die hier beschriebenen Untersuchungen untermauert werden, womit keine weitere Anpassung in (DAfStb 619) erforderlich ist.

Darüber hinaus fußen alle bisher betrachteten Untersuchungen der In-situ-Druckfestigkeit an Bohrkernen ausschließlich auf Probekörpern mit einer Schlankheit $\lambda = h/d \geq 1,0$. Insbesondere bei dünnen plattenartigen Bauteilen mit einer engmaschig verlegten Bewehrung; d. h. bewehrungsfreie Probekörper können nur aus dem Bereich zwischen den beiden Bewehrungslagen gewonnen werden; ist die Entnahme von Probekörpern mit einer Schlankheit $\lambda \geq 1,0$ nicht immer möglich. Für solche Fälle existiert bisher kein normativ geregeltes Vorgehen. Vor diesem Hintergrund sollte der Einfluss einer Probekörperschlankheit $\lambda < 1,0$ auf das Ergebnis der Druckfestigkeitsprüfung experimentell untersucht und bewertet werden.

Weiterhin wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit davon ausgegangen, dass der Umrechnungsfaktor zwischen Würfel- und Zylinderdruckfestigkeit in gleicher Weise für die zugehörige Streuung gültig ist. Inwieweit sich die Probekörperform auf die Streuung der In-situ-Betondruckfestigkeit auswirkt, wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht bewertet, weshalb hier weiterer Forschungsbedarf besteht.

Im Hinblick auf die Fortschreibung des Eurocodes 2 dessen Entwurf *prEN 1992-1-1:2017-10* derzeit vorliegt, gilt es ggf. die in Kapitel 7 und 8 beschriebenen Untersuchungen zum Unterschied der Druckfestigkeit des Bauwerkbetons und von Normprobekörpern sowie zum Einfluss von Dauerstandeffekten in Kombination zu betrachten. Daruf aufbauend ist die in den Gleichungen (10.1) und (10.2) aufgeführte Definition des Nachrechnungswertes der Betondruckfestigkeit zu überprüfen und eventuell anzupassen.

Über die Bewertung der Druckfestigkeit hinaus sollte in weiteren Schritten auch die Übertragbarkeit des neu entwickelten statistischen Auswerteverfahrens zur Bestimmung charakteristischer Materialkennwerte auf die experimentelle Untersuchung historischer Betonstähle überprüft werden.

11 Literatur

- ACI 214.4R-10 2014** American Concrete Institute, H. ACI 214.4R-10: *Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results*, ACI Committee 214, 2014.
- ARGEBAU 2008** Fachkommission Bautechnik der Bauministerkonferenz (ARGEBAU): *Hinweise und Beispiele zum Vorgehen beim Nachweis der Standsicherheit beim Bauen im Bestand*.
- Arnold et al. 1992** Arnold, B. C.; Balakrishnan, N.; Nagaraja, H. N.: *A first course in order statistics.*, 1992.
- Bartlett u. MacGregor 1996** Bartlett, F. M.; MacGregor, J. G.: *Statistical Analysis of the Compressive Strength of Concrete in Structures*, in: *ACI Materials Journal*, March-April 1996, S. 158–168.
- BASt 2018** Bundesanstalt für Straßenwesen: *Brückenstatistik, Stand 01.09.2018*, 08.11.2018.
- BAW 2016** Bundesanstalt für Wasserbau: *Bewertung der Tragfähigkeit bestehender, massiver Wasserbauwerke (TbW)*, 2016.
- Benjamin u. Cornell 1970** Benjamin, Jack R.; Cornell, T. Allin: *Probability, statistics, and decision for civil engineers*. Benjamin, McGraw-Hill, New York, 1970.
- Biscopig u. Pickhardt 2014** Biscopig, M.; Pickhardt, R.: *Überwachen von Beton auf Baustellen - Zement-Merkblatt Betontechnik, Nr. B5*, Düsseldorf, 2014.
- Bloem 1968** Bloem, D.: *Concrete Strength in Structures*, in: *ACI Journal*, March 1968, S. 176–187.
- BMWI 2014** Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWI): *Sanierungsbedarf im Gebäudebestand - Ein Beitrag zur Energieeffizienzstrategie Gebäude*, 2014.
- Bonzel et al. 1972** Bonzel, J.; Bub, H.; Funk, P.: *Erläuterungen zu den Stahlbetonbestimmungen – Band I DIN 1045.*, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1972.
- BORAPA 2018** BORAPA Ingenieurgesellschaft mbH: *Datensammlung Bauwerksuntersuchungen (anonymisiert)*. (unveröffentlicht),

- Brachmann et al. 2016** Brachmann, G.; Oettel, V.; Empelmann, M.: *Sonderforschungsvorhaben S 014 „Hintergrundrecherche und Vergleichsrechnungen zum Eurocode 2 im Rahmen der Auswertung der Nationalen Anhänge – Hintergrundrecherche zu den Beiwerten α_{cc} und α_{ct} . Schlussbericht, iBMB TU Braunschweig, 2016.*
- BS 6089** British Standards Institution, H. BS 6089:2010: *Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components. Complementary guidance to that given in BS EN 13791*, BSI, 2010.
- Campbell u. Tobin 1967** Campbell, R.; Tobin, E.: Core and Cylinder Strengths of Natural and Lightweight Concrete, in: *ACI Journal, April 1967*, S. 190–195.
- Caspeelee 2010** Caspeelee, R.: *Probabilistic Evaluation of Conformity Control and the Use of Bayesian Updating Techniques in the Framework of Safety Analyses of Concrete Structures*. Dissertation, Ghent University, Department of Structural Engineering - Magnel Laboratory for Concrete Research. Prof. Dr.-Ing. Luc Taerwe, 2010.
- CEN - 219** CEN/TC 104/ SC1/ TG11: *Further guidance on the application of EN 13791:2016 and background to the provisions*, April 2018.
- CEN - N102** CEN/TC 104/ SC1/ TG11: *Revision of EN 13791 Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components (Draft 15)*, March 2015.
- DAfEb 1916** Deutscher Ausschuss für Eisenbeton (DAfEB): *Bestimmungen für Ausführung von Bauwerken aus Eisenbeton*, 1916.
- DAfStb 077** Graf, O.: *Versuche mit Eisenbetonsäulen*, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1934.
- DAfStb 198** Rüschi, H.; Sell, R.; Rasch, E.; Grasser, E.; Hummel, A.; Wesche, K.; Flatten, H.: *Festigkeit und Verformung von unbewehrtem Beton unter konstanter Dauerlast*, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1968.
- DAfStb 2010** Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: *Richtlinie Massige Bauteile aus Beton*, Beuth, Berlin u.a., 2010.

- DAfStb 206** Rüsche, H.; Sell, R.; Rackwitz, R.: *Statistische Analyse der Betonfestigkeit*, Wilhelm Ernst & Sohn - Verlag, Berlin, 1969.
- DAfStb 232** Wittmann, F.; Zaitsev, J.: *Verformung und Bruchvorgang poröser Baustoffe bei kurzzeitiger Belastung und Dauerlast*, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1974.
- DAfStb 408** Rostásy, F.; Ranisch, E. H.: *Altersabhängige Beziehung zwischen der Druck- und Zugfestigkeit von Beton im Bauwerk - Bauwerkszugfestigkeit*, Beuth, Berlin, 1990.
- DAfStb 525:2010** DAfStb: *Erläuterungen zu DIN 1045-1, 2. überarbeitete Auflage*, Beuth, Berlin, 2010.
- DAfStb 600** DAfStb: *Erläuterungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (Eurocode 2)*, Beuth, Berlin, 2012.
- DAfStb 616** Schnell, J.; Zilch, K.; Weber, M.; Dunkelberg, D.: *Sachstandbericht Bauen im Bestand – Teil I: Mechanische Kennwerte historischer Betone, Betonstähle und Spannstähle für die Nachrechnung von bestehenden Bauwerken*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 2016.
- DAfStb 619** Brauer, N.; Dunkelberg, D.; Eckfeldt, L.; Feix, J.; Fingerloos, F.; Grünberg, J.; Hegger, J.; Marx, S.; Maurer, R.; Schacht, G.; Schmidt, H.; Schnell, J.; Stauder, F.; Weber, M.; Wiens, U.; Wöhl, U.; Ziems, B.; Zilch, K.: *Sachstandbericht Bauen im Bestand - Teil II: Bestimmung charakteristischer Betondruckfestigkeiten und abgeleiteter Kenngrößen im Bestand*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 2017.
- DAfStb 632** Schnell, J.; Weber, M.: *Experimentelle Ermittlung der Korrelation der Druckfestigkeiten von Bohrkernen aus Bauwerksbeton und genormten Probekörpern - Abschlussbericht DAfStb-Forschungsvorhaben V 496*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 2019.
- DAMW 968:1969** Deutsches Amt für Material- und Warenprüfung, H. DAMW 968: *Vorschrift Warenprüfung: Nachweis der Druckfestigkeit bei Beton*, 1969.
- David et al. 1954** David, H. A.; Hartley, H. O.; Pearson, E. S.: *The Distribution of the Ratio, in a Single Normal*

- Sample, of Range to Standard Deviation, in:
Biometrika Vol. 41, 1954, H. No. 3/4, S. 482–493.
- DBV 2013** Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V:
DBV-Merkblatt „Bauen im Bestand – Modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für Stahlbetonbauteile“, Eigenverlag, 03/2013.
- DBV 2015** Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V:
Datensammlung Bauwerksuntersuchungen. (unveröffentlicht),
- DBV 2016** Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V:
DBV-Merkblatt "Bauen im Bestand - Bewertung der In-situ-Druckfestigkeit von Beton", Eigenverlag, 03/2016.
- DIN 1045:1943-03** Deutscher Normenausschuß, H. DIN 1045:
Bestimmungen für Ausführung von Bauwerken aus Stahlbeton, Berlin, Beuth, 03.1943.
- DIN 1045:1959-11** Deutscher Normenausschuß, H. DIN 1045:
Bestimmungen für Ausführung von Bauwerken aus Stahlbeton, Berlin, Beuth, 11.1959.
- DIN 1045:1972-01** Deutsches Institut für Normung e. V., H.
DIN 1045: *Beton- und Stahlbetonbau – Bemessung und Ausführung*, Berlin, Beuth, 01.1972.
- DIN 1045:1978-12** Deutsches Institut für Normung e. V., H.
DIN 1045: *Beton und Stahlbeton – Bemessung und Ausführung*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 1978.
- DIN 1045:1988-07** Deutsches Institut für Normung e. V., H.
DIN 1045: *Beton und Stahlbeton – Bemessung und Ausführung*., Berlin, Beuth Verlag GmbH, 1988.
- DIN 1045-1:2001-07** Deutsches Institut für Normung e. V., H.
DIN 1045-1: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion mit Berichtigung 2:2005-06*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2001.
- DIN 1045-1:2008-08** Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN
1045-1: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2008.
- DIN 1045-2:2008-08** Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN
1045-2:2008-08: *Tragwerke aus Beton*,

Stahlbeton und Spannbeton -Teil 2: Beton - Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2008-08.

DIN 1048-1:1978-12

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN 1048-1: *Prüfverfahren für Beton - Frischbeton, Festbeton gesondert hergestellter Probekörper*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 12.1978.

DIN 1048-5:1991-06

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN 1048-5: *Prüfverfahren für Beton - Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 06.1991.

DIN 52103:1988

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN 52103:1988-10: *Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen: Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 10.1988.

DIN EN 1048-2:1991-06

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 1048-2: *Prüfverfahren für Beton - Festbeton in Bauwerken und Bauteilen*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 06.1991.

DIN EN 12390-1:2012-12

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 12390-1: *Prüfung von Festbeton - Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 12.2012.

DIN EN 12390-13:2014-06

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 12390-13: *Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul); Deutsche Fassung EN 12390-13:2013*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 06.2014.

DIN EN 12390-2:2009-08

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 12390-2:2009-8: *Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen; Deutsche Fassung EN 12390-2:2009 + Ber. 1:2012-02*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2012.

DIN EN 12390-3:2009-07

Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 12390-3: *Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2009 mit DIN EN 12390-3*

-
- Ber 1:2011-11*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 07.2009.
- DIN EN 12390-6:2010-09** Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 12390-6: *Prüfung von Festbeton - Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-6:2009*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 09.2010.
- DIN EN 12390-7:2009-07** Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 12390-7:2009: *Prüfung von Festbeton - Teil 7: Dichte von Festbeton; Deutsche Fassung EN 12390-7:2009*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 07.2009.
- DIN EN 12504-1:2009-07** Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 12504-1:2009-07: *Prüfung von Beton in Bauwerken - Teil 1: Herstellung, Untersuchung und Prüfung der Druckfestigkeit*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2009.
- DIN EN 13791/A20:2017-02** Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 13791/A20: *Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen; Änderung A20*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 02.2017.
- DIN EN 13791:2008-05** Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 13791:2008-05: *Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 05.2008.
- DIN EN 14630:2007** Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 14630:2007-01: *Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren – Bestimmung der Karbonatisierungstiefe im Festbeton mit der Phenolphthalein-Prüfung; Deutsche Fassung EN 14630:2006*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 01.2007.
- DIN EN 1542:1999** Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 1542:1999-07: *Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken: Prüfverfahren - Messung der Haftfestigkeit im Abreißversuch Deutsche Fassung EN1542 : 1999*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 07.1999.

- DIN EN 1990:2010-12** Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 1990: *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010 mit DIN EN 1990/NA:2010-12 Nationaler Anhang und DIN EN 1990/NA/A1:2012-08 A1-Änderung zum Nationalen Anhang*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 12.2010.
- DIN EN 1992-1-1:2011-01** Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 1992-1-1: *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010 mit NA:2013-04 Nationaler Anhang, A1-Änderung:2015-03 und A1-Änderung NA:2015-12*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 01.2011.
- DIN EN 206-1:2001-07** Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN EN 206-1:2001-07: *Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität Deutsche Fassung EN 206-1:2000*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 07.2001.
- DIN ISO 16269-6:2009-10** Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN ISO 16269-6: *Statische Auswertung von Daten - Teil 6: Ermittlung von statistischen Anteilsbereichen*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2009.
- DIN ISO 5479:2004-01** Deutsches Institut für Normung e. V., H. DIN ISO 5479: *DIN ISO 5479: Statistische Auswertung von Daten – Tests auf Abweichung von der Normalverteilung (ISO 5479:1997)*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 01.2004.
- Dixon 1953** Dixon, W. J.: Processing Data for Outliers, in: *Biometrics* Vol. 9, 1953, H. No. 1, S. 74–89.
- E DIN EN 13791:2018-06** Deutsches Institut für Normung e. V., H. E DIN EN 13791:2018-06: *Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen; Deutsche und Englische Fassung prEN 13791:2018*, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 06.2018.
- EN 13791:2007** European Committee for Standardization: *Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components*, 2007.

- EN 1990:2002-04** European Committee for Standardization, H. EN 1990: *Eurocode - Basis of structural design*, 04.2002.
- EN 1992-1-1:2004-12** European Committee for Standardization, H. EN 1992-1-1: *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, 12.2004.
- Evans u. Lawson 1955** Evans, R. H.; Lawson, K. T.: Ultimate Strength of Axially Loaded Columns Reinforced with Square Twisted Steel and Mild Steel, in: *The Structural Engineer* 33, 1955.
- fib Model Code 2010** International Federation for Structural Concrete (fib): *fib Model Code for Concrete Structures 2010*, s.l., Ernst Sohn, 2013.
- Fingerloos et al. 2015** Fingerloos, Frank; Marx, Steffen; Schnell, Jürgen: *Tragwerksplanung im Bestand - Bewertung bestehender Tragwerke*, in *Beton-Kalender 2015*, Ernst, Wilhelm & Sohn, Berlin, 2015.
- Fingerloos et al. 2016** Fingerloos, Frank; Hegger, Josef; Zilch, Konrad: *Eurocode 2 für Deutschland*, Beuth; Ernst & Sohn, Berlin, Wien, Zürich, Berlin, 2016.
- Gehler u. Palen 1952** Gehler, W.; Palen, C.: *Erläuterungen zu den Stahlbetonbestimmungen mit Beispielen*, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1952.
- Golden u. Beushausen 2014** Golden, G.; Beushausen, H.: *Druckfestigkeitsprüfung von Betonbohrkernen*, in: *BWI – BetonWerk International – 5/2014*, S. 256–261.
- Grasser 1968** Grasser, E.: *Darstellung und kritische Analyse der Grundlagen für eine wirklichkeitsnahe Bemessung von Stahlbetonquerschnitten bei einachsigen Spannungszuständen*. Dissertation, TH München, Fakultät für Bauwesen, 1968.
- Gumbel 1947** Gumbel, E. J.: The Distribution of the Range, in: *The Annals of Mathematical Statistics* 18, 1947, H. 3, S. 384–412.
- Hampel 1986** Hampel, F.; Ronchetti, E.; Rousseeuw, P.; Stahel, W.: *Robust Statistics*, John Wiley & Sons, New York, 1986.
- Hartung 1993** Hartung, J.: *Statistik*, München, Oldenburg Verlag GmbH, 1993.

- Heilmann 1969** Heilmann, H. G.: *Beziehungen zwischen Zug- und Druckfestigkeit des Betons*, in: *beton 19* (1969), Heft 2, S. 68–70.
- Henze 2008** Henze, Norbert: *Stochastik für Einsteiger*, Wiesbaden, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlage, Wiesbaden, 2008.
- Henzel u. Grube 1966** Henzel, J.; Grube, H.: Festigkeitsuntersuchungen an Bauwerksbeton und zugehörigen Gütewürfeln, in: *Der Bauingenieur 41*, Heft 12, 1966 1966, H. 12, S. 487–491.
- Hognestad 1951** Hognestad, E.: *A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members*. University of Illinois, Engineering Experiment Station, Bulletin No. 399,, 1951.
- Holický et al. 2007** Holický, M.; Jung, K.; Sýkora, M.: *Estimation of concrete strength from small samples*, 5th International Probabilistic Workshop, Ghent, Belgium, 2007.
- Horton u. Kleinman 2015** Horton, Nicholas J.; Kleinman, Ken: *Using R and RStudio for data management, statistical analysis, and graphics*, Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, 2015.
- ISO 12491:1997** International Organisation for Standardization, H. ISO 12491: *Statistical methods for quality control of building materials and components*, Genf, Eigenverlag, 05.1997.
- ISO 16269-6:2005** International Organisation for Standardization, H. ISO 16269-6: *Statistical interpretation of data – Part 6: Determination of statistical tolerance intervals*, 2005.
- JCSS 2001** JCSS: *Probabilistic Assessment of Existing Structures - A Publication of the Joint Committee on Structural Safety (JCSS)*, Cachan, RILEM 2001.
- Klose 1973** Klose, A.: Betonprüfung nach DIN 1045, in: *beton 23* (1973), Heft 11, S. 479–485.
- Knab u. Sodeikat 2015** Knab, F.; Sodeikat, C.: *Die Ermittlung der charakteristischen Betondruckfestigkeit von Bauwerken im Bestand - Hinweise aus der Erfahrung sachverständiger Ingenieure*, in: *Beton- und Stahlbetonbau 110* (2015), Heft 8, S. 539–553.

- KPM 1907** Königliches Preußisches Ministerium für öffentliche Arbeiten: *Bestimmungen für die Ausführung von Konstruktionen aus Eisenbeton bei Hochbauten*, 1907.
- Kurz et al. 2016** Kurz, W.; Fox, C.; Doktor, M.; Hanke, R.; Kopp, M.; Schwender, T.; Nüsse, G.: *Bestandsbewertung von Stahlbauwerken mithilfe zerstörungsfreier Prüfverfahren*. Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. FOSTA; Forschungsvorhaben P 859 / IGF-Nr. 466 ZN, Technische Universität Kaiserslautern, 2016.
- Langford 2006** Langford, E.: Quartiles in Elementary Statistics, in: *Journal of Statistics Education* 14, 2006, H. 3.
- Lewandowski 1971** Lewandowski, R.: *Beurteilung von Bauwerksfestigkeiten an Hand von Betongütewürfeln und -bohrproben*. Schriftenreihe der Institute für Konstruktiven Ingenieurbau der Technischen Universität Braunschweig, Werner Verlag, 1971.
- Loch et al. 2011** Loch, Markus; Stauder, Florian; Schnell, Jürgen: Bestimmung der charakteristischen Betonfestigkeiten in Bestandstragwerken, in: *Beton- und Stahlbetonbau* 106, 2011, H. 12, S. 804–813.
- Malárics 2011** Malárics, V.: *Ermittlung der Betonzugfestigkeit aus dem Spaltzugversuch an zylindrischen Betonproben*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, 2011.
- Meiswinkel 2012** Meiswinkel, K.: *Festigkeitsentwicklung alter Betone*. Diplomarbeit, TU Kaiserslautern, Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion, 2012.
- Nachrechnungsrichtlinie 2011** Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): *Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie) mit 1. Ergänzung: 2015-04*, Berlin, 05/2011.
- Petersons 1964** Petersons, N.: *Strength of concrete in finished structures*, Kungl. Tekniska Högskolans Handlingar, Nr. 232, 1964.

- Petersons 1968** Petersons, N.: *Should standard cube test specimens be replaced by test specimens taken from structures*, in: *Materials and Structures* 1968 (5), Heft 5, S. 425–435.
- Plate 1993** Plate, Erich J.: *Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure*, Berlin, Ernst, 1993.
- prEN 1990:2018-04** European Committee for Standardization, H. prEN 1990: *Eurocode - Basis of structural and geotechnical design*, 04.2018.
- prEN 1992-1-1:2017-10** European Committee for Standardization, H. prEN 1992-1-1: *Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures*, 10.2017.
- Rackwitz 1981** Rackwitz, R.: Zur Statistik von Eignungs- und Zulassungs-versuchen für Bauteile, in: *Bauingenieur* 56 (1981, S. 103–107.
- Richtlinie 89/106/EWG 1988** Rat der Europäischen Gemeinschaften: *Richtlinie 89/106/EWG des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte*, Brüssel, Dezember 1988.
- Roosch 2014** Roosch, A.: *Statistik für Ingenieure*, Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 2014.
- Roy u. Bargmann 1958** Roy, S. N.; Bargmann, R. E.: Tests of Multiple Independence and the Associated Confidence Bounds, in: *The Annals of Mathematical Statistics* 29, 1958, H. 2, S. 491–503.
- Rüsch 1956** Rüsch, H.: *Versuche zur Bestimmung des Einflusses der Zeit auf Festigkeit und Verformung. IABSE Kongressbericht, Technische Hochschule München, 1956.*
- Rüsch 1960** Rüsch, H.: *Researches toward a General Flexural Theory for Structural Concrete*, in: *Journal of the American Concrete Institute*, July 1960, Nr. 1, Vol. 32, S. 1–28.
- Rüsch 1975** Rüsch, H.: *Die Ableitung der charakteristischen Werte der Beton-zugfestigkeit*, in: *beton* 25 (1975), Heft 2, S. 55–58.
- Rüsch et al. 1961** Rüsch, H.; Grasser, E.; Rao, P. S.: *Grundlagen für die Bemessung bei einachsigen*

- Spannungszuständen im Betonbau. MPA für das Bauwesen der TH München, Bericht Nr. 47, 1961.*
- Schäper 2010** Schäper, M.: Zur Anwendung der logarithmischen Normalverteilung in der Materialprüfung - Missverständliche Normaussagen ergeben fehlerhafte Nachweise, in: *Bautechnik* 87, 2010, H. 9, S. 541–549.
- Scott 1979** Scott, D. W.: On Optimal and Data-Based Histogramms, in: *Biometrika* 66 (1979), H. 3, S. 605–610.
- Stauder 2015** Stauder, F.: *Zuverlässigkeitskonzept für bestehende Tragwerke im Wasserbau.* Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, Massivbau und Baukonstruktion. Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell; Prof. Dr.-Ing. Jürgen Grünberg, 2015.
- Steenbergen u. Vervuurt 2012** Steenbergen, R. D. J. M.; Vervuurt, A. H. J. M.: *Determining the in situ concrete strength of existing structures for assessing their structural safety*, in: *Structural Concrete* 13 (2012), Heft 1, S. 27–31.
- Steinbock u. Curbach 2018** Steinbock, O.; Curbach, M.: Materialkennwerte einer historischen Stahlbetonbrücke, in: *Beton- und Stahlbetonbau* 113, 2018, H. 2, S. 96–105.
- Taerwe 1985** Taerwe, L.: *Aspects of the stochastic nature of concrete strength including compliance control (in Dutch).* Dissertation, Ghent University, 1985.
- TGL 0-1045:1963-04** Amt für Standardisierung, H. TGL 0-1045: *Bauwerke aus Stahlbeton - Projektierung und Ausführung*, Leipzig, VEB Fachbuchverlag, 1963.
- TGL 33431:1980-09** Amt für Standardisierung, H. TGL 33431: *Betriebliche Qualitätssicherung und –kontrolle im Betonbau. Blatt 1: Allgemeine Forderungen*, 1980.
- TGL 33433:1979-06** Amt für Standardisierung, H. TGL 33433: *Prüfung des erhärteten Betons, Blatt 01: Allgemeine Forderungen*, 1979.
- The Concrete Society 2004** The Concrete Society: *In situ concrete strength – An investigation into the relationship between core strength and standard cube strength.*

- Concrete Society Project Report No. 3, Camberley, 2004.
- Thiele u. Weber 2016** Thiele, C.; Weber, M.: *Untersuchungen zur Korrelation von Druck- und Zugfestigkeit in alten, niederfesten Betonen als Grundlage für die Bestimmung der Tragfähigkeit von z. B. Befestigungsmitteln; Abschlussbericht zum BBR-Forschungsauftrag Aktenzeichen II 3-F20-12-1-005/SWD-10.08.18.7-13.01*, Technische Universität Kaiserslautern, 2016.
- Thomas 1938** Thomas, F. G.: *Studies on Reinforced Concrete. VI. The Strength and Deformation of Reinforced Concrete Columns under Combined Direct Stress and Bending. Building Research Technical Paper No. 23, Department of Science and Industrial Research*, 1938.
- Toutenburg u. Heumann 2008** Heumann, Christian; Toutenburg, Helge: *Deskriptive Statistik*, Springer, Berlin, 2008.
- VDAIV u. DBV 1904** Verbände deutscher Architekten- und Ingenieur-Vereine und Deutscher Beton-Verein: *Vorläufige Leitsätze für die Vorbereitung, Ausführung und Prüfung von Eisenbetonbauteilen*, 1904.
- Weber et al. 2015** Weber, M.; Thiele, C.; Schnell, J.: *Korrelation von Druck- und Zugfestigkeit bei alten Betonen*, in: 4. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken, 27. und 28. Januar 2015, TAE, Ostfildern, 2015.
- Weber et al. 2016** Weber, M.; Schwabach, E.; Schnell, J.: *Bestimmung der charakteristischen Betondruckfestigkeit im Bestand bei kleinem Stichprobenumfang - Hintergründe und Erläuterungen zur Neuregelung nach E DIN EN 13791/A20:2016*, in: *Beton- und Stahlbetonbau 111* (2016), Heft 4, S. 188–199.
- Weber et al. 2019a** Weber, M.; Doktor, M.; Stockis, J. P.; Glock, C.; Kurz, W.; Fox, C.: *Ausreißertests bei der Bestimmung der In-situ-Betondruckfestigkeit*, in: *beton*, 6/2019, S. 156–163.
- Weber et al. 2019b** Weber, M.; Sefrin, R.; Glock, C.; Schnell, J.: *Bestimmung des Dauerstandbeiwertes α_{cc} für die Nachrechnung bestehender Massivbauwerke bei experimenteller Ermittlung der Betondruckfestigkeit am Bestandstragwerk*, Abschlussbericht zum DBV-

-
- Forschungsprojekt 313, Technische Universität Kaiserslautern, 2019.
- Weber et al. 2019c** Weber, M.; Sefrin, R.; Schnell, J.; Glock, C.: *Berücksichtigung von Dauerstandseffekten im Nachrechnungswert der Betondruckfestigkeit - Bewertung der Übertragbarkeit von im Neubaufall gültigen Ansätzen*, in: *Beton und Stahlbetonbau* 114 (2019), Heft 11.
- Weber et al. 2019d** Weber, M.; Schnell, J.; Sefrin, R.: *Ermittlung der charakteristischen Betondruckfestigkeit im Bestand bei geringem Stichprobenumfang, Abschlussbericht zum AiF/IGF-Projekt Nummer 19346 N (in Bearbeitung)*, Technische Universität Kaiserslautern, 2019.
- Weber u. Thiele 2016** Weber, M.; Thiele, C.: *Korrelation von Betondruck- und Zugfestigkeit historischer Betone - Bewertung der Anwendbarkeit bestehender Regeln nach DIN EN 1992-1-1*, in: *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016), Heft 10, S. 635–644.
- Weber u. Thiele 2018** Weber, M.; Thiele, C.: *Correlation between compressive and tensile strength of old concretes: Applicability of the relationship described in EN 1992-1-1* (<https://doi.org/10.1002/suco.201700244>), in: *Structural Concrete*, 2018, S. 1–10.
- Zilch u. Zehetmaier 2008** Zilch, K.; Zehetmaier, G.: *Bemessung im konstruktiven Betonbau*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, NY, 2010.
- Zupan et al. 2007** Zupan, D.; Srpčić, J.; Turk, G.: *Characteristic value determination from small samples*, in: *Structural Safety* 29 (2007), S. 268–278.

Anhang I Datenbank Bauwerksuntersuchungen zur Betondruckfestigkeit

Anhang I.1 Ergebnisse der Druckfestigkeitsuntersuchungen – Einzelwerte und Parameter der Stichprobe

In den nachfolgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Druckfestigkeitsuntersuchungen an bestehenden Massivbauwerken durch Bohrkernentnahmen dargestellt. Die Untersuchungen der Betondruckfestigkeiten erfolgten bei selbst durchgeführter Bohrkernentnahme im Materialprüfamt (MPA) der Technischen Universität Kaiserslautern.

Die angegebenen Druckfestigkeiten entsprechen jeweils der am Bohrkern mit der angegebenen Geometrie und Lagerung geprüften Betondruckfestigkeit. Eine Umrechnung auf eine entsprechende Zylinderdruckfestigkeit ist nicht erfolgt. Die Entnahmerichtung der Bohrkernkerne ist in Bezug auf die Betonierrichtung (senkrecht/parallel) angegeben. Der angegebene Größtkorndurchmesser wurde jeweils visuell an der Bohrkernoberfläche abgeschätzt.

Eine eventuell am Bauwerk feststellbare karbonatisierte Schicht wurde im Rahmen der Vorbereitung der Bohrkernkerne für die Prüfung der Betondruckfestigkeit abgetrennt. Die ggf. angegebene Karbonatisierungstiefe beschreibt dabei die direkt am Bauwerk /-teil festgestellte Karbonatisierungstiefe.

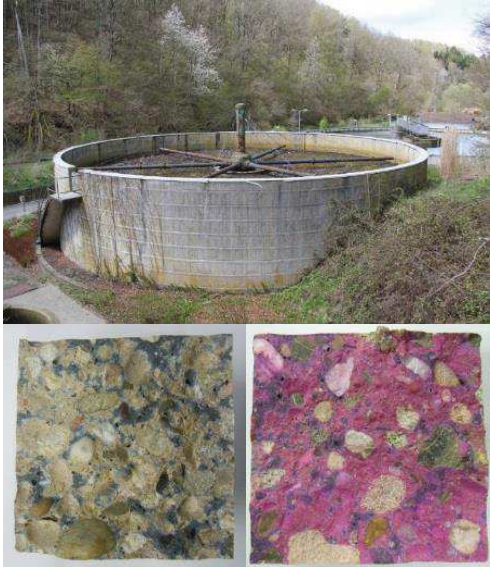
Zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit am Bohrkern wurde aufgrund des jeweils großen Stichprobenumfangs eine logarithmische Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* verwendet.

Die Ergebnisse aus einer Umfrage und aus der Literatur wurden teilweise anonymisiert und werden in den nachfolgenden Tabellen in neutraler Form als Bauwerk i bezeichnet.

Legende Tab. I. 1 bis Tab. I. 84:

- a) Gleichung (2.8)
- b) Gleichung (2.1)
- c) Gleichung (2.9)
- d) Gleichung (3.12)
- e) Gleichung (3.13)
- f) Gleichung (2.9)
- g) Tab. 3.4 / Gleichung (3.14)
- h) Gleichung (3.11)
- 1) Bewehrung quer zur Bohrkernlängsachse (sofern vorhanden)
- 2) trocken: am Bauwerk vorliegender Feuchtezustand; nass: wassergesättigt nach *DIN EN 12504-1:2009-07* (mind. 48 h in Wasser gelagert)

Tab. I. 1 Tropfkörper Kläranlage Blümeltal, Pirmasens – Betondruckfestigkeit

Tropfkörper Kläranlage Blümeltal, Pirmasens Thiele u. Weber 2016						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	B225	[-]				
Größtkorndurchmesser	16	[mm]				
Art Zuschlag	rund	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	113	[mm]				
Bohrkernschlankheit	113/113	[mm]				
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]				
Lagerung	trocken	[-]				
Baujahr	1970	[-]				
Prüfdatum	2013	[-]				
Alter	43	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Wand						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
48,4	58,4	62,2	64,8	67,5	69,9	74,7
48,8	58,7	62,6	65,2	67,5	70,6	75,1
53,0	58,8	62,7	65,3	67,8	70,6	75,1
53,4	59,0	63,0	65,4	67,9	70,7	75,6
53,8	60,1	63,2	65,6	68,1	71,5	76,7
54,6	60,2	63,3	65,9	68,1	72,5	78,9
57,1	60,2	64,1	66,1	69,3	73,2	80,5
57,9	60,6	64,2	66,9	69,5	74,0	86,1
58,3	61,8	64,5	67,1	69,5	74,6	87,3
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	63	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	7,96	[N/mm ²]	
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	66,0	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,12	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	4,18	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,03	[-]	
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,12	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,68	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	53,4	[N/mm ²]	

Tab. I. 2 Tropfkörper Kläranlage Blüemetal, Pirmasens – Betondruckfestigkeit:
Einzelprüfwerte

Tropfkörper Kläranlage Blüemetal, Pirmasens <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-3:2009-07</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
A 1-1	112,9	114,0		2,635	-	675900
A 2-1	113,0	113,6		2,632	-	670900
A 3-1	113,0	114,0		2,648	-	627900
A 4-2	113,0	114,2		2,669	-	628600
A 5-2	113,0	109,2	zuvor E-Modul	2,554	-	584400
A 6-2	113,1	113,7		2,654	-	656100
B 1-1	113,1	114,3	0,0157 kg Stahl ¹⁾	2,654	-	587000
B 2-1	113,1	110,0	zuvor E-Modul	2,606	-	663700
B 3-1	113,1	114,9		2,677	-	681000
B 4-2	113,1	113,4		2,640	-	659500
B 5-2	113,2	113,0		2,651	-	697900
B 6-2	113,1	113,5		2,653	-	651400
C 1-1	113,0	110,7	zuvor E-Modul	2,584	-	697300
C 2-1	113,1	114,0		2,650	-	644600
C 3-1	113,2	114,5		2,618	-	719700
C 4-2	113,0	112,2		2,625	-	748900
C 5-2	113,0	112,1		2,637	-	758000
C 6-2	113,0	113,5		2,663	-	696500
D 1-1	113,0	114,4		2,678	-	660600
D 2-1	113,1	114,4		2,670	-	735000
D 3-1	113,1	112,6		2,629	-	709600
D 4-2	113,3	108,8	zuvor E-Modul	2,544	-	704800
D 5-2	113,0	114,6		2,709	-	863600
E 1-1	113,2	112,1	zuvor E-Modul	2,618	-	591400
E 2-1	113,2	115,2		2,683	-	593900
E 3-1	113,1	115,1		2,680	-	635000
E 4-2	113,2	113,5		2,629	-	537700
E 5-2	113,3	114,3		2,674	-	583800
E 6-2	113,1	114,5		2,656	-	624600
E 7-2	113,1	114,0		2,654	-	532600
F 1-1	113,1	110,0	zuvor E-Modul	2,563	-	603300
F 2-1	113,2	115,0		2,670	-	491300
F 3-1	113,0	114,0	0,0088 kg Stahl ¹⁾	2,669	-	634300
F 4-2	113,2	114,3		2,681	-	621600

Anhang I: Datenbank Bauwerksuntersuchungen zur Betondruckfestigkeit

F 5-2	113,0	114,8		2,684	-	642500
F 6-2	113,1	114,8		2,669	-	608700
G 1-1	113,2	110,4		2,536	-	549400
G 2-1	113,1	112,6		2,606	-	540000
G 3-1	113,0	114,7		2,665	-	485500
G 4-2	113,1	111,5		2,662	-	709900
G 5-2	113,1	113,5		2,642	-	633100
G 6-2	113,2	112,6		2,583	-	575100
H 1-1	113,2	112,6		2,624	-	655700
H 2-1	113,3	113,3		2,639	-	659200
H 3-1	113,2	111,0	zuvor E-Modul	2,588	-	675700
H 4-2	113,4	112,9		2,621	-	608000
H 5-2	113,0	112,2		2,650	-	708200
H 6-2	113,1	112,3		2,614	-	684300
H 7-2	113,4	113,4	verspätet geprüft	2,639	-	796800
I 1-1	113,3	112,0		2,600	-	680700
I 2-1	113,4	113,2		2,647	-	685700
I 3-1	113,3	113,4		2,646	-	606600
I 4-2	113,4	112,0		2,626	-	732100
I 5-2	113,6	112,8		2,648	-	653400
I 6-2	113,3	112,1		2,635	-	745700
I 7-2	113,3	112,0		2,643	-	757300
K 1-1	113,2	111,0		2,605	-	685700
K 2-1	113,2	111,5		2,642	-	810300
K 3-1	113,2	111,5	0,0334 kg Stahl ¹⁾	2,668	-	771800
K 4-2	113,3	113,1		2,706	-	752300
K 5-2	113,4	112,4		2,657	-	592500
K 6-2	113,3	111,7		2,675	-	880100
K 7-2	113,1	115,7		2,719	-	754900

Tab. I. 3 Autobahnunterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern

Autobahnunterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern Thiele u. Weber 2016										
Betondruckfestigkeit			 							
Güte-/Festigkeitsklasse	B225	[-]								
Größtkorndurchmesser	16	[mm]								
Art Zuschlag	rund	[-]								
Karbonatisierung	nein	[-]								
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]								
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]								
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]								
Lagerung	nass	[-]								
Baujahr	1957	[-]								
Prüfdatum	2014	[-]								
Alter	57	[Jahre]								
Untersuchte Bauteilart: Wand										
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07										
32,2	38,2	48,0								
32,4	38,5	49,7								
33,4	39,0	50,1								
33,7	39,4	52,4								
33,7	39,7									
33,9	40,4									
34,8	43,2									
36,9	44,1									
37,4	45,6									
Parameter der Stichprobe										
Stichprobenumfang n	22	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	6,18	[N/mm ²]					
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	39,9	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,16	[-]					
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,67	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,04	[-]					
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,15	[-]								
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
$k_n^{g)}$	1,76	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	30,2	[N/mm ²]					

Tab. I. 4 Autobahnunterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern – Betondruckfestigkeit:
Einzelprüfwerte

Autobahnunterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-3:2009-07</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
D 2-1 D	98,8	100,5		-	1,828	304000
D 3-1 D	99,0	101,0		-	1,832	284000
D 5-2 D	98,6	100,9		-	1,821	291800
E 2-1 D	98,5	95,4		-	1,718	307700
E 5-2 D	98,5	98,1		-	1,758	247200
E 6-2 D	98,5	100,5		-	1,828	258700
F 1-1 D	99,6	100,5	zuvor E-Modul	-	1,782	300000
F 2-1 D	98,2	100,5		-	1,819	363800
F 3-1 D	98,4	101,5		-	1,805	264800
F 4-2 D	98,3	101,9	großes Kieskorn ausgebrochen	-	1,824	256000
F 5-2 D	99,4	102,0		-	1,804	290000
G 2-1 D	98,3	100,0		-	1,788	327800
G 3-1 D	98,3	98,4		-	1,766	255400
G 4-2 D	98,4	102,0		-	1,821	347000
G 5-2 D	98,2	100,3		-	1,776	396800
G 6-2 D	98,5	99,5		-	1,773	300000
H 1-1 D	99,6	100,5	zuvor E-Modul	-	1,850	343600
H 2-1 D	99,6	100,5		-	1,854	390700
H 3-1 D	99,6	101,8		-	1,881	387500
H 4-2 D	99,6	100,3		-	1,847	250700
H 5-2 D	99,6	101,7		-	1,874	260300
H 6-2 D	99,5	100,0		-	1,863	303500



Tab. I. 5 Autobahnunterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern

Autobahnunterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern Thiele u. Weber 2016						
Betondruckfestigkeit			 			
Güte-/Festigkeitsklasse	B225	[-]				
Größtkorndurchmesser	16	[mm]				
Art Zuschlag	rund	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]				
Lagerung	nass	[-]				
Baujahr	1957	[-]				
Prüfdatum	2014	[-]				
Alter	57	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Wand						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
24,5	41,7	48,5	52,7			
31,0	41,8	49,3	56,5			
32,8	42,1	49,5				
33,4	42,6	49,5				
38,5	43,6	49,6				
38,6	45,5	50,2				
38,6	47,2	51,1				
38,7	47,2	51,4				
38,8	48,2	51,9				
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	29	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	7,48	[N/mm ²]	
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	44,0	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,17	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,77	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,05	[-]	
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,19	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,73	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	31,3	[N/mm ²]	

Tab. I. 6 Autobahnunterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern – Betondruckfestigkeit:
Einzelprüfwerte

Autobahnunterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-3:2009-07</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
A 1-1 D	98,8	100,5	zuvor E-Modul	-	1,833	348500
A 2-1 D	98,5	99,8		-	1,802	375700
A 3-1 D	98,6	100,4		-	1,786	294100
A 4-2 D	98,6	99,5		-	1,794	295000
A 5-2 D	98,4	99,2		-	1,780	253900
A 6-2 D	98,3	99,2		-	1,779	376200
A 7-2 D	98,5	98,6	Risse im ungeprüften Probekörper	-	1,709	186500
B 1-1 D	99,0	100,5	zuvor E-Modul	-	1,842	381200
B 3-1 D	99,0	99,0		-	1,816	363200
B 4-2 D	98,8	99,9		-	1,814	369600
B 5-2 D	98,9	100,5		-	1,824	297400
B 6-2 D	98,8	99,0		-	1,801	295900
C 1-1 D	98,8	100,3	zuvor E-Modul	-	1,812	326600
C 2-1 D	99,3	99,7		-	1,813	398000
C 3-1 D	98,6	100,0		-	1,805	378200
C 4-2 D	98,8	100,0		-	1,810	371600
C 5-2 D	98,8	100,0		-	1,798	362100
C 6-2 D	99,0	100,5		-	1,814	298900
I 1-1 D	99,5	97,0	zuvor E-Modul	-	1,759	390700
I 2-1 D	99,6	100,3		-	1,846	410400
I 3-1 D	99,6	101,0		-	1,844	324900
I 4-2 D	99,6	100,5		-	1,847	398200
I 5-2 D	99,3	101,7		-	1,883	324000
I 6-2 D	99,5	100,4		-	1,812	339000
K 2-1 D	98,7	101,6		-	1,836	250800
K 3-1 D	98,7	100,9		-	1,839	322200
K 4-2 D	98,6	101,6		-	1,815	236400
K 5-2 D	98,6	101,3	großes Kieskorn ausgebrochen	-	1,854	396200
K 6-2 D	98,6	100,0		-	1,814	431600

Tab. I. 7 Umspannwerk, Sulzbach

Umspannwerk, Sulzbach <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Betondruckfestigkeit			 			
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	16	[mm]				
Art Zuschlag	rund	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]				
Lagerung	trocken	[-]				
Baujahr	1925	[-]				
Prüfdatum	2013	[-]				
Alter	88	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Stütze						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
11,3	22,1	26,0	29,5			
14,9	23,0	26,4	29,6			
17,2	23,8	27,5	30,2			
18,4	24,2	27,6				
18,6	24,8	27,7				
19,5	24,9	28,1				
20,5	24,9	28,3				
20,8	25,9	29,2				
21,1	25,9	29,3				
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	30	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	4,76	[N/mm ²]	
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	24,0	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,20	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,16	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,07	[-]	
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,23	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,73	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	15,8	[N/mm ²]	

Tab. I. 8 Umspannwerk, Sulzbach – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Umspannwerk, Sulzbach <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-3:2009-07</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
1,1	99,7	99,9		1,777	-	152100
1,2	99,7	102,9		1,695	-	202900
1,3	99,6	101,0		1,582	-	201600
1,4	99,6	101,9		1,711	-	179400
2,1	99,8	102,1	Stahl (0,0554kg)	1,838	-	206300
2,2	99,9	100,8	Ablösung an Unterseite/Kante der Druckfläche	1,843	-	236500
2,3	99,7	100,0		1,745	-	228100
2,4	100,0	100,2	Ablösung an Oberseite/Kante der Druckfläche	1,727	-	117000
2,5	100,3	101,3		1,756	-	204900
2,6	99,6	100,3		1,749	-	188800
3,1	99,7	100,6	Ablösung an Unterseite/Kante der Druckfläche	1,702	-	164300
3,2	99,7	102,0		1,755	-	145000
3,5	99,7	100,0		1,703	-	87800
4,1	99,7	102,2		1,719	-	134000
4,3	99,6	100,7		1,706	-	143600
4,4	99,7	101,0		1,741	-	160100
4,5	99,8	102,0		1,753	-	195000
5,1	99,7	100,4		1,721	-	193600
5,2	99,7	104,2	Stahl (0,0122kg)	1,814	-	214600
5,3	99,7	100,9		1,698	-	230900
5,4	99,8	101,2	Stahl (0,0221kg)	1,699	-	221300
5,5	99,8	99,3	Stahl (0,0315kg)	1,676	-	220000
6,1	99,9	101,5	Einkerbung an Bohrkernseite (Länge 5,5cm; Dicke 1cm)	1,807	-	217100
6,2	99,8	102,0		1,788	-	186500
6,4	99,8	103,0		1,766	-	173100
6,4	100,0	99,9		1,711	-	231400
6,5	99,7	100,9		1,759	-	215300
7,1	99,9	100,5		1,798	-	229500
7,3	99,8	99,1	leichte Ablösungen an Druckfläche	1,778	-	193900
7,4	99,7	99,8		1,752	-	194700
7,5	99,8	100,9		1,644	-	162700


Tab. I. 9 Hochwasserschutzwand, Dormagen

Hochwasserschutzwand, Dormagen DAfStb 619										
Betondruckfestigkeit										
Güte-/Festigkeitsklasse	B25	[-]								
Größtkorndurchmesser	32	[mm]								
Art Zuschlag	rund	[-]								
Karbonatisierung	12	[mm]								
Bohrkerndurchmesser	104	[mm]								
Bohrkernschlankheit	104/104	[mm]								
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]								
Lagerung	trocken	[-]								
Baujahr	2000	[-]								
Prüfdatum	2014	[-]								
Alter	14	[Jahre]								
Untersuchte Bauteilart: Massiges Bauteil										
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07										
18,4	42,3	59,5								
33,5	44,7	64,5								
35,7	45,0	73,9								
36,4	48,3	74,5								
37,5	51,3									
37,9	51,8									
38,8	52,5									
39,3	52,9									
40,0	53,0									
Parameter der Stichprobe										
Stichprobenumfang n	22	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	13,2	[N/mm ²]					
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	46,9	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,28	[-]					
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,81	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,08	[-]					
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,30	[-]								
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
$k_n^{g)}$	1,76	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	26,4	[N/mm ²]					

Tab. I. 10 Hochwasserschutzwand, Dormagen – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Hochwasserschutzwand, Dormagen <i>DAfStb 619</i>						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-3:2009-07</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
1	104	104		2,073	-	450000
2	104	104		2,067	-	380000
3	104	104		2,084	-	446375
4	104	104		2,186	-	632773
5	104	104		2,245	-	627868
7	104	104		2,048	-	309029
9	104	104		2,069	-	382607
11	104	104		2,008	-	333555
19.1	104	104		2,055	-	505504
19.2	104	104		2,073	-	449300
20.1	104	104		2,070	-	547636
21.1	104	104		2,054	-	329795
21.2	104	104		2,033	-	359324
22.1	104	104		2,057	-	284655
22.2	104	104		2,030	-	303149
23.1	104	104		2,058	-	410311
23.2	104	104		2,104	-	439759
24.1	104	104		1,772	-	156637
25.1	104	104		2,068	-	322268
26.1	104	104		2,023	-	339647
27.1	104	104		2,051	-	318911
28.1	104	104		2,057	-	435637

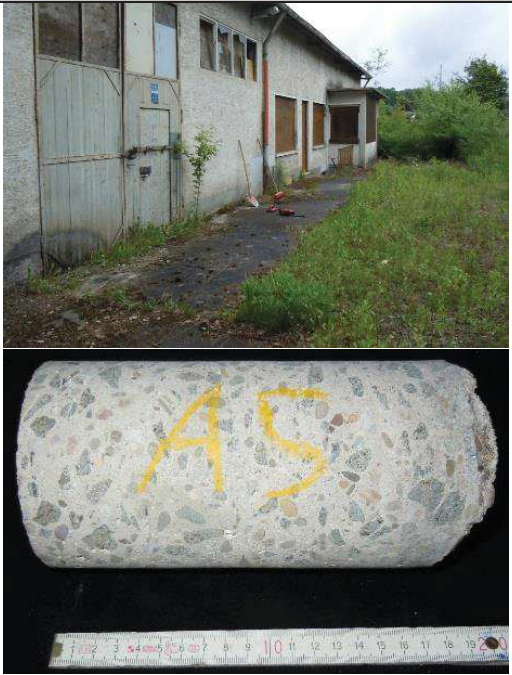
Tab. I. 11 Schwergewichtswand, Dormagen

Schwergewichtswand, Dormagen DAfStb 619						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	63	[mm]				
Art Zuschlag	rund	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	145	[mm]				
Bohrkernschlankheit	145/145	[mm]				
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]				
Lagerung	trocken	[-]				
Baujahr	1915	[-]				
Prüfdatum	2014	[-]				
Alter	99	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Massiges Bauteil						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
10,3	14,7	17,1	21,5			
10,6	14,8	17,2	21,7			
10,9	15,2	17,8	27,8			
11,3	15,3	18,2	28,3			
12,2	15,4	18,2				
12,6	15,7	18,3				
13,4	16,0	18,5				
13,5	16,9	19,1				
13,9	16,9	19,7				
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	31	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	4,30	[N/mm ²]	
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	16,6	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,26	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	2,78	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,09	[-]	
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,25	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck,is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,72	[-]	$f_{ck,is}^{h)}$	10,5	[N/mm ²]	

Tab. I. 12 Schwergewichtswand, Dormagen – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Schwergewichtswand, Dormagen DAfStb 619						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
25.2	145	145		5,411	-	259815
25.3	145	145		5,372	-	228852
25.4	145	145		5,295	-	170293
26.2	145	145		5,267	-	302226
26.3	145	145		5,116	-	264531
26.4	145	145		5,167	-	244979
27.2	145	145		5,303	-	325649
28.2	145	145		5,137	-	301037
28.3	145	145		5,157	-	154661
28.4	145	145		4,909	-	113664
29.2	145	145		5,170	-	253657
29.3	145	145		5,233	-	223018
29.4	145	145		5,290	-	281675
30.1	145	145		5,214	-	175065
30.2	145	145		5,243	-	208218
30.3	145	145		5,306	-	250762
30.5	145	145		5,286	-	201199
30.6	145	145		5,305	-	222085
30.7	145	145		5,197	-	179282
31.1	145	145		5,335	-	316019
32.1	145	145		5,274	-	243000
32.3	145	145		5,258	-	186992
32.5	145	145		5,289	-	279412
32.6	145	145		5,351	-	284786
32.7	145	145		5,414	-	278863
33.1	145	145		5,402	-	251974
34.1	145	145		5,424	-	458604
34.2	145	145		5,489	-	467070
34.3	145	145		5,327	-	354483
34.4	145	145		5,128	-	300105
35.1	145	145		5,114	-	305656
36.1	145	145		5,149	-	294277
36.2	145	145		5,239	-	359147


Tab. I. 13 Bodenplatte ACO, Kaiserslautern

Bodenplatte ACO, Kaiserslautern Thiele u. Weber 2016						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	16	[mm]				
Art Zuschlag	gebrochen	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	parallel	[-]				
Lagerung	nass	[-]				
Baujahr	unbekannt	[-]				
Prüfdatum	2015	[-]				
Alter	-	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Bodenplatte						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
19,3	55,0	67,8				
32,7	55,2					
34,9	56,9					
38,9	58,5					
39,0	58,9					
42,5	59,1					
50,4	60,3					
50,7	62,0					
52,1	63,1					
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	19	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	12,6	[N/mm ²]	
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	50,4	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,25	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,88	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,08	[-]	
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,31	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,78	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	28,1	[N/mm ²]	

Tab. I. 14 Bodenplatte ACO, Kaiserslautern – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Bodenplatte ACO, Kaiserslautern Thiele u. Weber 2016						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
A2	99,7	101,2		-	1,77	272400
A5	99,6	100,7		-	1,772	455900
A6	99,7	101,6		-	1,787	431000
A8	99,6	98,1		-	1,731	392500
B2	99,7	100,4		-	1,775	255100
B4	99,6	100,3		-	1,766	469700
B7	99,8	99,2		-	1,75	332500
B8	99,6	101,0		-	1,782	443300
C4	99,6	100,7		-	1,773	405700
C5	99,6	101,2		-	1,775	428300
C6	99,6	99,5		-	1,749	459100
D1	99,7	101,7		-	1,781	395800
D2	99,6	100,1		-	1,762	150700
D6	99,6	99,0		-	1,754	528500
D7	99,7	100,6		-	1,771	461300
E3	99,7	100,2		-	1,761	484000
E4	99,7	101,3		-	1,774	303500
E5	99,6	101,6		-	1,78	491900
E8	99,6	100,1		-	1,762	304200


Tab. I. 15 Stützwand Ohmbach Abschnitt I, Pirmasens

Stützwand Ohmbach Abschnitt I, Pirmasens <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	16	[mm]				
Art Zuschlag	rund	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	113	[mm]				
Bohrkernschlankheit	113/113	[mm]				
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]				
Lagerung	nass	[-]				
Baujahr	1983	[-]				
Prüfdatum	2012	[-]				
Alter	29	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Wand						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
40,5	51,9	55,3	60,3			
46,6	52,0	56,1	60,8			
47,0	52,5	57,9	62,8			
47,9	54,0	58,8	62,9			
49,9	54,2	58,8	63,4			
51,2	54,6	59,3	63,5			
51,2	54,6	59,5	64,1			
51,3	54,8	59,6	65,6			
51,7	55,2	59,7				
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	35	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	5,76	[N/mm ²]	
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	55,7	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,10	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	4,01	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,03	[-]	
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,11	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,71	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	46,1	[N/mm ²]	

Tab. I. 16 Stützwand Ohmbach Abschnitt I, Pirmasens – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Stützwand Ohmbach Abschnitt I, Pirmasens <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-3:2009-07</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
DF-A1	113,5	115,4		2,691	2,708	552700
DF-A2	113,7	115,0		2,689	2,698	554100
DF-A3	113,8	115,1		2,724	2,733	533700
DF-A4	113,8	115,2		2,705	2,741	645400
DF-A5	113,8	113,2		2,645	2,657	561400
DF-B1	113,5	114,2		2,632	2,648	586300
DF-B2	113,5	114,6		2,666	2,673	603000
DF-B3	113,5	114,4		2,650	2,664	484400
DF-B4	113,5	114,1		2,628	2,645	635600
DF-B5	113,4	114,7		2,659	2,668	635600
DF-C1	113,5	113,5		2,632	2,637	641000
DF-C2	113,5	113,9		2,630	2,658	526300
DF-C3	113,3	114,0		2,628	2,645	592400
DF-C4	113,5	112,6		2,604	2,613	409700
DF-C5	113,5	113,6		2,634	2,658	519000
DF-D1	113,3	114,4		2,635	2,658	503500
DF-D2	113,5	116,1		2,709	2,725	648400
DF-D3	113,4	113,8		2,641	2,662	516800
DF-D4	113,4	112,3		2,582	2,606	516900
DF-D5	113,5	112,2		2,583	2,609	523200
DF-E1	113,4	95,9		2,244	2,26	600500
DF-E2	113,5	114,1		2,613	2,633	567900
DF-E3	113,6	113,7		2,659	2,673	616300
DF-E4	113,4	112,6		2,614	2,627	474800
DF-E5	113,6	112,7		2,579	2,6	610700
DF-F1	113,4	115,1		2,672	2,694	599000
DF-F2	113,4	112,0		2,586	2,608	523900
DF-F3	113,3	114,8		2,663	2,681	602400
DF-F4	113,4	115,7		2,684	2,699	470600
DF-F5	113,6	112,5		2,615	2,628	555300
DF-M1	113,3	112,7		2,630	2,648	593100
DF-M2	113,4	111,0		2,595	2,61	545000
DF-M3	113,3	114,5		2,645	2,67	557400
DF-M4	113,2	114,0		2,628	2,652	545100
DF-M5	113,0	113,2		2,614	2,629	658300


Tab. I. 17 Stützwand Ohmbach Abschnitt II, Pirmasens

Stützwand Ohmbach Abschnitt II, Pirmasens <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	16	[mm]				
Art Zuschlag	rund	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	113	[mm]				
Bohrkernschlankheit	113/113	[mm]				
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]				
Lagerung	nass	[-]				
Baujahr	1983	[-]				
Prüfdatum	2012	[-]				
Alter	29	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Wand						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
34,3	43,7	48,5				
37,0	44,6	49,1				
37,0	44,7	49,3				
38,2	44,9	49,6				
38,9	45,1	49,6				
39,9	45,2	50,3				
39,9	45,8	51,4				
41,4	46,9					
42,8	47,6					
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	25	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	4,79	[N/mm ²]	
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	44,2	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,11	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert μ_y ^{d)}	3,78	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,03	[-]	
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,11	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
k_n ^{g)}	1,74	[-]	$f_{ck, is}$ ^{h)}	36,2	[N/mm ²]	

Tab. I. 18 Stützwand Ohmbach Abschnitt II, Pirmasens – Betondruckfestigkeit:
Einzelprüfwerte

Stützwand Ohmbach Abschnitt II, Pirmasens <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-3:2009-07</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
DF-G1	113,9	113,6		2,649	2,679	421600
DF-G2	113,2	113,0		2,597	2,623	451400
DF-G3	114,0	114,9		2,663	2,693	406900
DF-G4	113,9	115,6		2,694	2,716	454600
DF-G5	113,8	112,0		2,597	2,629	435400
DF-H1	113,4	112,2		2,561	2,584	441500
DF-H2	113,0	110,0		2,538	2,562	343800
DF-H3	113,3	113,6		2,622	2,645	480300
DF-H4	113,2	113,0		2,604	2,626	494600
DF-H5	113,3	113,8		2,594	2,623	455900
DF-J1	113,1	115,0		2,654	2,673	486800
DF-J2	113,3	114,6		2,623	2,659	373400
DF-J3	113,4	114,6		2,656	2,678	451300
DF-J4	113,3	114,7		2,620	2,649	402500
DF-J5	113,3	115,0		2,666	2,684	518300
DF-K1	113,4	112,0		2,576	2,607	386300
DF-K2	113,4	112,0		2,588	2,608	507700
DF-K3	113,4	114,9		2,639	2,666	462200
DF-K4	113,4	114,4		2,650	2,673	497600
DF-K5	113,4	113,1		2,603	2,633	373700
DF-L1	113,2	113,5		2,629	2,65	471700
DF-L2	113,3	111,9		2,605	2,624	500100
DF-L3	113,6	114,8		2,658	2,688	456700
DF-L4	113,3	111,4		2,579	2,601	499900
DF-L5	113,4	116,1		2,685	2,673	393000

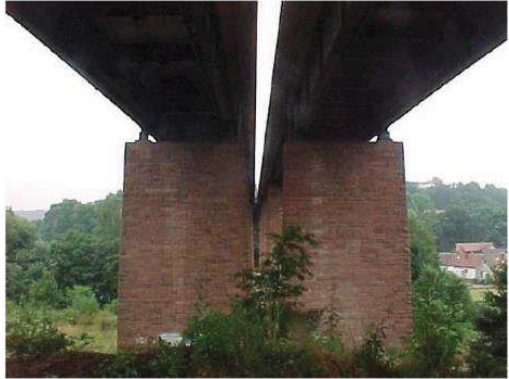
Tab. I. 19 Weserbrücke, Hannoversch Münden

Weserbrücke, Hannoversch Münden Thiele u. Weber 2016						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	-	[mm]				
Art Zuschlag	-	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]				
Lagerung	trocken	[-]				
Baujahr	1960	[-]				
Prüfdatum	2013	[-]				
Alter	53	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Brücke						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
47,8	69,9	95,2				
58,8	70,1	95,8				
61,1	71,1					
62,9	71,6					
66,2	71,8					
67,0	72,2					
67,5	81,9					
69,0	94,4					
69,8	94,5					
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	20	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	13,1	[N/mm ²]	
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	72,9	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,18	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	4,27	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,04	[-]	
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,18	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,77	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	52,5	[N/mm ²]	

Tab. I. 20 Weserbrücke, Hannoversch Münden – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Weserbrücke, Hannoversch Münden Thiele u. Weber 2016						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
26-00	93,8	100,6	12er mittig	1,653	-	659000
27-00	93,6	100,6		1,642	-	666000
28-00	94,4	100,2		1,605	-	474000
29-00	93,9	100,3		1,593	-	502000
30-00	94,4	100,3		1,662	-	668000
31-00	94,4	99,9		1,629	-	673000
32-00	94,4	100,1		1,627	-	416000
33-00	94,6	100,6		1,590	-	582000
34-00	94,5	99,4		1,554	-	338000
35-00	94,5	99,9		1,605	-	504000
36-00	94,5	100,0		1,618	-	469000
37-00	94,5	100,8		1,622	-	508000
38-00	93,9	100,8		1,625	-	490000
39-00	94,4	99,9		1,592	-	432000
40-00	94,6	98,6		1,608	-	490000
41-00	93,8	100,3		1,615	-	488000
42-00	93,8	93,2		1,505	-	487000
43-00	93,8	93,3		1,475	-	504000
44-00	93,8	90,0		1,453	-	439000
45-00	89,7	93,8	Abmessungen	1,438	-	431000

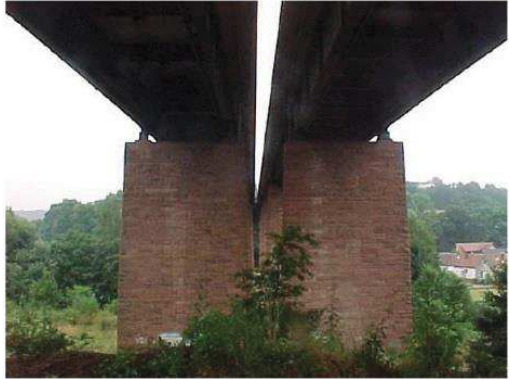
Tab. I. 21 Lautertalbrücke Pfeiler B, Kaiserslautern

Lautertalbrücke Pfeiler B, Kaiserslautern <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	16 (63)	[mm]				
Art Zuschlag	rund	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	parallel	[-]				
Lagerung	trocken	[-]				
Baujahr	1936	[-]				
Prüfdatum	1997	[-]				
Alter	61	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Massiges Bauteil						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
13,0	21,0					
14,0	21,0					
14,0	28,0					
15,0	29,0					
19,0	30,0					
20,0	34,0					
20,0	35,0					
20,0	39,0					
21,0						
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	17	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	7,95	[N/mm ²]	
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	23,1	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,34	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert μ_y ^{d)}	3,09	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,11	[-]	
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,34	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
k_n ^{g)}	1,80	[-]	$f_{ck, is}$ ^{h)}	11,9	[N/mm ²]	

Tab. I. 22 Lautertalbrücke Pfeiler B, Kaiserslautern – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Lautertalbrücke Pfeiler B, Kaiserslautern <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-3:2009-07</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
B1	101,0	100,0		1,727	-	165300
B2	101,0	100,0		1,757	-	168100
B3	101,0	100,0		1,644	-	109200
B4	101,0	100,0		1,757	-	121900
B5			zuvor E-Modul; umgerechnet aus Bk 100/200 mm		-	
B6	101,0	100,0		1,723	-	150700
B7	100,0	99,0		1,624	-	97900
B8	101,0	100,0		1,728	-	157400
B9	102,0	100,0		1,800	-	242300
B10			zuvor E-Modul; umgerechnet aus Bk 100/200 mm		-	
B11	102,0	100,0		1,677	-	110300
B12			zuvor E-Modul; umgerechnet aus Bk 100/200 mm		-	
B13	102,0	100,0		1,808	-	279700
B14	102,0	100,0		1,794	-	238800
B15	102,0	100,0		1,755	-	161100
B16	102,0	100,0		1,841	-	289600
B17			zuvor E-Modul; umgerechnet aus Bk 100/200 mm	1,727	-	165300

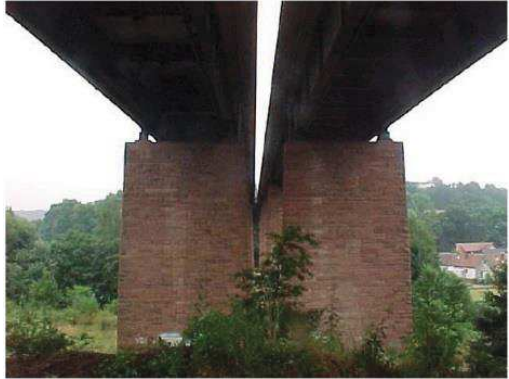
Tab. I. 23 Lautertalbrücke Pfeiler C, Kaiserslautern

Lautertalbrücke Pfeiler C, Kaiserslautern <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	16 (63)	[mm]				
Art Zuschlag	rund	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	parallel	[-]				
Lagerung	trocken	[-]				
Baujahr	1936	[-]				
Prüfdatum	1997	[-]				
Alter	61	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Massiges Bauteil						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
10,0	24,0	41,0				
10,0	24,0	42,0				
11,0	25,0					
15,0	25,0					
17,0	27,0					
19,0	27,0					
21,0	28,0					
22,0	30,0					
23,0	35,0					
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	20	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	8,99	[N/mm ²]	
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	23,8	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,38	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,09	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,13	[-]	
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,41	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,77	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	10,6	[N/mm ²]	

Tab. I. 24 Lautertalbrücke Pfeiler C, Kaiserslautern – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Lautertalbrücke Pfeiler C, Kaiserslautern <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-3:2009-07</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
C1	100,0	101,0		1,634	-	81600
C2	101,0	99,0		1,711	-	199400
C3	101,0	100,0		1,756	-	216800
C4			<small>zuvor E-Modul; umgerechnet aus Bk 100/200 mm</small>		-	
C5	101,0	101,0		1,688	-	90700
C6	101,0	100,0		1,704	-	200600
C7	101,0	101,0		1,747	-	189100
C8			<small>zuvor E-Modul; umgerechnet aus Bk 100/200 mm</small>		-	
C9	101,0	100,0		1,722	-	188300
C10			<small>zuvor E-Modul; umgerechnet aus Bk 100/200 mm</small>		-	
C11	101,0	100,0		1,787	-	280300
C12	101,0	100,0		1,823	-	332200
C13	102,0	100,0		1,752	-	223900
C14	102,0	98,0		1,691	-	170200
C15	101,0	100,0		1,649	-	82200
C16			<small>zuvor E-Modul; umgerechnet aus Bk 100/200 mm</small>		-	
C17	102,0	100,0		1,812	-	336100
C18	102,0	100,0		1,725	-	247900
C19	102,0	102,0		1,778	-	158600
C20	102,0	102,0		1,831	-	188700

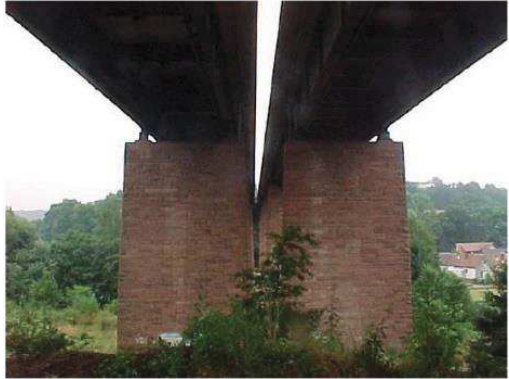
Tab. I. 25 Lautertalbrücke Pfeiler D, Kaiserslautern

Lautertalbrücke Pfeiler D, Kaiserslautern <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	16 (63)	[mm]				
Art Zuschlag	rund	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	parallel	[-]				
Lagerung	trocken	[-]				
Baujahr	1936	[-]				
Prüfdatum	1997	[-]				
Alter	61	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Massiges Bauteil						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
5,0	17,0	33,0				
10,0	18,0	37,0				
11,0	21,0	37,0				
12,0	22,0	39,0				
16,0	22,0	59,0				
16,0	22,0					
17,0	22,0					
17,0	23,0					
17,0	25,0					
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	23	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	11,8	[N/mm ²]	
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	22,5	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,53	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert μ_y ^{d)}	2,99	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,17	[-]	
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,52	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
k_n ^{g)}	1,75	[-]	$f_{ck, is}$ ^{h)}	8,0	[N/mm ²]	

Tab. I. 26 Lautertalbrücke Pfeiler D, Kaiserslautern – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Lautertalbrücke Pfeiler D, Kaiserslautern <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-3:2009-07</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
D1	101,0	101,0		1,692	-	137500
D2	101,0	100,0		1,665	-	132500
D3	101,0	101,0		1,757	-	178900
D4			zuvor E-Modul; umgerechnet aus Bk 100/200 mm		-	
D5	101,0	100,0		1,820	-	292300
D6	101,0	100,0		1,794	-	195900
D7	101,0	100,0		1,672	-	99600
D8			zuvor E-Modul; umgerechnet aus Bk 100/200 mm		-	
D9	101,0	100,0		1,614	-	82300
D10	101,0	100,0		1,501	-	173300
D11	101,0	101,0		1,795	-	175800
D12	101,0	100,0		1,827	-	298100
D13	101,0	100,0		1,735	-	139000
D14			zuvor E-Modul; umgerechnet aus Bk 100/200 mm		-	
D15	101,0	101,0		1,544	-	39400
D16	101,0	100,0		1,670	-	91300
D17	101,0	100,0		1,801	-	262400
D18	101,0	100,0		1,728	-	139100
D19	101,0	100,0		1,783	-	164500
D20			zuvor E-Modul; umgerechnet aus Bk 100/200 mm		-	
D21	101,0	100,0		1,869	-	474300
D22	102,0	100,0		1,753	-	150100
D23	102,0	100,0		1,884	-	316900

Tab. I. 27 Lautertalbrücke Pfeiler E, Kaiserslautern

Lautertalbrücke Pfeiler E, Kaiserslautern <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	16 (63)	[mm]				
Art Zuschlag	rund	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	parallel	[-]				
Lagerung	trocken	[-]				
Baujahr	1936	[-]				
Prüfdatum	1997	[-]				
Alter	61	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Massiges Bauteil						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
6,0	18,0	27,0				
11,0	20,0	30,0				
12,0	20,0	40,0				
12,0	20,0	40,0				
14,0	21,0					
16,0	22,0					
16,0	23,0					
17,0	24,0					
18,0	26,0					
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	22	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	8,44	[N/mm ²]	
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	20,6	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,41	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	2,94	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,15	[-]	
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,43	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,76	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	8,9	[N/mm ²]	

Tab. I. 28 Lautertalbrücke Pfeiler E, Kaiserslautern – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Lautertalbrücke Pfeiler E, Kaiserslautern <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-3:2009-07</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
E1	100,0	99,0		1,760	-	313600
E2	100,0	98,0		1,717	-	232500
E3	100,0	100,0		1,709	-	127100
E4	100,0	99,0		1,615	-	139000
E5			zuvor E-Modul; umgerechnet aus Bk 100/200 mm		-	
E6	100,0	100,0		1,690	-	159700
E7	100,0	98,0		1,647	-	205800
E8	100,0	99,0		1,742	-	311400
E9			zuvor E-Modul; umgerechnet aus Bk 100/200 mm		-	
E10	100,0	95,0		1,628	-	156700
E11	100,0	99,0		1,559	-	82800
E12	100,0	97,0		1,667	-	165600
E13	100,0	100,0		1,728	-	175800
E14			zuvor E-Modul; umgerechnet aus Bk 100/200 mm		-	
E15	100,0	99,0		1,680	-	156900
E16	101,0	99,0		1,632	-	95500
E17	101,0	99,0		1,749	-	215800
E18			zuvor E-Modul; umgerechnet aus Bk 100/200 mm		-	
E19	101,0	100,0		1,688	-	127300
E20	101,0	100,0		1,564	-	97400
E21	101,0	99,0		1,751	-	191600
E22	101,0	97,0		1,424	-	48200

Tab. I. 29 Gewölbebogen, Zwickau

Gewölbebogen, Zwickau						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	-	[mm]				
Art Zuschlag	-	[-]				
Karbonatisierung	-	[-]				
Bohrkerndurchmesser	-	[mm]				
Bohrkernschlankheit	-	[mm]				
Entnahmerichtung	-	[-]				
Lagerung	-	[-]				
Baujahr	1939	[-]				
Prüfdatum	-	[-]				
Alter	-	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Massiges Bauteil						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
7,4	20,4					
8,2	23,2					
9,0	34,9					
10,2						
11,0						
11,8						
13,6						
14,0						
17,2						
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	12	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	7,92	[N/mm ²]	
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	15,1	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,53	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	2,61	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,18	[-]	
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,46	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,87	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	5,7	[N/mm ²]	

Tab. I. 30 Gewölbebogen, Zwickau – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Gewölbebogen, Zwickau						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-3:2009-07</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]

Einzelprüfwerte liegen nicht vor.

Tab. I. 31 Lahntalbrücke, Limburg

Lahntalbrücke, Limburg						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	B450	[-]				
Größtkorndurchmesser	31,5	[mm]				
Art Zuschlag	Mischkorn	[-]				
Karbonatisierung	0-30	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/200	[mm]				
Entnahmerichtung	gemischt	[-]				
Lagerung	trocken	[-]				
Baujahr	1962	[-]				
Prüfdatum	2017	[-]				
Alter	55	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Brücke						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
46,1	53,7	57,5				
47,1	53,8	58,4				
48,3	53,9	59,2				
49,2	54,1	61,0				
49,9	54,1	61,2				
50,5	55,3	63,1				
51,9	55,8	63,7				
52,2	56,7	67,5				
53,7	57,4	69,8				
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	27	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	5,93	[N/mm ²]	
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	55,7	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,11	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	4,02	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,03	[-]	
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,10	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,74	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	46,3	[N/mm ²]	

Tab. I. 32 Lahntalbrücke, Limburg – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Lahntalbrücke, Limburg						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
I_D_0.1_1	99,4	181,4		3,250	-	419210
I_D_0.1_2	99,1	202,7		3,700	-	415910
I_D_0.1_3	99,1	183,6		3,395	-	442610
I_D_0.1_4	98,7	209,3		3,684	-	423170
I_D_0.2_1	98,9	167,0		2,966	-	383790
I_D_0.2_2	99,0	206,4		3,669	-	449930
I_D_0.2_3	99,1	209,8		3,750	-	491150
I_D_0.2_4	98,7	198,0	Nagel in Beton	3,495	-	440130
I_D_0.4_1	98,6	192,4		3,440	-	515620
I_D_0.4_2	99,1	203,8	Eisen in Längsrichtung	3,697	-	372760
I_D_0.4_3	99,1	205,5		3,663	-	417450
I_D_0.4_4	98,8	195,3	18er quer	3,482	-	535620
I_D_0.5_1	98,8	207,4		3,662	-	353880
I_D_0.5_2	99,7	158,1		2,894	-	419610
I_D_0.5_3	99,6	185,3		3,374	-	383380
I_D_0.5_4	98,7	202,7		3,633	-	411540
I_D_0.6_1	98,8	205,1		3,694	-	387380
I_D_0.6_2	99,5	160,5		2,925	-	475520
I_D_0.6_3	99,5	175,7		3,197	-	440770
I_D_0.6_4	98,7	203,7		3,673	-	360110
I_D_0.7_1	98,9	203,4		3,644	-	412490
I_D_0.7_2	99,3	201,0		3,662	-	471860
I_D_0.7_3	99,3	200,3	8er quer	3,639	-	432430
I_D_0.7_4	98,6	206,4		3,655	-	398820
I_D_0.9_1	98,9	209,3		3,778	-	484700
I_D_0.9_2	99,3	209,6	26er quer	4,015	-	458020
I_D_0.9_4	98,6	206,7		3,771	-	396750

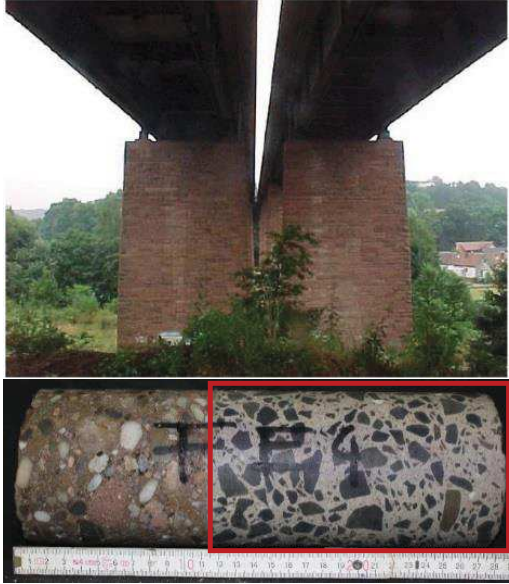
Tab. I. 33 Lautertalbrücke Widerlager, Kaiserslautern

Lautertalbrücke Widerlager, Kaiserslautern						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	32	[mm]				
Art Zuschlag	rund	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]				
Lagerung	nass	[-]				
Baujahr	1936	[-]				
Prüfdatum	2016	[-]				
Alter	80	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Brücke						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
30,4	55,2	65,1				
32,8	56,0	66,6				
34,9	56,7	70,3				
40,8	57,2	71,3				
42,2	59,1	72,7				
43,8	59,5	75,7				
52,8	62,1					
54,1	63,7					
54,5	64,0					
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	24	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	12,7	[N/mm ²]	
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	55,9	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,23	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,99	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,06	[-]	
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,25	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,75	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	34,9	[N/mm ²]	

Tab. I. 34 Lautertalbrücke Widerlager, Kaiserslautern – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Lautertalbrücke Widerlager, Kaiserslautern						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
W-A-1-2	100,0	100,2		-	1,810	427800
W-A-2-1	100,0	100,5		-	1,819	239100
W-A-3-2	99,8	100,5		-	1,835	342900
W-A-4-1	100,0	100,9		-	1,844	440000
W-A-5-1	100,0	96,1		-	1,764	448900
W-A-6-2	100,0	100,0		-	1,861	522800
W-A-7-2	100,0	101,2		-	1,842	433700
W-A-8-1	100,0	101,5		-	1,894	274000
W-A-9-1	99,8	100,5		-	1,864	509000
W-A-10-2	100,0	101,9		-	1,848	425000
W-A-13-1	100,0	99,8		-	1,864	571000
W-A-16-1	100,0	100,6		-	1,890	594400
W-B-1-1	100,0	102,0		-	1,901	560100
W-B-2-2	100,0	99,0		-	1,839	414400
W-B-3-1	100,0	100,9		-	1,870	445300
W-B-4-1	100,0	99,6		-	1,855	320400
W-B-5-1	100,0	95,8		-	1,765	502900
W-B-6-2	100,0	100,8		-	1,868	257500
W-B-7-1	100,0	96,3		-	1,782	331800
W-B-8-2	100,0	100,6		-	1,869	467700
W-B-11-2	100,0	100,0		-	1,870	487700
W-B-12-2	100,0	97,1		-	1,820	551800
W-B-14-1	100,0	100,0		-	1,872	464500
W-B-15-1	100,0	102,2		-	1,895	500000

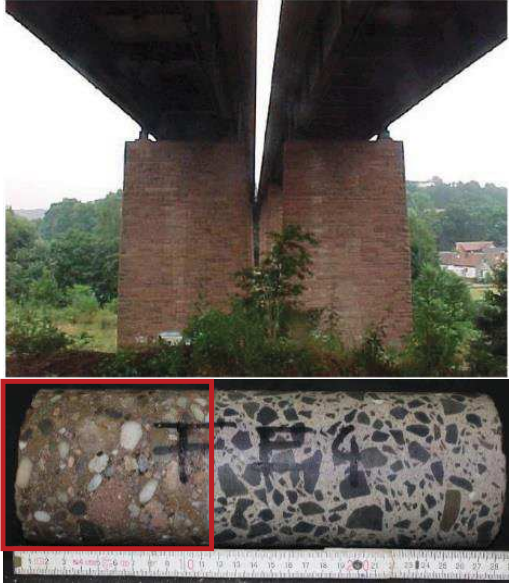
Tab. I. 35 Lautertalbrücke Fahrbahn obere Schicht, Kaiserslautern

Lautertalbrücke Fahrbahn obere Schicht, Kaiserslautern										
Betondruckfestigkeit										
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]								
Größtkorndurchmesser	16	[mm]								
Art Zuschlag	gebrochen	[-]								
Karbonatisierung	nein	[-]								
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]								
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]								
Entnahmerichtung	parallel	[-]								
Lagerung	nass	[-]								
Baujahr	unbekannt	[-]								
Prüfdatum	2016	[-]								
Alter	unbekannt	[Jahre]								
Untersuchte Bauteilart: Brücke										
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07										
55,4	68,5									
55,9										
57,3										
57,3										
59,7										
60,4										
62,1										
63,9										
67,7										
Parameter der Stichprobe										
Stichprobenumfang n	10	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	4,68	[N/mm ²]					
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	60,8	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,08	[-]					
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
Mittelwert μ_y ^{d)}	4,11	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,02	[-]					
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,08	[-]								
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
k_n ^{g)}	1,92	[-]	$f_{ck, is}$ ^{h)}	52,4	[N/mm ²]					

Tab. I. 36 Lautertalbrücke Fahrbahn obere Schicht, Kaiserslautern – Betondruckfestigkeit:
Einzelprüfwerte

Lautertalbrücke Fahrbahn obere Schicht, Kaiserslautern						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
F-A-1-1	100,0	101,5		-	1,889	474400
F-B-1-1	100,0	98,1		-	1,808	501900
F-B-2-1	100,0	98,1		-	1,793	488100
F-B-3-1	100,0	100,5		-	1,838	450000
F-C-1-1	100,0	99,7		-	1,817	468800
F-D-2-1	99,8	100,0		-	1,827	448200
F-E-1-1	99,8	98,6		-	1,818	535600
F-E-2-1	99,8	100,6		-	1,857	433100
F-E-3-1	99,8	100,7		-	1,848	436900
F-E-4-1	99,8	99,0		-	1,827	529200


Tab. I. 37 Lautertalbrücke Fahrbahn untere Schicht, Kaiserslautern

Lautertalbrücke Fahrbahn untere Schicht, Kaiserslautern										
Betondruckfestigkeit										
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]								
Größtkorndurchmesser	32	[mm]								
Art Zuschlag	rund	[-]								
Karbonatisierung	nein	[-]								
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]								
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]								
Entnahmerichtung	parallel	[-]								
Lagerung	nass	[-]								
Baujahr	1936	[-]								
Prüfdatum	2016	[-]								
Alter	80	[Jahre]								
Untersuchte Bauteilart: Brücke										
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07										
14,3	23,3	32,2								
14,4	23,4									
15,2	23,5									
16,5	23,7									
18,0	23,9									
18,3	24,6									
19,3	25,4									
19,8	25,5									
22,3	27,8									
Parameter der Stichprobe										
Stichprobenumfang n	19	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	4,78	[N/mm ²]					
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	21,6	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,22	[-]					
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,05	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,07	[-]					
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,23	[-]								
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
$k_n^{g)}$	1,78	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	14,1	[N/mm ²]					

Tab. I. 38 Lautertalbrücke Fahrbahn untere Schicht, Kaiserslautern – Betondruckfestigkeit:
Einzelprüfwerte

Lautertalbrücke Fahrbahn untere Schicht, Kaiserslautern						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
F-A-2-2	99,8	100,1		-	1,785	186900
F-A-3-2	99,8	100,1		-	1,753	151100
F-A-4-2	99,8	101,1		-	1,752	118900
F-A-5-2	99,8	97,7		-	1,685	141000
F-A-6-2	99,8	99,7		-	1,75	129400
F-A-7-2	99,8	101,2		-	1,755	143000
F-A-8-2	99,8	101,2		-	1,757	112900
F-A-9-2	99,8	100,0		-	1,753	155000
F-A-10-2	100,0	100,5		-	1,783	199300
F-A-11-2	100,0	99,9		-	1,789	252600
F-D-1-2	100,0	100,4		-	1,809	200000
F-D-2-2	100,0	100,6		-	1,788	112300
F-D-5-2	98,8	97,4		-	1,741	178600
F-D-6-2	100,0	100,0		-	1,78	193000
F-D-7-2	100,0	96,0		-	1,698	184700
F-E-1-2	98,8	96,4		-	1,706	212900
F-E-2-2	100,0	95,0		-	1,698	183700
F-E-3-2	99,8	97,5		-	1,718	185400
F-E-4-2	100,0	97,3		-	1,716	175100

Tab. I. 39 Decke Wohnblock, Ludwigshafen

Decke Wohnblock, Ludwigshafen						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	16	[mm]				
Art Zuschlag	rund	[-]				
Karbonatisierung	20	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	parallel	[-]				
Lagerung	trocken	[-]				
Baujahr	unbekannt	[-]				
Prüfdatum	2016	[-]				
Alter	unbekannt	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Platte						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
23,4	34,5	37,3	43,8			
25,7	34,5	38,7	44,9			
28,7	34,9	40,2	45,6			
29,2	35,8	40,6	45,9			
31,2	36,1	40,9	48,2			
32,8	36,3	41,5	49,0			
32,8	36,4	42,0				
33,9	36,5	42,1				
34,0	36,7	42,4				
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	33	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	6,16	[N/mm ²]	
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	37,5	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,16	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert μ_y ^{d)}	3,61	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,05	[-]	
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,17	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
k_n ^{g)}	1,72	[-]	$f_{ck, is}$ ^{h)}	27,5	[N/mm ²]	

Tab. I. 40 Decke Wohnblock, Ludwigshafen – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Decke Wohnblock, Ludwigshafen						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-3:2009-07</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
1	99,4	99,9		1,782	-	329400
2	99,5	103,6		1,854	-	326700
3	99,4	102,0	Holzeinlagerung	1,829	-	277700
4	99,3	96,3		1,748	-	379300
5	99,3	93,2		1,643	-	226500
6	99,4	97,3		1,705	-	315100
7	99,0	101,1		1,801	-	323800
8	99,4	104,0		1,861	-	280500
10	99,6	97,0		1,749	-	223700
11	99,4	100,2		1,819	-	181700
12	99,2	98,3		1,759	-	352700
13	99,4	107,2		1,952	-	374200
14	99,2	96,9		1,762	-	354900
15	99,5	95,6		1,731	-	317700
16	99,5	93,3		1,669	-	268400
17	99,5	99,3		1,768	-	282200
18	99,4	95,0		1,701	-	289700
19	99,5	97,5		1,745	-	322800
20	99,3	101,5		1,795	-	269900
21	99,5	101,3		1,831	-	268100
22	99,5	101,2		1,841	-	282800
23	99,5	102,9		1,842	-	254800
24	99,4	98,8		1,754	-	242500
25	99,5	96,2		1,705	-	312600
26	99,3	112,7		2,048	-	347600
27	99,4	99,1		1,811	-	199800
28	99,5	98,9		1,777	-	255200
29	99,5	95,1		1,705	-	340400
30	99,6	101,7	Holzeinlagerung	1,847	-	265100
31	99,4	101,8		1,863	-	284900
32	99,4	94,1		1,700	-	283000
33	99,5	101,7		1,856	-	301000
34	99,2	98,7		1,791	-	261700


Tab. I. 41 Wand Technische Werke Ludwigshafen, Ludwigshafen

Wand Technische Werke Ludwigshafen, Ludwigshafen						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	16	[mm]				
Art Zuschlag	rund	[-]				
Karbonatisierung	10	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	parallel	[-]				
Lagerung	nass	[-]				
Baujahr	unbekannt	[-]				
Prüfdatum	2017	[-]				
Alter	unbekannt	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Wand						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
26,3	41,6	51,6				
29,6	41,7	53,0				
30,8	42,6	54,3				
31,5	45,8	55,4				
33,2	45,9					
33,7	46,8					
34,8	48,0					
40,1	48,9					
40,8	50,8					
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	22	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	8,72	[N/mm ²]	
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	42,1	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,21	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,72	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,06	[-]	
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,22	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,76	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	28,1	[N/mm ²]	

Tab. I. 42 Wand Technische Werke Ludwigshafen, Ludwigshafen – Betondruckfestigkeit:
Einzelprüfwerte

Wand Technische Werke Ludwigshafen, Ludwigshafen						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
WA 2	98,1	102,0		-	1,808	263000
WA 3	98,3	104,4		-	1,865	224800
WA 4	98,4	102,9		-	1,830	234100
WA 5	98,7	102,0		-	1,844	350500
WA 6	98,4	102,0		-	1,838	316500
WA 7	98,6	101,9		-	1,839	311500
WA 8	98,5	104,9		-	1,897	240300
WB 1	98,9	101,9		-	1,850	359800
WB 2	98,6	102,5		-	1,866	366600
WB 3	98,7	101,6		-	1,870	415400
WB 4	98,8	104,2		-	1,891	254400
WB 7	98,7	104,9		-	1,886	257800
WB 9	98,8	102,8		-	1,858	351800
WC 2	98,6	101,7		-	1,855	393900
WC 3	98,6	103,8		-	1,901	404600
WC 5	98,8	103,3		-	1,864	319700
WC 8	98,7	104,0		-	1,909	373800
WC 10	98,8	103,0		-	1,870	307600
WD 1	98,9	104,7		-	1,913	327500
WD7	99,4	104,1		-	1,900	204100
WD 8	99,5	104,9		-	1,946	394700
WD 9	99,4	102,2		-	1,893	430200

Tab. I. 43 Bauwerk 1 (anonymisiert)

Bauwerk 1 (anonymisiert)										
Betondruckfestigkeit										
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]								
Größtkorndurchmesser	16	[mm]								
Art Zuschlag	rund	[-]								
Karbonatisierung	16	[-]								
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]								
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]								
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]								
Lagerung	nass	[-]								
Baujahr	unbekannt	[-]								
Prüfdatum	2017	[-]								
Alter	unbekannt	[Jahre]								
Untersuchte Bauteilart: Wand										
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07										
28,3	43,4	47,9	54,2							
31,9	44,7	48,2	55,3							
36,2	45,5	48,5	57,2							
36,5	45,6	51,5	62,2							
37,6	46,1	51,7	64,9							
38,6	46,4	52,0	68,2							
40,6	46,6	52,3								
40,9	46,9	53,0								
41,5	47,7	53,0								
Parameter der Stichprobe										
Stichprobenumfang n	33	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	8,83	[N/mm ²]					
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	47,4	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,19	[-]					
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,84	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,05	[-]					
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,19	[-]								
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
$k_n^{g)}$	1,72	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	33,5	[N/mm ²]					

Tab. I. 44 Bauwerk 1 – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Bauwerk 1						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
A1-1	99,4	98,2	zuvor E-Modul	-	1,789	357900
A1-2	99,7	98,8	zuvor E-Modul	-	1,810	404000
A2	99,4	96,9		-	1,793	247800
A3	99,5	102,7		-	1,900	362400
A4	99,5	100,6		-	1,878	354100
A5	99,4	101,8		-	1,909	411600
A6	99,5	101,5		-	1,863	283500
A7-1	99,5	100,2	zuvor E-Modul	-	1,830	375000
A7-2	99,4	98,6	zuvor E-Modul	-	1,816	405500
B1-1	99,5	101,1	zuvor E-Modul	-	1,859	504800
B1-2	99,4	100,8	zuvor E-Modul	-	1,851	429400
B2	99,4	99,5		-	1,838	317200
B3	99,3	102,2		-	1,889	299200
B5	99,3	102,1		-	1,881	362900
B6-1	99,3	98,0	zuvor E-Modul	-	1,772	410200
B6-2	99,3	99,2	zuvor E-Modul	-	1,791	420100
B7	99,3	103,4		-	1,892	336100
C1	99,2	104,0		-	1,907	290600
C2-1	99,3	99,7	zuvor E-Modul	-	1,830	528400
C2-2	99,2	96,4	zuvor E-Modul	-	1,758	442400
C3	99,1	103,0		-	1,876	369200
C4	99,1	102,2		-	1,894	312900
C5-1	99,0	100,0	zuvor E-Modul	-	1,808	351000
C5-2	99,3	99,4	zuvor E-Modul	-	1,767	481800
C6	99,0	100,8		-	1,813	373300
D1-1	99,0	100,0	zuvor E-Modul	-	1,813	396100
D1-2	99,0	100,7	zuvor E-Modul	-	1,820	367100
D3	99,0	101,1		-	1,864	278500
D4-1	99,0	100,3	zuvor E-Modul	-	1,834	356900
D4-2	99,0	97,9	zuvor E-Modul	-	1,779	400400
D5	99,0	102,4		-	1,870	319600
D6	99,0	101,6		-	1,871	217700
D7	99,0	103,7		-	1,893	343800

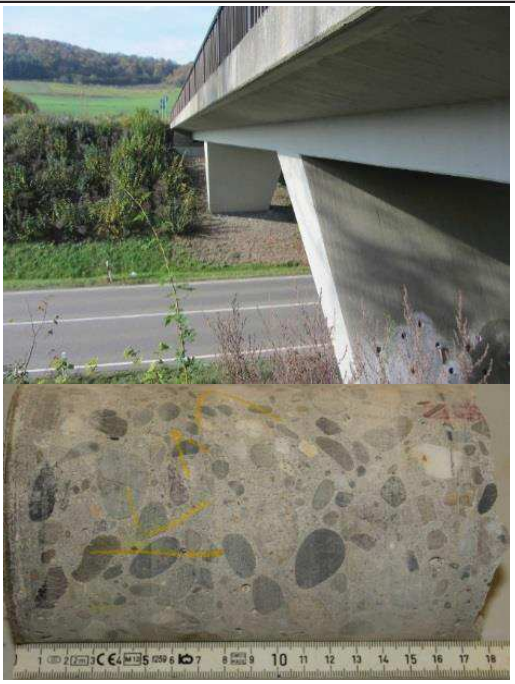
Tab. I. 45 Pfeiler Brücke B270, Langweiler

Pfeiler Brücke B270, Langweiler										
Betondruckfestigkeit										
Güte-/Festigkeitsklasse	B300	[-]								
Größtkorndurchmesser	16	[mm]								
Art Zuschlag	rund	[-]								
Karbonatisierung	0-1	[mm]								
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]								
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]								
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]								
Lagerung	nass	[-]								
Baujahr	1963	[-]								
Prüfdatum	2017	[-]								
Alter	54	[Jahre]								
Untersuchte Bauteilart: Brücke										
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07										
37,8	70,7									
47,1	75,4									
47,3	103,3									
50,4										
52,6										
53,8										
57,8										
64,7										
66,5										
Parameter der Stichprobe										
Stichprobenumfang n	12	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	17,3	[N/mm ²]					
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	60,6	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,29	[-]					
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	4,07	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,07	[-]					
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,27	[-]								
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
$k_n^{g)}$	1,87	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	35,7	[N/mm ²]					

Tab. I. 46 Pfeiler Brücke B270, Langweiler – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Pfeiler Brücke B270, Langweiler						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-3:2009-07</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
S1	99,0	99,7		1,816	-	414200
S2	99,0	102,4		1,846	-	291300
S3	99,0	102,0		1,844	-	362200
S4	99,0	100,3		1,813	-	511600
S5	99,0	96,7		1,786	-	795500
S6	99,0	98,0		1,796	-	580200
S7	99,0	98,4		1,823	-	544300
S8	99,0	100,7		1,813	-	498000
S9	99,0	100,3		1,822	-	387800
S10	99,0	99,3		1,800	-	404900
S11	99,0	101,0		1,828	-	364100
S12	99,0	99,4		1,805	-	444600

Tab. I. 47 Brückenkappe Brücke B270, Langweiler

Brückenkappe Brücke B270, Langweiler						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	B225	[-]				
Größtkorndurchmesser	16	[mm]				
Art Zuschlag	rund	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	parallel	[-]				
Lagerung	trocken	[-]				
Baujahr	1963	[-]				
Prüfdatum	2017	[-]				
Alter	54	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Brücke						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
58,0						
58,2						
68,6						
69,0						
76,1						
78,7						
90,1						
93,9						
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	8	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	13,3	[N/mm ²]	
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	74,1	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,18	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert μ_y ^{d)}	4,29	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,04	[-]	
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,18	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
k_n ^{g)}	2,01	[-]	$f_{ck, is}$ ^{h)}	50,9	[N/mm ²]	

Tab. I. 48 Brückenkappe Brücke B270, Langweiler – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Brückenkappe Brücke B270, Langweiler						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-3:2009-07</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
K2	99,0	97,0		1,777	-	447700
K3	99,0	99,6		1,822	-	528300
K6	99,0	90,8		1,659	-	530800
K7	99,0	95,8		1,779	-	693600
K8	99,0	83,0		1,538	-	723100
K9	99,0	98,7		1,799	-	446800
K12	99,0	100,0		1,828	-	585900
K14	99,0	95,0		1,779	-	605500

Tab. I. 49 Brücke Autobahnkreuz Mainz-Süd - Auflager, Mainz

Brücke Autobahnkreuz Mainz-Süd - Auflager, Mainz										
Betondruckfestigkeit										
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]								
Größtkorndurchmesser	16	[mm]								
Art Zuschlag	rund	[-]								
Karbonatisierung	4	[-]								
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]								
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]								
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]								
Lagerung	trocken	[-]								
Baujahr	1965	[-]								
Prüfdatum	2017	[-]								
Alter	52	[Jahre]								
Untersuchte Bauteilart: Brücke										
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07										
34,2	54,9									
38,0	55,5									
45,0	55,6									
45,6	60,0									
46,1										
49,3										
49,8										
50,9										
54,9										
Parameter der Stichprobe										
Stichprobenumfang n	13	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	7,40	[N/mm ²]					
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	49,2	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,15	[-]					
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,88	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,04	[-]					
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,16	[-]								
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
$k_n^{g)}$	1,85	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	36,2	[N/mm ²]					

Tab. I. 50 Brücke Autobahnkreuz Mainz-Süd - Auflager, Mainz – Betondruckfestigkeit:
Einzelprüfwerte

Brücke Autobahnkreuz Mainz-Süd - Auflager, Mainz						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
WR-1	99,1	100,6		1,928	-	384000
WR-2-1	99,1	99,4		1,868	-	423300
WR-2-2	99,2	101,4		1,837	-	463900
WR-4-3	100,0	102,0		1,837	-	431100
WL-1	99,7	102,4		1,914	-	267100
WL-2-1	99,8	101,8	zuvor E-Modul	1,829	-	297100
WL-2-2	99,8	102,0	zuvor E-Modul	1,844	-	434800
WL-3-1	99,8	102,0		1,826	-	360500
WL-3-2	99,8	103,0		1,862	-	386000
WL-4-1	99,8	101,0	zuvor E-Modul	1,819	-	352300
WL-4-2	99,8	100,2	zuvor E-Modul	1,798	-	434300
WL-5-1	99,8	101,2	zuvor E-Modul	1,820	-	356500
WL-5-2	99,7	100,4	zuvor E-Modul	1,814	-	397500

Tab. I. 51 Brücke über den Lockwitzbach, Dresden/Niedersedlitz

Brücke über den Lockwitzbach, Dresden/Niedersedlitz Steinbock u. Curbach 2018						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-					[-]
Größtkorndurchmesser	32					[mm]
Art Zuschlag	-					[-]
Karbonatisierung	nein					[-]
Bohrkerndurchmesser	100					[mm]
Bohrkernschlankheit	100/100					[mm]
Entnahmerichtung	-					[-]
Lagerung	-					[-]
Baujahr	1905					[-]
Prüfdatum	2016					[-]
Alter	111					[Jahre]
Untersuchte Bauteilart: Brücke						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
32,9	56,7					
35,5	61,4					
41,6	62,8					
42,3						
43,0						
44,0						
45,7						
46,7						
52,8						
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	12		[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	9,50	[N/mm ²]
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	47,1		[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,20	[-]
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,83		[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,05	[-]
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,20		[-]			
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,87		[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	31,7	[N/mm ²]

Tab. I. 52 Brücke über den Lockwitzbach, Dresden/Niedersedlitz – Betondruckfestigkeit:
Einzelprüfwerte

Brücke über den Lockwitzbach, Dresden/Niedersedlitz <i>Steinbock u. Curbach 2018</i>						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-3:2009-07</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]

Einzelprüfwerte liegen nicht vor.

Tab. I. 53 Stützen, TU Kaiserslautern

Stützen, TU Kaiserslautern						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	C16/20	[-]				
Größtkorndurchmesser	16	[mm]				
Art Zuschlag	rund	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]				
Lagerung	trocken	[-]				
Baujahr	2017	[-]				
Prüfdatum	2017	[-]				
Alter	-	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Stütze						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
27,1	43,0					
28,3						
28,8						
30,1						
31,1						
33,4						
34,9						
35,2						
39,4						
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	10	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	5,11	[N/mm ²]	
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	33,1	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,15	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert μ_y ^{d)}	3,49	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,04	[-]	
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,15	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
k_n ^{g)}	1,92	[-]	$f_{ck, is}$ ^{h)}	24,6	[N/mm ²]	

Tab. I. 54 Stützen TU Kaiserslautern (TUK), Kaiserslautern – Betondruckfestigkeit:
Einzelprüfwerte

Stützen TU Kaiserslautern (TUK), Kaiserslautern						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
1_1-1	99,0	103,3		1,796	-	256900
1_2-1	99,7	100,7		1,758	-	307300
1_3-1	99,0	101,5		1,778	-	208400
1_4-1	99,0	102,0		1,791	-	270600
1_5-1	99,0	100,0		1,749	-	330700
2_1-1	99,7	102,0		1,798	-	224500
2_2-1	99,7	99,7		1,740	-	235100
2_3-1	99,5	100,7		1,771	-	241700
2_4-1	99,5	102,0		1,792	-	271200
2_5-1	99,3	102,0		1,784	-	219200

Tab. I. 55 Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt – Betondruckfestigkeit

Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt						
Betondruckfestigkeit			 			
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	16	[mm]				
Art Zuschlag	rund	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]				
Lagerung	trocken	[-]				
Baujahr	unbekannt	[-]				
Prüfdatum	2018	[-]				
Alter	-	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Wand						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
21,2	34,9	37,9				
24,0	35,1	38,8				
29,3	35,3	40,0				
29,5	35,8	40,6				
31,0	36,3	42,2				
31,7	37,0	42,6				
31,9	37,4	44,3				
32,1	37,4	45,2				
33,5	37,8	45,8				
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	27	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	5,95	[N/mm ²]	
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	35,9	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,17	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert μ_y ^{d)}	3,57	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,05	[-]	
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,18	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
k_n ^{g)}	1,74	[-]	$f_{ck, is}$ ^{h)}	25,9	[N/mm ²]	

Tab. I. 56 Wand Technische Werke Ludwigshafen, Ludwigshafen – Betondruckfestigkeit:
Einzelprüfwerte

Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
A3	99,4	100,2		1,765	-	260200
A4	99,5	100,2		1,748	-	165000
A5-1	99,6	99,9	zuvor E-Modul	1,740	-	248700
A6-1	99,6	101,0	zuvor E-Modul	1,773	-	291100
A7-1	99,5	100,4	zuvor E-Modul	1,749	-	290900
A8	99,7	99,3		1,743	-	250400
A9	99,5	101,3		1,766	-	271400
A11	99,7	101,0		1,734	-	187200
B1	99,7	101,0		1,748	-	247300
B2	99,7	100,0		1,760	-	228400
B5-1	99,6	100,0	zuvor E-Modul	1,766	-	345000
B6	99,7	99,7		1,743	-	275900
B7-1	99,7	100,4	zuvor E-Modul	1,747	-	279100
B8	99,7	100,0		1,741	-	274200
B10	99,6	101,5		1,788	-	241700
C1	99,6	100,1		1,785	-	288300
C2	99,6	100,3		1,774	-	302600
C3	99,7	98,3		1,732	-	230600
C6	99,6	99,6		1,741	-	295100
C7	99,6	100,3		1,770	-	356600
C10-1	99,6	101,0	zuvor E-Modul	1,754	-	311400
C11-1	99,7	99,5	zuvor E-Modul	1,725	-	283500
C11-2	99,6	97,4	zuvor E-Modul	1,704	-	316200
C13-1	99,8	99,7	zuvor E-Modul	1,761	-	295600
C13-2	99,8	99,8	zuvor E-Modul	1,776	-	353500
C14-1	99,7	95,8	zuvor E-Modul	1,693	-	329700
C14-2	99,7	97,3	zuvor E-Modul	1,718	-	332600

Tab. I. 57 Balkonplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt

Balkonplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt										
Betondruckfestigkeit										
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]								
Größtkorndurchmesser	16	[mm]								
Art Zuschlag	rund	[-]								
Karbonatisierung	nein	[-]								
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]								
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]								
Entnahmerichtung	parallel	[-]								
Lagerung	trocken	[-]								
Baujahr	unbekannt	[-]								
Prüfdatum	2018	[-]								
Alter	-	[Jahre]								
Untersuchte Bauteilart: Platte										
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07										
39,0	48,2									
39,3	53,3									
40,0	53,8									
42,3	57,0									
42,6	61,5									
42,7										
42,9										
45,8										
46,7										
Parameter der Stichprobe										
Stichprobenumfang n	14	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	7,05	[N/mm ²]					
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	46,8	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,15	[-]					
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,84	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,04	[-]					
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,14	[-]								
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
$k_n^{g)}$	1,83	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	35,5	[N/mm ²]					

Tab. I. 58 Balkonplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt – Betondruckfestigkeit:
Einzelprüfwerte

Balkonplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
C15-B	99,8	99,8		1,777	-	333600
C16-B	99,8	99,6		1,765	-	307600
C18-B	99,7	99,5		1,766	-	333600
C19-B	99,7	99,4		1,797	-	444900
C22-B	99,8	100,0		1,753	-	335300
C23-B	99,8	100,0		1,793	-	377200
C24-B	99,8	99,3		1,758	-	312700
C25-B	99,7	99,4		1,764	-	357500
C26-B	99,8	99,2		1,804	-	480900
C27-B	99,8	100,0		1,787	-	365000
C28-B	99,8	100,5		1,778	-	331100
C29-B	99,8	100,0		1,763	-	304900
C30-B	99,8	100,7		1,811	-	420900
C31-B	99,7	101,0		1,799	-	416200

Tab. I. 59 Deckenplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt

Deckenplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt										
Betondruckfestigkeit			 							
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]								
Größtkorndurchmesser	16	[mm]								
Art Zuschlag	rund	[-]								
Karbonatisierung	nein	[-]								
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]								
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]								
Entnahmerichtung	parallel	[-]								
Lagerung	trocken	[-]								
Baujahr	unbekannt	[-]								
Prüfdatum	2018	[-]								
Alter	-	[Jahre]								
Untersuchte Bauteilart: Platte										
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07										
31,5	42,5	49,2								
32,0	42,8									
32,1	43,6									
33,5	43,9									
34,0	45,6									
35,2	45,7									
37,3	46,2									
40,8	46,3									
41,7	46,6									
Parameter der Stichprobe										
Stichprobenumfang n	19	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	5,86	[N/mm ²]					
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	40,6	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,14	[-]					
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,69	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,04	[-]					
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,15	[-]								
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
$k_n^{g)}$	1,78	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	30,7	[N/mm ²]					

Tab. I. 60 Deckenplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt – Betondruckfestigkeit:
Einzelprüfwerte

Deckenplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
1	99,8	98,7		1,735	-	265800
2	99,8	100,0		1,740	-	291500
3	99,8	100,0		1,782	-	332600
7	99,8	100,0		1,760	-	385000
8	99,8	100,9		1,787	-	334800
9	99,8	100,0		1,777	-	343600
10	99,8	101,3		1,786	-	325900
11	99,8	100,2		1,758	-	341000
12	99,8	101,7		1,808	-	361700
13	99,7	99,8		1,778	-	361100
14	99,7	101,1		1,791	-	318600
15	99,8	99,8		1,751	-	275400
16	99,8	101,2		1,782	-	364800
17	99,6	99,9		1,755	-	356300
18	99,7	99,0		1,745	-	355700
28	99,7	101,0		1,713	-	261600
29	99,8	98,3		1,679	-	250800
30	99,8	100,7		1,737	-	250600
31	99,7	100,7		1,726	-	245800



Tab. I. 61 Stütze Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt

Stütze Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	8	[mm]				
Art Zuschlag	rund	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	50	[mm]				
Bohrkernschlankheit	50/50	[mm]				
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]				
Lagerung	trocken	[-]				
Baujahr	unbekannt	[-]				
Prüfdatum	2018	[-]				
Alter	-	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Stütze						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
48,4						
50,3						
51,4						
51,6						
52,1						
54,6						
55,7						
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	7	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	2,47	[N/mm ²]	
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	52,0	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,05	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,95	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,01	[-]	
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,05	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	2,08	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	47,1	[N/mm ²]	

Tab. I. 62 Stütze Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt – Betondruckfestigkeit:
Einzelprüfwerte

Stütze Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
S1-o	51,8	50,3		0,238	-	117300
S1-u	51,8	48,8		0,231	-	109900
S2-o	51,8	50,0		0,233	-	108300
S2-u	51,8	49,7		0,235	-	108700
S3	51,8	49,0		0,230	-	102000
S4	51,8	48,2		0,228	-	115100
S5	51,8	47,3		0,219	-	106100


Tab. I. 63 Stützwand, Kusel

Stützwand, Kusel						
Betondruckfestigkeit			 			
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	16	[mm]				
Art Zuschlag	gebrochen	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]				
Lagerung	nass	[-]				
Baujahr	unbekannt	[-]				
Prüfdatum	2018	[-]				
Alter	-	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Wand						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
51,9	57,6	59,8	62,2			
54,6	57,9	60,1	62,3			
54,8	57,9	60,2	62,3			
54,9	58,0	60,4	63,6			
55,3	58,2	60,8	63,8			
55,3	58,2	61,0	64,3			
56,2	58,3	61,4	64,4			
56,2	59,5	61,7				
56,3	59,8	62,1				
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	34	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	3,17	[N/mm ²]	
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	59,2	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,05	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert μ_y ^{d)}	4,08	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,01	[-]	
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,05	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
k_n ^{g)}	1,72	[-]	$f_{ck, is}$ ^{h)}	53,8	[N/mm ²]	

Tab. I. 64 Stützwand, Kusel – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Stützwand, Kusel						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast F
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
A1-1	99,7	98,2	zuvor E-Modul	-	1,773	438700
A2	99,8	96,4	zuvor E-Modul	-	1,746	440800
A2-2	99,7	98,4	zuvor E-Modul	-	1,786	486700
A4-1	99,7	95,3	zuvor E-Modul	-	1,722	452700
A4-2	99,7	100,4	zuvor E-Modul	-	1,803	454100
A5	99,7	101,8		-	1,841	454400
A6	99,7	101,2		-	1,838	502900
B1	99,7	96,1	zuvor E-Modul	-	1,722	426000
B2-1	99,7	101,0		-	1,793	405500
B4	99,7	101,6		-	1,822	431700
B5	99,8	98,4		-	1,786	429400
B6-2	99,8	100,7	zuvor E-Modul	-	1,824	470600
B7-1	99,8	99,0	zuvor E-Modul	-	1,781	432200
B8-1	99,8	100,7		-	1,834	472700
B9	99,8	100,2		-	1,820	467700
B10	99,8	100,5		-	1,824	456200
C1-2	99,8	98,4		-	1,778	452600
C2	99,7	99,0		-	1,798	475000
C3-1	99,8	94,4	zuvor E-Modul	-	1,707	470200
C5-1	99,8	92,0	zuvor E-Modul	-	1,668	439800
C5-2	99,7	102,3	zuvor E-Modul	-	1,853	451700
C6-1	99,7	96,6	zuvor E-Modul	-	1,741	428200
C8	99,8	101,9		-	1,824	450200
C9	99,5	100,4		-	1,812	465000
D1	99,8	98,7		-	1,786	485600
D2	99,7	99,8		-	1,812	485700
D4-1	99,8	98,6	zuvor E-Modul	-	1,784	482400
D4-2	99,7	97,0	zuvor E-Modul	-	1,753	502000
D6	99,7	101,2		-	1,842	496200
D8	99,8	100,6		-	1,807	480300
D10	99,8	101,2		-	1,810	487500
D11	99,7	100,5		-	1,809	464200
D12	99,7	101,1		-	1,831	498200
D14	99,7	98,8	zuvor E-Modul	-	1,778	476500

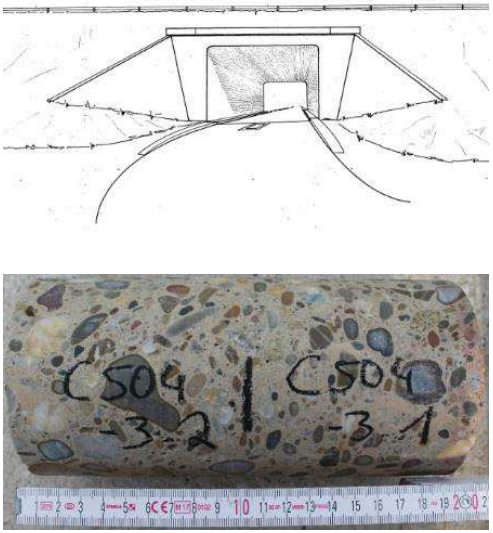
Tab. I. 65 Unterführung A6 Kirchhausen-Biberach (501 A-D), Heilbronn

Unterführung A6 Kirchhausen-Biberach (501 A-D), Heilbronn						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	B300	[-]				
Größtkorndurchmesser	32	[mm]				
Art Zuschlag	Rundkorn	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]				
Lagerung	trocken	[-]				
Baujahr	1965-67	[-]				
Prüfdatum	2018	[-]				
Alter	51	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Wand						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
24,6	35,3	41,5				
27,1	35,4	41,9				
29,2	35,5	42,0				
29,4	36,1	43,8				
31,4	36,2	44,6				
32,3	37,1	45,5				
33,2	38,8	46,4				
33,3	40,9					
34,7	41,4					
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	25	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	5,90	[N/mm ²]	
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	36,7	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,16	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert μ_y ^{d)}	3,59	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,05	[-]	
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,17	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
k_n ^{g)}	1,74	[-]	$f_{ck, is}$ ^{h)}	27,1	[N/mm ²]	

Tab. I. 66 Unterführung A6 Kirchhausen-Biberach (501 A-D), Heilbronn –
Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Unterführung A6 Kirchhausen-Biberach (501 A-D), Heilbronn						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
A1-2	99,7	100,2	zuvor E-Modul	1,761	-	323600
A2-2	99,8	94,2	zuvor E-Modul	1,639	-	290000
A3-1	99,7	97,3	zuvor E-Modul	1,694	-	245200
A4	99,7	104,3		1,818	-	271100
A5	99,7	97,7	Steinausbrüche an Stirnseite	1,692	-	323400
A6-1	99,5	98,9		1,735	-	360500
B1	99,6	102,0		1,775	-	326500
B2-1	99,7	97,9	zuvor E-Modul	1,679	-	252000
B3-1	99,6	97,6	zuvor E-Modul	1,693	-	192000
B4-1	99,4	98,5	Steinausbrüche an Stirnseite	1,698	-	226300
B5	99,7	102,1		1,782	-	259800
B6-2	99,8	100,7	zuvor E-Modul	1,745	-	212200
B7-1	99,6	101,9		1,794	-	341400
C1-1	99,6	94,1		1,654	-	347500
C2-1	99,7	95,8	zuvor E-Modul	1,664	-	276900
C3-2	99,7	97,7	zuvor E-Modul	1,725	-	355600
C4	99,5	106,9		1,872	-	281200
C5-2	99,4	102,9	zuvor E-Modul	1,809	-	279800
C6	99,8	105,0		1,854	-	303400
D1-2	99,6	100,8	zuvor E-Modul	1,762	-	327000
D2-2	99,7	102,2	zuvor E-Modul	1,798	-	258800
D3	99,7	102,5		1,809	-	275300
D4-1	99,7	96,3	zuvor E-Modul	1,697	-	229300
D5	99,7	103,7		1,828	-	276400
D6	99,6	104,1	zuvor E-Modul	1,827	-	319000

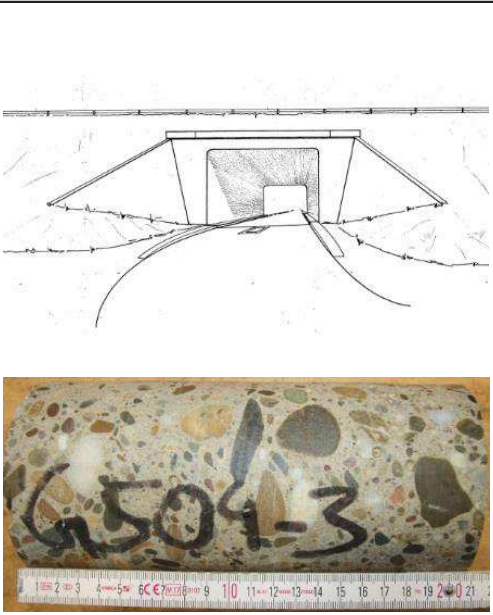
Tab. I. 67 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Heilbronn

Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Heilbronn						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	B300	[-]				
Größtkorndurchmesser	32	[mm]				
Art Zuschlag	rund	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]				
Lagerung	nass	[-]				
Baujahr	1965-67	[-]				
Prüfdatum	2018	[-]				
Alter	51	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Wand						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
19,9	33,4	39,1				
22,6	33,8	42,6				
25,1	34,4					
25,4	34,6					
26,3	35,2					
26,9	36,0					
27,1	37,3					
31,7	37,5					
32,3	37,9					
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	20	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	6,11	[N/mm ²]	
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	32,0	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,19	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert μ_y ^{d)}	3,45	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,06	[-]	
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,20	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
k_n ^{g)}	1,77	[-]	$f_{ck, is}$ ^{h)}	21,9	[N/mm ²]	

Tab. I. 68 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Heilbronn –
Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Heilbronn						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
A1-1	99,0	95,5		-	1,683	300900
A2-1	99,1	103,7		-	1,835	288900
A4-1	99,7	97,4	zuvor E-Modul	-	1,725	264000
A5-1	99,7	101,6	zuvor E-Modul	-	1,804	268300
A5-2	99,8	97,5	zuvor E-Modul	-	1,715	198600
B1-1	99,6	99,5	zuvor E-Modul	-	1,704	176200
B2-1	99,7	97,3	zuvor E-Modul	-	1,686	155200
B2-2	99,8	96,0	zuvor E-Modul	-	1,661	196600
B4-1	99,2	104,6		-	1,864	329500
B6-1	99,2	106,7		-	1,868	209500
C1-1	99,8	98,1	zuvor E-Modul	-	1,732	270900
C2-1	99,2	105,6		-	1,871	202900
C3-1	99,5	98,1	zuvor E-Modul	-	1,742	209400
C5-1	99,1	107,1		-	1,917	249400
D1-1	99,3	101,1		-	1,782	278700
D1-2	99,2	101,6		-	1,777	258100
D3-1	99,7	100,3	zuvor E-Modul	-	1,782	247300
D3-2	99,6	97,7	zuvor E-Modul	-	1,728	295600
D4-1	99,8	98,7	zuvor E-Modul	-	1,735	275200
D5-2	99,9	99,7	zuvor E-Modul	-	1,782	292700

Tab. I. 69 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), Heilbronn

Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), Heilbronn						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	B300	[-]				
Größtkorndurchmesser	32	[mm]				
Art Zuschlag	rund	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]				
Lagerung	nass	[-]				
Baujahr	1965-67	[-]				
Prüfdatum	2018	[-]				
Alter	51	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Wand						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
34,0	38,5	40,7				
35,9	38,6	40,9				
36,8	38,7	43,1				
37,0	38,7	43,4				
37,3	38,8	43,6				
37,5	39,7	44,2				
38,0	40,1	45,2				
38,0	40,5					
38,3	40,6					
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	25	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	2,74	[N/mm ²]	
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	39,5	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,07	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert μ_y ^{d)}	3,67	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,02	[-]	
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,07	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
k_n ^{g)}	1,74	[-]	$f_{ck, is}$ ^{h)}	35,0	[N/mm ²]	

Tab. I. 70 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), Heilbronn –
Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), Heilbronn						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
E1-1	99,8	98,0	zuvor E-Modul	-	1,768	313700
E3	99,6	101,2		-	2,003	296100
E4	99,8	111,3		-	2,067	319800
E5-2	99,5	99,1	zuvor E-Modul	-	1,808	287700
E6-1	99,7	99,5	zuvor E-Modul	-	1,777	300700
E6-2	99,7	96,1	zuvor E-Modul	-	1,705	302800
F1-2	99,7	99,9		-	1,780	316900
F2-1	99,8	109,2		-	1,959	292000
F3-1	99,8	109,8		-	1,812	317100
F4-2	99,4	97,5	zuvor E-Modul	-	1,745	338000
F5-1	99,2	96,9	zuvor E-Modul	-	1,721	314300
F6-1	99,3	102,1	zuvor E-Modul	-	1,811	350300
G1	99,2	103,1		-	1,838	298500
G2-1	99,2	103,1	zuvor E-Modul	-	1,812	299300
G3-2	99,4	100,2	zuvor E-Modul	-	1,778	308000
G4-1	99,3	100,5	zuvor E-Modul	-	1,780	263600
G4-2	99,2	101,1	zuvor E-Modul	-	1,778	284300
G5-1	99,1	100,1		-	1,779	335100
G6	99,2	102,2		-	1,822	293600
H1	99,2	111,2		-	2,007	277400
H2	99,2	112,5		-	2,009	299000
H3-1	99,2	95,7	zuvor E-Modul	-	1,690	333400
H4	99,2	101,9		-	1,818	296100
H5	99,2	109,2		-	1,954	289900
H6-2	99,2	92,4	zuvor E-Modul	-	1,624	341600

Tab. I. 71 Bauwerk 2

Bauwerk 2 BORAPA 2018						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-					[-]
Größtkorndurchmesser	-					[mm]
Art Zuschlag	-					[-]
Karbonatisierung	-					[-]
Bohrkerndurchmesser	100					[mm]
Bohrkernschlankheit	100/100					[mm]
Entnahmerichtung	-					[-]
Lagerung	-					[-]
Baujahr	unbekannt					[-]
Prüfdatum	2015					[-]
Alter	-					[Jahre]
Untersuchte Bauteilart unbekannt						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
28,3	48,9					
39,3	62,3					
41,6	67,4					
41,8	77,0					
42,7						
43,4						
43,7						
44,6						
46,3						
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	13			Standardabweichung $s_x^{a)}$	13,1	[N/mm ²]
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	48,3			Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,27	[-]
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,85			Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,07	[-]
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,26					
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,85			$f_{ck, is}^{h)}$	29,1	[N/mm ²]

Tab. I. 72 Bauwerk 2 – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Bauwerk 2 BORAPA 2018						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
BK1	99,8	100,2		-	-	327300
BK2	99,4	100,3		-	-	346300
BK3	95,1	95,0		-	-	303100
BK4	95,3	94,8		-	-	312000
BK8	99,3	100,0		-	-	304100
BK10	99,1	99,0		-	-	320800
BK11	99,1	86,6		-	-	480600
BK12	99,6	100,0		-	-	220700
BK13	95,0	95,2		-	-	346600
BK14	95,0	95,2		-	-	328400
BK15	95,0	95,3		-	-	307900
BK16	95,1	95,4		-	-	478600
BK17	95,2	95,4		-	-	548400

Tab. I. 73 Bauwerk 3

Bauwerk 3 BORAPA 2018						
Betondruckfestigkeit			-			
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	-	[mm]				
Art Zuschlag	-	[-]				
Karbonatisierung	-	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	-	[-]				
Lagerung	-	[-]				
Baujahr	unbekannt	[-]				
Prüfdatum	2009	[-]				
Alter	-	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart unbekannt						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
40,1	57,7					
42,7	58,3					
44,4	60,4					
47,6	60,9					
48,6	65,2					
49,8						
52,2						
54,1						
57,6						
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	14	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	7,58	[N/mm ²]	
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	52,8	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,14	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,96	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,04	[-]	
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,15	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,83	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	40,0	[N/mm ²]	

Tab. I. 74 Bauwerk 3 – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Bauwerk 3 BORAPA 2018						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
2/1	93,0	95,0		-	-	272200
4/1	94,0	94,0		-	-	400100
6/1	94,0	95,0		-	-	296300
8/1	94,0	96,0		-	-	362200
10/1	94,0	95,0		-	-	330000
12/1	94,0	96,0		-	-	404900
13/1	94,0	95,0		-	-	452700
16/1	94,0	95,0		-	-	419300
17/1	94,0	95,0		-	-	399900
20/1	94,0	95,0		-	-	307800
22/1	94,0	95,0		-	-	337400
23/1	94,0	95,0		-	-	375200
26/1	94,0	95,0		-	-	345900
27/1	93,0	95,0		-	-	413700

Tab. I. 75 Bauwerk 4

Bauwerk 4 BORAPA 2018						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	-	[mm]				
Art Zuschlag	-	[-]				
Karbonatisierung	-	[-]				
Bohrkerndurchmesser	150	[mm]				
Bohrkernschlankheit	150/300	[mm]				
Entnahmerichtung	-	[-]				
Lagerung	-	[-]				
Baujahr	2004	[-]				
Prüfdatum	2004	[-]				
Alter	60 - 63	[Tage]				
Untersuchte Bauteilart unbekannt						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
37,3	43,3	45,2	48,3	52,5		
39,6	43,8	45,2	49,3	52,8		
40,7	44,2	46,5	49,8	52,9		
41,3	44,2	46,7	50,5	52,9		
41,7	44,3	47,4	51,4	54,1		
41,9	44,5	47,7	51,6	54,3		
42,5	44,9	47,9	51,9	56,9		
42,7	44,9	48,1	52,4	57,1		
42,9	45,0	48,2	52,5			
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	44	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	4,80	[N/mm ²]	
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	47,4	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,10	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,85	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,03	[-]	
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,10	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,70	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	39,7	[N/mm ²]	

Tab. I. 76 Bauwerk 4 – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Bauwerk 4 BORAPA 2018						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
1	150,0	335,0		-	-	-
2	150,0	330,0		-	-	-
3	150,0	345,0		-	-	-
4	150,0	340,0		-	-	-
5	150,0	325,0		-	-	-
6	150,0	345,0		-	-	-
7	150,0	335,0		-	-	-
8	150,0	340,0		-	-	-
9	150,0	330,0		-	-	-
10	150,0	330,0		-	-	-
11	150,0	330,0		-	-	-
12	150,0	335,0		-	-	-
13	150,0	315,0		-	-	-
14	150,0	355,0		-	-	-
15	150,0	325,0		-	-	-
16	150,0	335,0		-	-	-
17	150,0	335,0		-	-	-
18	150,0	335,0		-	-	-
19	150,0	325,0		-	-	-
20	150,0	325,0		-	-	-
21	150,0	320,0		-	-	-
22	150,0	320,0		-	-	-
23	150,0	335,0		-	-	-
24	150,0	325,0		-	-	-
25	150,0	335,0		-	-	-
26	150,0	320,0		-	-	-
27	150,0	350,0		-	-	-
28	150,0	320,0		-	-	-
29	150,0	330,0		-	-	-
30	150,0	335,0		-	-	-
31	150,0	320,0		-	-	-
32	150,0	330,0		-	-	-
33	150,0	325,0		-	-	-
34	150,0	320,0		-	-	-
35	150,0	335,0		-	-	-

Anhang I: Datenbank Bauwerksuntersuchungen zur Betondruckfestigkeit

36	150,0	315,0		-	-	-
37	150,0	325,0		-	-	-
38	150,0	355,0		-	-	-
39	150,0	320,0		-	-	-
40	150,0	320,0		-	-	-
41	150,0	330,0		-	-	-
42	150,0	345,0		-	-	-
43	150,0	320,0		-	-	-
44	150,0	335,0		-	-	-

Tab. I. 77 Kühlturm, DBV

Kühlturm, DBV $f_{c(12)}$ DBV 2015						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-					[-]
Größtkorndurchmesser	-					[mm]
Art Zuschlag	-					[-]
Karbonatisierung	-					[-]
Bohrkerndurchmesser	-					[mm]
Bohrkernschlankheit	-					[mm]
Entnahmerichtung	-					[-]
Lagerung	-					[-]
Baujahr	unbekannt					[-]
Prüfdatum	-					[-]
Alter	-					[Jahre]
Untersuchte Bauteilart unbekannt						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
78,0	101,5					
78,5						
80,0						
81,0						
85,0						
85,5						
85,5						
88,5						
97,0						
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	10	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	7,82	[N/mm ²]	
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	86,1	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,09	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	4,45	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,02	[-]	
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,09	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,92	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	72,4	[N/mm ²]	

Tab. I. 78 Kühlturm, DBV – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Kühlturm, DBV $f_{ci}(12)$ DBV 2015						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]

Einzelprüfwerte liegen nicht vor.

Tab. I. 79 Brücke, DBV

Brücke, DBV $f_{c(28)}$ DBV 2015						
Betondruckfestigkeit			-			
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	-	[mm]				
Art Zuschlag	-	[-]				
Karbonatisierung	-	[-]				
Bohrkerndurchmesser	-	[mm]				
Bohrkernschlankheit	-	[mm]				
Entnahmerichtung	-	[-]				
Lagerung	-	[-]				
Baujahr	unbekannt	[-]				
Prüfdatum	-	[-]				
Alter	-	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Brücke						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
38,0	73,1					
41,5						
49,5						
52,6						
56,8						
57,2						
58,5						
63,3						
64,4						
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	10	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	10,6	[N/mm ²]	
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	55,5	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,19	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	4,00	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,05	[-]	
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,20	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,92	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	37,1	[N/mm ²]	

Tab. I. 80 Brücke, DBV – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Brücke, DBV $f_{ci}(28)$ DBV 2015						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]

Einzelprüfwerte liegen nicht vor.

Tab. I. 81 Kühlturmschale, DBV

Kühlturmschale, DBV $f_{c(55-1)}$ DBV 2015						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-					[-]
Größtkorndurchmesser	-					[mm]
Art Zuschlag	-					[-]
Karbonatisierung	-					[-]
Bohrkerndurchmesser	-					[mm]
Bohrkernschlankheit	-					[mm]
Entnahmerichtung	-					[-]
Lagerung	-					[-]
Baujahr	unbekannt					[-]
Prüfdatum	-					[-]
Alter	-					[Jahre]
Untersuchte Bauteilart: Schalentragerwerk						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
42,0	61,4					
46,4						
50,3						
50,9						
51,3						
52,6						
53,7						
56,4						
59,4						
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	10			Standardabweichung $s_x^{a)}$	5,77	[N/mm ²]
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	52,4			Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,11	[-]
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,95			Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,03	[-]
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,11					
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,92			$f_{ck, is}^{h)}$	42,0	[N/mm ²]

Tab. I. 82 Kühlturmschale, DBV – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Kühlturmschale, DBV $f_{ci}(55-1)$ DBV 2015						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]

Einzelprüfwerte liegen nicht vor.

Tab. I. 83 Flachdecke, DBV

Flachdecke, DBV $f_{c(70)}$ DBV 2015						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	-	[mm]				
Art Zuschlag	-	[-]				
Karbonatisierung	-	[-]				
Bohrkerndurchmesser	-	[mm]				
Bohrkernschlankheit	-	[mm]				
Entnahmerichtung	-	[-]				
Lagerung	-	[-]				
Baujahr	unbekannt	[-]				
Prüfdatum	-	[-]				
Alter	-	[Jahre]				
Untersuchte Bauteilart: Platte						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
17,8	34,8					
18,9						
22,1						
23,3						
23,7						
24,4						
25,3						
30,7						
32,6						
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	10	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	5,65	[N/mm ²]	
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	25,4	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,22	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,21	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,07	[-]	
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,22	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,92	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	16,2	[N/mm ²]	

Tab. I. 84 Flachdecke, DBV – Betondruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Flachdecke, DBV $f_c(70)$ DBV 2015						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]

Einzelprüfwerte liegen nicht vor.

Anhang I.2 Schätzung der empirischen Dichtefunktion

Zur Beschreibung der Verteilung der in Anhang I.1 genannten Datensätze ist in Abb. I. 6 bis Abb. I. 47 die jeweilige Verteilungsdichte dargestellt. Für die auf den Daten der Stichproben basierenden empirischen Dichtefunktionen wurde ein Kerndichteschätzer nach Kapitel 2.2.4.3 verwendet.

Zur Auswahl der Kernfunktion wurden für die fünf erstgenannten Datensätze aus Anhang I.1 die Kerndichteschätzer für alle vier genannten Kernfunktionen bestimmt (vgl. Abb. I. 1 bis Abb. I. 5). Die Berechnung erfolgte hierbei mit der Software RStudio, Version 1.1.456 Horton u. Kleinman 2015. Zusätzlich ist für jeden der Kerndichteschätzer in Tab. I. 85 bis Tab. I. 89 der 5 %-Quantilwert angegeben.

Der optische Vergleich der verschiedenen Kernfunktionen zeigt, dass sich die geschätzten Dichtefunktionen für den Gauß-Kern, den Epanechnikov-Kern und den Dreieckskern kaum unterscheiden. Lediglich die mit dem Rechteckskern geschätzten Dichtefunktionen unterscheiden sich durch einen sprunghaften Verlauf von den vorgenannten. Die bestimmten 5 %-Quantilwerte unterscheiden sich um nicht mehr als 1 N/mm². Die Abweichung kann somit als vernachlässigbar eingestuft werden. Für die in Abb. I. 6 bis Abb. I. 47 dargestellten Kerndichteschätzer wurde ein Gauß-Kern nach Gleichung (2.24) verwendet. Eine Berechnung mit den sonstigen, zuvor genannten Kernfunktionen, würde bei dem vorliegenden Stichprobenumfang zu vergleichbaren Ergebnissen führen.

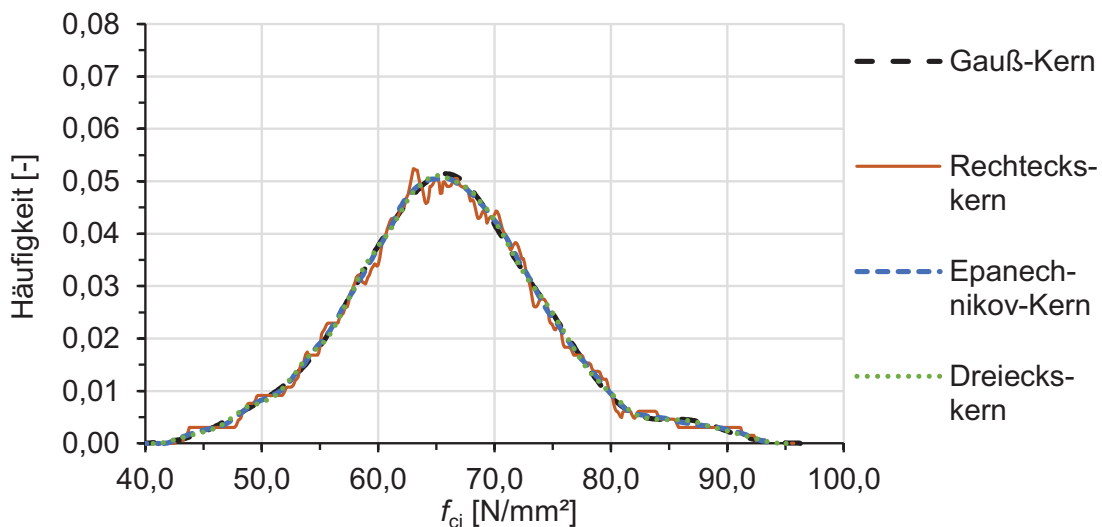


Abb. I. 1 Tropfkörper Kläranlage Blümeltal, Pirmasens – Vergleich Kernfunktionen

Tab. I. 85 Tropfkörper Kläranlage Blümeltal, Pirmasens – Vergleich Kernfunktionen und Quantilwerte

Tropfkörper Kläranlage Blümeltal, Pirmasens Thiele u. Weber 2016			
5 %-Quantile [N/mm ²]			
Gauß-Kern	Rechteckskern	Epanechnikov-Kern	Dreieckskern
52,1	52,2	52,2	52,2

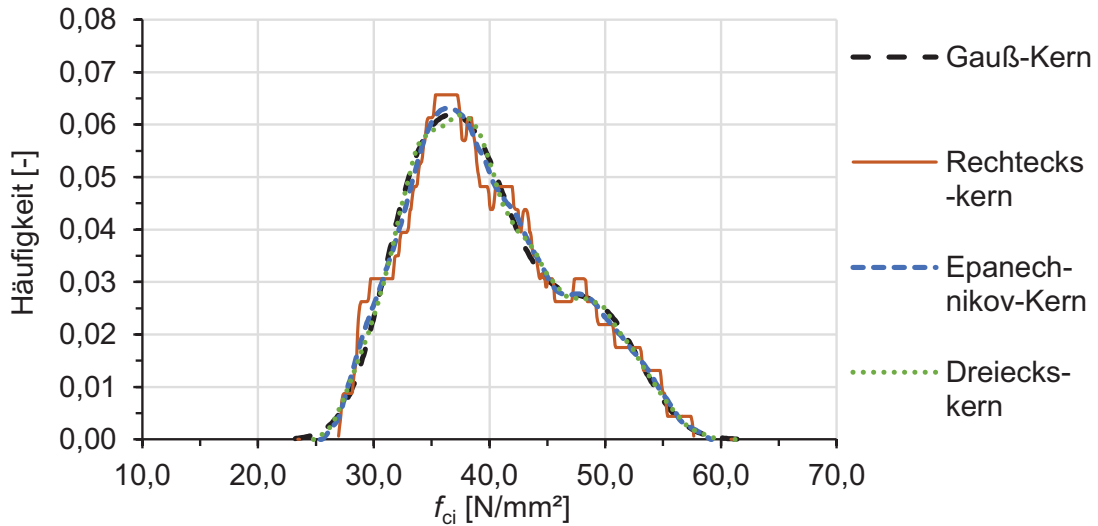


Abb. I. 2 Unterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern – Vergleich Kernfunktionen

Tab. I. 86 Unterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern – Vergleich Kernfunktionen und Quantilwerte

Autobahnunterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern <i>Thiele u. Weber 2016</i>			
5 %-Quantile [N/mm ²]			
Gauß-Kern	Rechteckskern	Epanechnikov-Kern	Dreieckskern
30,3	29,9	30,0	30,1

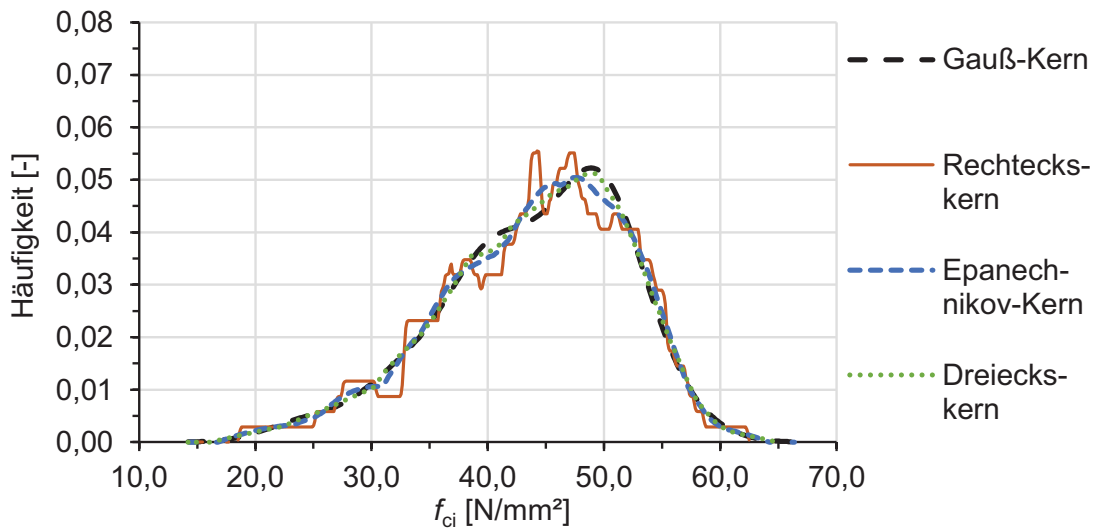


Abb. I. 3 Unterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern – Vergleich Kernfunktionen

Tab. I. 87 Unterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern – Vergleich Kernfunktionen und Quantilwerte

Autobahnunterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern <i>Thiele u. Weber 2016</i>			
5 %-Quantile [N/mm ²]			
Gauß-Kern	Rechteckskern	Epanechnikov-Kern	Dreieckskern
29,1	28,8	28,9	29,0

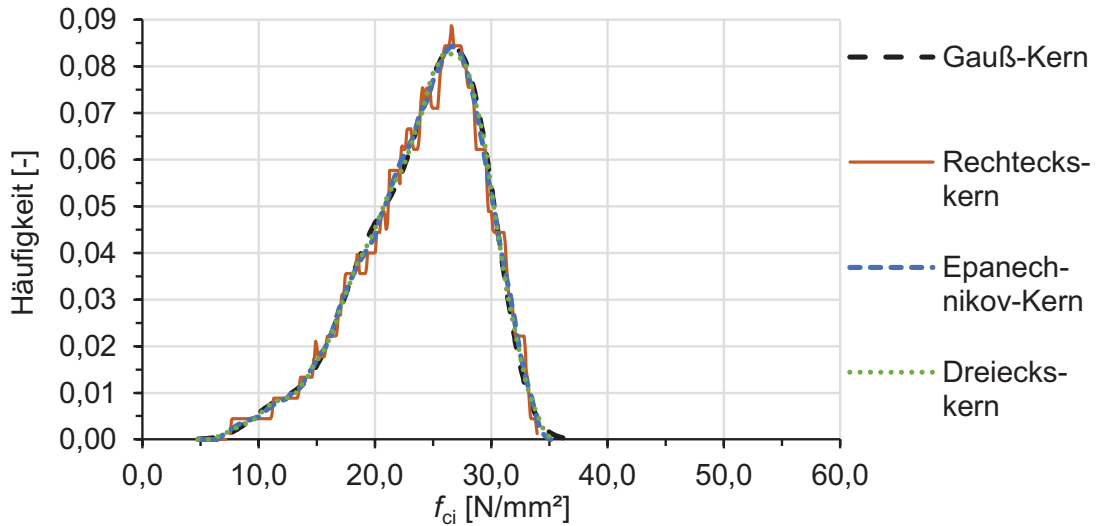


Abb. I. 4 Umspannwerk, Sulzbach – Vergleich Kernfunktionen

Tab. I. 88 Umspannwerk, Sulzbach – Vergleich Kernfunktionen und Quantilwerte

Umspannwerk, Sulzbach <i>Thiele u. Weber 2016</i>			
5 %-Quantile [N/mm ²]			
Gauß-Kern	Rechteckskern	Epanechnikov-Kern	Dreieckskern
14,4	14,5	14,4	14,4

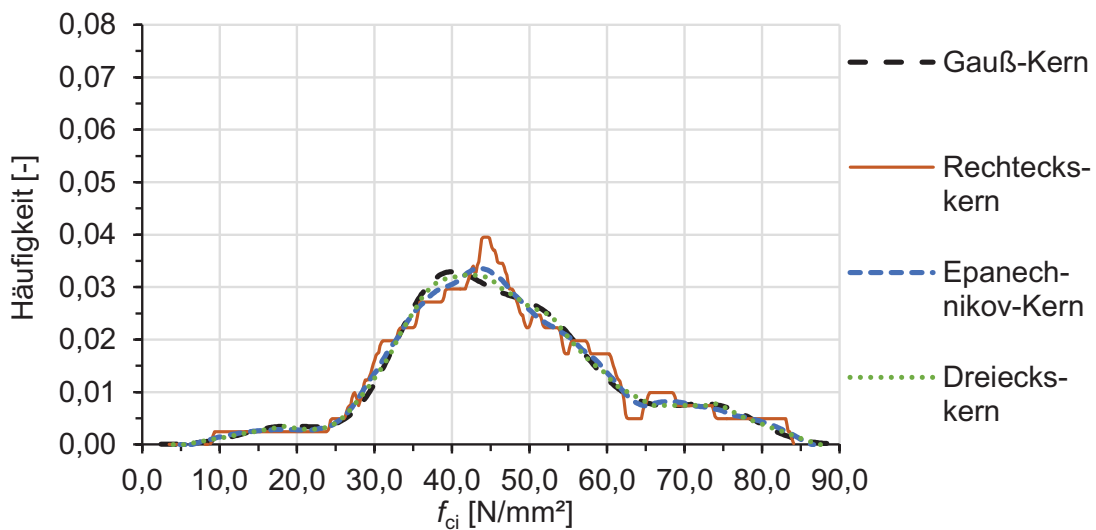


Abb. I. 5 Hochwasserschutzwand, Dormagen – Vergleich Kernfunktionen

Tab. I. 89 Hochwasserschutzwand, Dormagen – Vergleich Kernfunktionen und Quantilwerte

Hochwasserschutzwand, Dormagen <i>DAfStb 619</i>			
5 %-Quantile [N/mm ²]			
Gauß-Kern	Rechteckskern	Epanechnikov-Kern	Dreieckskern
25,9	26,7	26,5	26,3

Über die durch einen Kerndichteschätzer mit Gauß-Kern beschriebene empirische Verteilungsfunktion hinaus sind in Abb. I. 6 bis Abb. I. 47 zusätzlich die mit den aus der Stichprobe ermittelten Parametern bestimmte Normalverteilung und logarithmische Normalverteilung dargestellt.

Zusätzlich wurde nach Gleichung (2.11) für jede Stichprobe die empirische Schiefe berechnet sowie der Shapiro-Wilk-Test durchgeführt. Die Ergebnisse sind Tab. I. 90 bis Tab. I. 131 zu entnehmen.

Der Shapiro-Wilk-Test dient zur Überprüfung, ob es sich bei der zu der Stichprobe gehörenden Grundgesamtheit um eine Normalverteilung handelt. Dazu wird die als Nullhypothese bezeichnete Annahme aufgestellt, dass eine normalverteilte Grundgesamtheit vorliegt. Ist der an der Stichprobe ermittelte p -Wert größer als das festzulegende Signifikanzniveau α , so kann die Nullhypothese nicht abgelehnt werden, d. h. es kann angenommen werden, dass eine Normalverteilung vorliegt. Für p -Werte kleiner als das definierte Signifikanzniveau α wird die Nullhypothese hingegen verworfen, d. h. es wird angenommen, dass keine Normalverteilung vorliegt. Allgemein beschreibt der p -Wert, welcher Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann, die Auftretenswahrscheinlichkeit der betrachteten Stichprobe bei angenommener normalverteilter Grundgesamtheit. Je kleiner der p -Wert, desto kleiner ist die Wahrscheinlichkeit, dass die zu der betrachteten Stichprobe gehörende Grundgesamtheit normalverteilt ist. Der Shapiro-Wilk-Test wurde mit der Software RStudio, Version 1.1.456 Horton u. Kleinman 2015 unter Verwendung des Befehls „shapiro.test“ durchgeführt.

Weiterhin sind in Tab. I. 90 bis Tab. I. 131 auch die 5 %-Quantile von Kerndichteschätzer, Normalverteilung und logarithmischer Normalverteilung dargestellt. Der 5 %-Quantilwert des Kerndichteschätzers wurde mit der Software RStudio, Version 1.1.456 Horton u. Kleinman 2015 unter Verwendung des Befehls „quantile“ berechnet. Für die Normal- und logarithmische Normalverteilung wurde der 5 %-Quantilwert nach DIN EN 1990:2010-12 (vgl. Kapitel 3.7.3) berechnet.

Legende Tab. I. 90 bis Tab. I. 131:

- a) empirische Schiefe nach Gleichung (2.11)
- b) p -Wert berechnet mit der Software RStudio, Version 1.1.456 Horton u. Kleinman 2015 unter Verwendung des Befehls „quantile“
- c) 5 %-Quantilwert des Kerndichteschätzers mit Gauß-Kern; berechnet mit der Software RStudio, Version 1.1.456 Horton u. Kleinman 2015 unter Verwendung des Befehls „quantile“
- d) 5 %-Quantilwert der Normalverteilung nach Gleichung (3.10)
- e) 5 %-Quantilwert der logarithmischen Normalverteilung nach Gleichung (3.11)

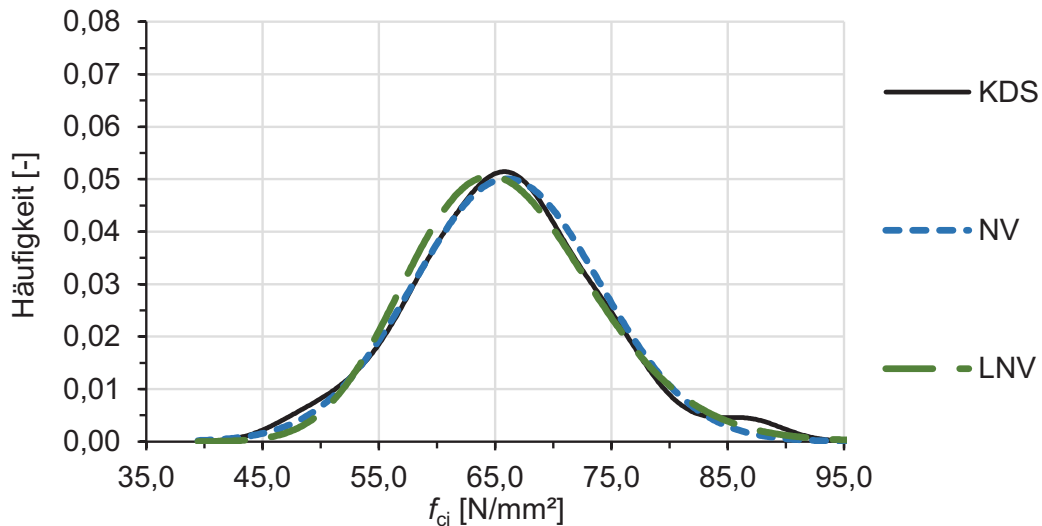


Abb. I. 6 Tropfkörper Kläranlage Blüemeltal, Pirmasens – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 90 Tropfkörper Kläranlage Blüemeltal, Pirmasens – Dichtefunktion und Quantilwerte

Tropfkörper Kläranlage Blüemeltal, Pirmasens Thiele u. Weber 2016				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,245	0,785	52,1	52,6	53,4

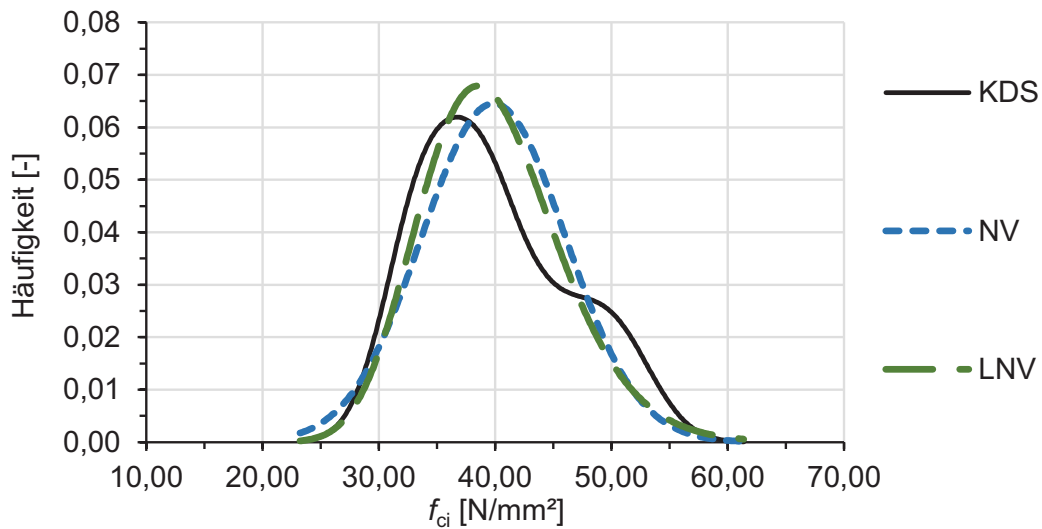


Abb. I. 7 Unterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 91 Unterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern – Dichtefunktion und Quantilwerte

Autobahnunterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern Thiele u. Weber 2016				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,643	0,07	30,3	29,0	30,2

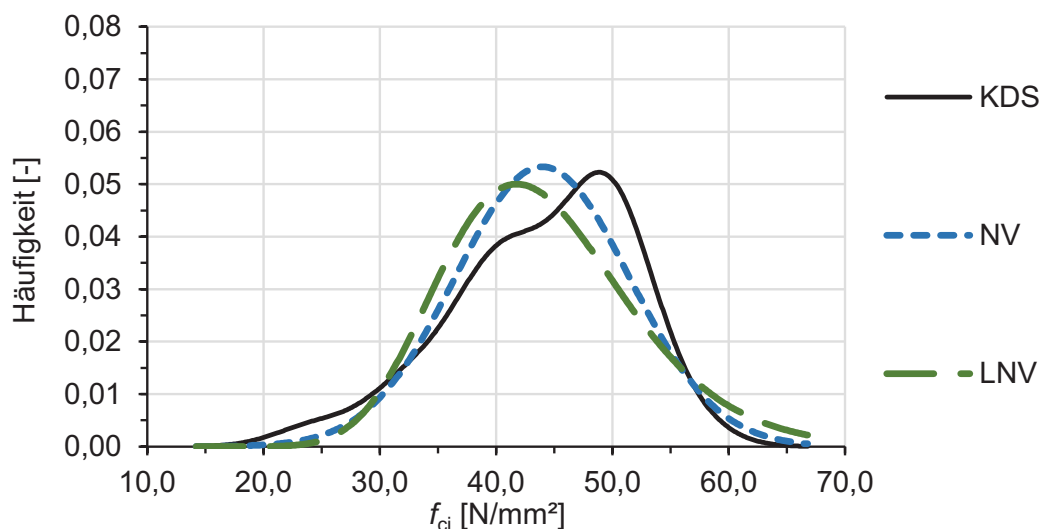


Abb. I. 8 Unterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 92 Unterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern – Dichtefunktion und Quantilwerte

Autobahnunterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern Thiele u. Weber 2016				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-0,724	0,151	29,1	31,0	31,3

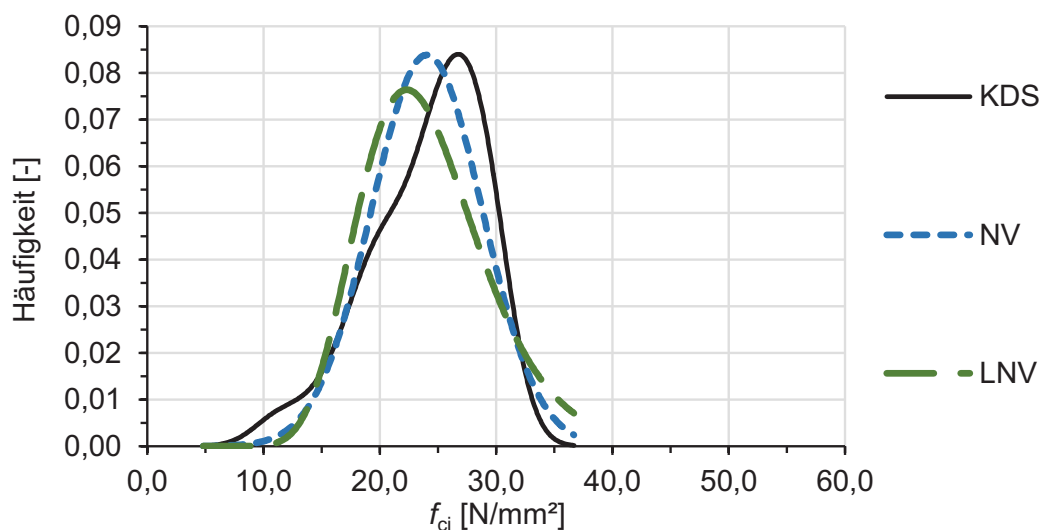


Abb. I. 9 Umspannwerk, Sulzbach – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 93 Umspannwerk, Sulzbach – Dichtefunktion und Quantilwerte

Umspannwerk, Sulzbach Thiele u. Weber 2016				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-0,881	0,055	14,4	15,8	15,8

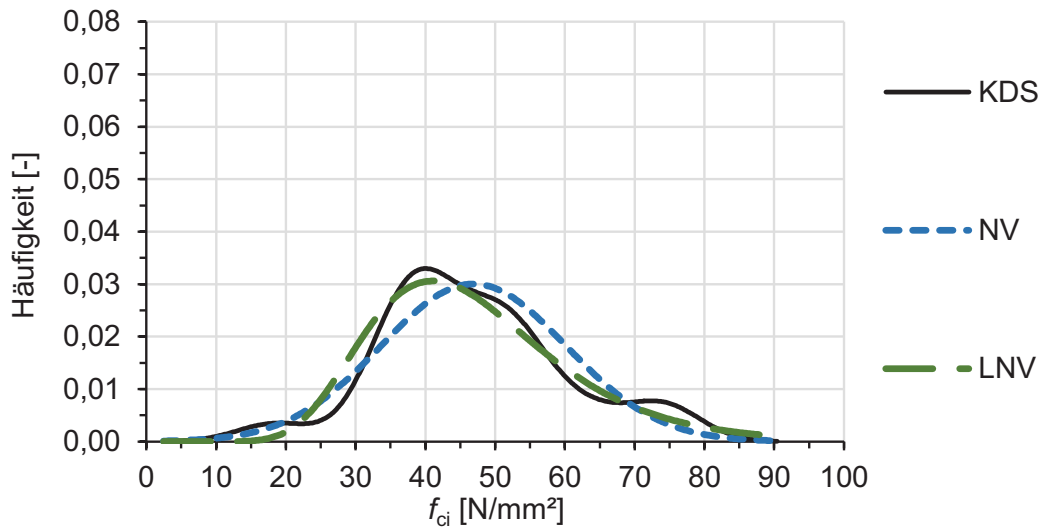


Abb. I. 10 Hochwasserschutzwand, Dormagen – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 94 Hochwasserschutzwand, Dormagen – Dichtefunktion und Quantilwerte

Hochwasserschutzwand, Dormagen DAfStb 619				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,401	0,314	25,9	23,5	26,4

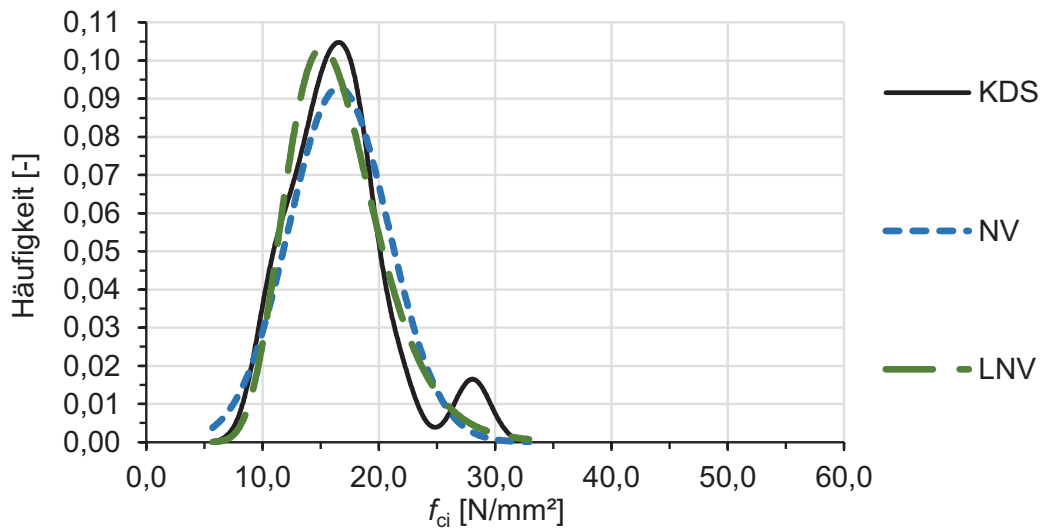


Abb. I. 11 Schwergewichtswand, Dormagen – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 95 Schwergewichtswand, Dormagen – Dichtefunktion und Quantilwerte

Schwergewichtswand, Dormagen DAfStb 619				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
1,052	0,022	10,1	9,1	10,5

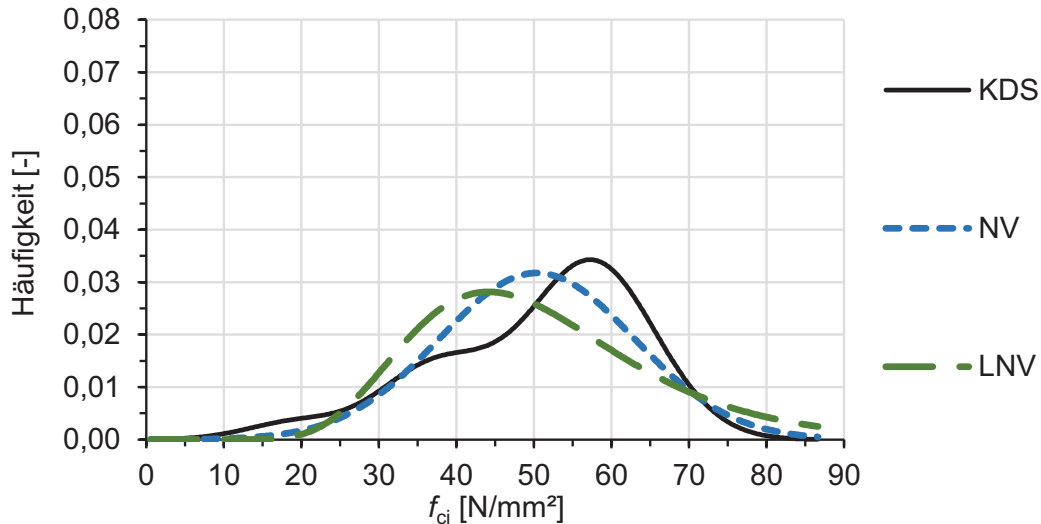


Abb. I. 12 Bodenplatte ACO, Kaiserslautern – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 96 Bodenplatte ACO, Kaiserslautern – Dichtefunktion und Quantilwerte

Bodenplatte ACO, Kaiserslautern Thiele u. Weber 2016				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-0,951	0,103	24,4	28,0	28,1

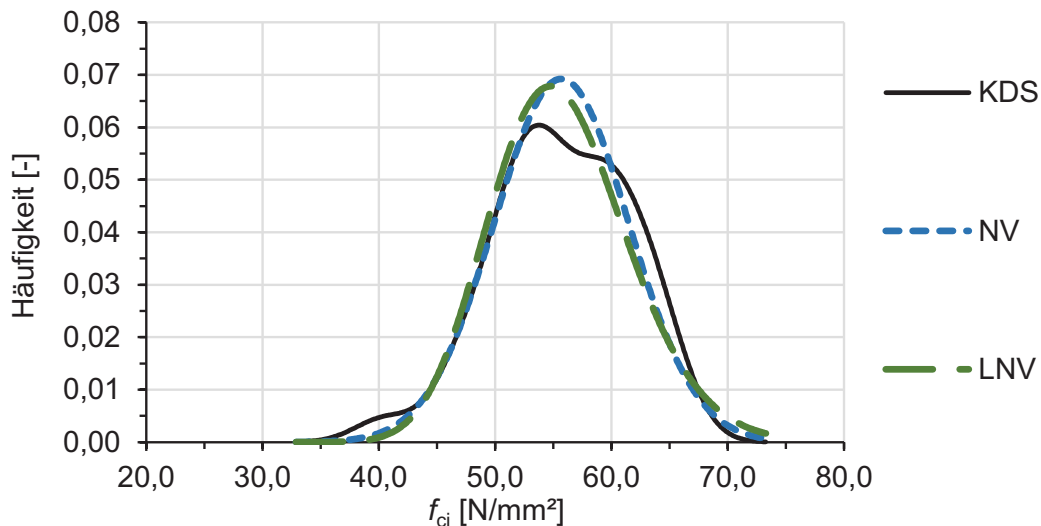


Abb. I. 13 Stützwand Ohmbach Abschnitt I, Pirmasens – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 97 Stützwand Ohmbach Abschnitt I, Pirmasens – Dichtefunktion und Quantilwerte

Stützwand Ohmbach Abschnitt I, Pirmasens Thiele u. Weber 2016				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-0,378	0,502	45,3	45,8	46,1

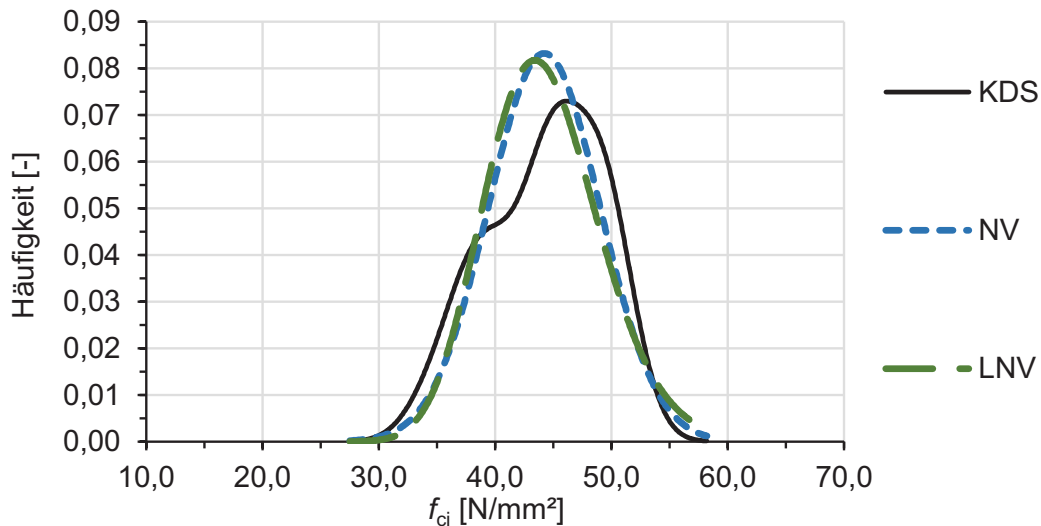


Abb. I. 14 Stützwand Ohmbach Abschnitt II, Pirmasens – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 98 Stützwand Ohmbach Abschnitt II, Pirmasens – Dichtefunktion und Quantilwerte

Stützwand Ohmbach Abschnitt II, Pirmasens <i>Thiele u. Weber 2016</i>				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-0,409	0,253	35,2	35,9	36,2

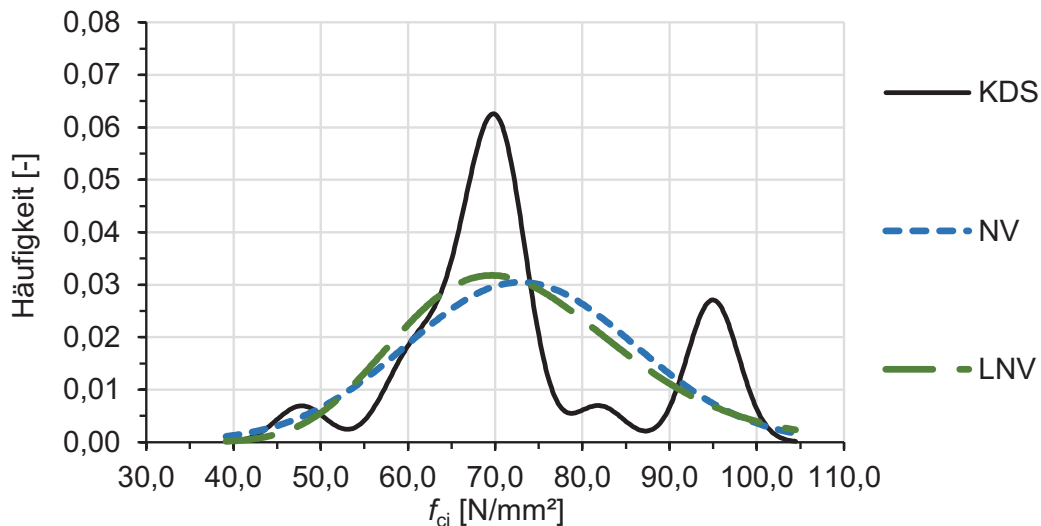


Abb. I. 15 Weserbrücke, Hannoversch Münden – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 99 Weserbrücke, Hannoversch Münden – Dichtefunktion und Quantilwerte

Weserbrücke, Hannoversch Münden <i>Thiele u. Weber 2016</i>				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,560	0,018	53,2	49,7	52,5

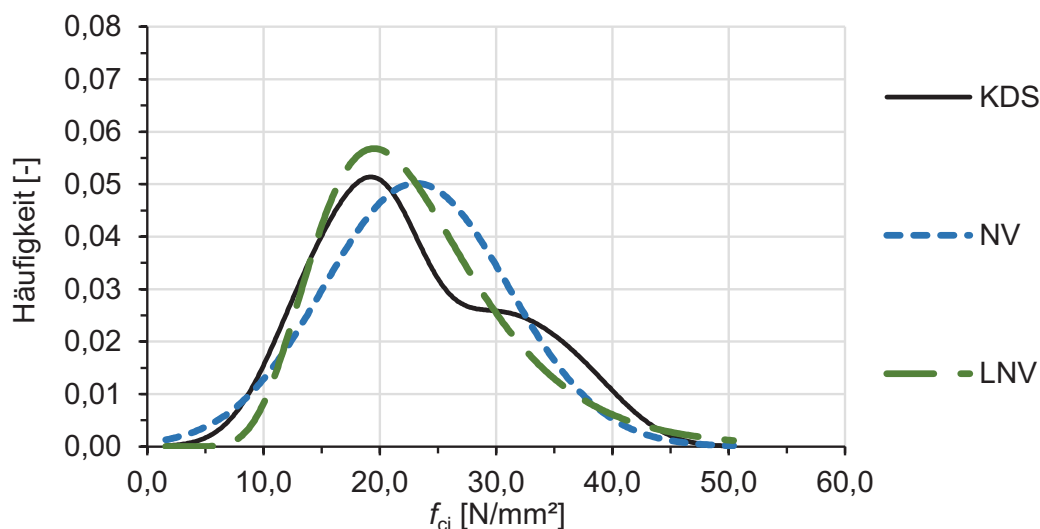


Abb. I. 16 Lautertalbrücke Pfeiler B, Kaiserslautern – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 100 Lautertalbrücke Pfeiler B, Kaiserslautern – Dichtefunktion und Quantilwerte

Lautertalbrücke Pfeiler B, Kaiserslautern Thiele u. Weber 2016				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,612	0,106	10,7	8,8	11,9

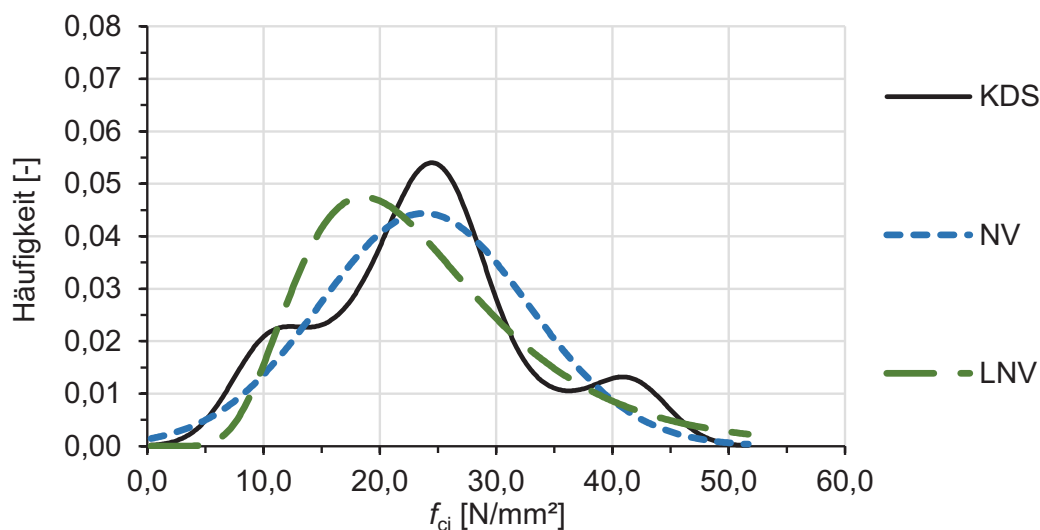


Abb. I. 17 Lautertalbrücke Pfeiler C, Kaiserslautern – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 101 Lautertalbrücke Pfeiler C, Kaiserslautern – Dichtefunktion und Quantilwerte

Lautertalbrücke Pfeiler C, Kaiserslautern Thiele u. Weber 2016				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,356	0,385	8,8	7,9	10,6

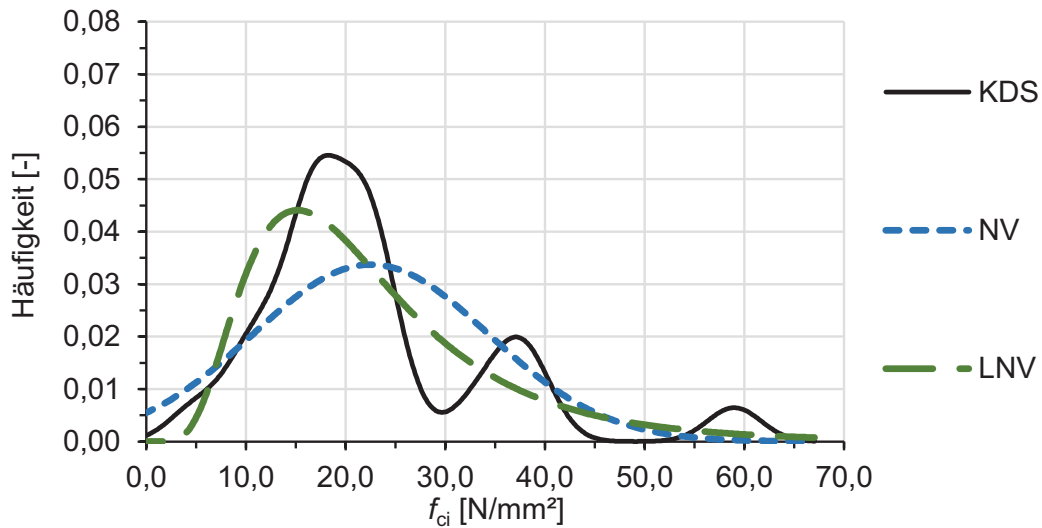


Abb. I. 18 Lautertalbrücke Pfeiler D, Kaiserslautern – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 102 Lautertalbrücke Pfeiler D, Kaiserslautern – Dichtefunktion und Quantilwerte

Lautertalbrücke Pfeiler D, Kaiserslautern Thiele u. Weber 2016				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
1,472	0,007	7,5	1,8	8,0

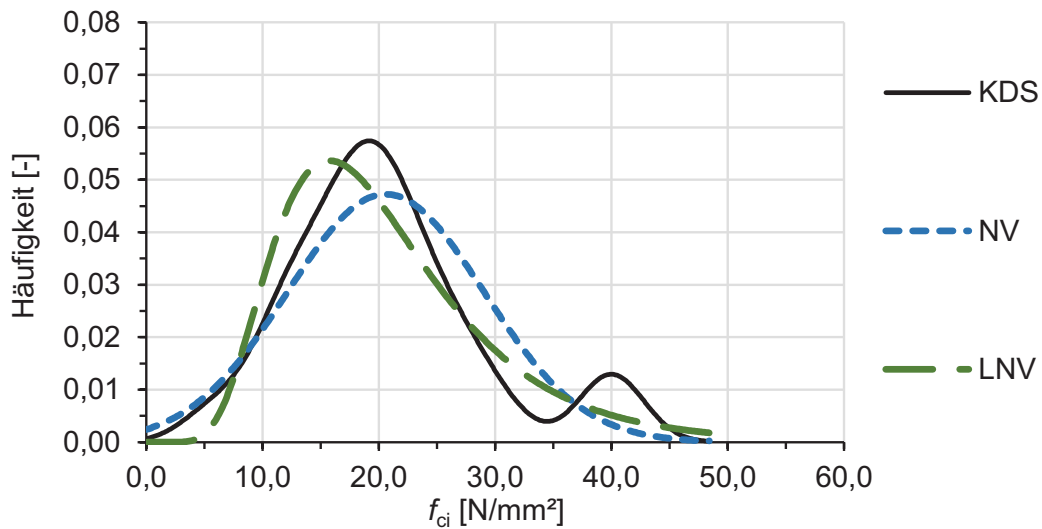


Abb. I. 19 Lautertalbrücke Pfeiler E, Kaiserslautern – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 103 Lautertalbrücke Pfeiler E, Kaiserslautern – Dichtefunktion und Quantilwerte

Lautertalbrücke Pfeiler E, Kaiserslautern Thiele u. Weber 2016				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,880	0,141	8,1	5,7	8,9

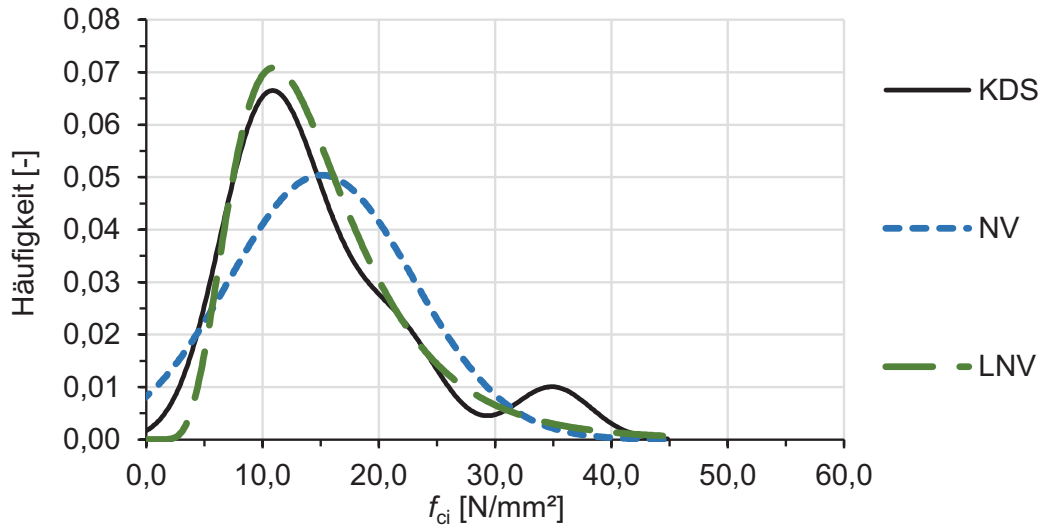


Abb. I. 20 Gewölbebogen, Zwickau – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 104 Gewölbebogen, Zwickau – Dichtefunktion und Quantilwerte

Gewölbebogen, Zwickau				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
1,597	0,033	4,9	0,3	5,7

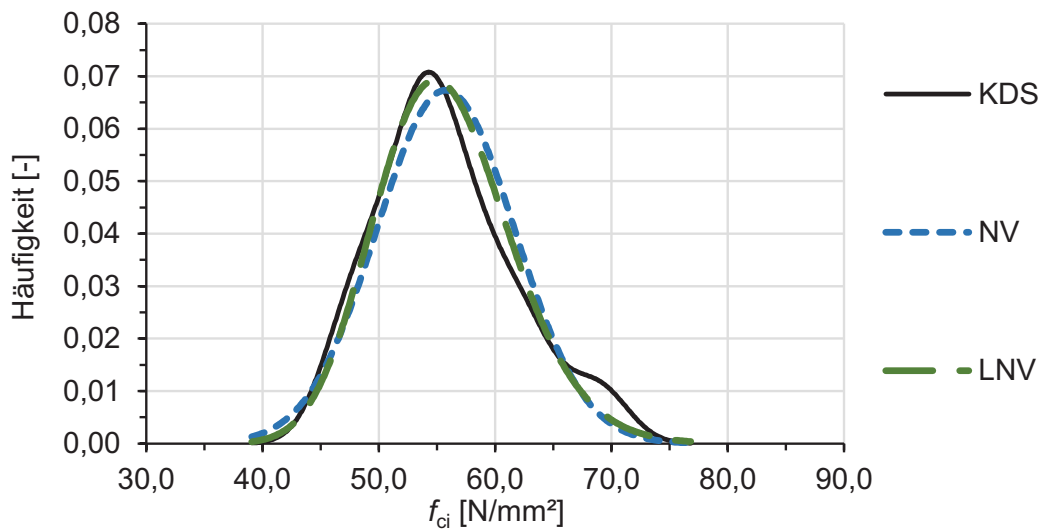


Abb. I. 21 Lahntalbrücke, Limburg – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 105 Lahntalbrücke, Limburg – Dichtefunktion und Quantilwerte

Lahntalbrücke, Limburg				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,593	0,52	46,3	45,5	46,3

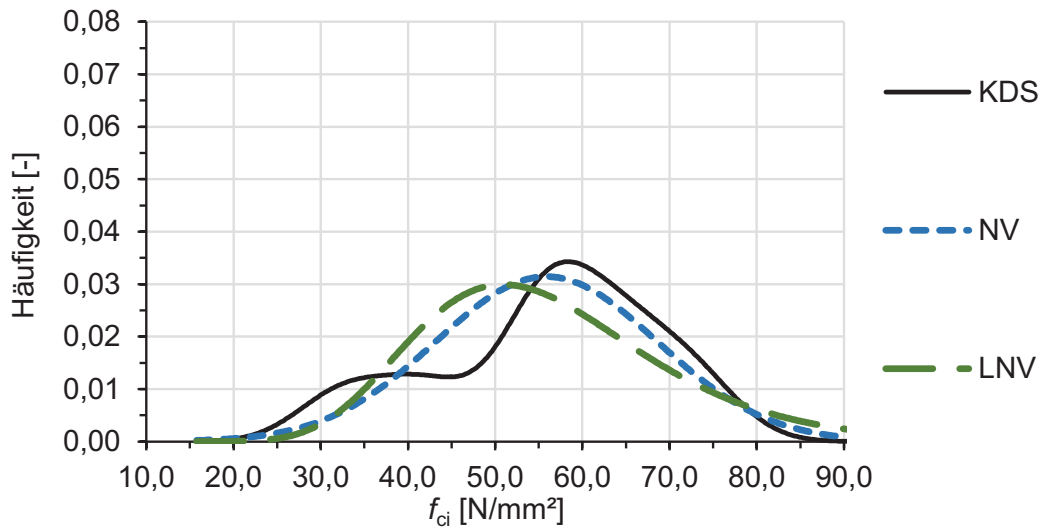


Abb. I. 22 Lautertalbrücke Widerlager, Kaiserslautern – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 106 Lautertalbrücke Widerlager, Kaiserslautern – Dichtefunktion und Quantilwerte

Lautertalbrücke Widerlager, Kaiserslautern				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-0,544	0,227	31,2	33,7	34,9

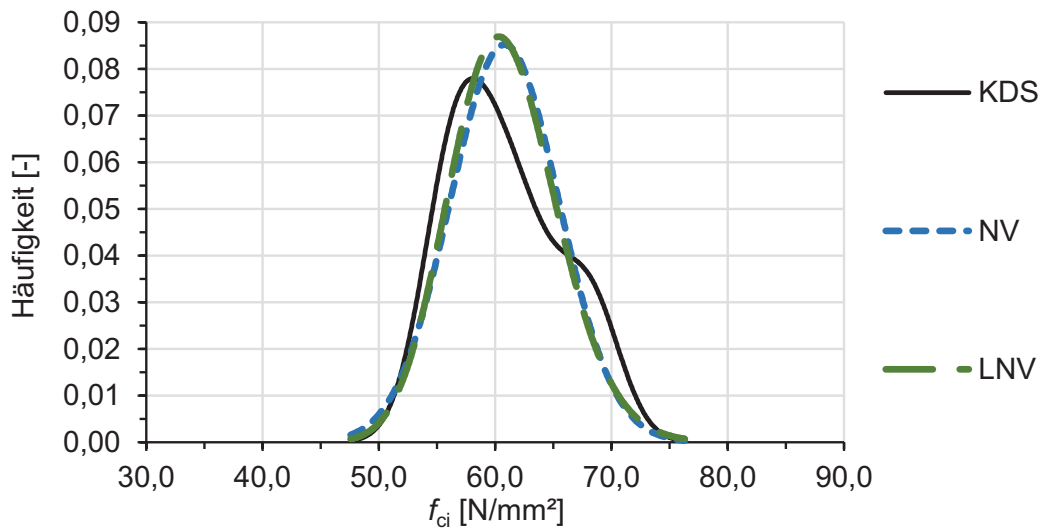


Abb. I. 23 Lautertalbrücke Fahrbahn obere Schicht, KL – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 107 Lautertalbrücke Fahrbahn obere Schicht, KL – Dichtefunktion und Quantilwerte

Lautertalbrücke Fahrbahn obere Schicht, Kaiserslautern				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,584	0,313	53,3	51,8	52,4

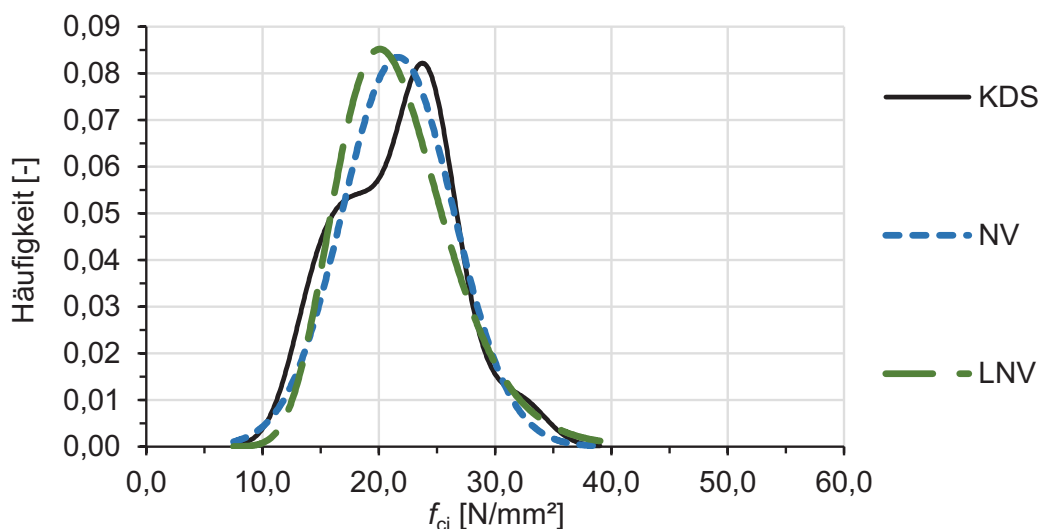


Abb. I. 24 Lautertalbrücke Fahrbahn untere Schicht, KL – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 108 Lautertalbrücke Fahrbahn untere Schicht, KL – Dichtefunktion und Quantilwerte

Lautertalbrücke Fahrbahn untere Schicht, Kaiserslautern				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,159	0,466	13,3	13,1	14,1

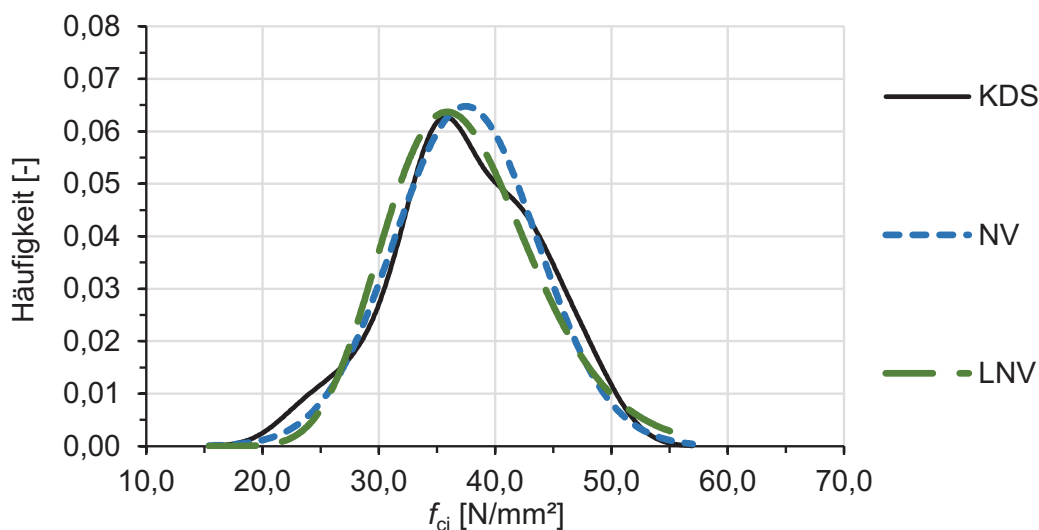


Abb. I. 25 Decke Wohnblock, Ludwigshafen – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 109 Decke Wohnblock, Ludwigshafen – Dichtefunktion und Quantilwerte

Decke Wohnblock, Ludwigshafen				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-0,171	0,872	25,9	26,9	27,5

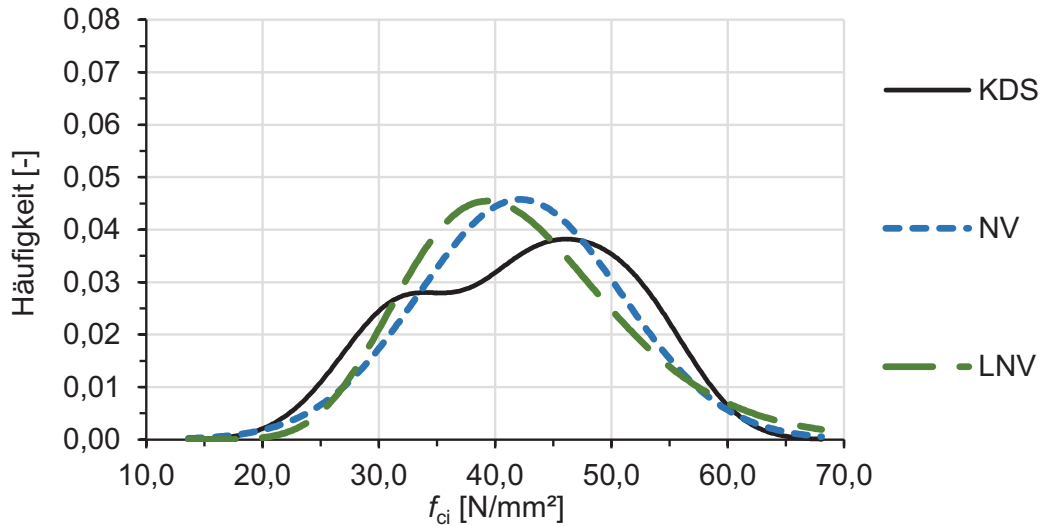


Abb. I. 26 Wand TWL, Ludwigshafen – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 110 Wand TWL, Ludwigshafen – Dichtefunktion und Quantilwerte

Wand Technische Werke Ludwigshafen, Ludwigshafen				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-0,217	0,358	26,3	26,8	28,1

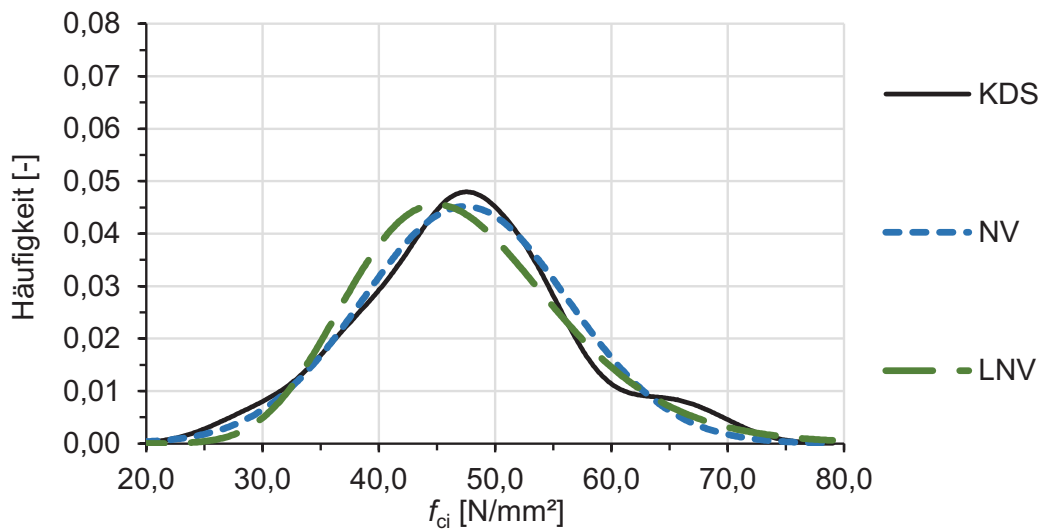


Abb. I. 27 Bauwerk 1 – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 111 Bauwerk 1 – Dichtefunktion und Quantilwerte

Bauwerk 1				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,194	0,889	31,9	32,3	33,5

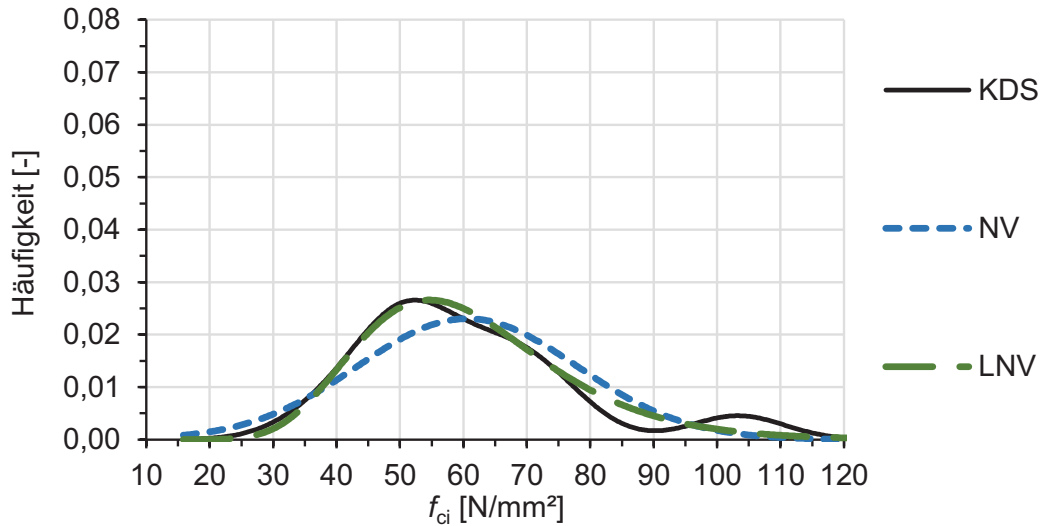


Abb. I. 28 Pfeiler Brücke B270, Langweiler – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 112 Pfeiler Brücke B270, Langweiler – Dichtefunktion und Quantilwerte

Pfeiler Brücke B270, Langweiler				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
1,343	0,172	36,2	28,2	35,7

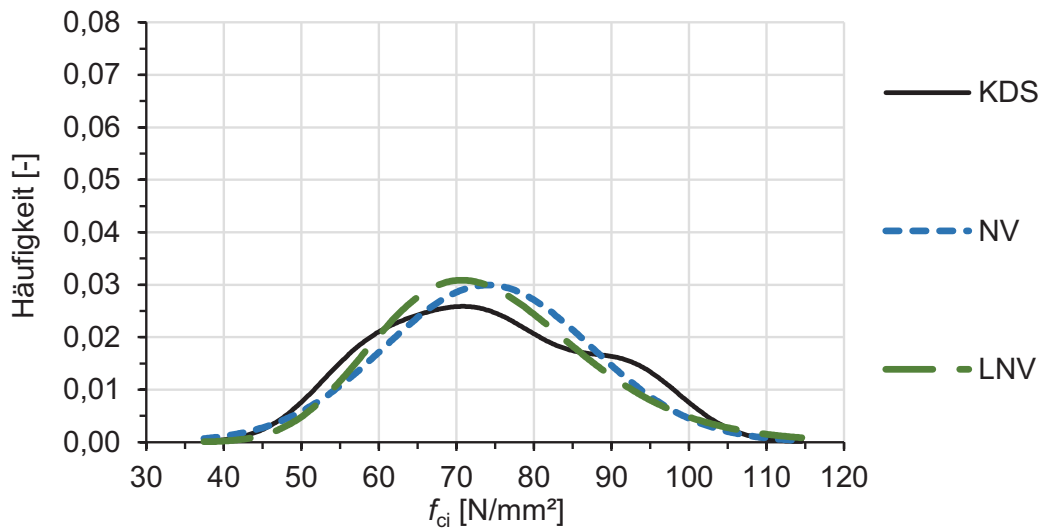


Abb. I. 29 Brückenkappe Brücke B270, Langweiler – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 113 Brückenkappe Brücke B270, Langweiler – Dichtefunktion und Quantilwerte

Brückenkappe Brücke B270, Langweiler				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,291	0,509	52,1	47,3	50,9

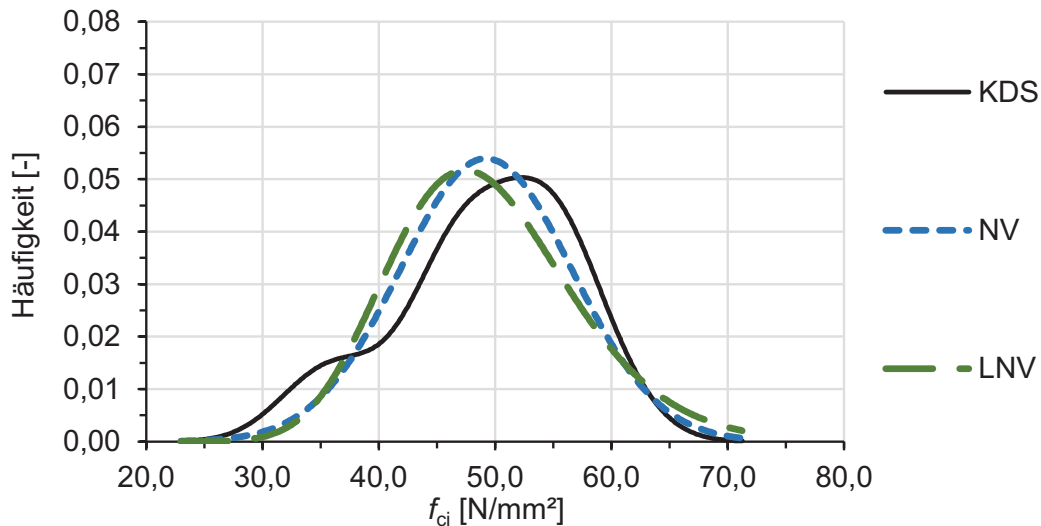


Abb. I. 30 Brücke AK Mainz-Süd - Auflager, Mainz – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 114 Brücke AK Mainz-Süd - Auflager, Mainz – Dichtefunktion und Quantilwerte

Brücke Autobahnkreuz Mainz-Süd - Auflager, Mainz				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-0,684	0,471	34,2	35,5	36,2

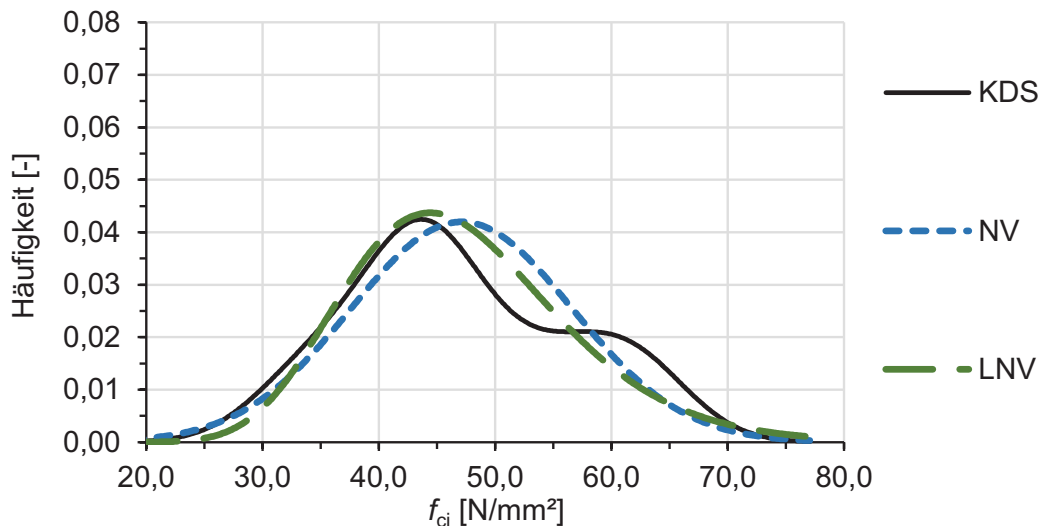


Abb. I. 31 Brücke Lockwitzbach, Dresden – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 115 Brücke Lockwitzbach, Dresden – Dichtefunktion und Quantilwerte

Brücke Lockwitzbach, Dresden/Niedersedlitz Steinbock u. Curbach 2018				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,383	0,517	31,3	29,4	31,7

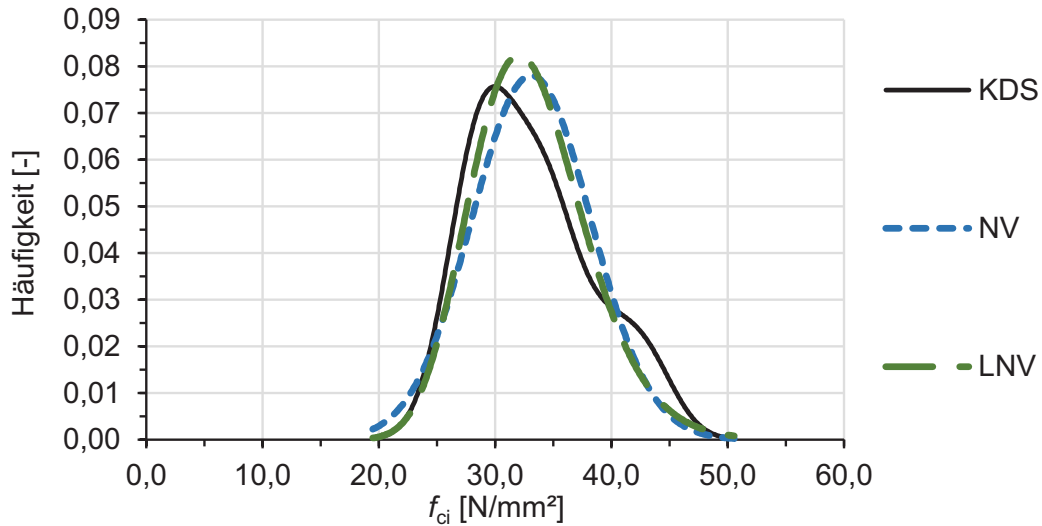


Abb. I. 32 Stützen, TU Kaiserslautern – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 116 Stützen, TU Kaiserslautern – Dichtefunktion und Quantilwerte

Stützen, TU Kaiserslautern				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test ρ ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,800	0,467	25,3	23,3	24,6

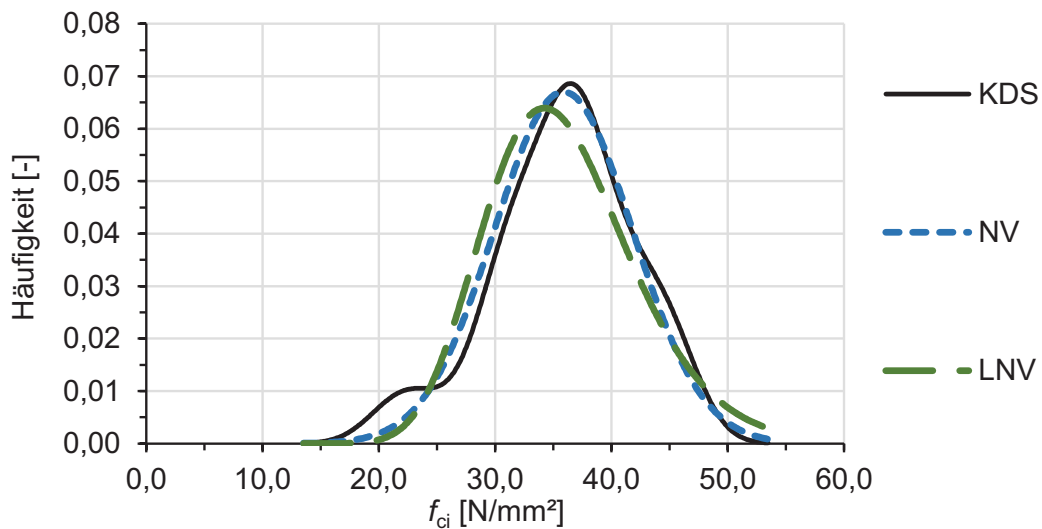


Abb. I. 33 Kellerinnenwand Schifferstadt, Schifferstadt – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 117 Kellerinnenwand Schifferstadt, Schifferstadt – Dichtefunktion und Quantilwerte

Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test ρ ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-0,499	0,61	23,8	25,5	25,9

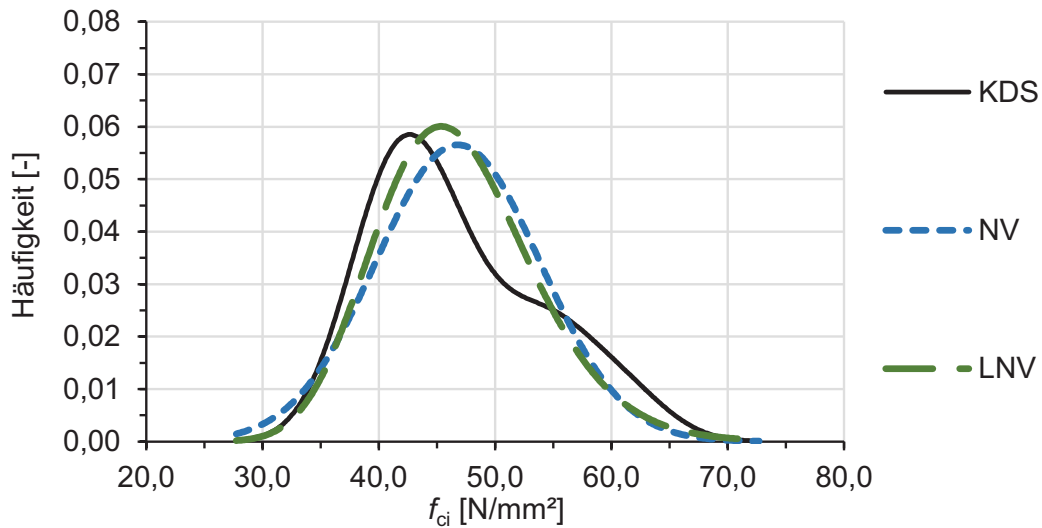


Abb. I. 34 Balkonplatte Altersheim, Schifferstadt – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 118 Balkonplatte Altersheim, Schifferstadt – Dichtefunktion und Quantilwerte

Balkonplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,857	0,107	36,0	33,9	35,5

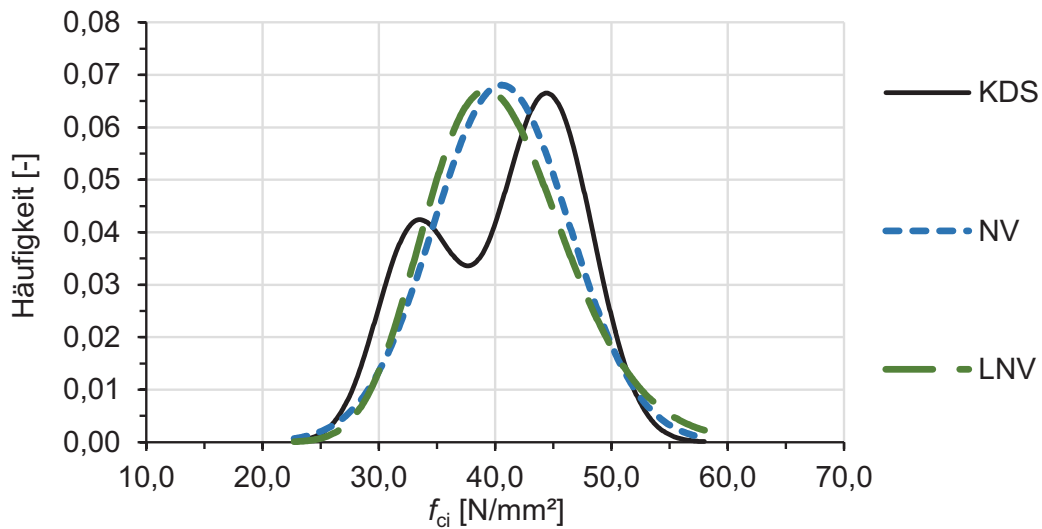


Abb. I. 35 Deckenplatte Altersheim, Schifferstadt – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 119 Deckenplatte Altersheim, Schifferstadt – Dichtefunktion und Quantilwerte

Deckenplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-0,370	0,044	29,8	30,1	30,7

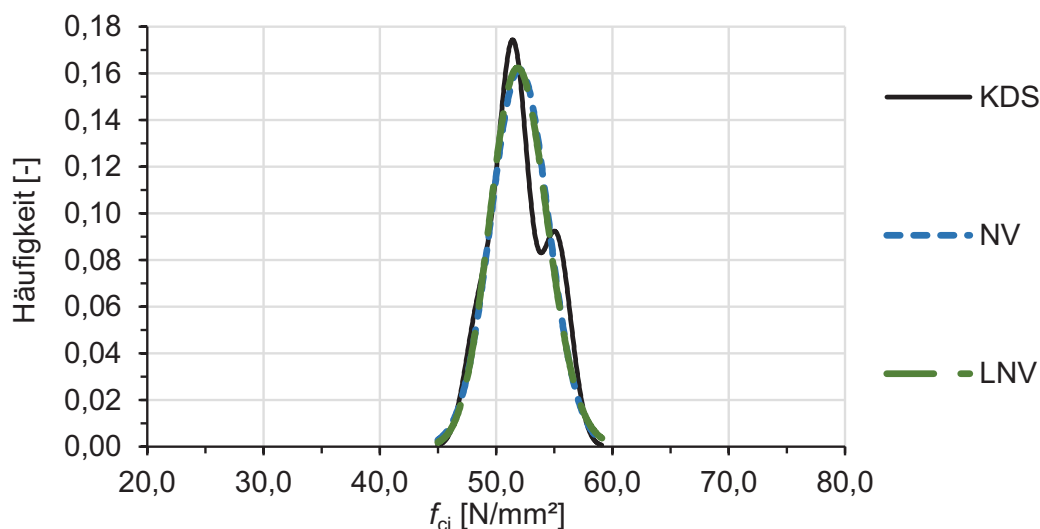


Abb. I. 36 Stütze Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 120 Stütze Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt – Dichtefunktion und Quantilwerte

Stütze Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,206	0,833	47,9	46,9	47,1

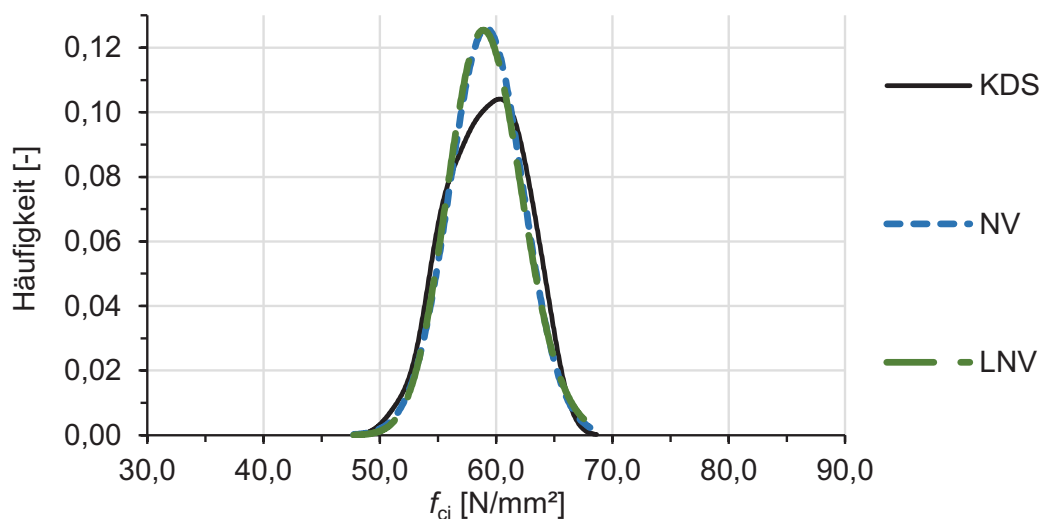


Abb. I. 37 Stützwand, Kusel – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 121 Stützwand, Kusel – Dichtefunktion und Quantilwerte

Stützwand, Kusel				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-0,205	0,544	53,5	53,7	53,8

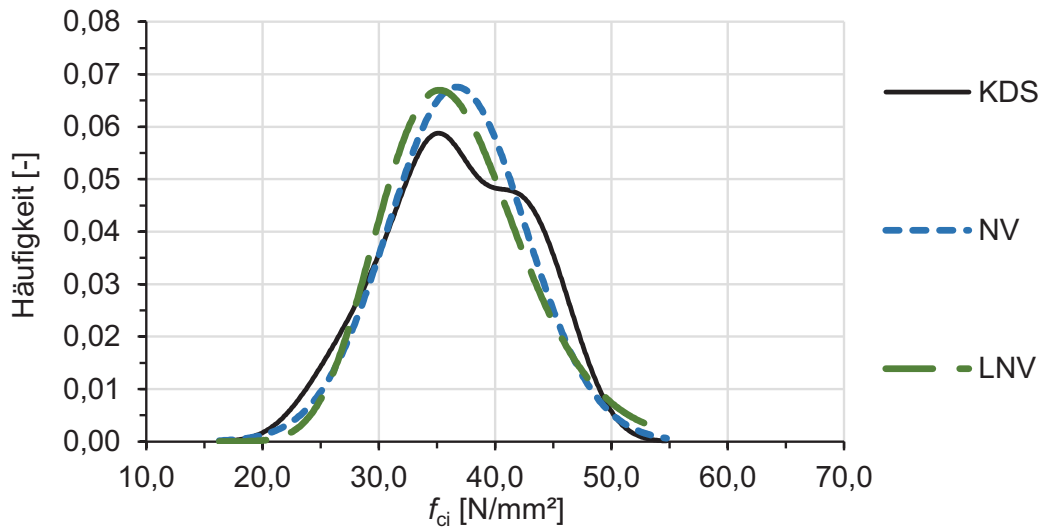


Abb. I. 38 Unterführung A6 (501 A-D), Heilbronn – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 122 Unterführung A6 (501 A-D), Heilbronn – Dichtefunktion und Quantilwerte

Unterführung A6 Kirchhausen-Biberach (501 A-D), Heilbronn				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-0,163	0,678	25,8	26,4	27,1

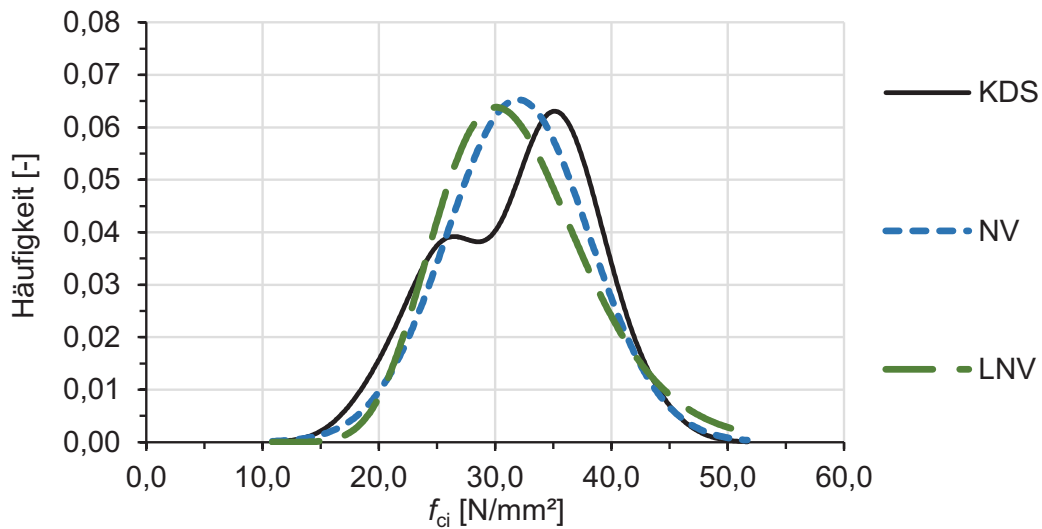


Abb. I. 39 Unterführung A6 (504 A-D), Heilbronn – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 123 Unterführung A6 (504 A-D), Heilbronn – Dichtefunktion und Quantilwerte

Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Heilbronn				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-0,346	0,493	20,5	21,1	21,9

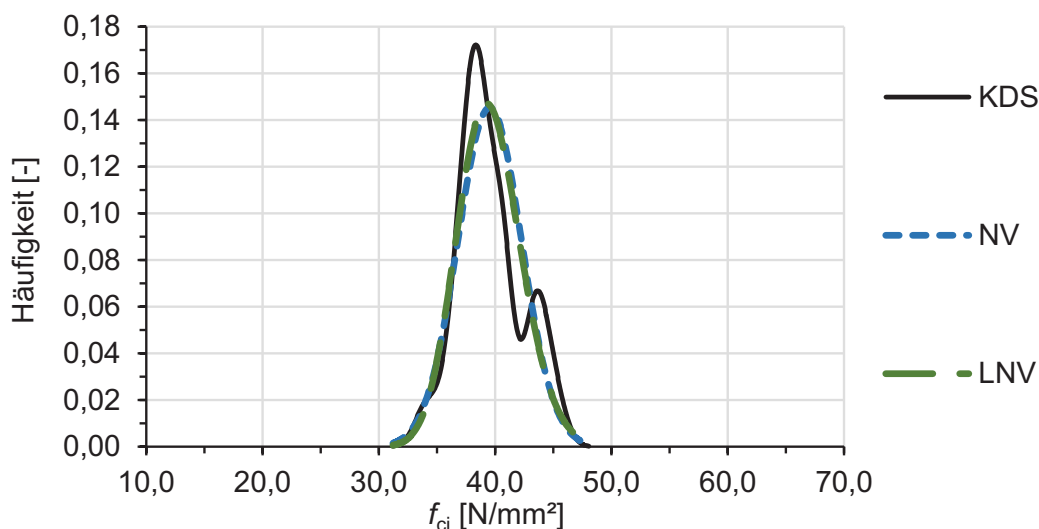


Abb. I. 40 Unterführung A6 (504 E-H), Heilbronn – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 124 Unterführung A6 (504 E-H), Heilbronn – Dichtefunktion und Quantilwerte

Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), Heilbronn				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,404	0,38	35,2	34,7	35,0

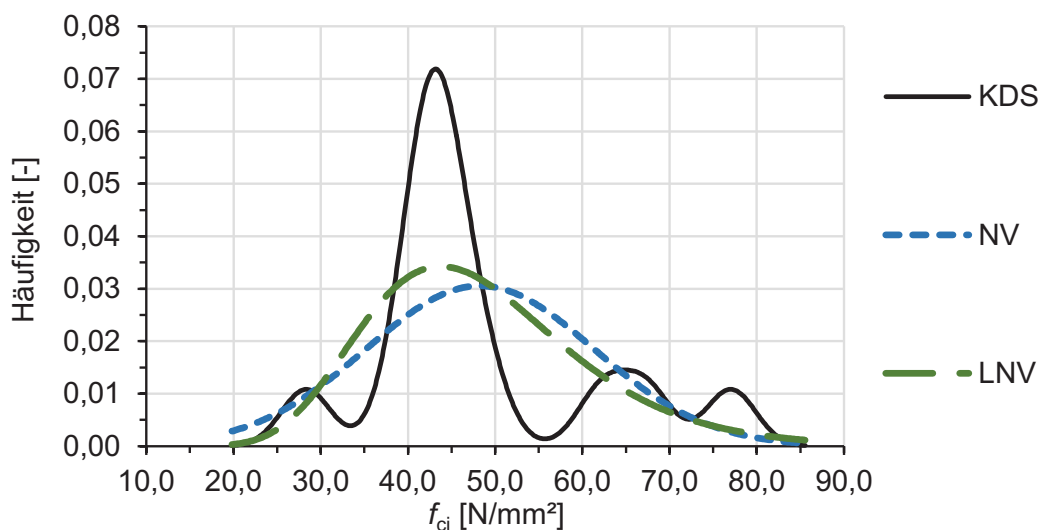


Abb. I. 41 Bauwerk 2 – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 125 Bauwerk 2 – Dichtefunktion und Quantilwerte

Bauwerk 2 BORAPA 2018				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
1,057	0,047	29,4	24,1	29,1

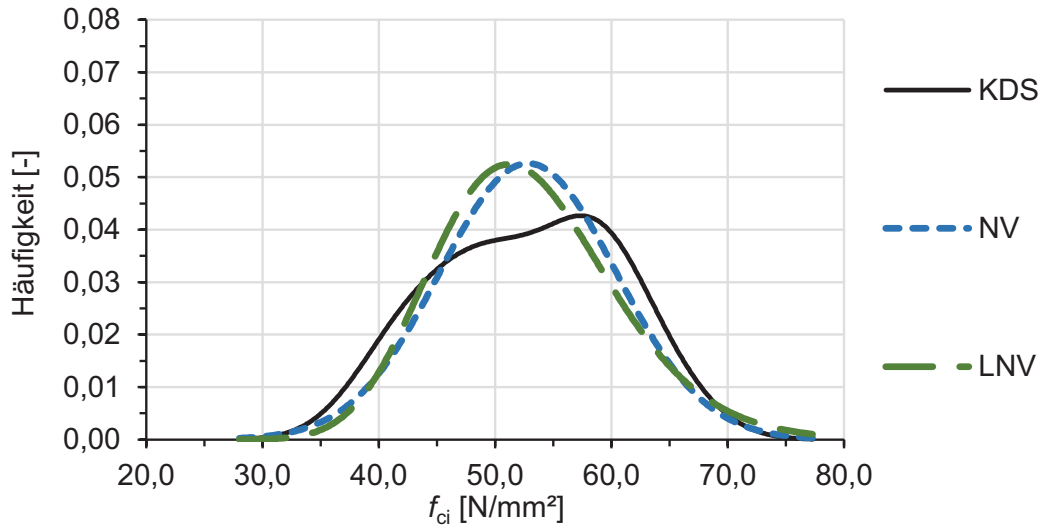


Abb. I. 42 Bauwerk 3 – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 126 Bauwerk 3 – Dichtefunktion und Quantilwerte

Bauwerk 3 BORAPA 2018				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-0,145	0,837	39,0	38,9	40,0

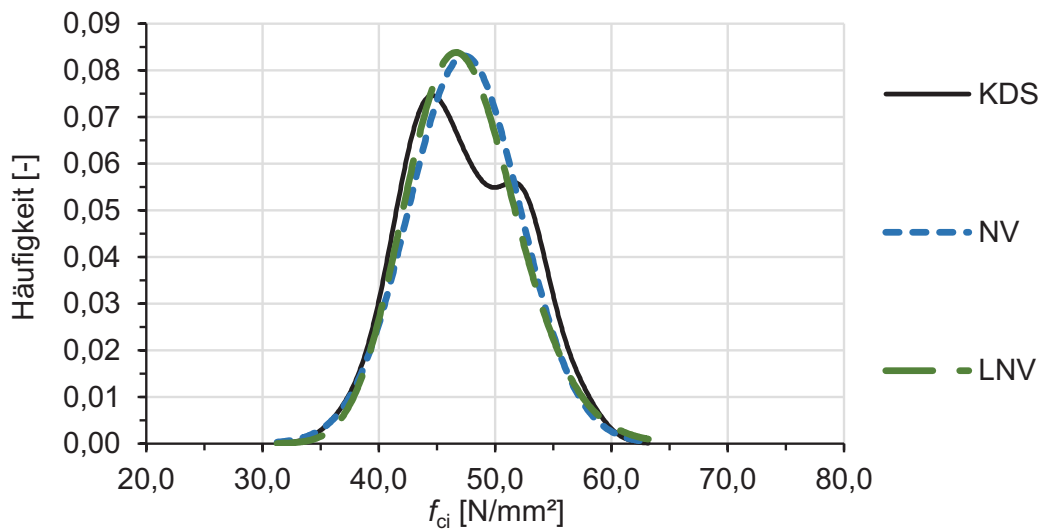


Abb. I. 43 Bauwerk 4 – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 127 Bauwerk 4 – Dichtefunktion und Quantilwerte

Bauwerk 4 BORAPA 2018				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,151	0,408	39,4	39,2	39,7

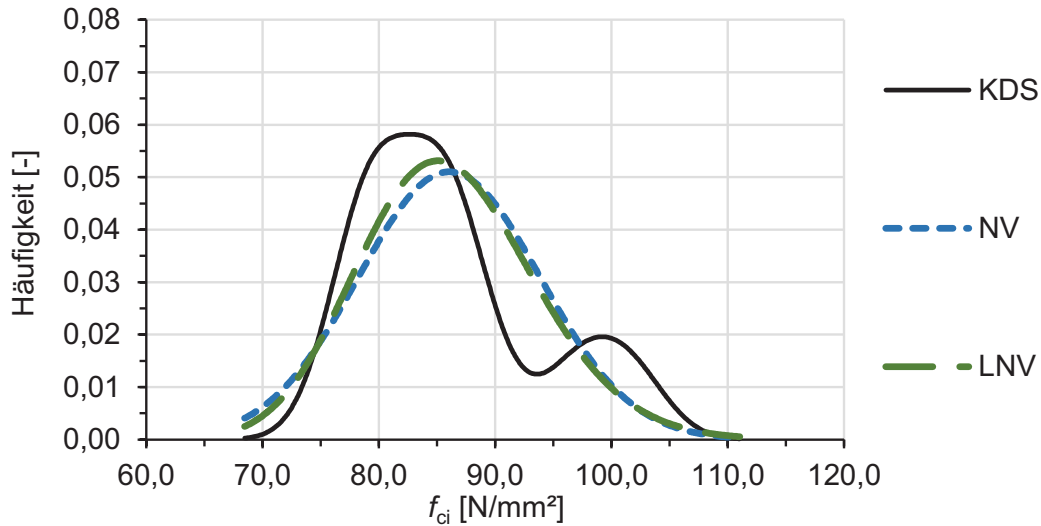


Abb. I. 44 Kühlturm, DBV $f_c(12)$ – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 128 Kühlturm, DBV $f_c(12)$ – Dichtefunktion und Quantilwerte

Kühlturm, DBV $f_c(12)$ DBV 2015				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test ρ ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
1,078	0,12	75,5	71,0	72,4

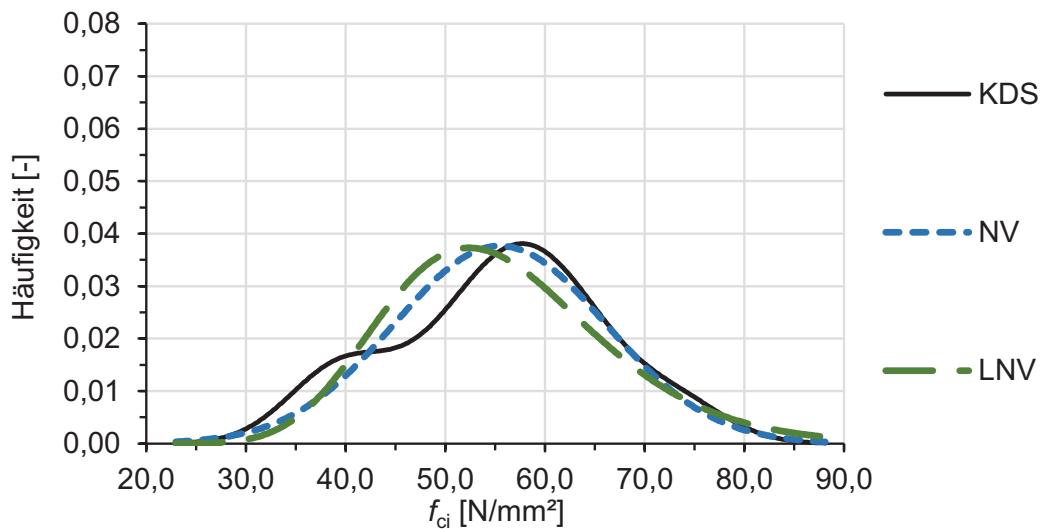


Abb. I. 45 Brücke, DBV $f_c(28)$ – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 129 Brücke, DBV $f_c(28)$ – Dichtefunktion und Quantilwerte

Brücke, DBV $f_c(28)$ DBV 2015				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test ρ ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-0,193	0,927	36,1	35,1	37,1

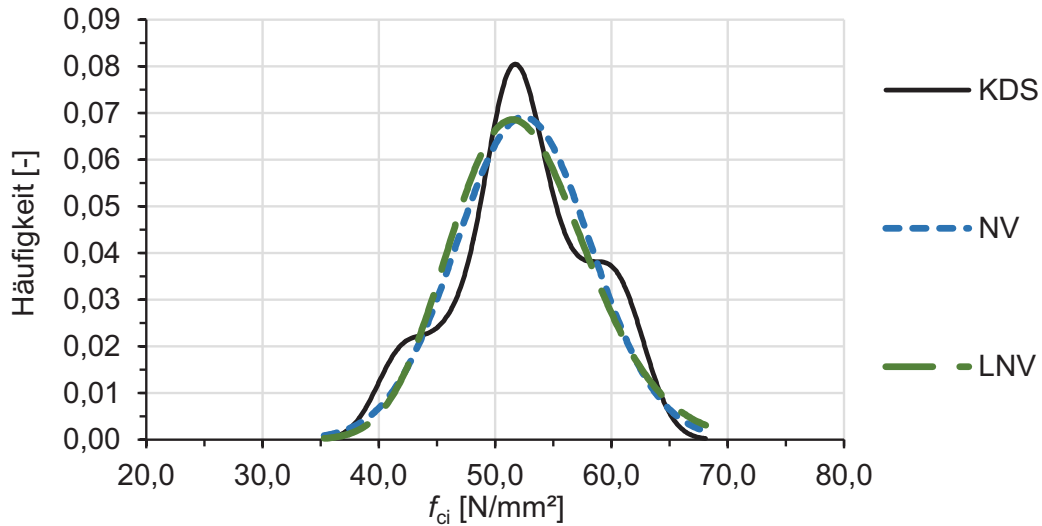


Abb. I. 46 Kühlturmschale, DBV $f_{ci}(55-1)$ – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 130 Kühlturmschale, DBV $f_{ci}(55-1)$ – Dichtefunktion und Quantilwerte

Kühlturmschale, DBV $f_{ci}(55-1)$ DBV 2015				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
-0,183	0,945	41,9	41,3	42,0

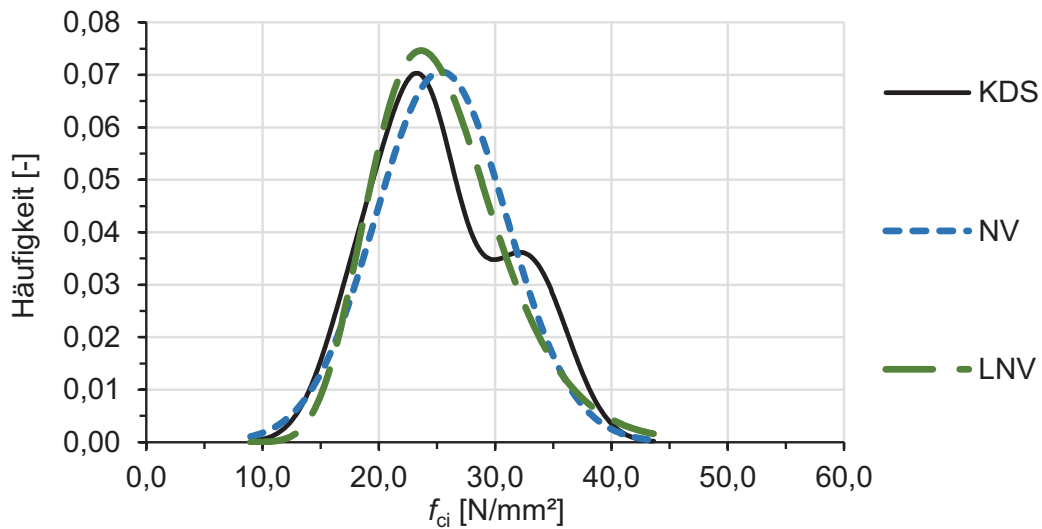


Abb. I. 47 Flachdecke, DBV $f_{ci}(70)$ – Schätzung der Dichtefunktion der Betondruckfestigkeit

Tab. I. 131 Flachdecke, DBV $f_{ci}(70)$ – Dichtefunktion und Quantilwerte

Flachdecke, DBV $f_{ci}(70)$ DBV 2015				
Schiefe ^{a)}	Shapiro-Wilk-Test p ^{b)}	5 %-Quantilwert		
		KDS ^{c)}	NV ^{d)}	LNV ^{e)}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,479	0,478	16,1	14,5	16,2

Anhang II Statistische Simulationen zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Druckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang

Zur Bewertung der Güte statistischer Verfahren oder auch Näherungsverfahren zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit bei kleinem Stichprobenumfang sind nachfolgend die Ergebnisse der in Kapitel 5 erläuterten statistischen Simulationen dargestellt.

Der an der Gesamtstichprobe bestimmte charakteristische Wert x_k der In-situ-Betondruckfestigkeit, welcher aufgrund des großen Umfangs der Stichprobe den tatsächlichen 5 %-Quantilwert der Grundgesamtheit mit ausreichender Genauigkeit beschreibt, ist in den nachfolgenden Abbildungen als grüne Linie dargestellt. Die Berechnung erfolgte basierend auf einer logarithmischen Normalverteilung nach Gleichung (3.11).

Die einzelnen Punkte stellen jeweils die charakteristische Betondruckfestigkeit, bestimmt an einer Teilstichprobe mit dem Stichprobenumfang n von drei; fünf oder acht Probekörpern, dar. Je nach Farbe sind die Punkte einem bestimmten statistischen Auswerte- oder Näherungsverfahren zuzuordnen. Als Vergleichsgröße wurde jeweils das Ergebnis der Auswertung der Teilstichproben mit einer logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12*, welche in den Diagrammen durch rote Punkte dargestellt ist, gewählt. Es sind jeweils lediglich bis zu 500 zufällig ausgewählte Datensätze grafisch dargestellt, wobei die Verteilung der möglichen Ergebnisse mit ausreichender Genauigkeit beschrieben wird.

Der Abstand der einzelnen Punkte zur grünen Linie, welche die charakteristische Betondruckfestigkeit der Grundgesamtheit, basierend auf einer logarithmischen Normalverteilung, beschreibt, stellt somit ein Maß der Abweichung und folglich auch der Güte des jeweiligen statistischen Auswerte- oder Näherungsverfahrens dar.

Zusätzlich sind für die verschiedenen Auswerteverfahren die zugehörigen empirischen Dichtefunktionen dargestellt, welche die Häufigkeit des Auftretens bestimmter Werte veranschaulichen. Die Intervallbreiten wurden nach Gleichung (2.19) berechnet, wodurch sich in Abhängigkeit von der Anzahl der Teilstichproben unterschiedliche Intervallbreiten ergeben. Aufgrund dessen sind die Diagramme nicht maßstabsgetreu und infolgedessen auch lediglich für den qualitativen Vergleich heranzuziehen.

Über die grafische Darstellung der Simulationsergebnisse hinaus sind die Kenngrößen der Auswertung für die verschiedenen Auswerteverfahren auch in tabellarischer Form angegeben, wobei die folgenden Größen angegeben werden:

MIN	kleinster an einer Stichprobe ermittelter charakteristischer Wert der Betondruckfestigkeit,
MAX	größter an einer Stichprobe ermittelter charakteristischer Wert der Betondruckfestigkeit,
Streubreite	Abstand zwischen kleinstem und größtem an einer Stichprobe ermitteltem charakteristischen Wert der Betondruckfestigkeit,

Mittelwert	Arithmetisches Mittel der an den Teilstichproben ermittelten charakteristischen Werte der Betondruckfestigkeit (mittlere charakteristische Betondruckfestigkeit),
Überschreitung	prozentualer Anteil der Teilstichproben die einen charakteristischen Wert der Betondruckfestigkeit liefern, der größer ist als der an der Gesamtstichprobe ermittelte Wert,
Unterschreitung	prozentualer Anteil der Teilstichproben die einen charakteristischen Wert der Betondruckfestigkeit liefern, der kleiner ist als der an der Gesamtstichprobe ermittelte Wert,
Mittlere Abweichung	Abstand zwischen dem arithmetischen Mittel der an den Teilstichproben ermittelten charakteristischen Werten der Betondruckfestigkeit (mittlere charakteristische Betondruckfestigkeit) und dem an der Gesamtstichprobe ermittelten charakteristischen Wert der Betondruckfestigkeit.

Vergleich DIN EN 1990:2010-12 Normal- und logarithmische Normalverteilung

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse einer Bewertung der Teilstichproben mit einer Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12 und einer logarithmischen Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12 gegenübergestellt.

Die mit der Normalverteilung ermittelten Ergebnisse werden durch graue und die mit der logarithmischen Normalverteilung ermittelten Ergebnisse durch rote Punkte dargestellt.

Zusätzlich ist die empirische Verteilungsdichte jeweils für $n = 3$, $n = 5$ und $n = 8$ abgebildet.

Die bei Abb. II. 1 beschriebene Legende ist in gleicher Form auch für Abb. II. 2 bis Abb. II. 29 gültig.

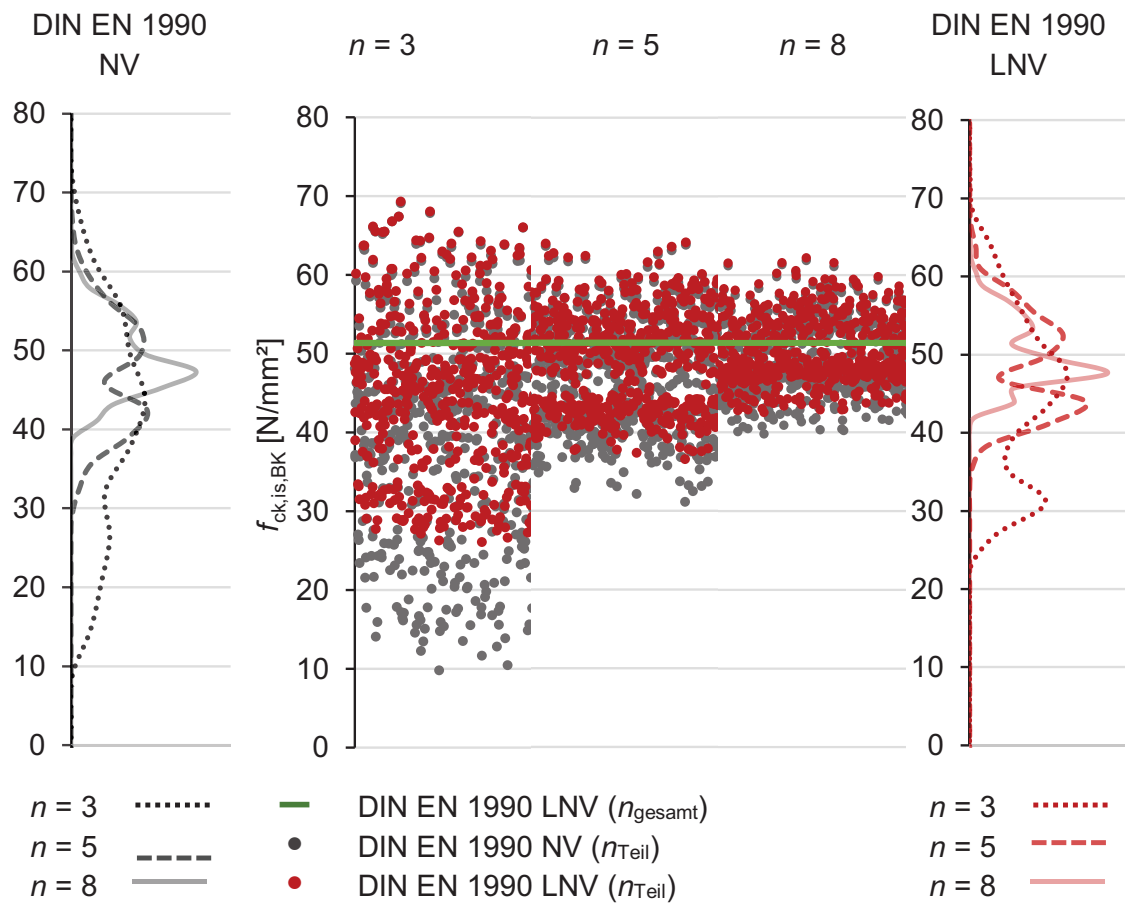


Abb. II. 1 Tropfkörper Kläranlage Blümelstal, Pirmasens: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

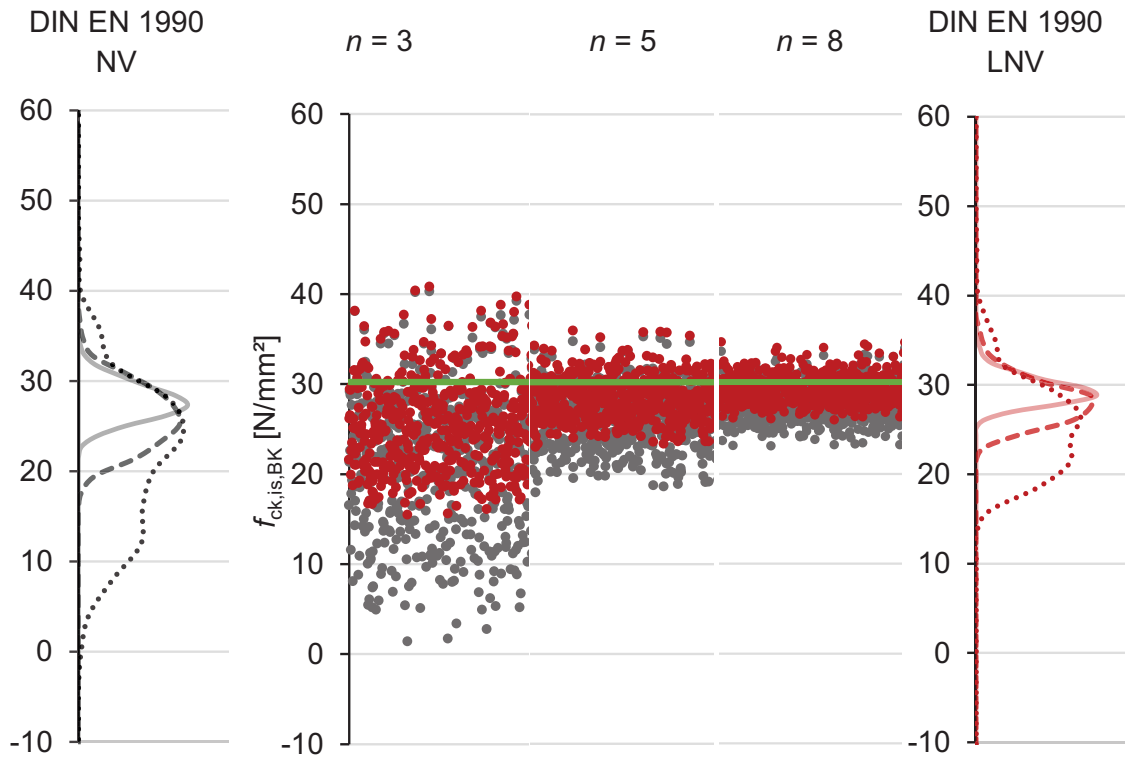


Abb. II. 2 Autobahnunterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

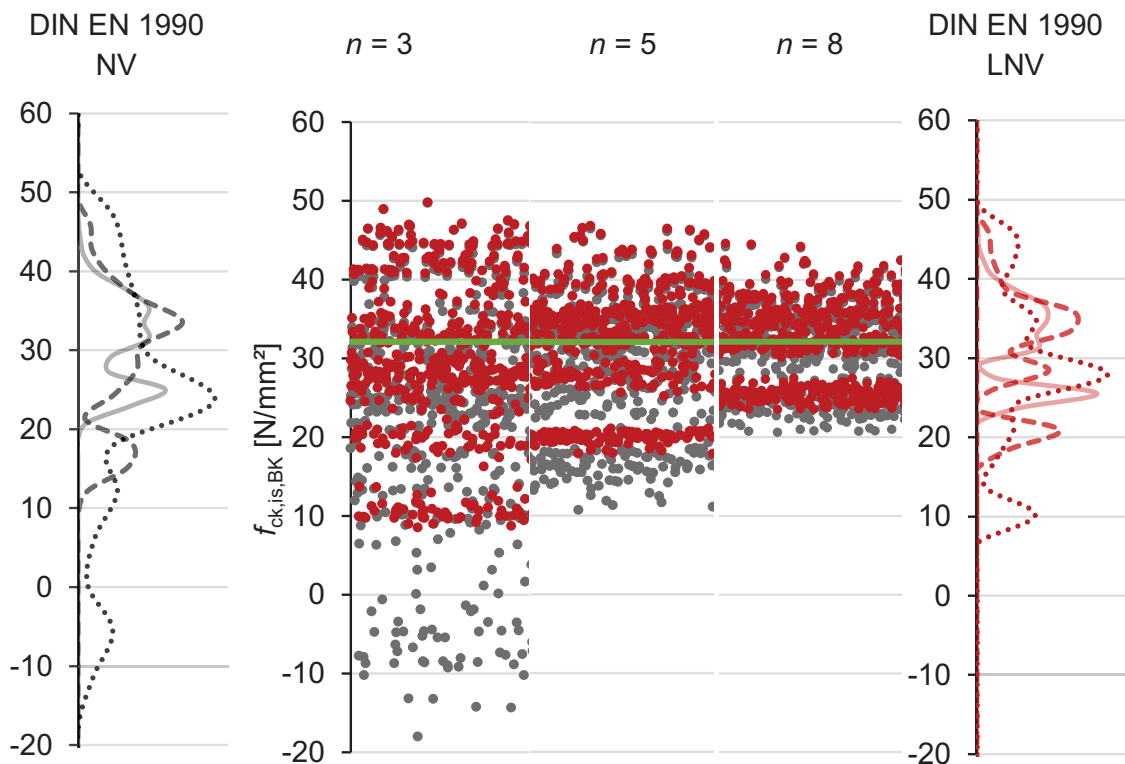


Abb. II. 3 Autobahnunterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

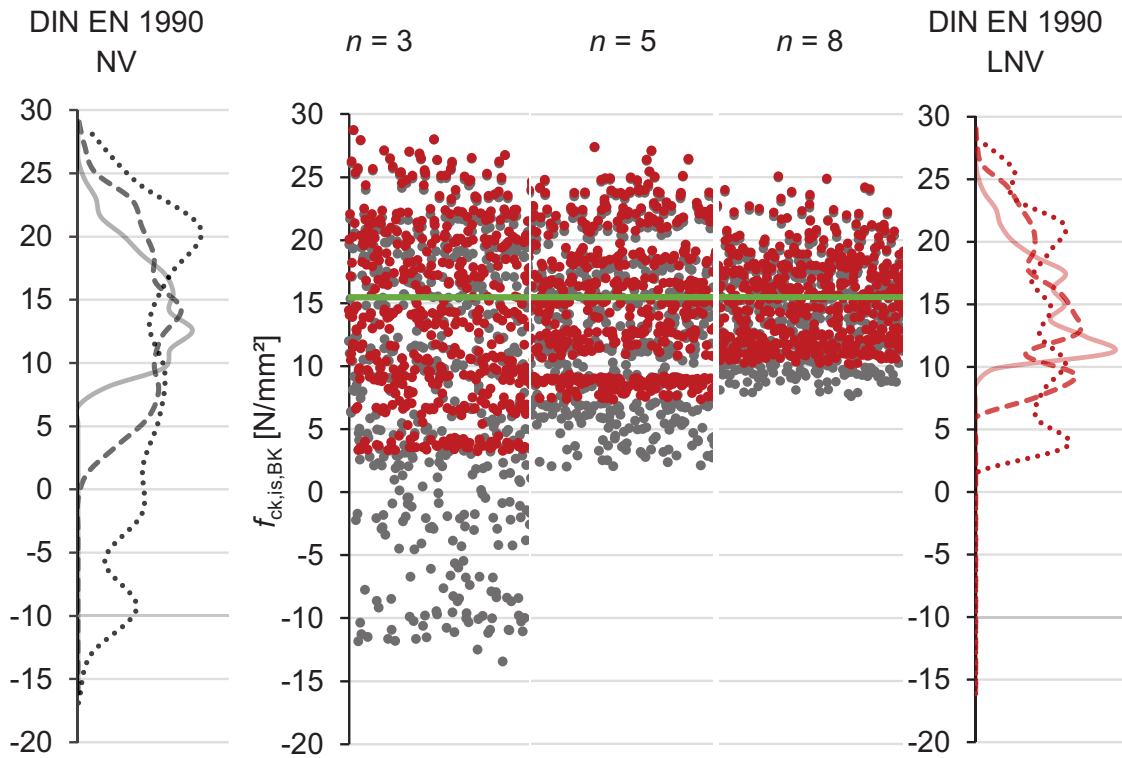


Abb. II. 4 Umspannwerk, Sulzbach: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

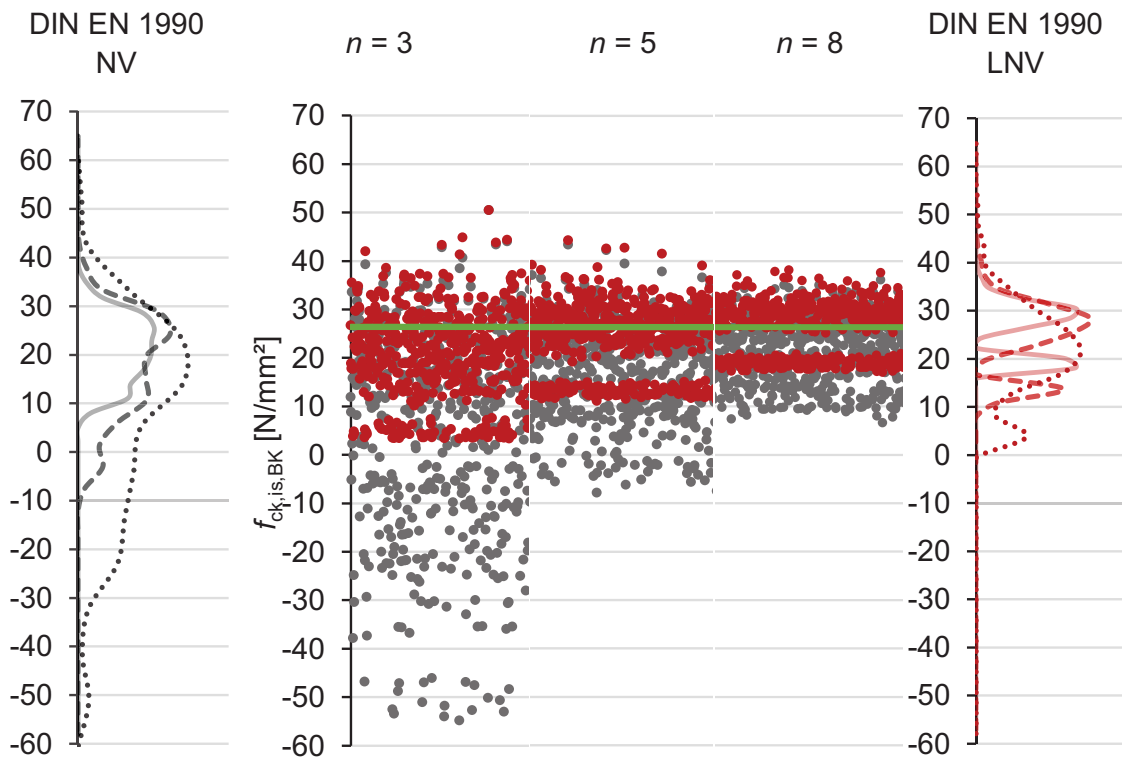


Abb. II. 5 Hochwasserschutzwand, Dormagen: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

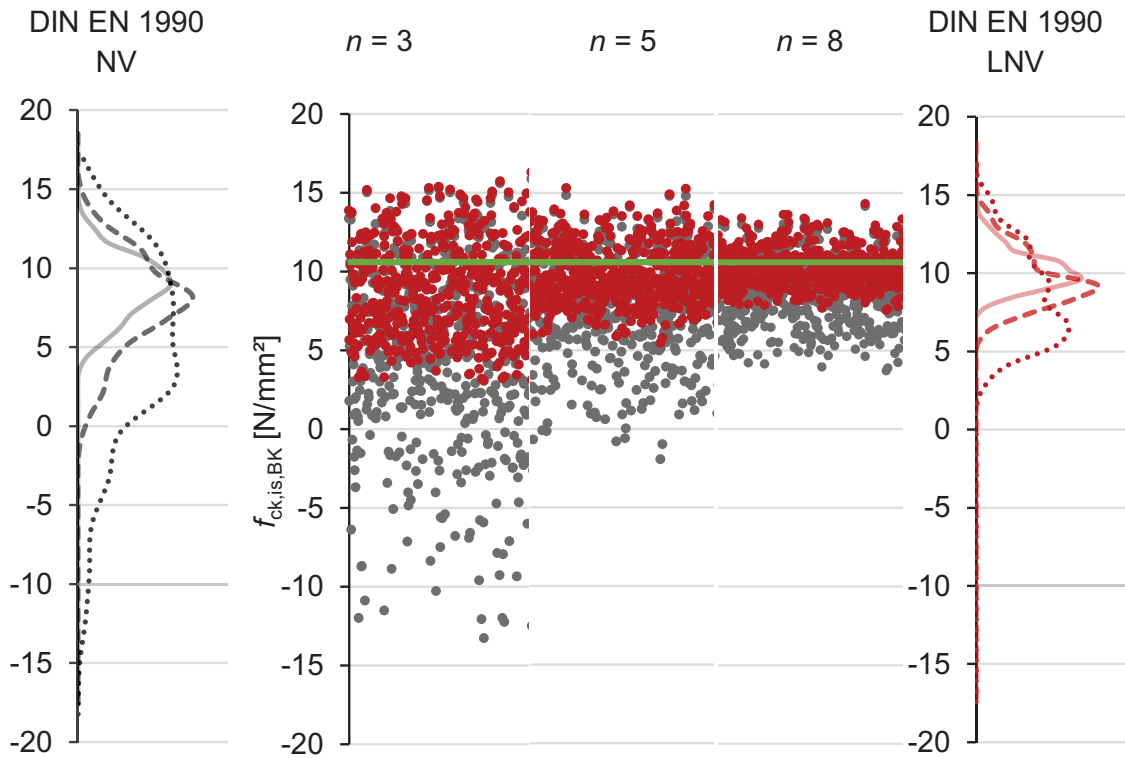


Abb. II. 6 Schwergewichtswand, Dormagen: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

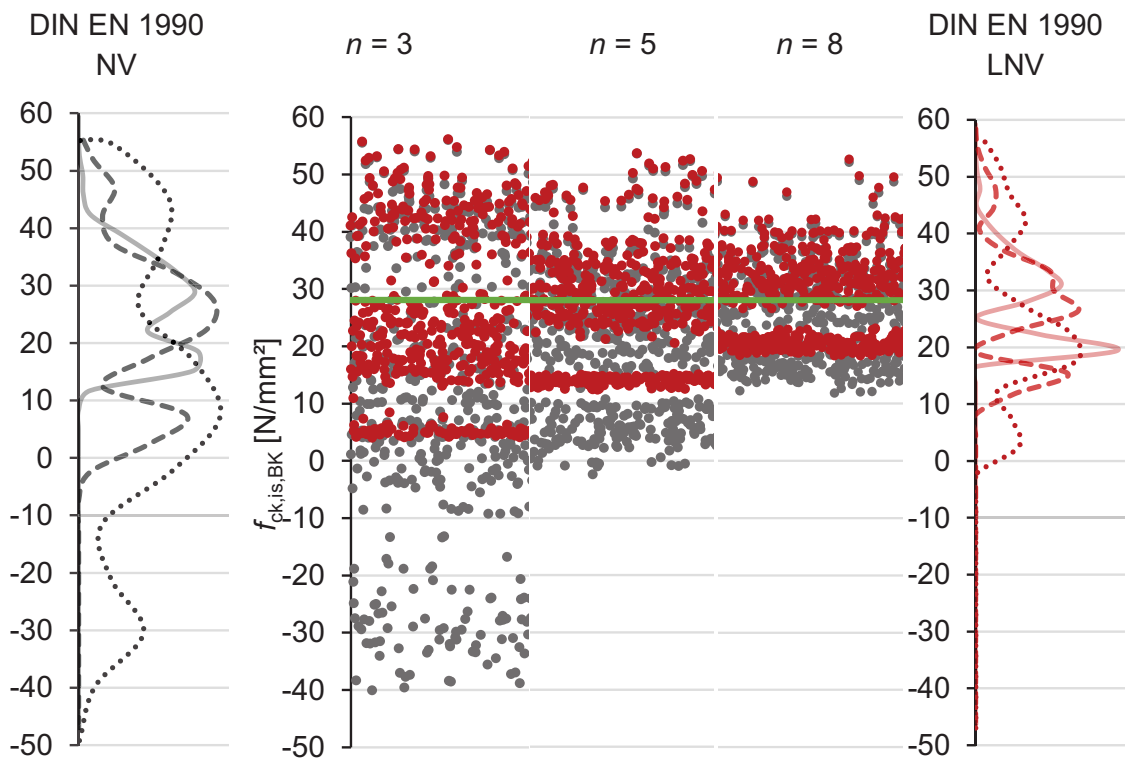


Abb. II. 7 Bodenplatte ACO, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

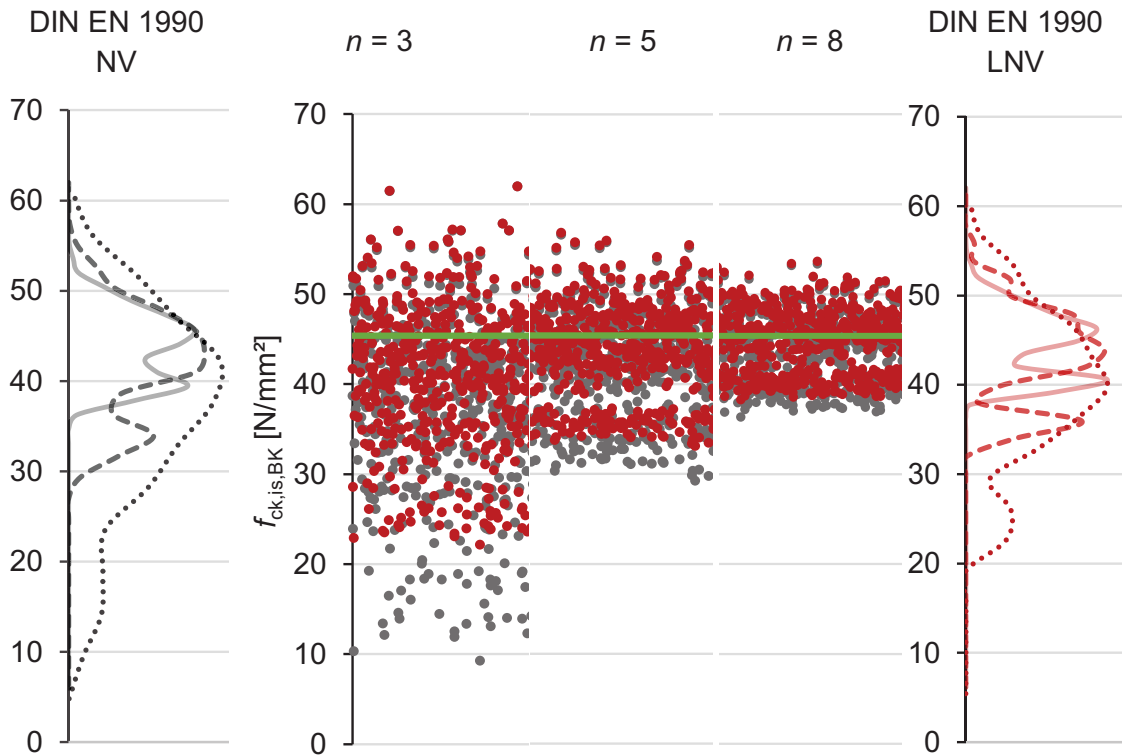


Abb. II. 8 Stützwand Ohmbach Abschnitt I, Pirmasens: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

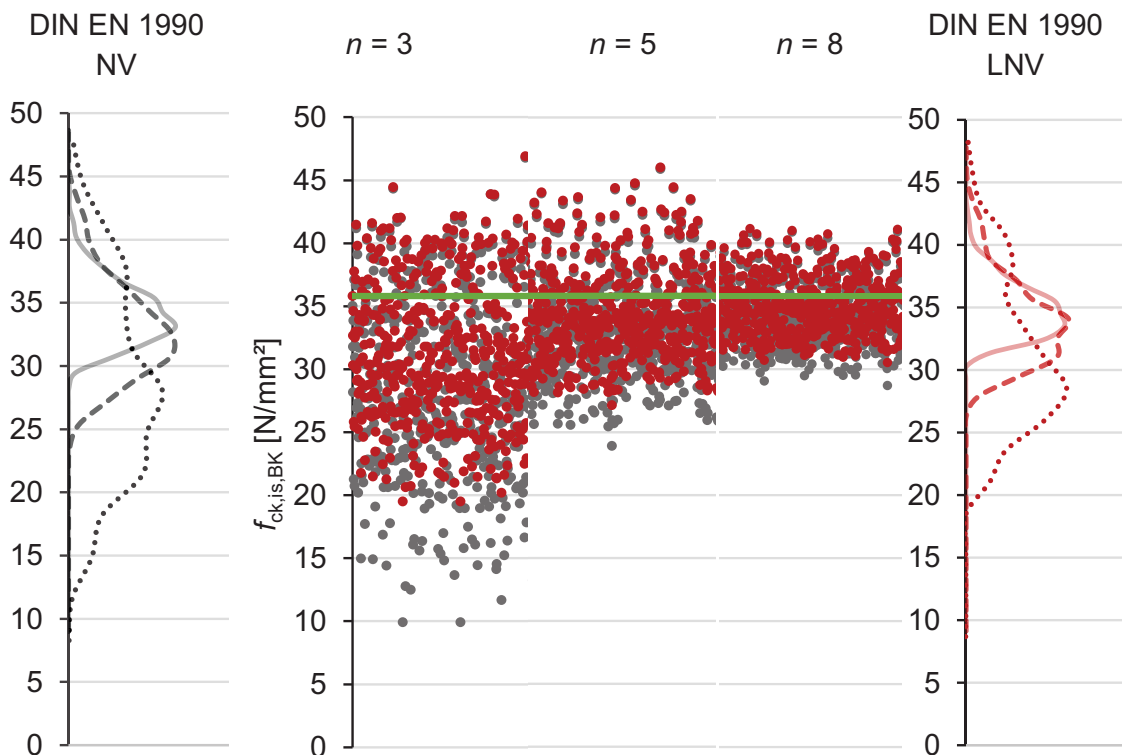


Abb. II. 9 Stützwand Ohmbach Abschnitt II, Pirmasens: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

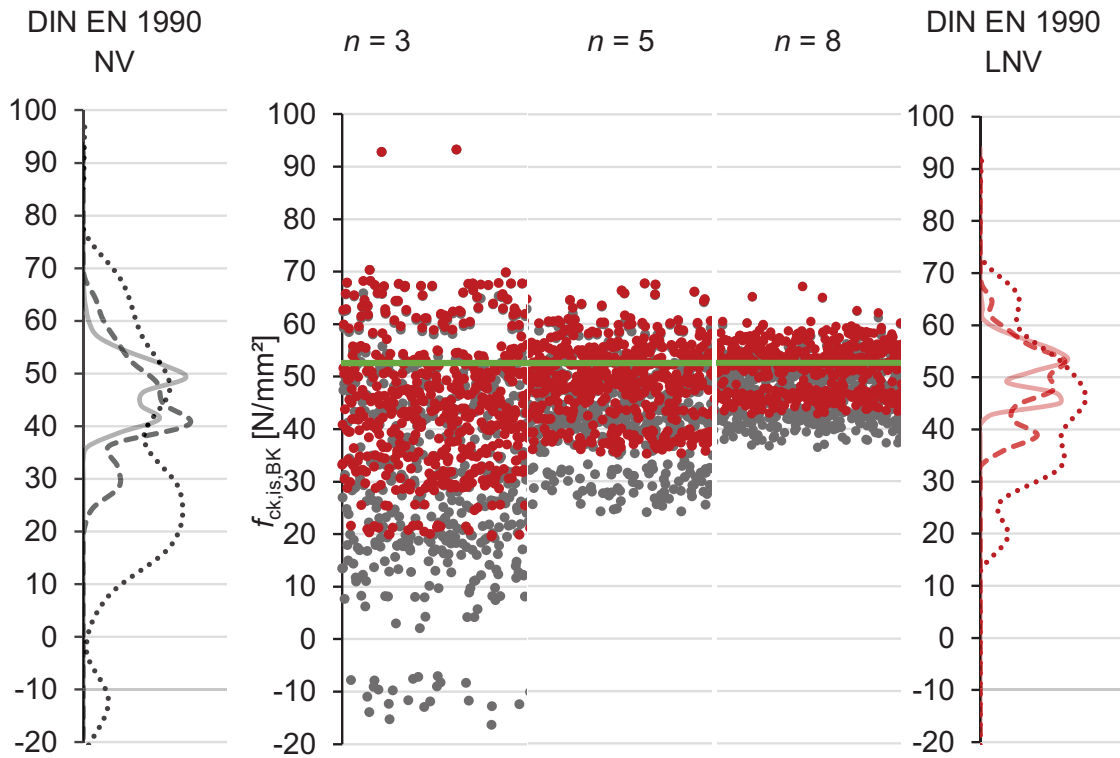


Abb. II. 10 Weserbrücke, Hannoversch Münden: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

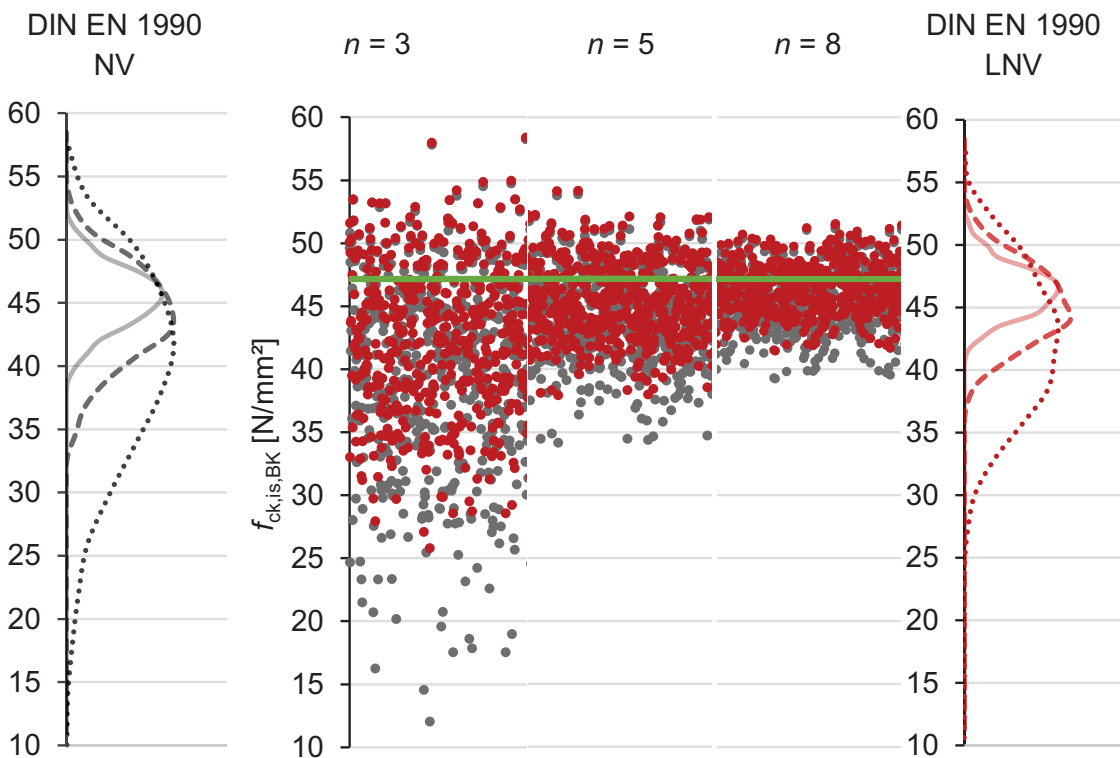


Abb. II. 11 Lahntalbrücke, Limburg: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

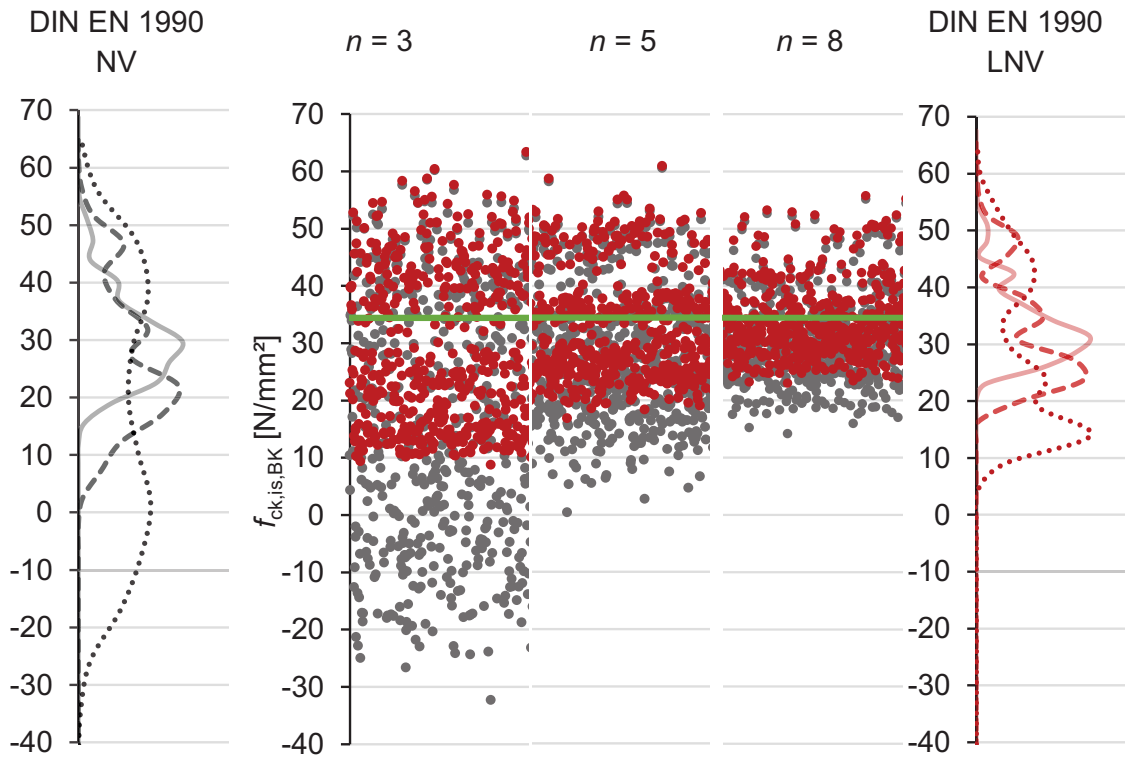


Abb. II. 12 Lautertalbrücke Widerlager, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

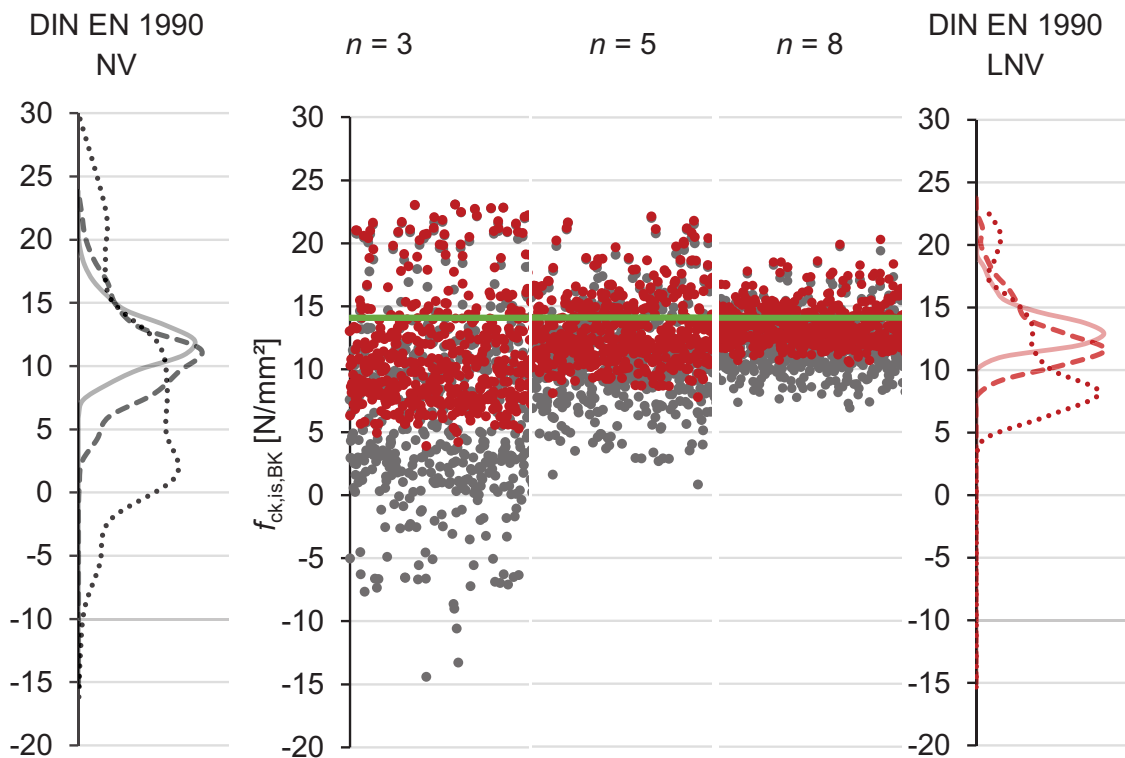


Abb. II. 13 Lautertalbrücke Fahrbahn untere Schicht, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

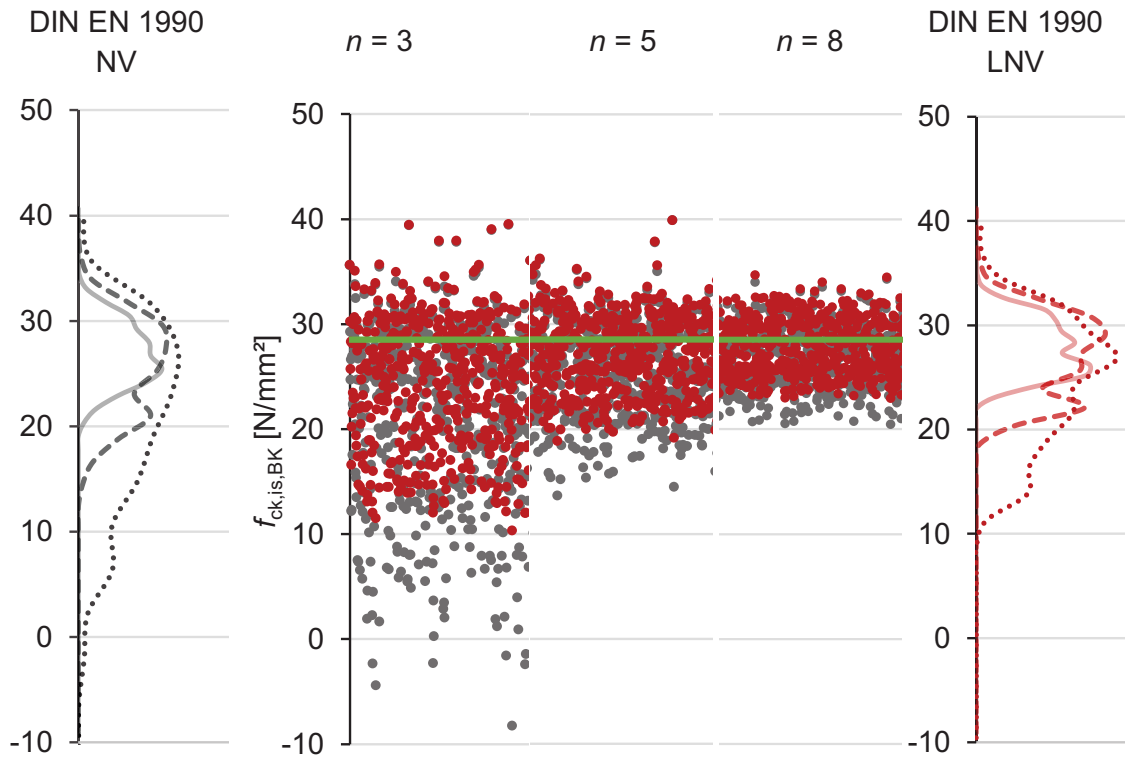


Abb. II. 14 Decke Wohnblock, Ludwigshafen: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

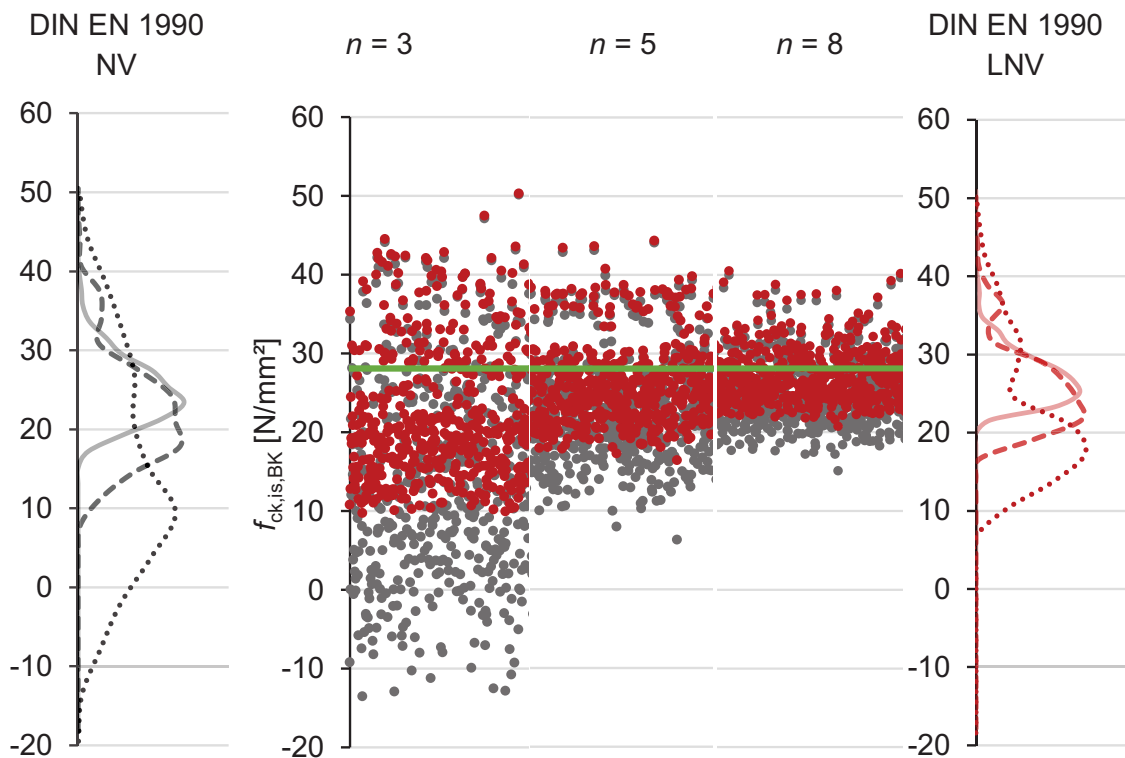


Abb. II. 15 Wand Technische Werke Ludwigshafen, Ludwigshafen: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

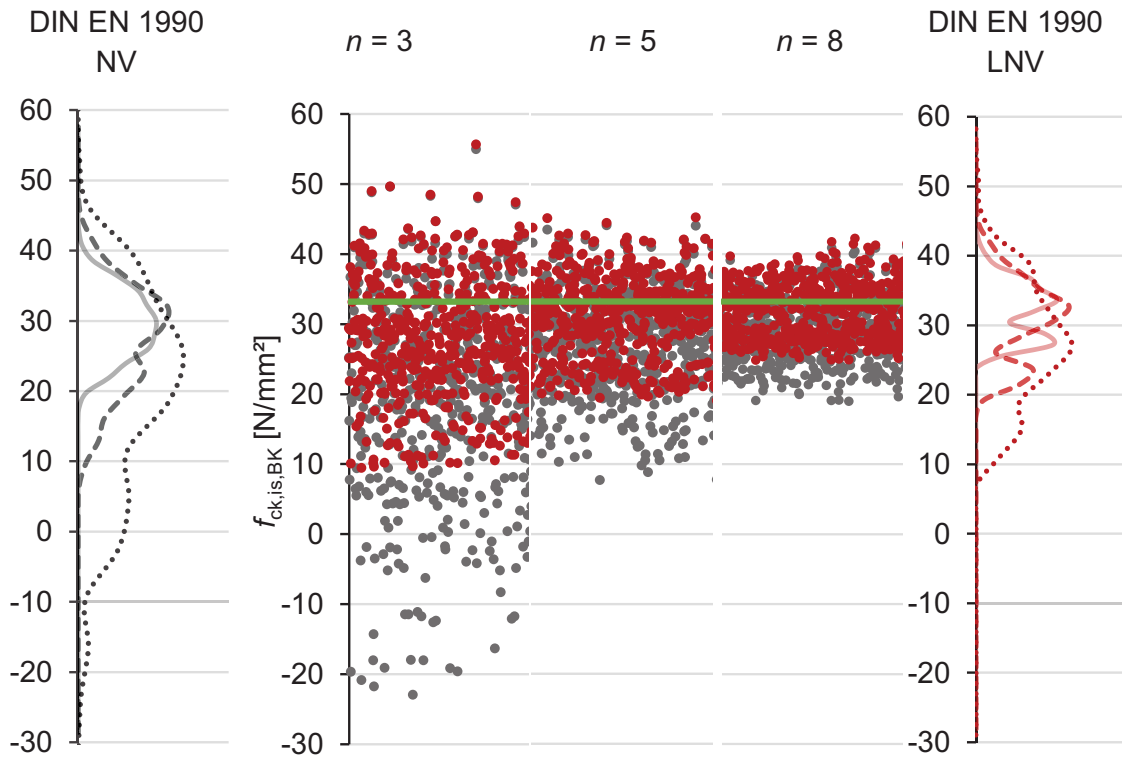


Abb. II. 16 Bauwerk 1: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

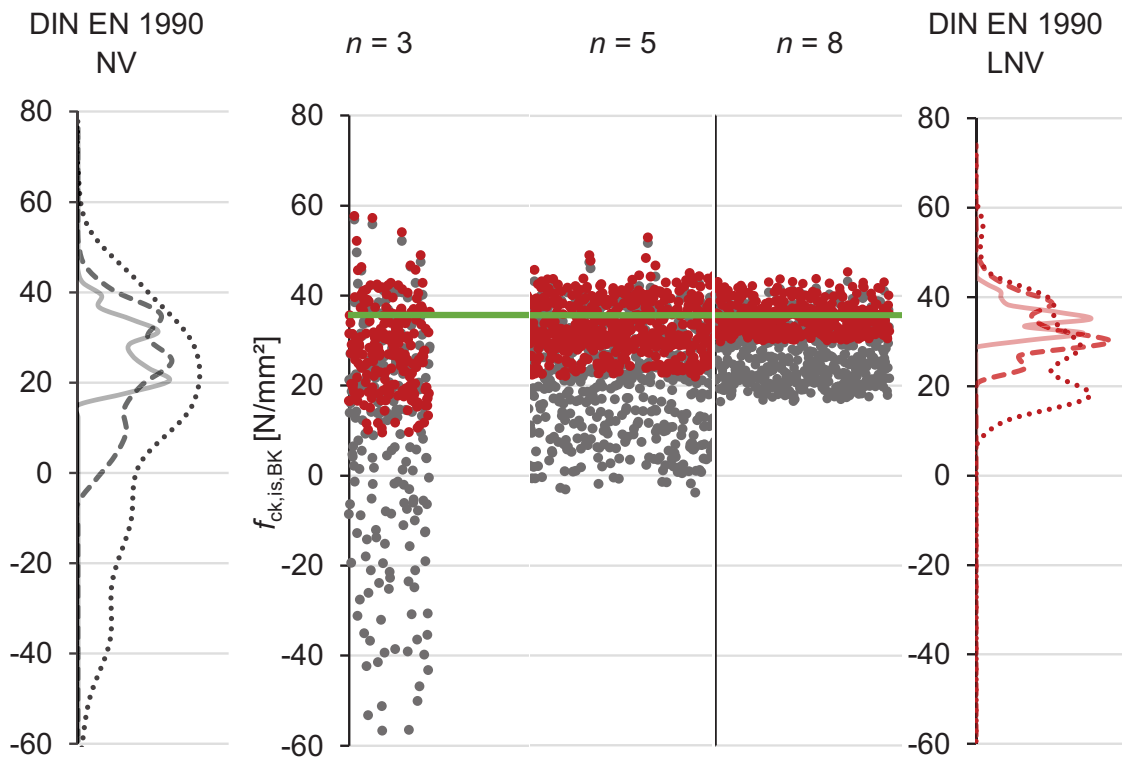


Abb. II. 17 Pfeiler Brücke B270, Langweiler: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

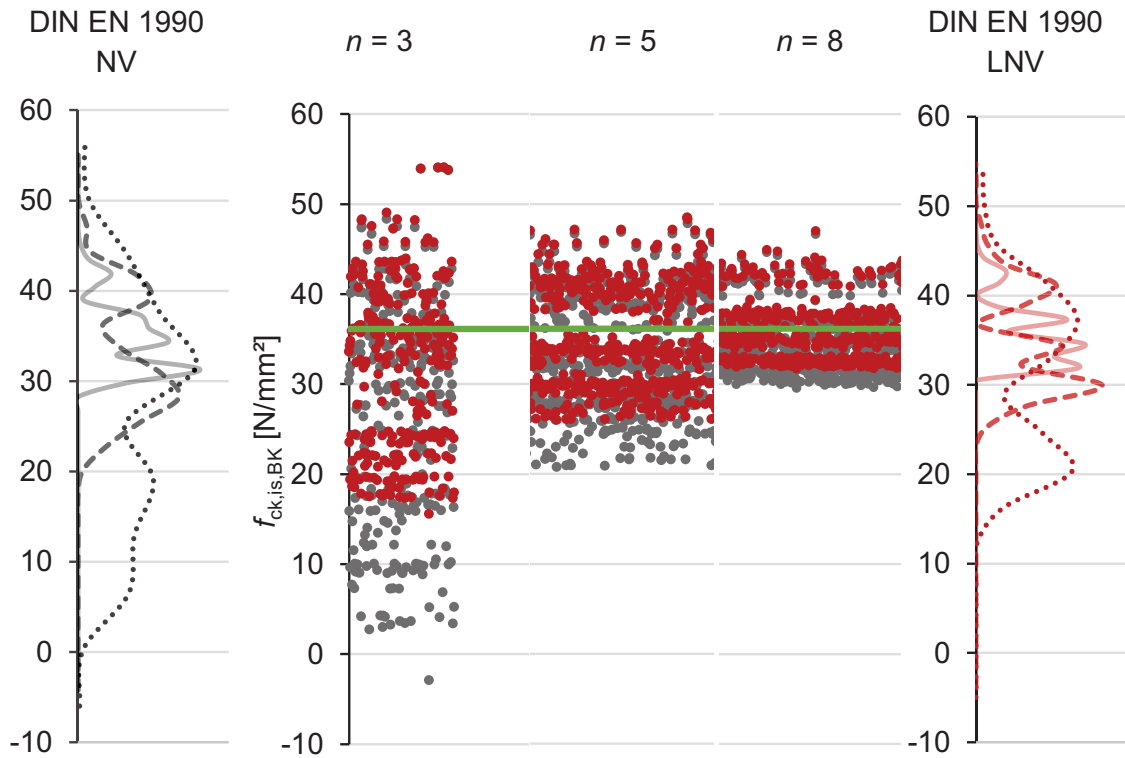


Abb. II. 18 Brücke Autobahnkreuz Mainz-Süd - Auflager, Mainz: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

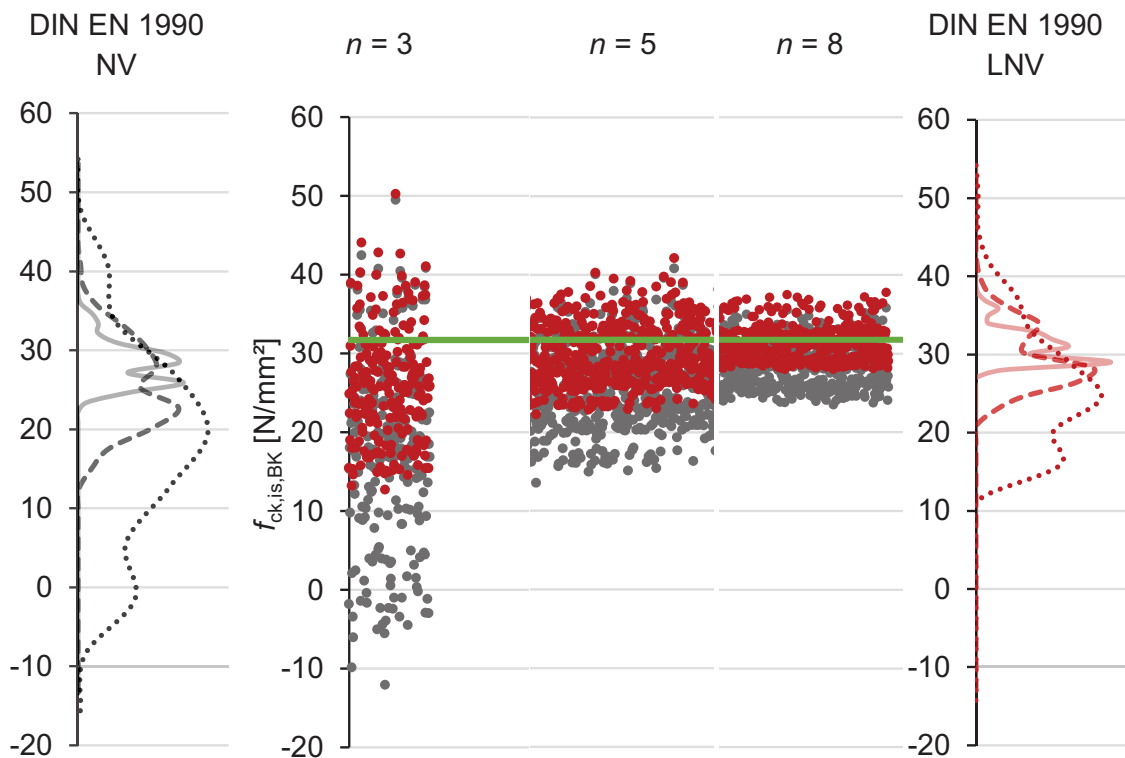


Abb. II. 19 Brücke über den Lockwitzbach, Dresden/Niedersedlitz: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

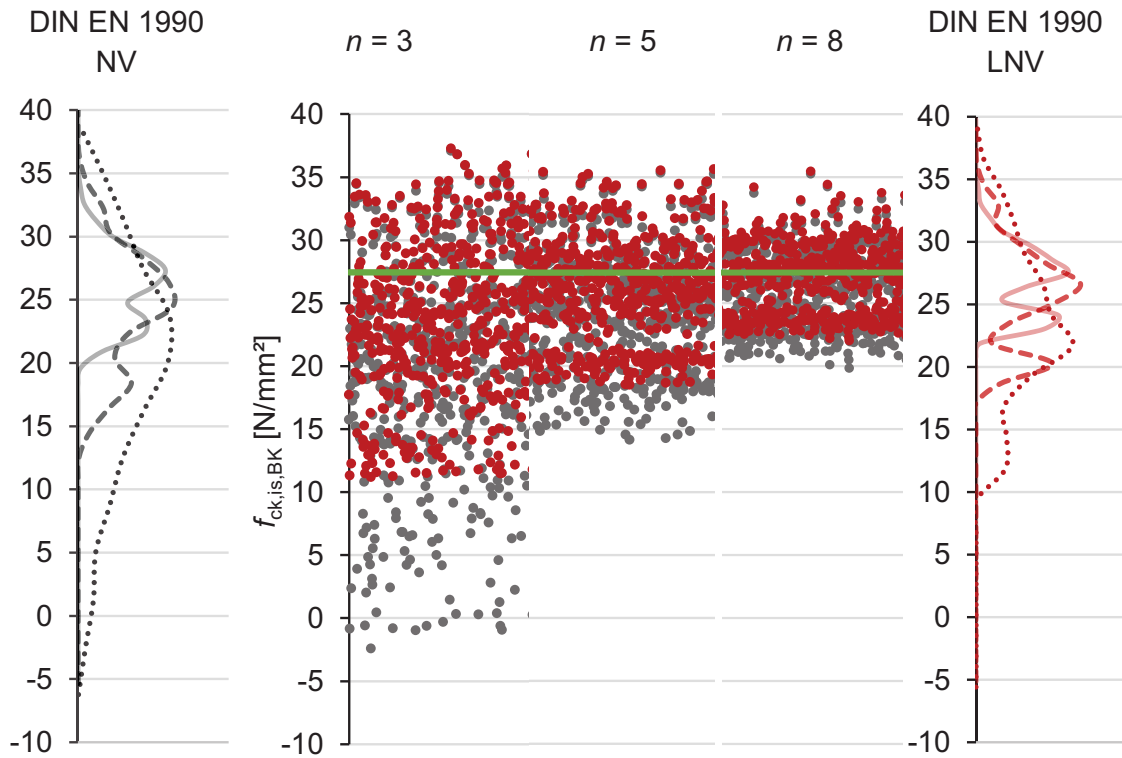


Abb. II. 20 Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

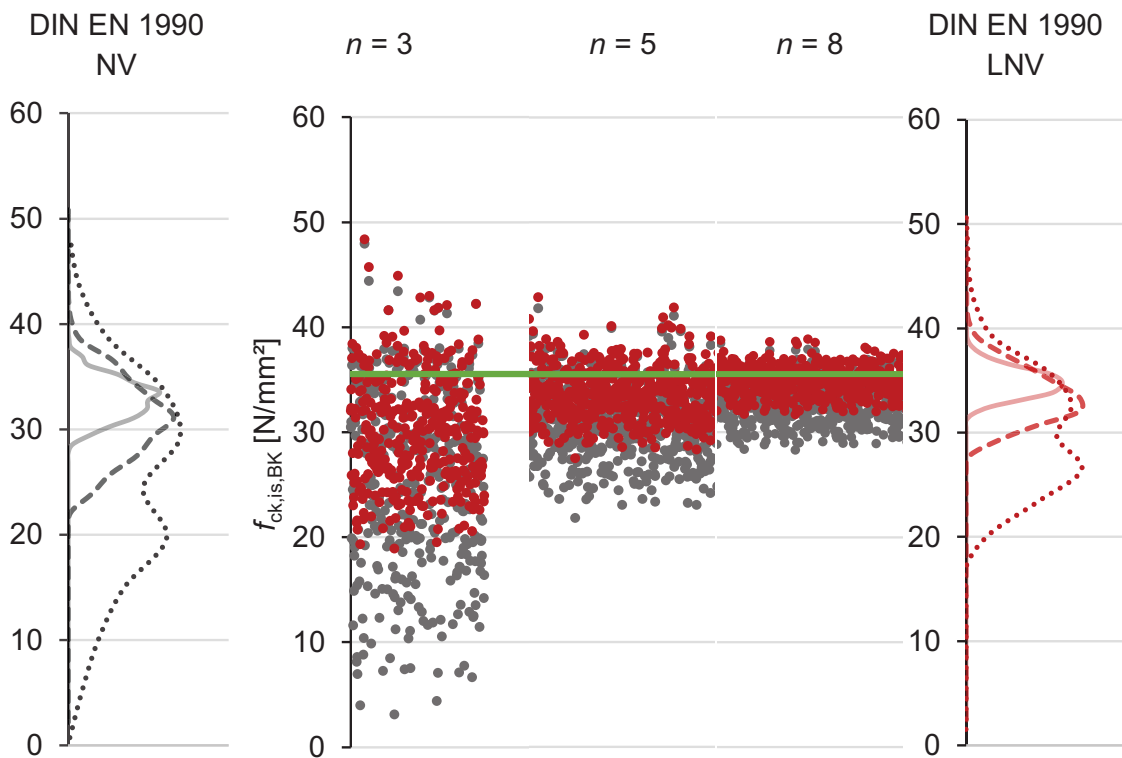


Abb. II. 21 Balkonplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

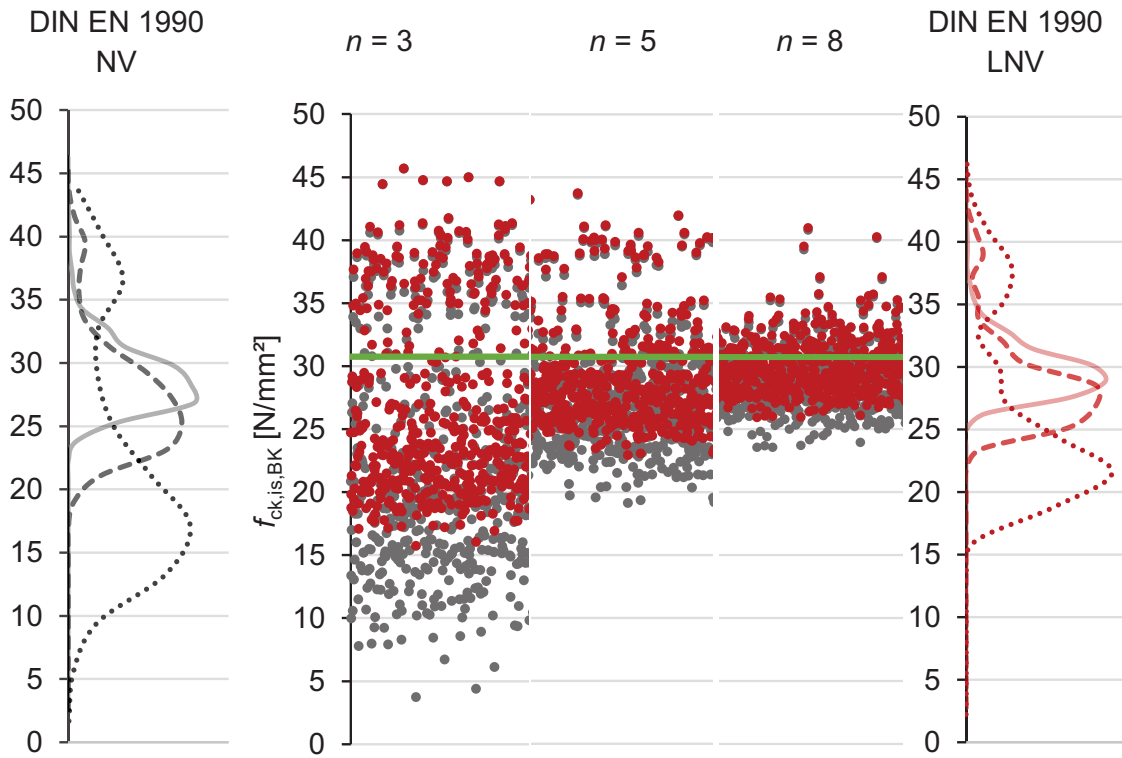


Abb. II. 22 Deckenplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

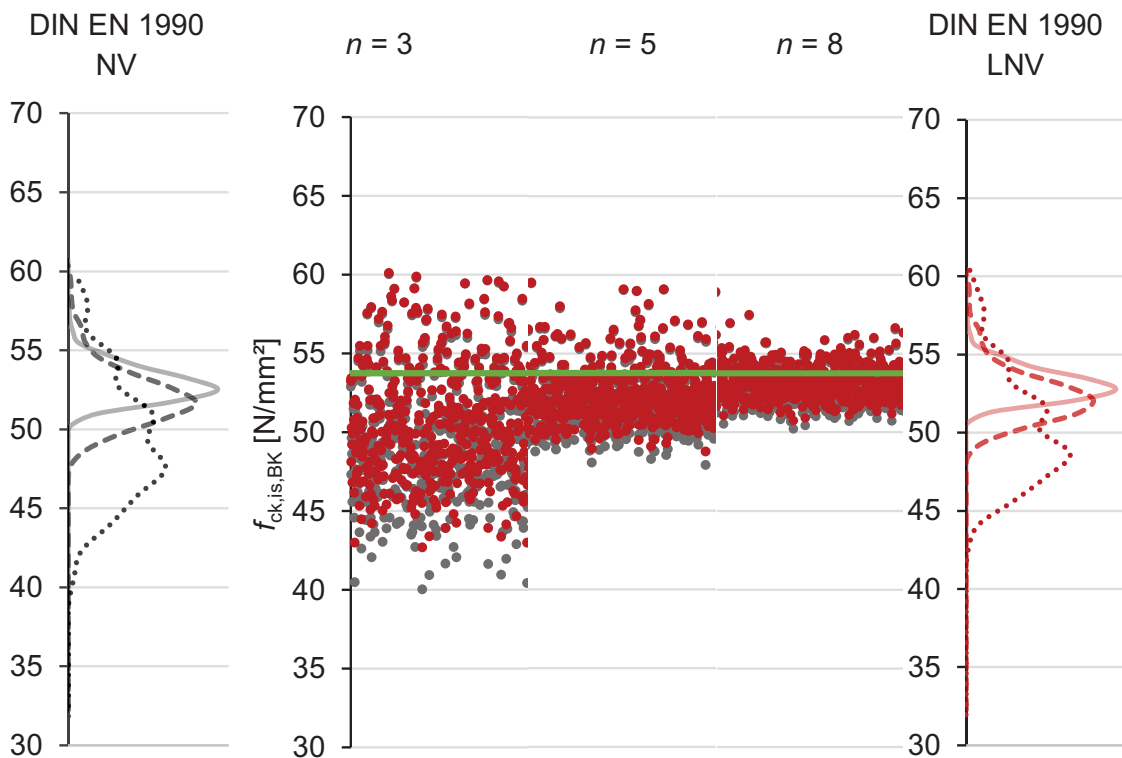


Abb. II. 23 Stützwand, Kusel: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

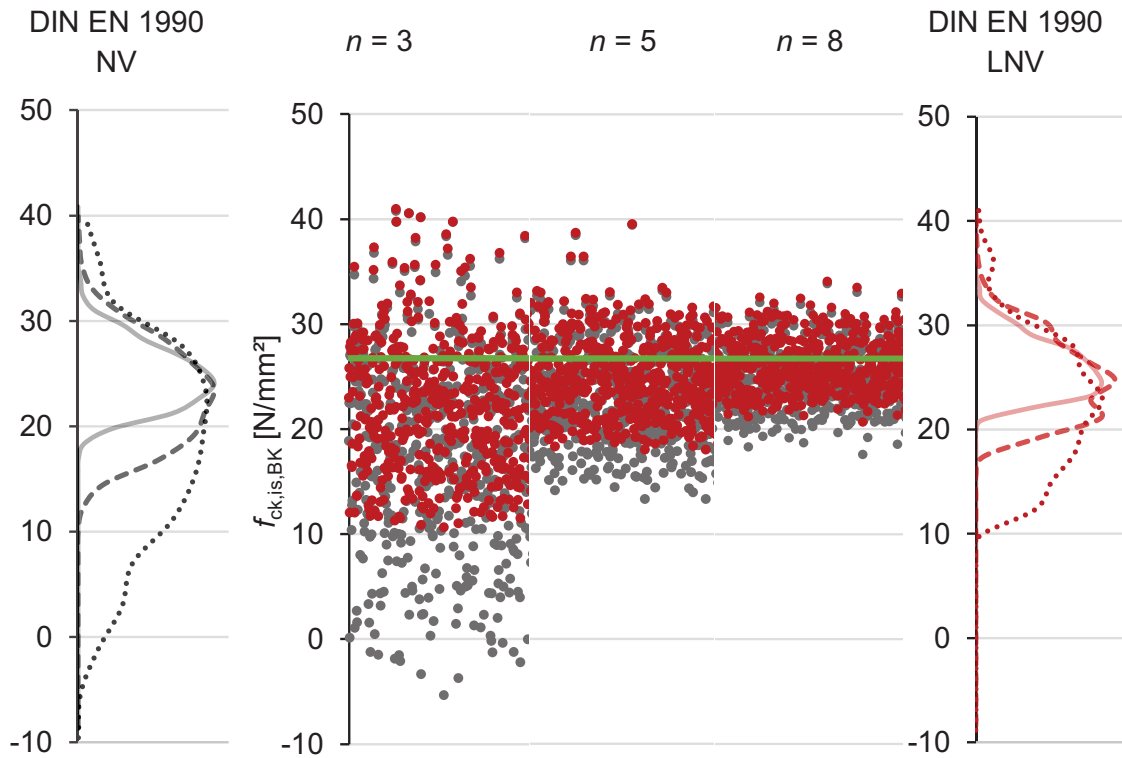


Abb. II. 24 Unterführung A6 Kirchhausen-Biberach (501 A-D), Heilbronn: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

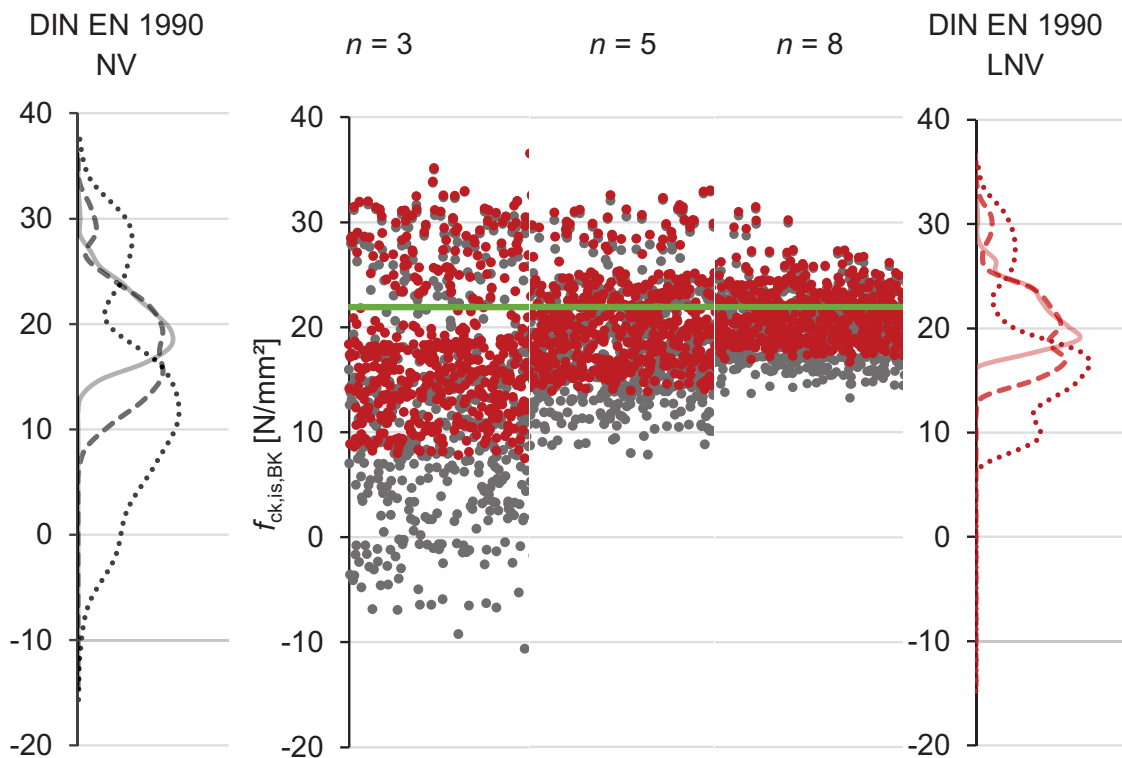


Abb. II. 25 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Heilbronn: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

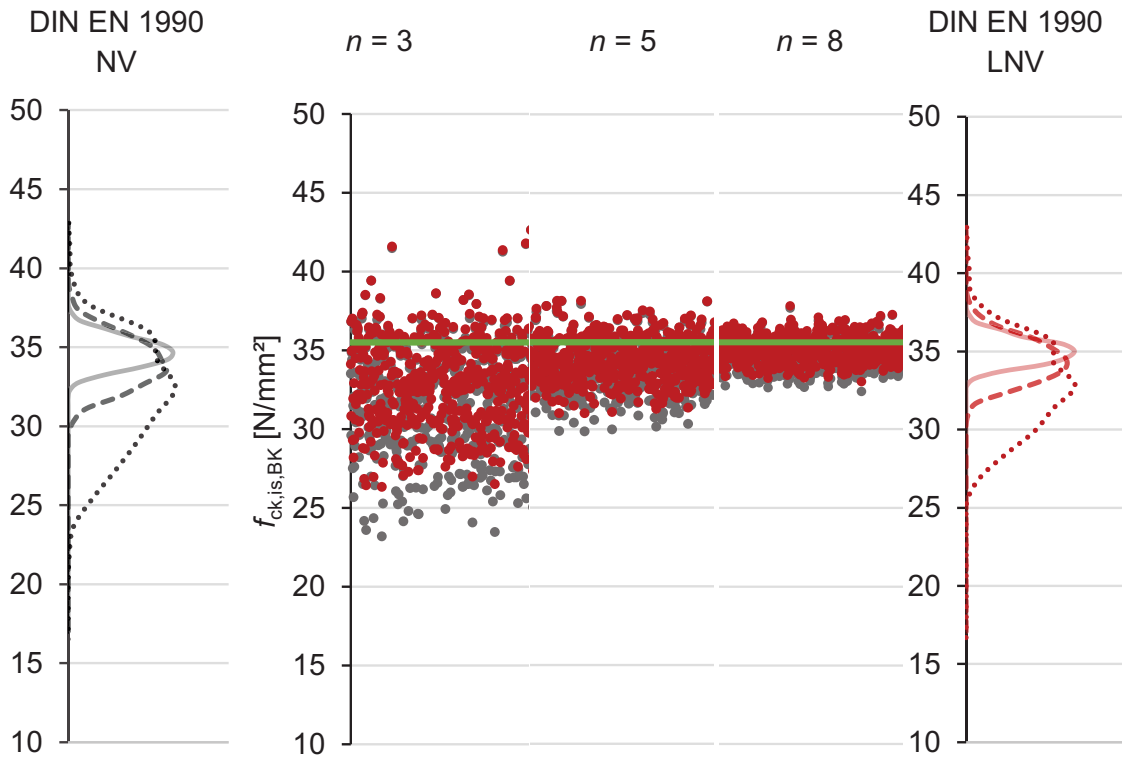


Abb. II. 26 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), Heilbronn: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

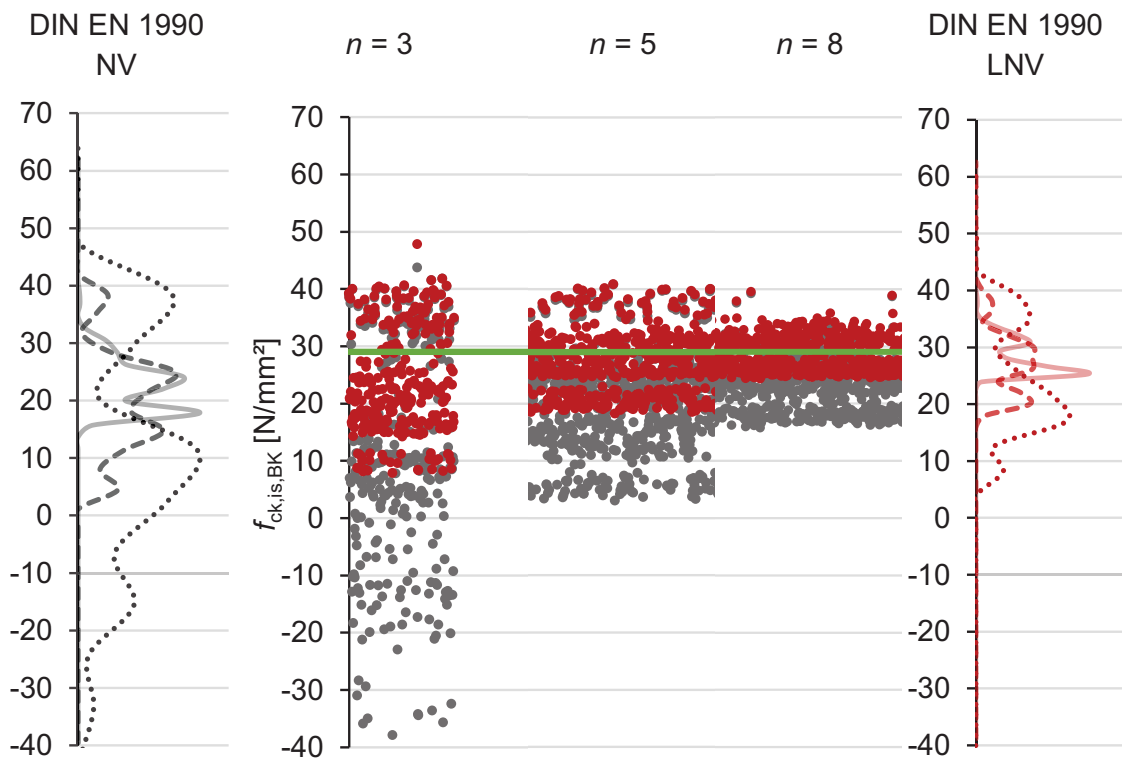


Abb. II. 27 Bauwerk 2: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

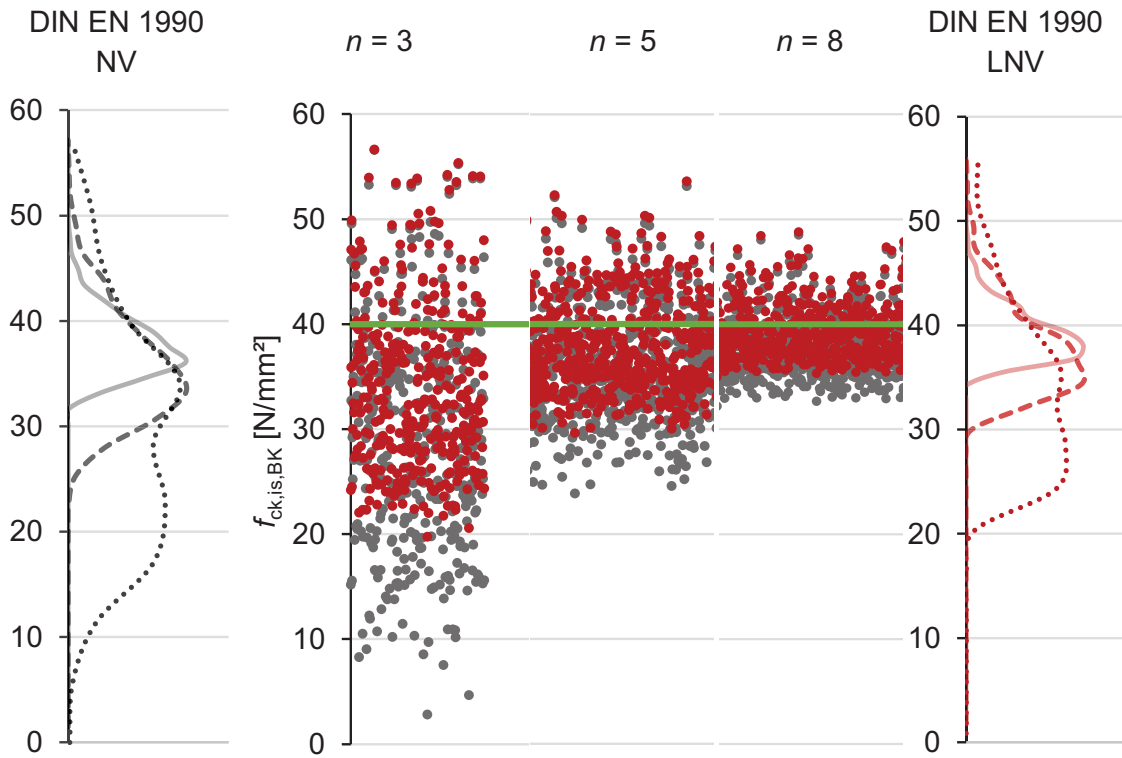


Abb. II. 28 Bauwerk 3: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

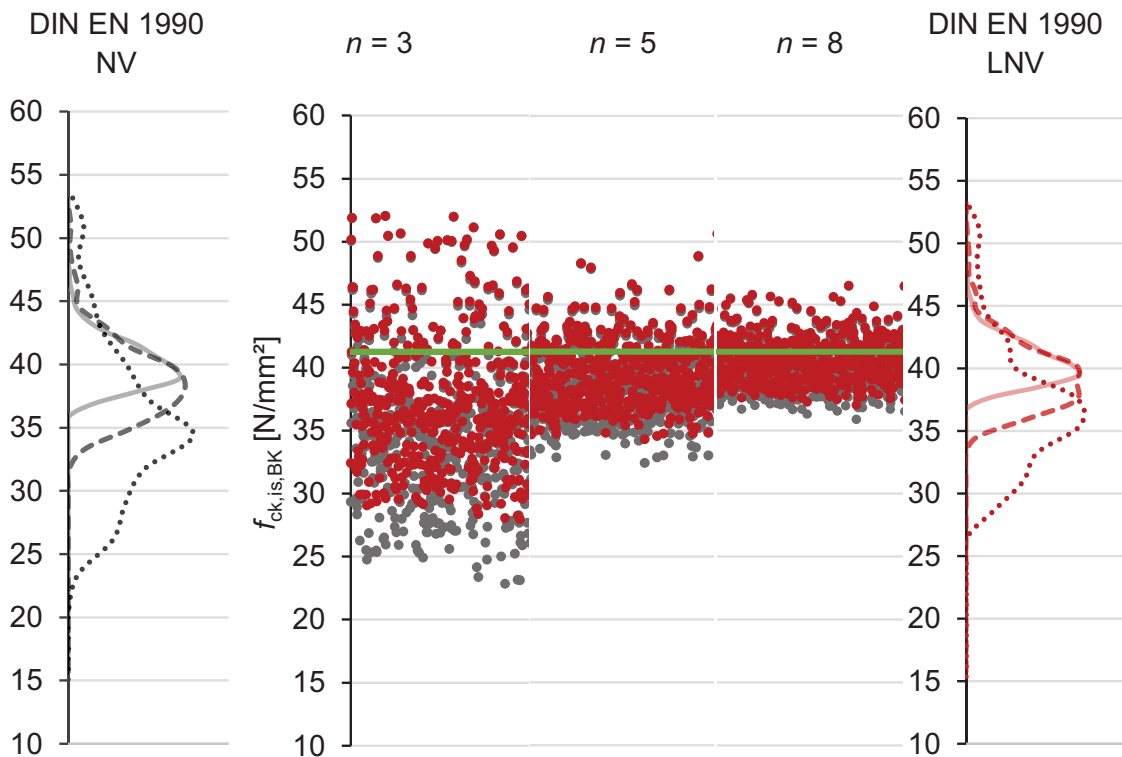


Abb. II. 29 Bauwerk 4: Vergleich DIN EN 1990 – NV und DIN EN 1990 – LNV

Vergleich DIN EN 1990 - logarithmische Normalverteilung und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse einer Bewertung der Teilstichproben mit einer logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* und dem Ansatz B nach *DIN EN 13791:2008-05* gegenübergestellt.

Die mit der logarithmischen Normalverteilung ermittelten Ergebnisse werden durch rote und die mit Ansatz B ermittelten Ergebnisse durch blaue Punkte dargestellt.

Zusätzlich ist die empirische Verteilungsdichte jeweils für $n = 3$, $n = 5$ und $n = 8$ abgebildet.

Die bei Abb. II. 30 beschriebene Legende ist in gleicher Form auch für die Abbildungen Abb. II. 31 bis Abb. II. 58 gültig.

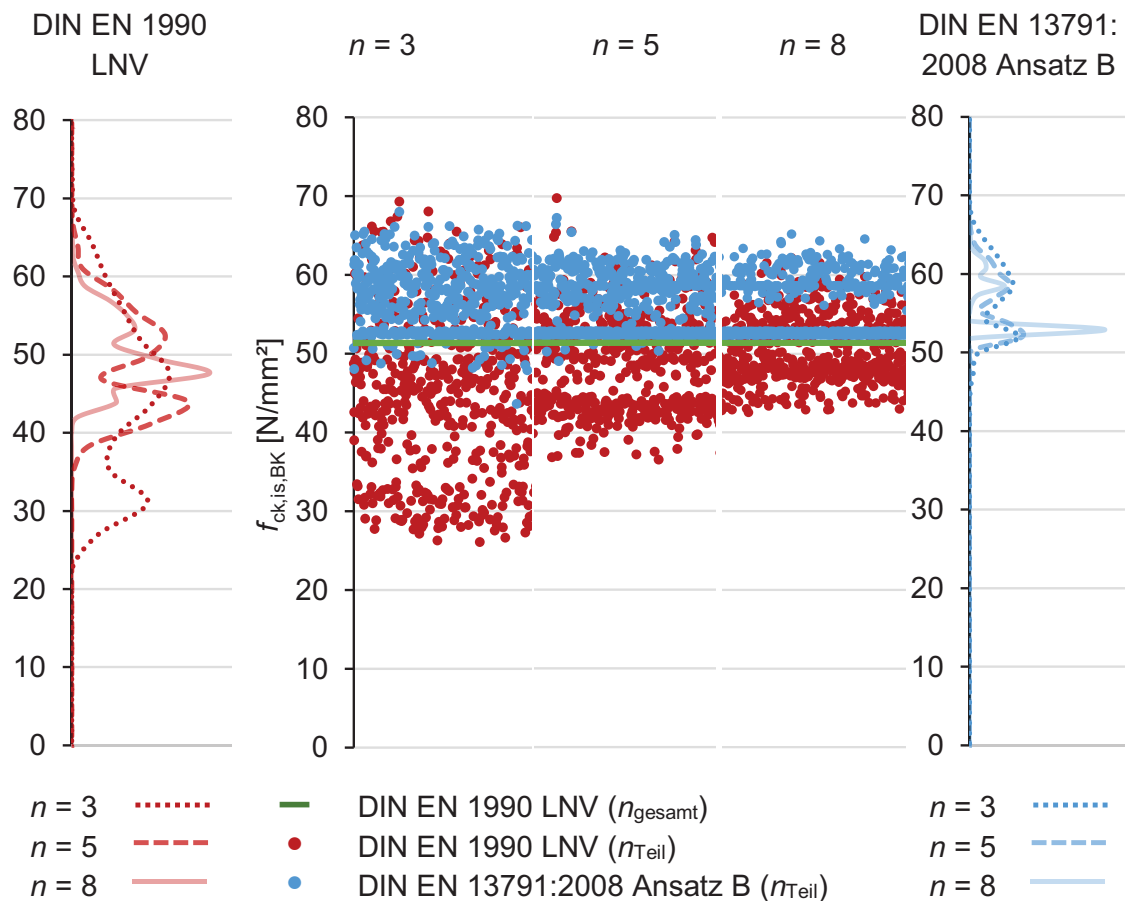


Abb. II. 30 Tropfkörper Kläranlage Blümeltal, Pirmasens: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

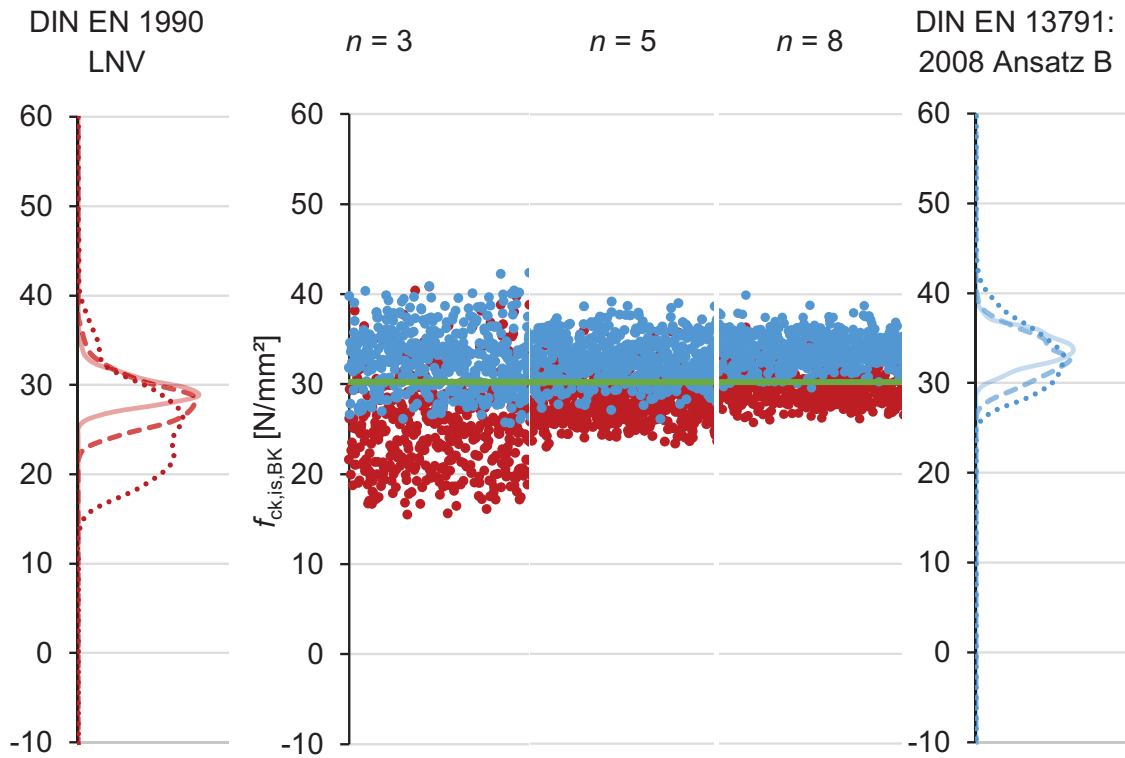


Abb. II. 31 Autobahnunterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

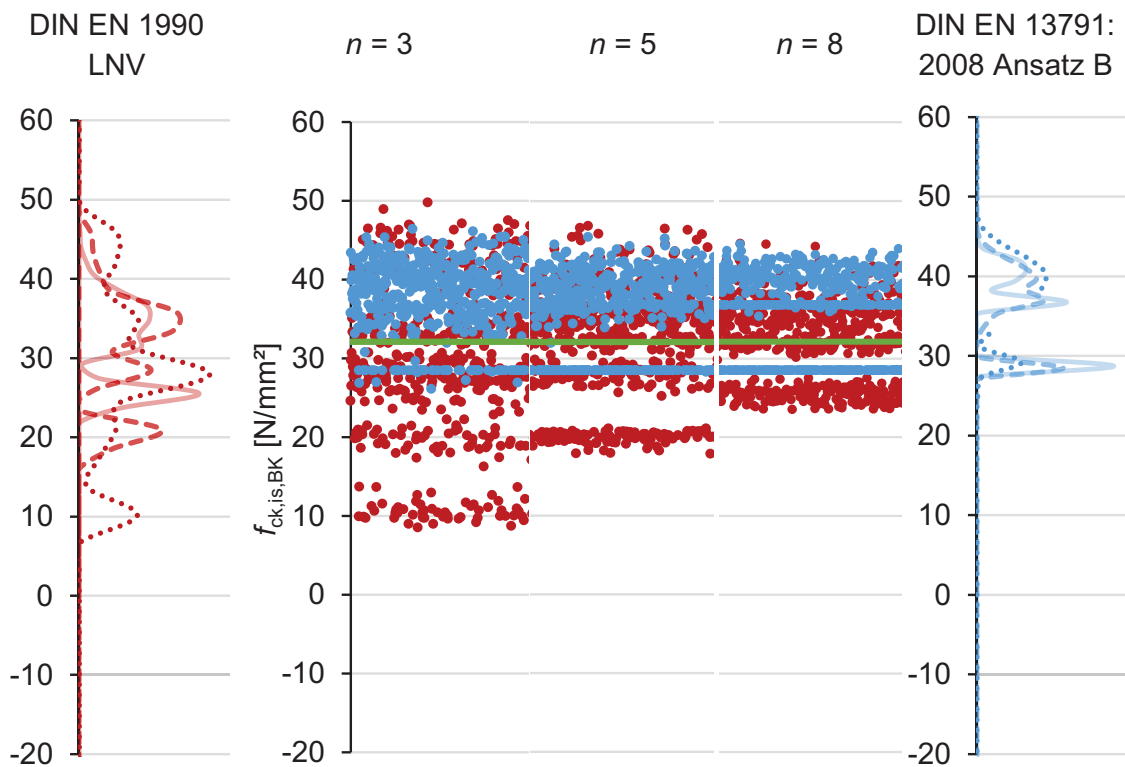


Abb. II. 32 Autobahnunterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

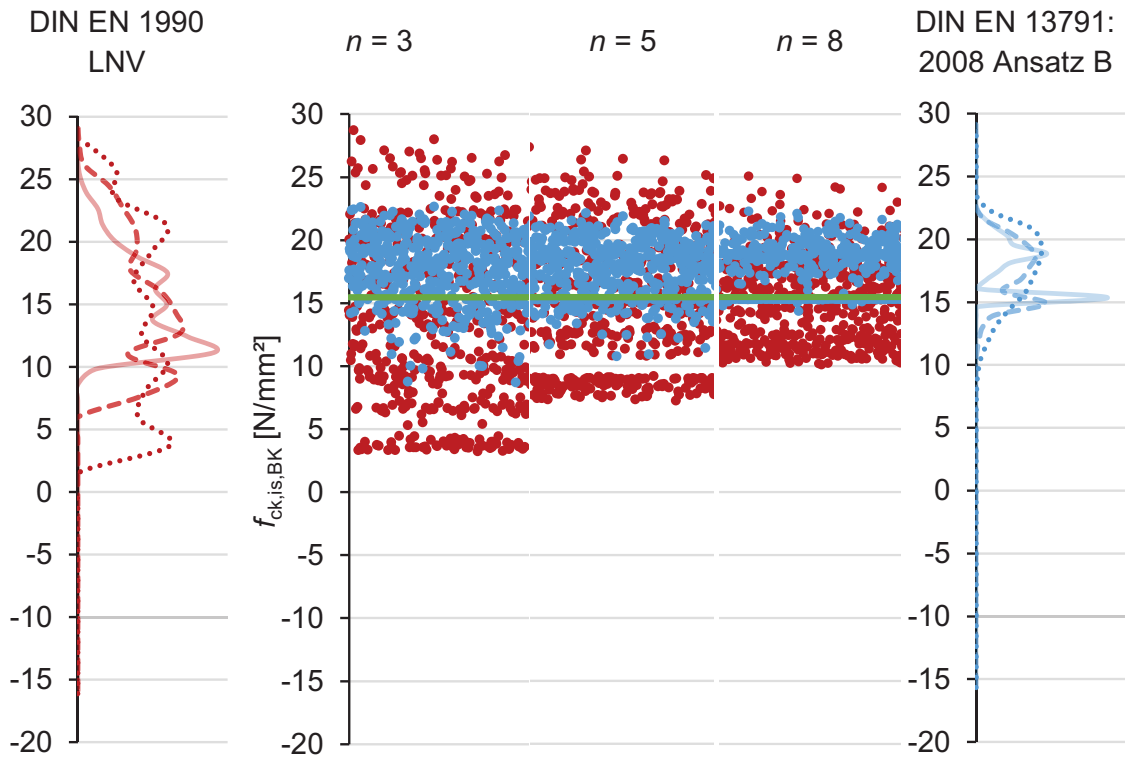


Abb. II. 33 Umspannwerk, Sulzbach: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

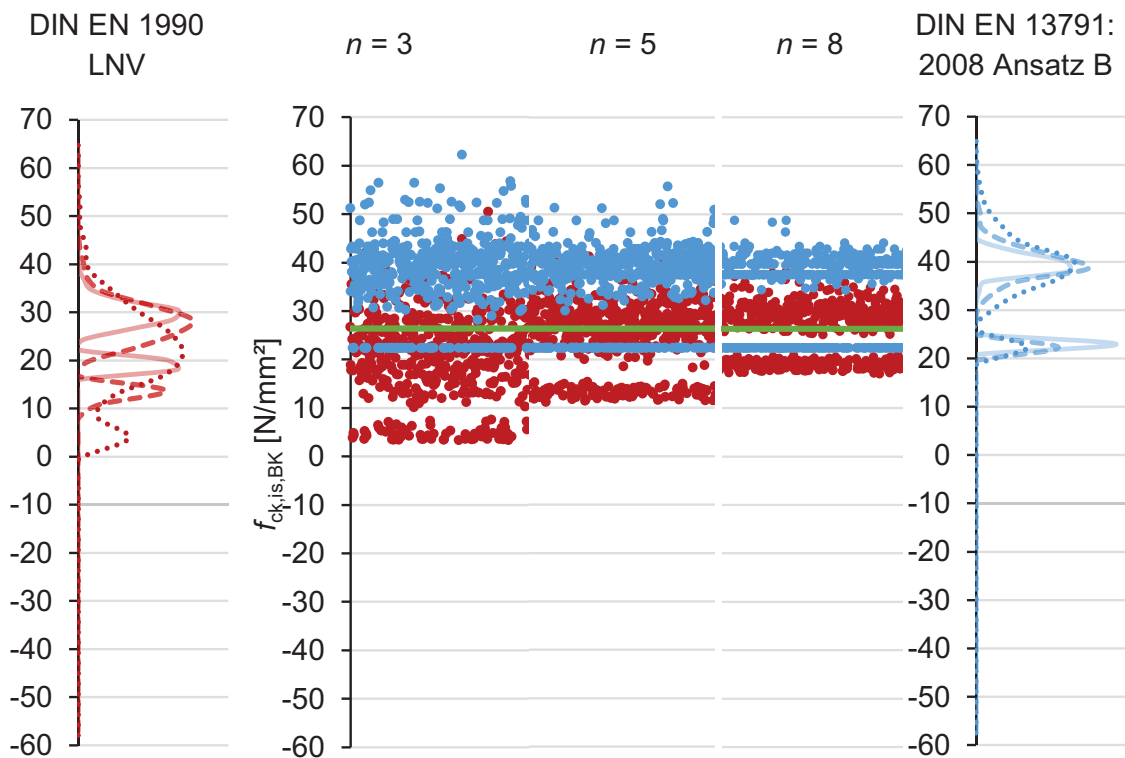


Abb. II. 34 Hochwasserschutzwand, Dormagen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

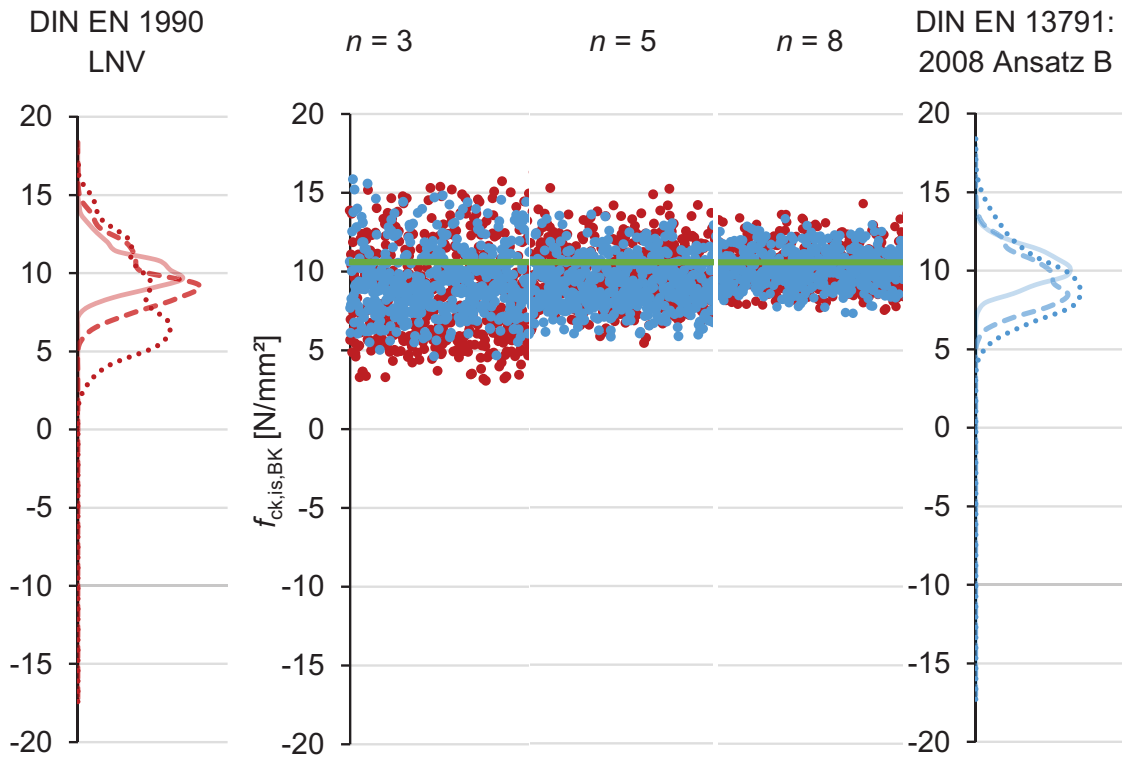


Abb. II. 35 Schwergewichtswand, Dormagen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

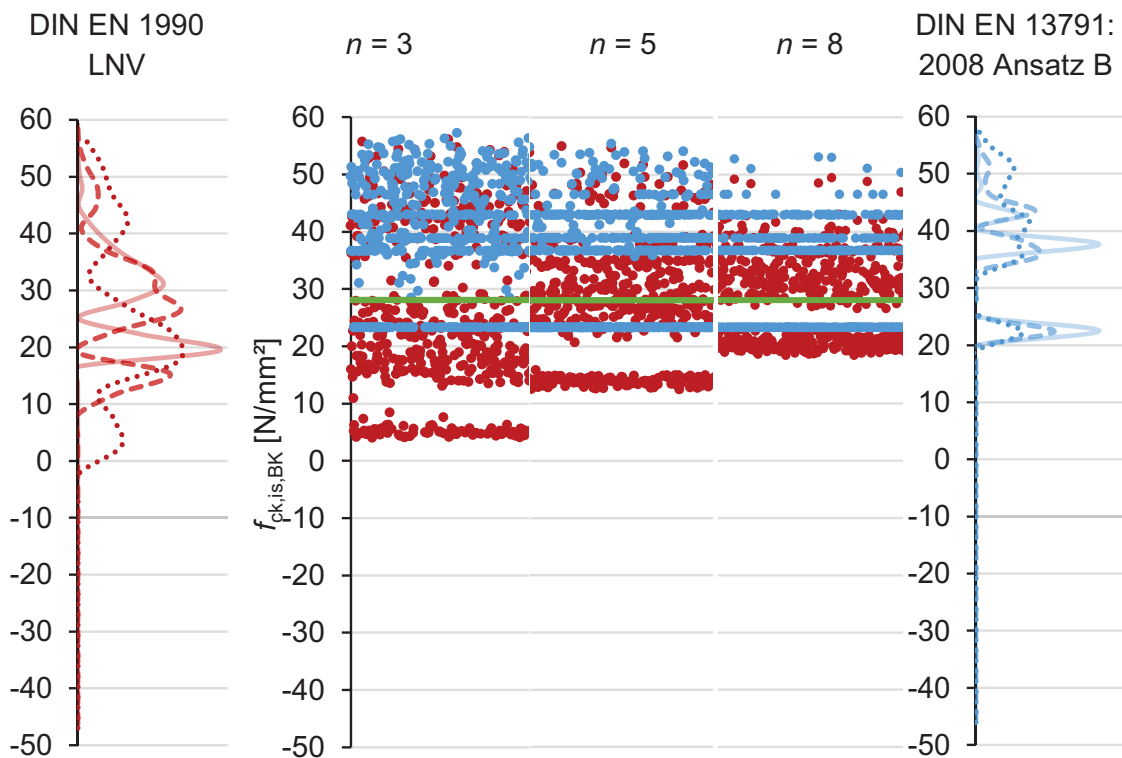


Abb. II. 36 Bodenplatte ACO, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

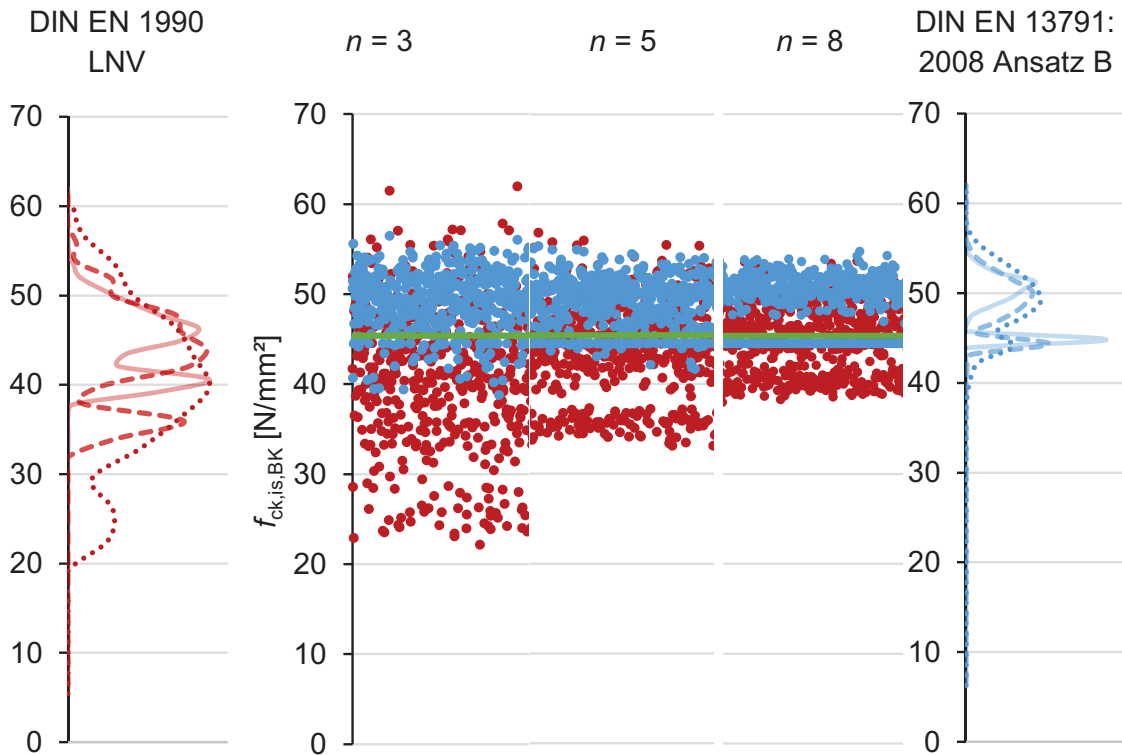


Abb. II. 37 Stützwand Ohmbach Abschnitt I, Pirmasens: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

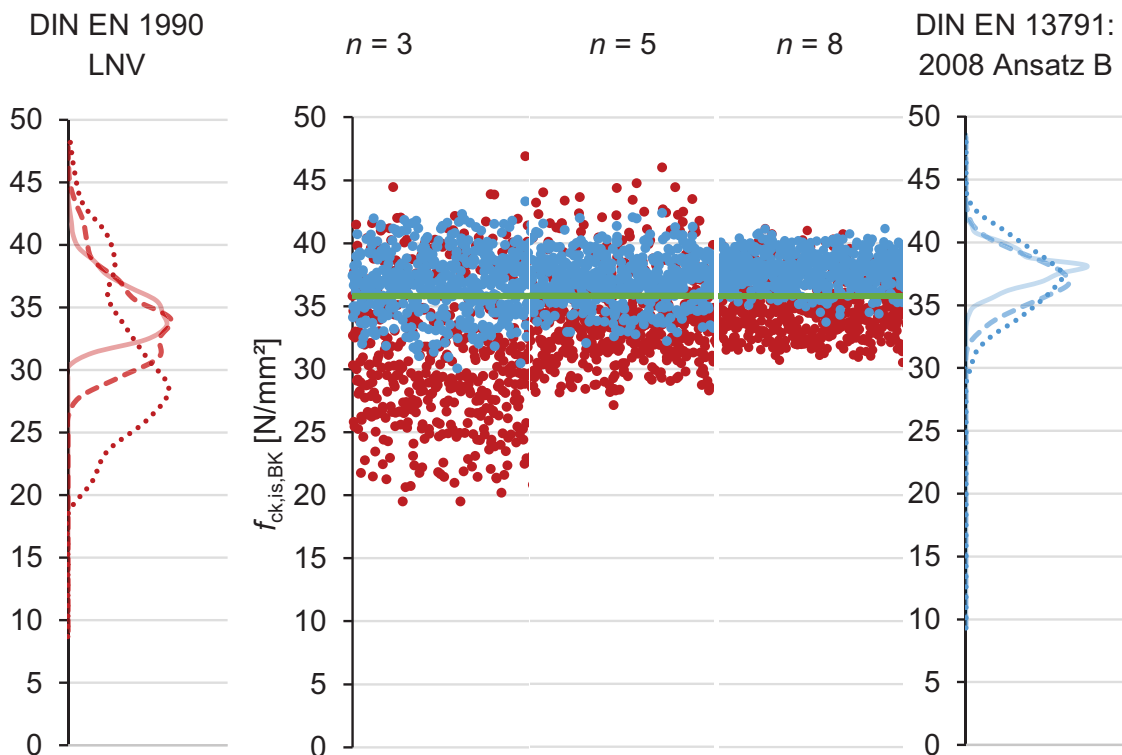


Abb. II. 38 Stützwand Ohmbach Abschnitt II, Pirmasens: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

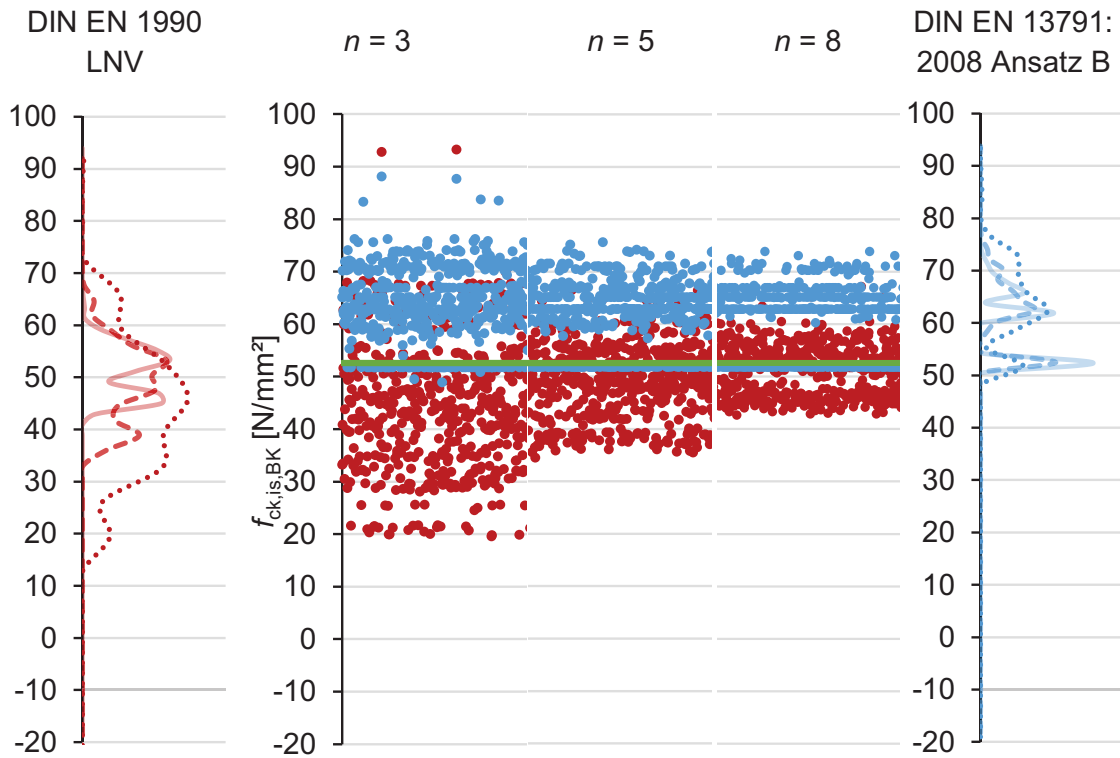


Abb. II. 39 Weserbrücke, Hannoversch Münden: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

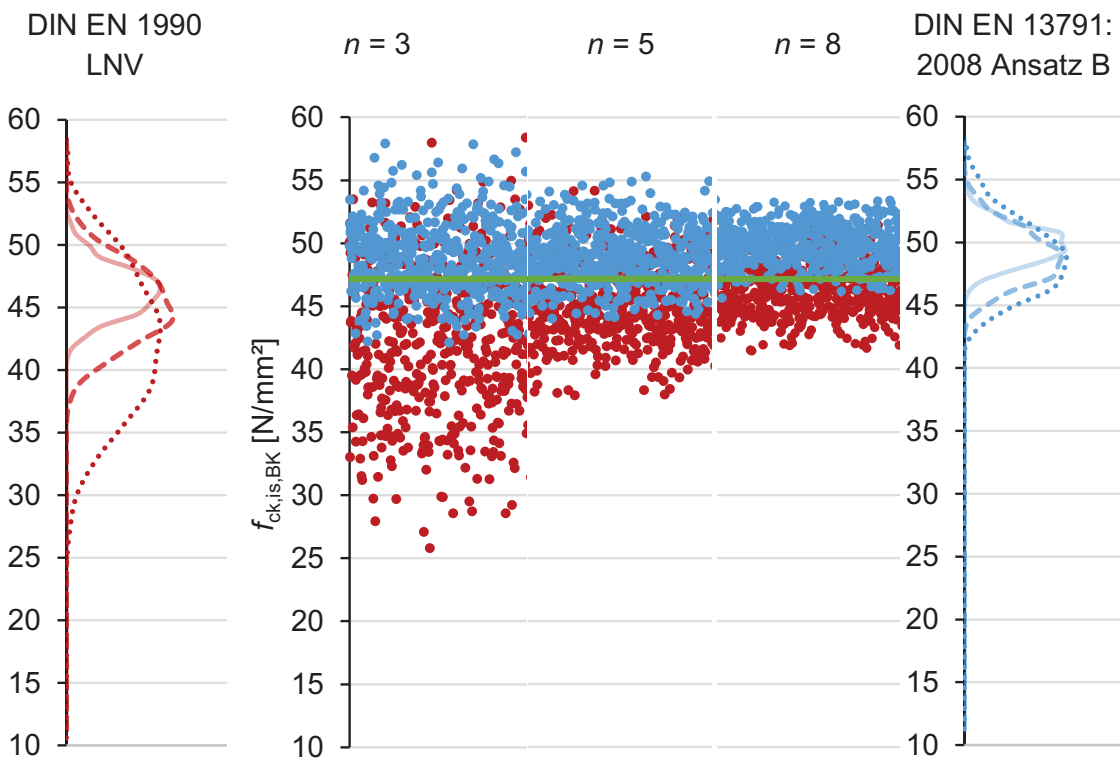


Abb. II. 40 Lahntalbrücke, Limburg: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

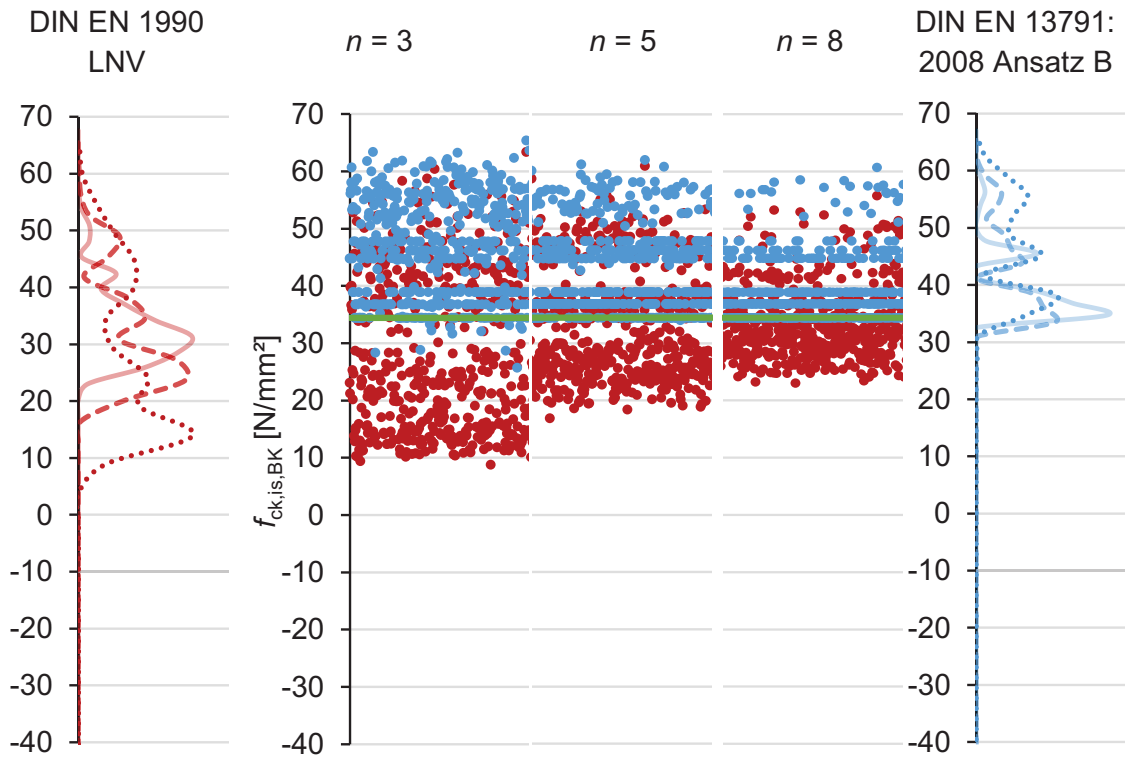


Abb. II. 41 Lautertalbrücke Widerlager, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

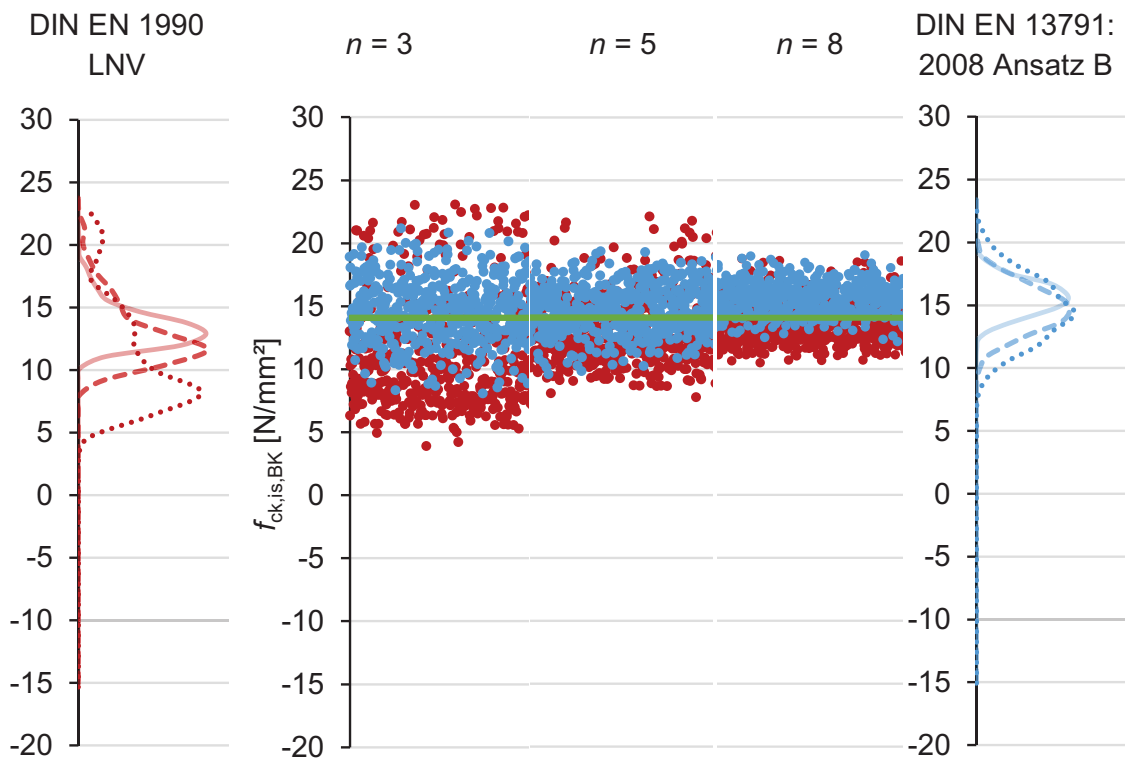


Abb. II. 42 Lautertalbrücke Fahrbahn untere Schicht, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

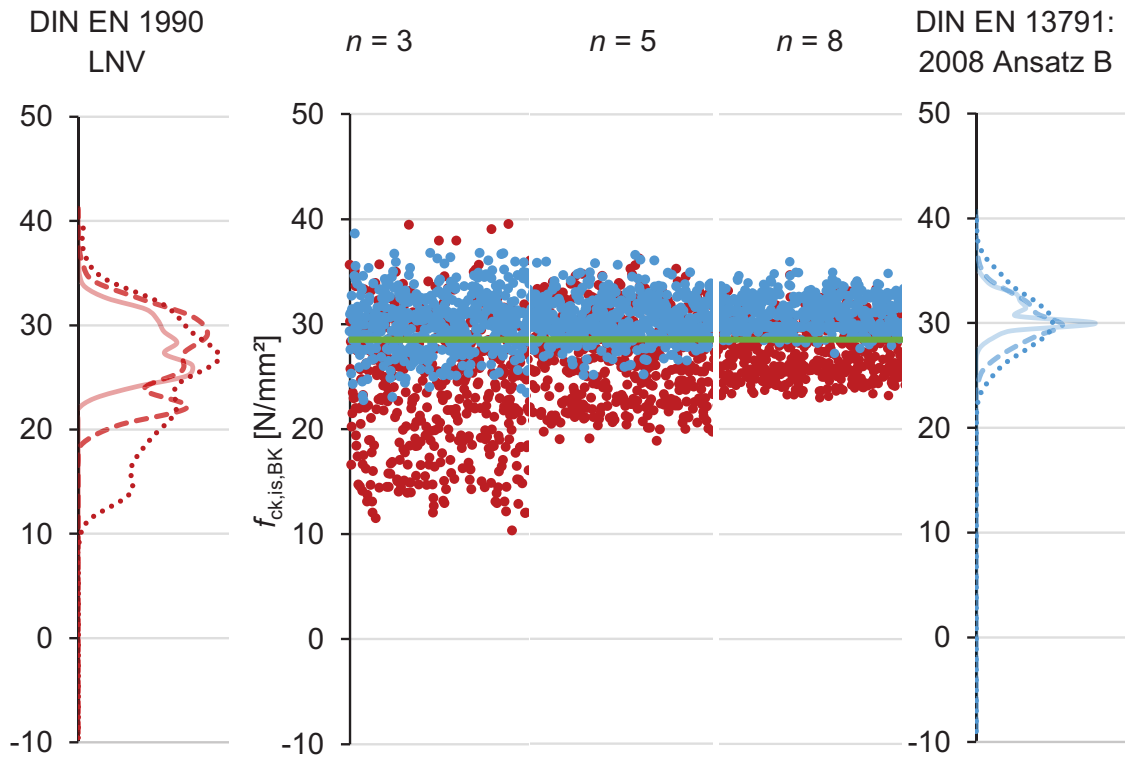


Abb. II. 43 Decke Wohnblock, Ludwigshafen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

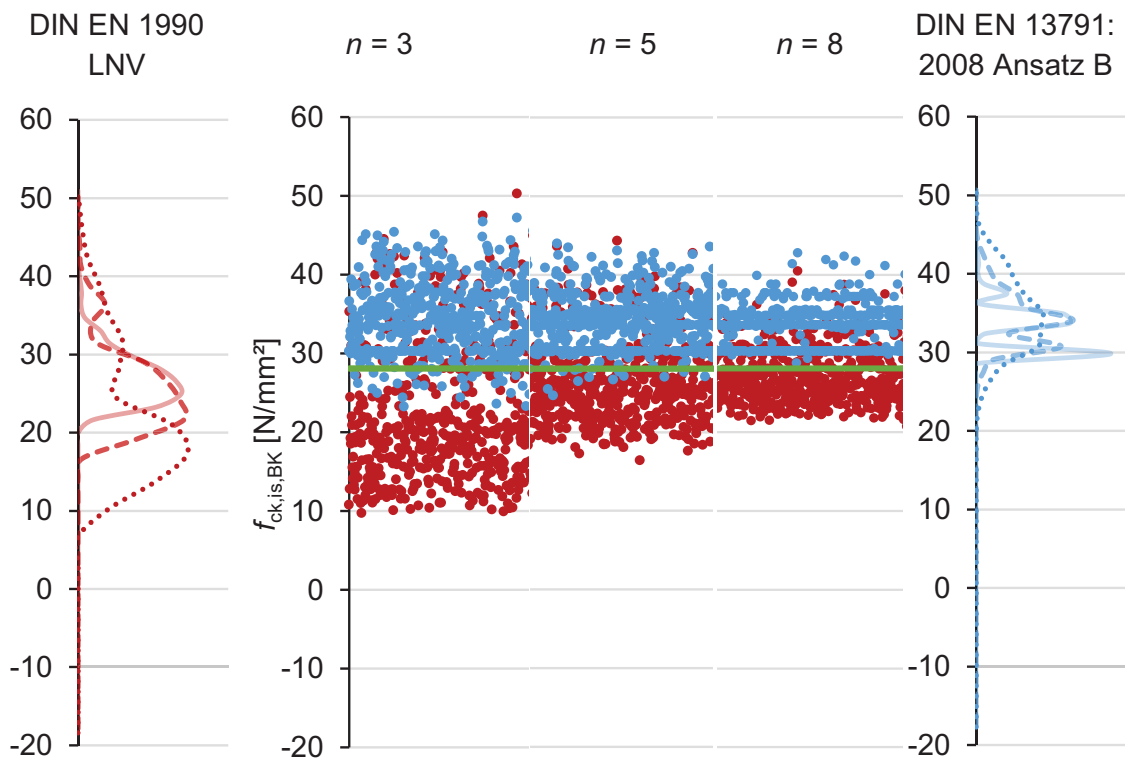


Abb. II. 44 Wand Technische Werke Ludwigshafen, Ludwigshafen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

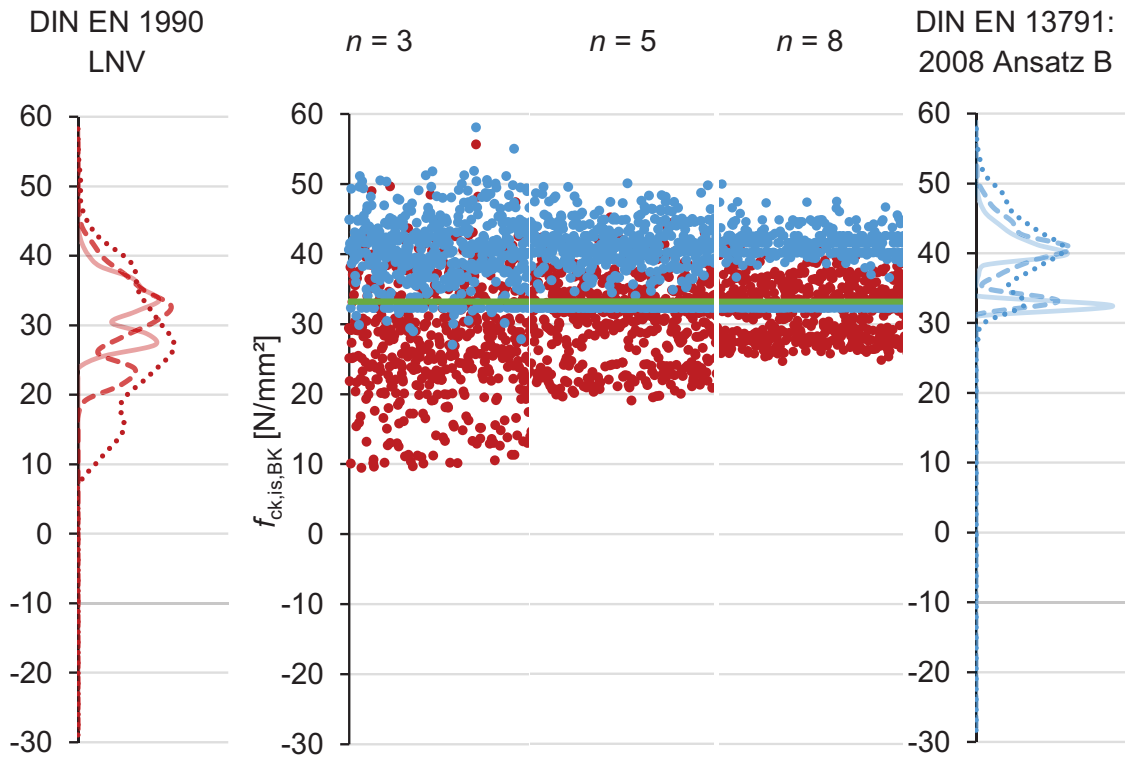


Abb. II. 45 Bauwerk 1: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

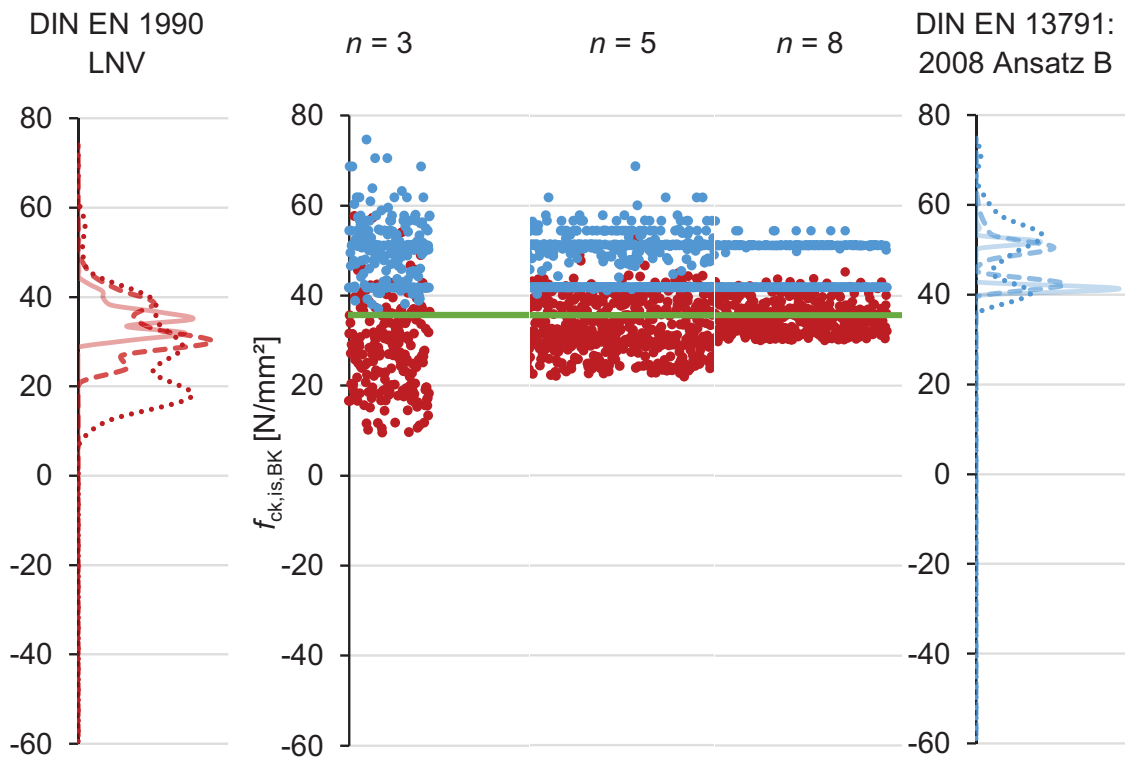


Abb. II. 46 Pfeiler Brücke B270, Langweiler: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

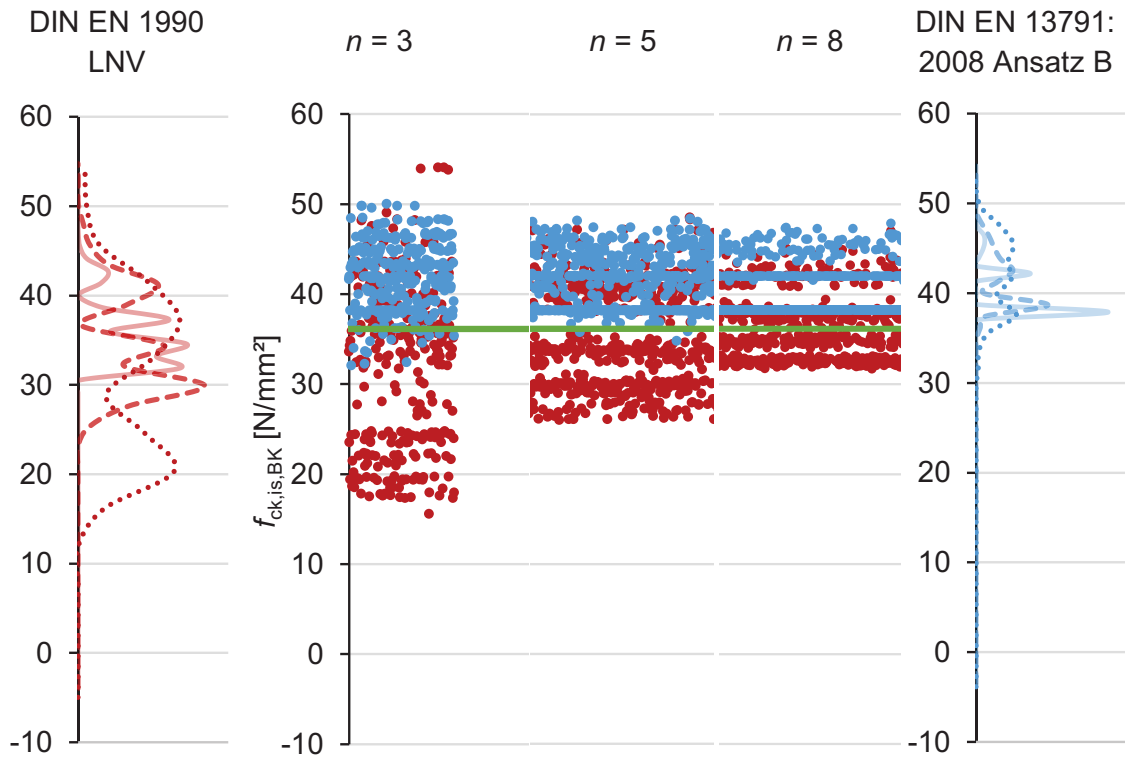


Abb. II. 47 Brücke Autobahnkreuz Mainz-Süd - Auflager, Mainz: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

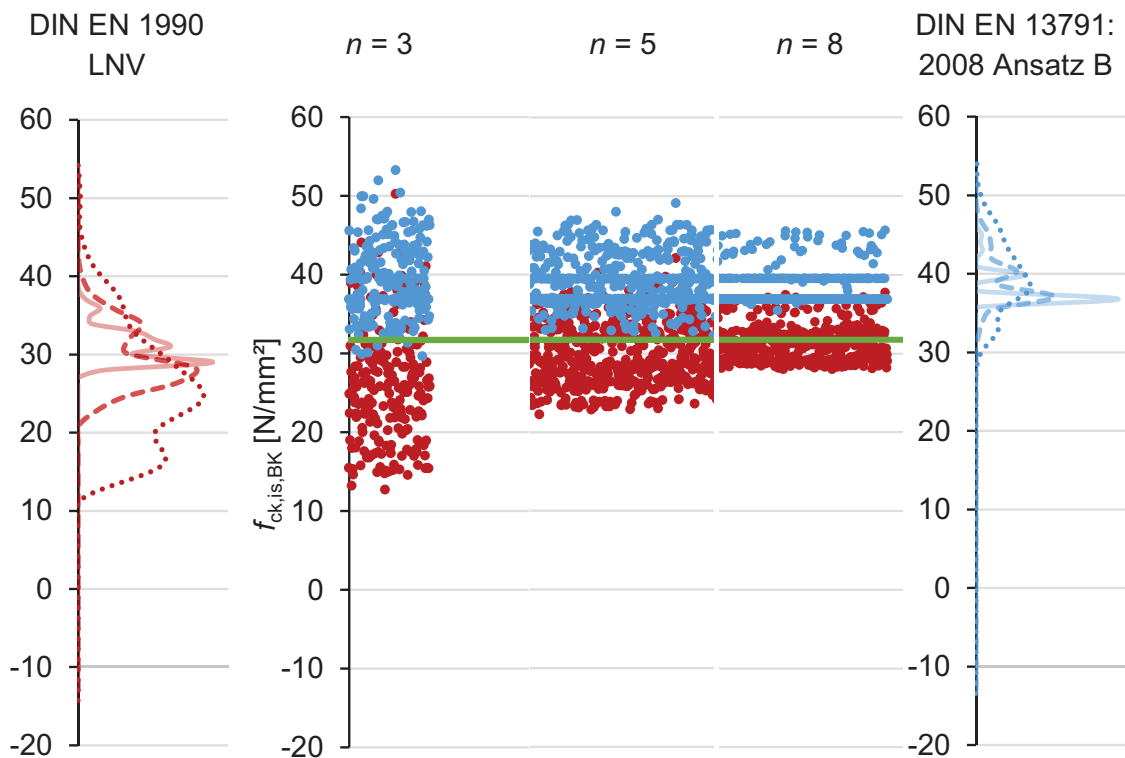


Abb. II. 48 Brücke über den Lockwitzbach, Dresden/Niedersedlitz: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

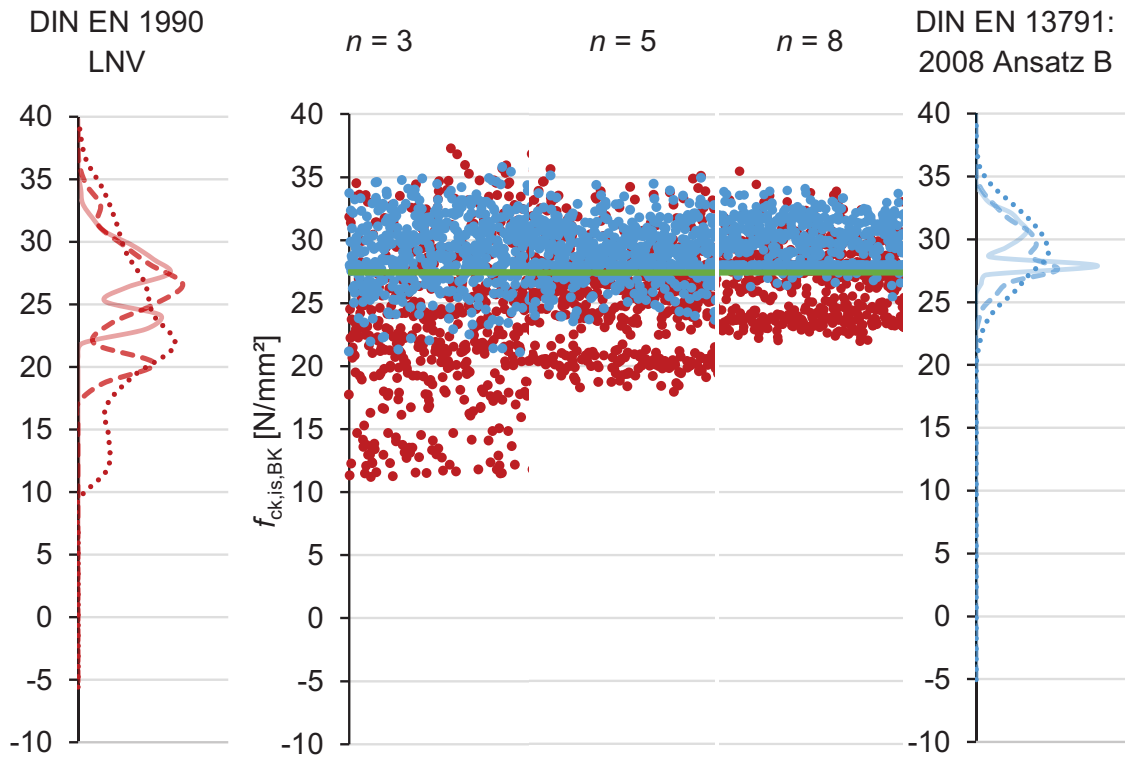


Abb. II. 49 Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

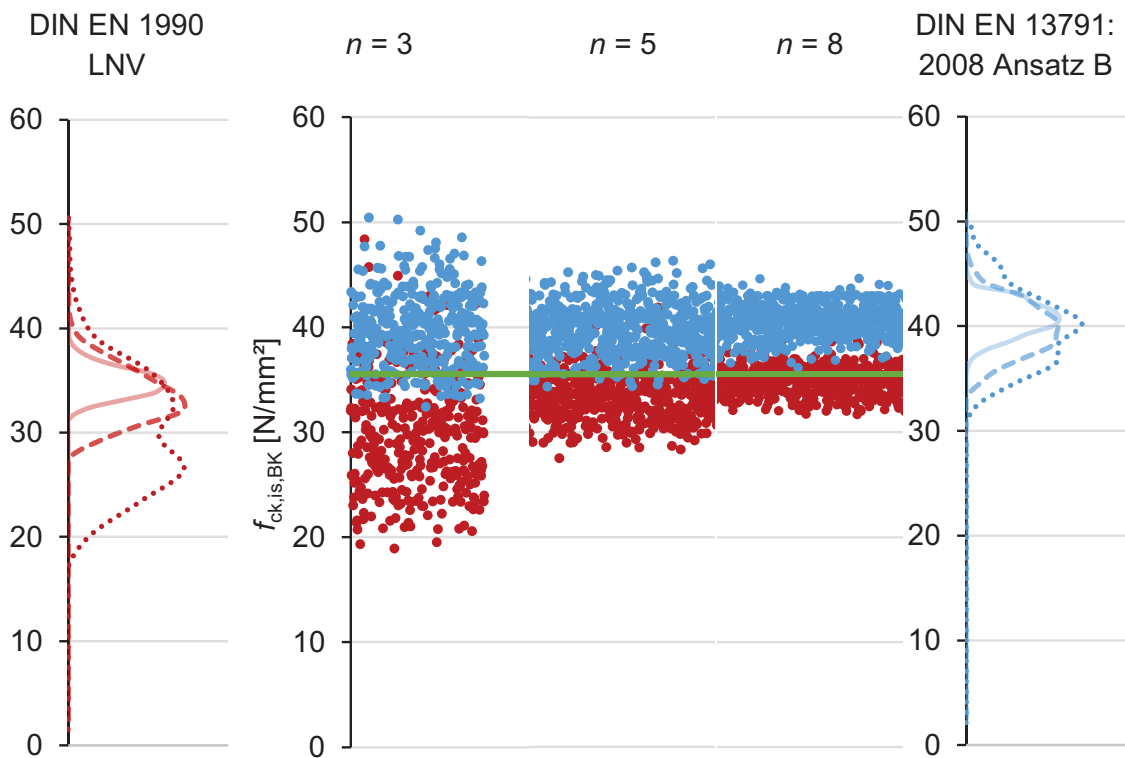


Abb. II. 50 Balkonplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

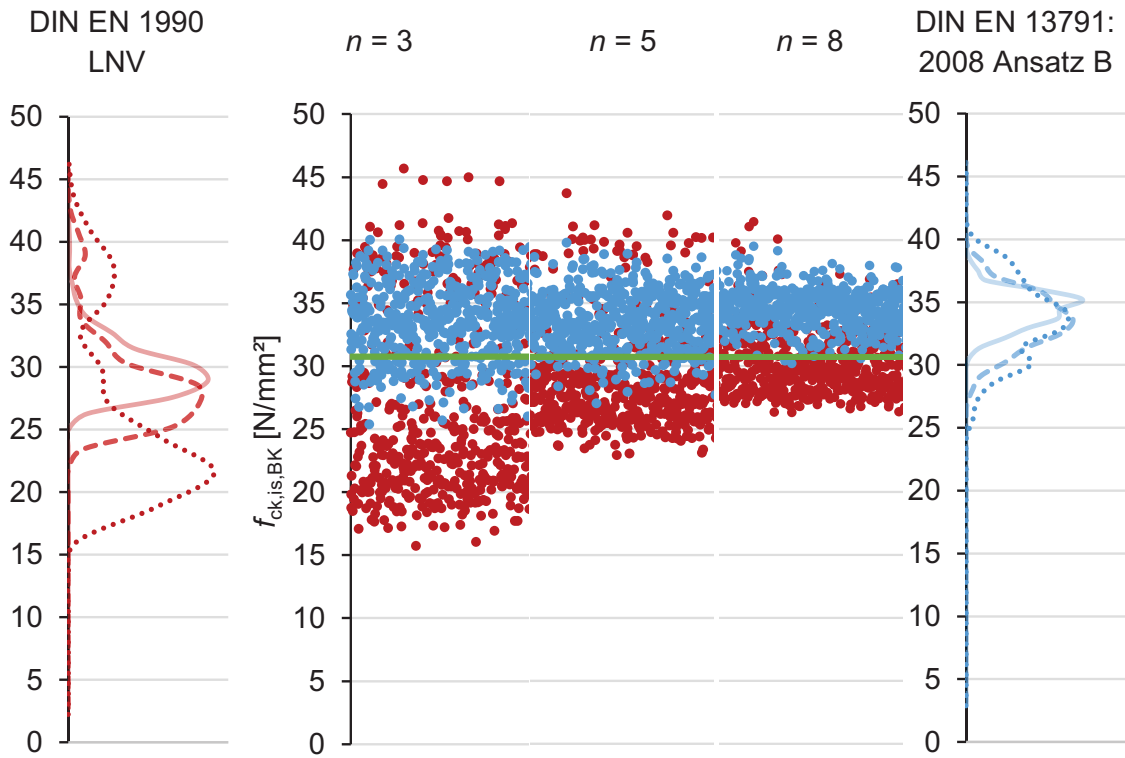


Abb. II. 51 Deckenplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

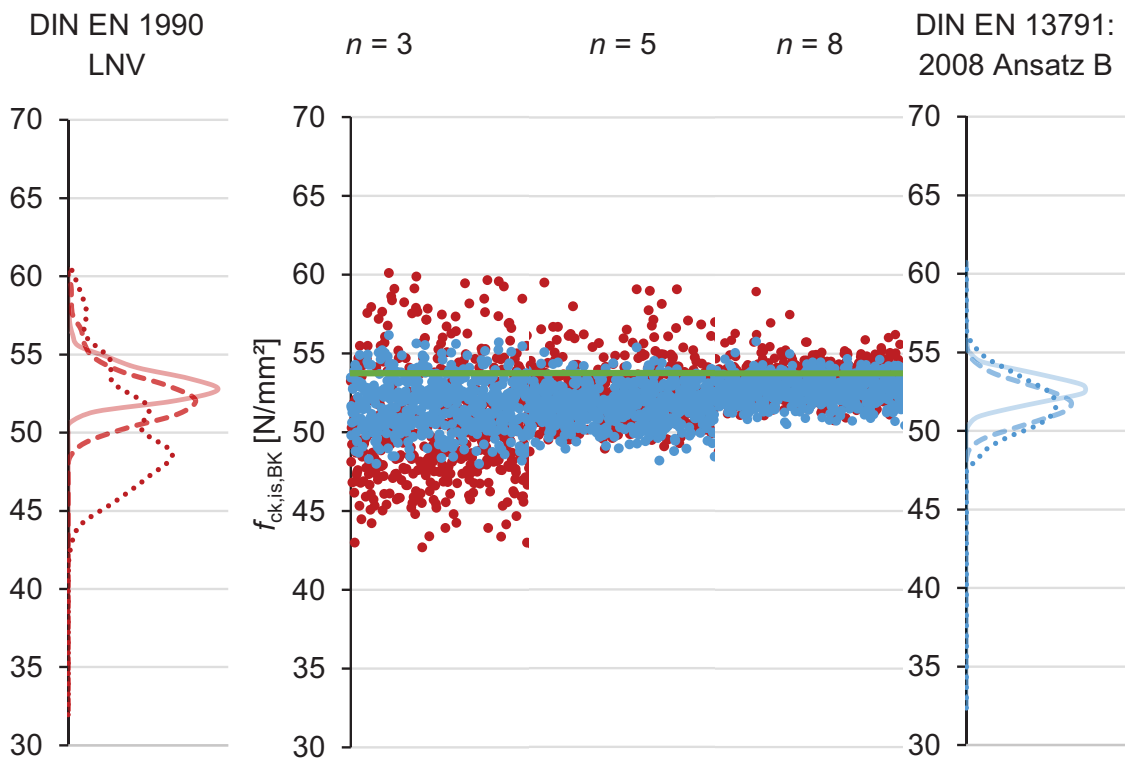


Abb. II. 52 Stützwand, Kusel: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

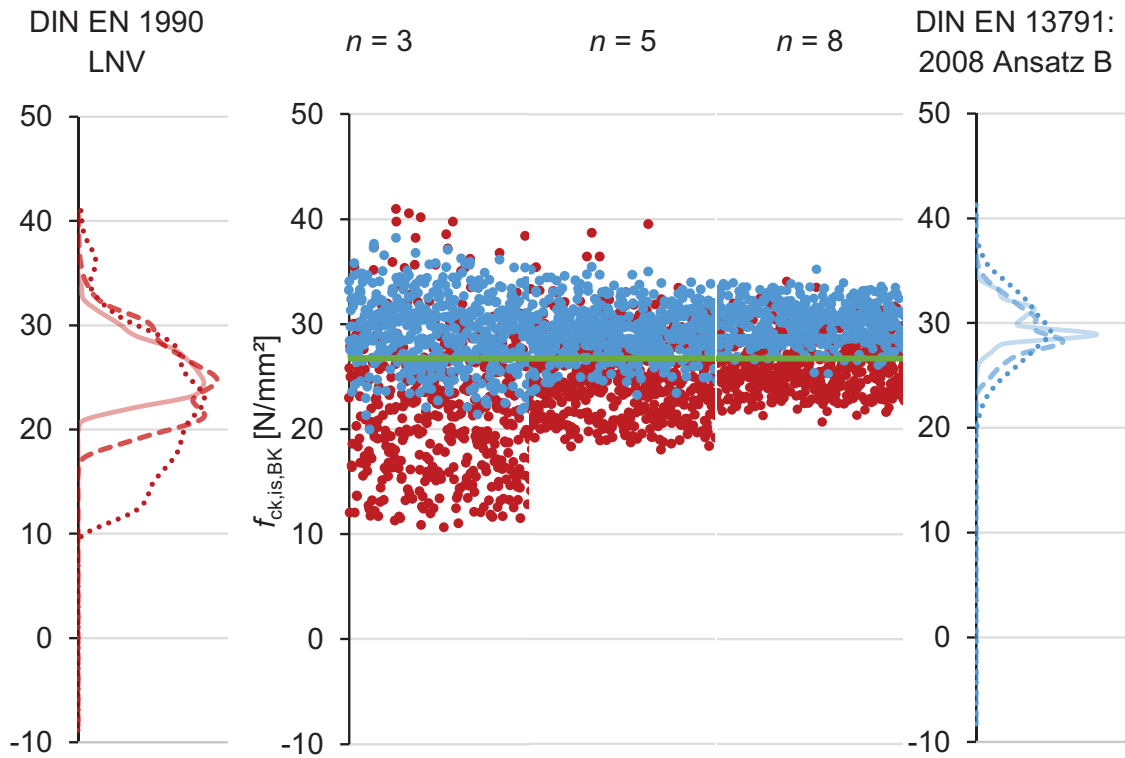


Abb. II. 53 Unterführung A6 Kirchhausen-Biberach (501 A-D), Heilbronn: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

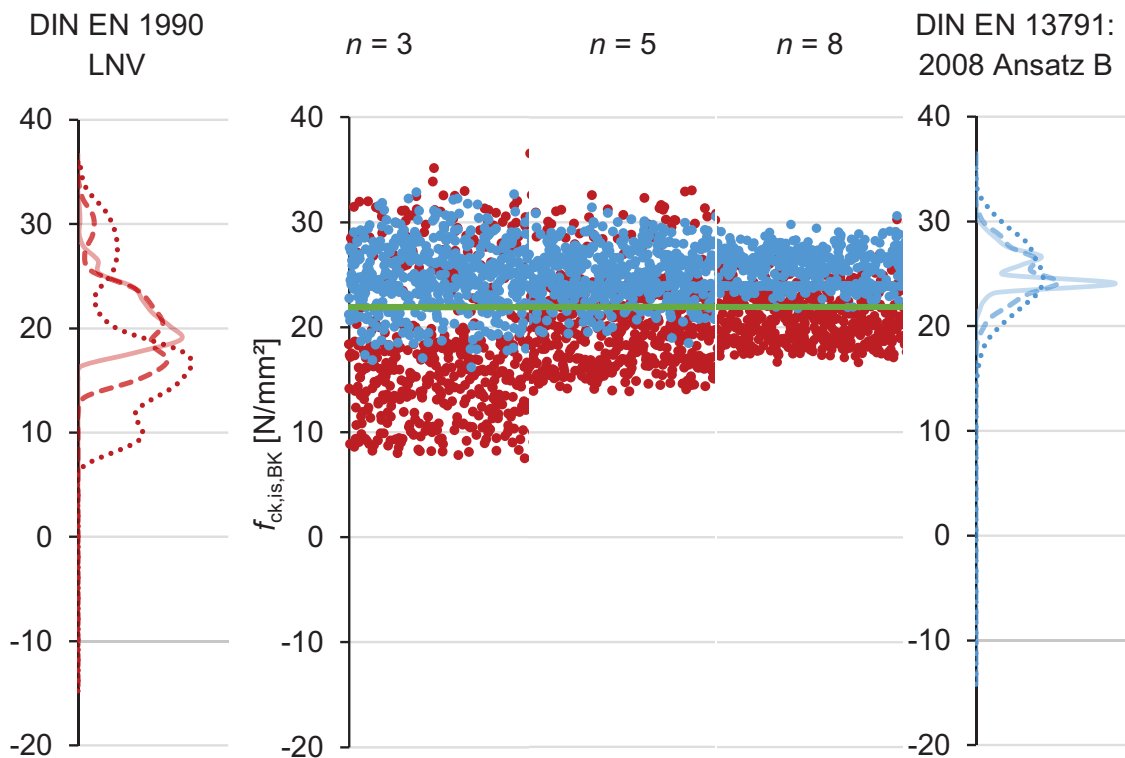


Abb. II. 54 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Heilbronn: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

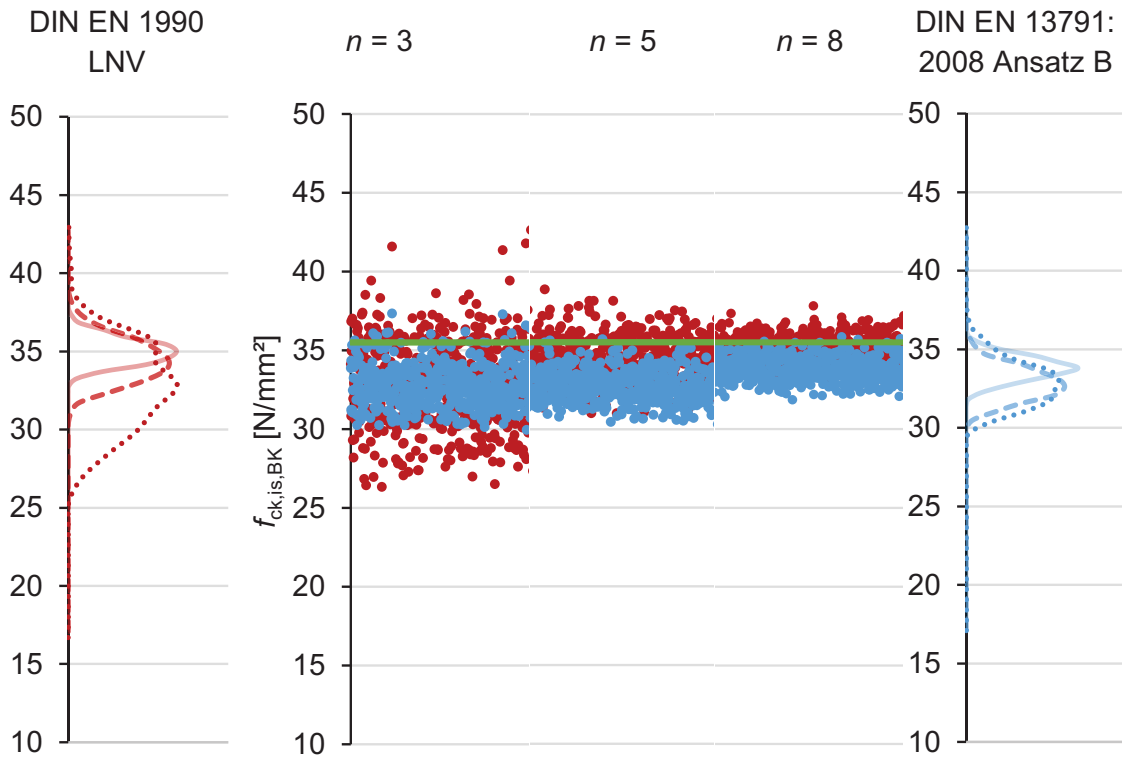


Abb. II. 55 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), Heilbronn: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

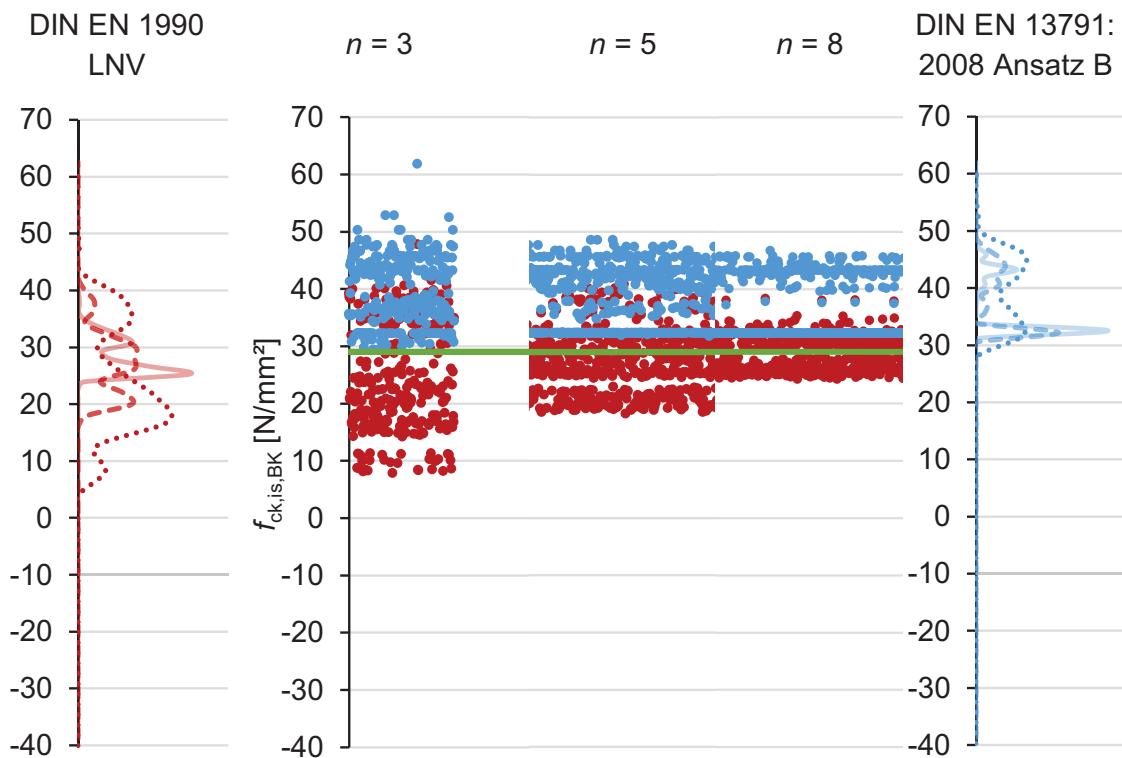


Abb. II. 56 Bauwerk 2: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

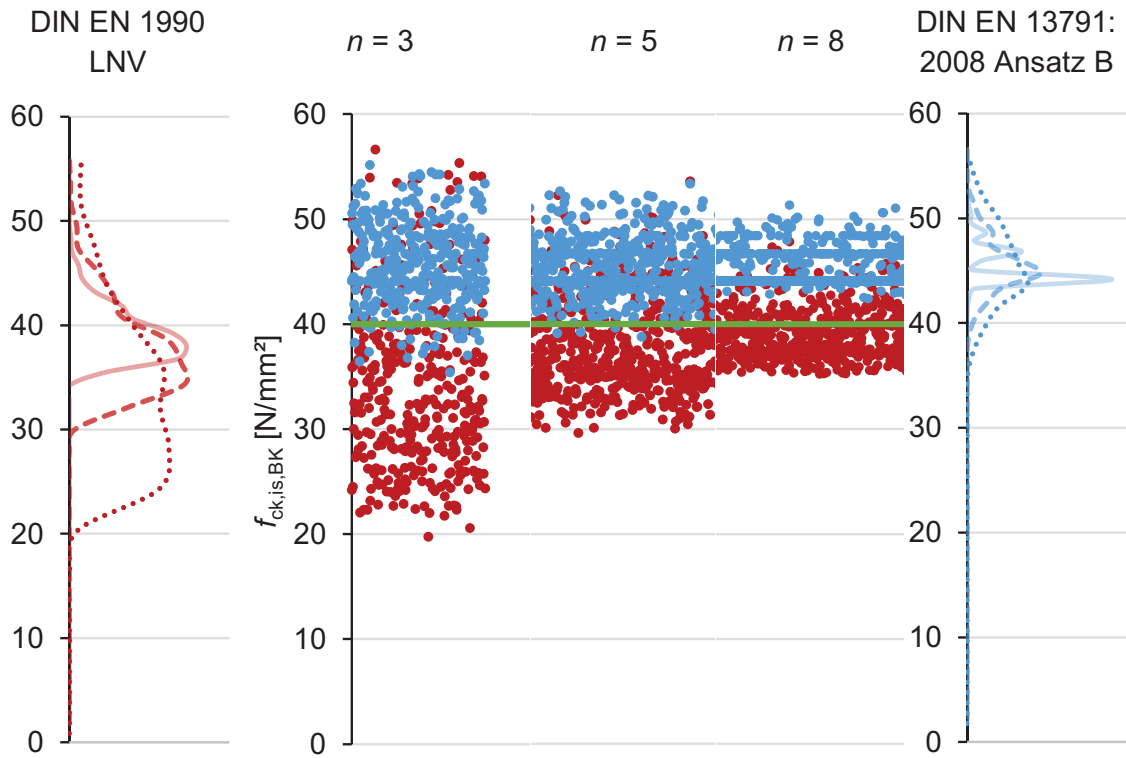


Abb. II. 57 Bauwerk 3: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

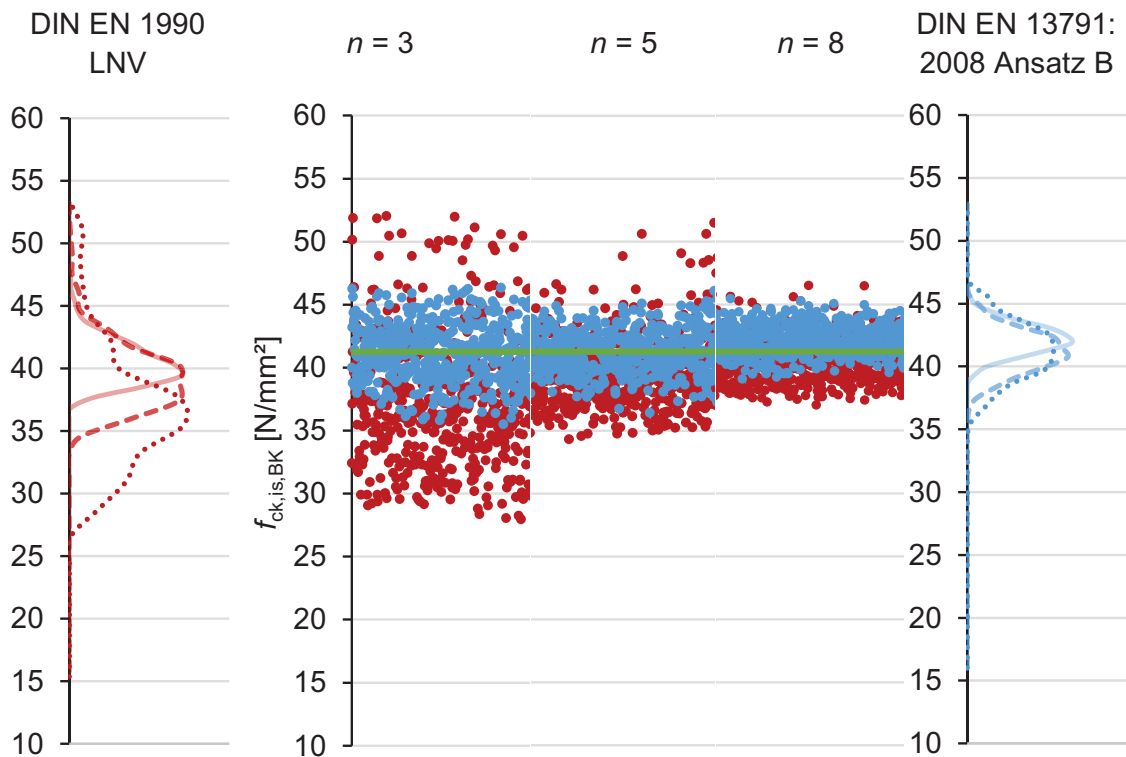


Abb. II. 58 Bauwerk 4: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791:2008 Ansatz B

Vergleich DIN EN 1990 logarithmische Normalverteilung und BAW 2016

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse einer Bewertung der Teilstichproben mit einer logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* und dem in *BAW 2016* beschriebenen Ansatz gegenübergestellt.

Die mit der logarithmischen Normalverteilung ermittelten Ergebnisse werden durch rote und die mit dem Ansatz nach *BAW 2016* ermittelten Ergebnisse durch dunkelblaue Punkte dargestellt.

Zusätzlich ist die empirische Verteilungsdichte jeweils für $n = 3$, $n = 5$ und $n = 8$ abgebildet.

Die bei Abb. II.59 beschriebene Legende ist in gleicher Form auch für die Abbildungen Abb. II.60 bis Abb. II.87 gültig.

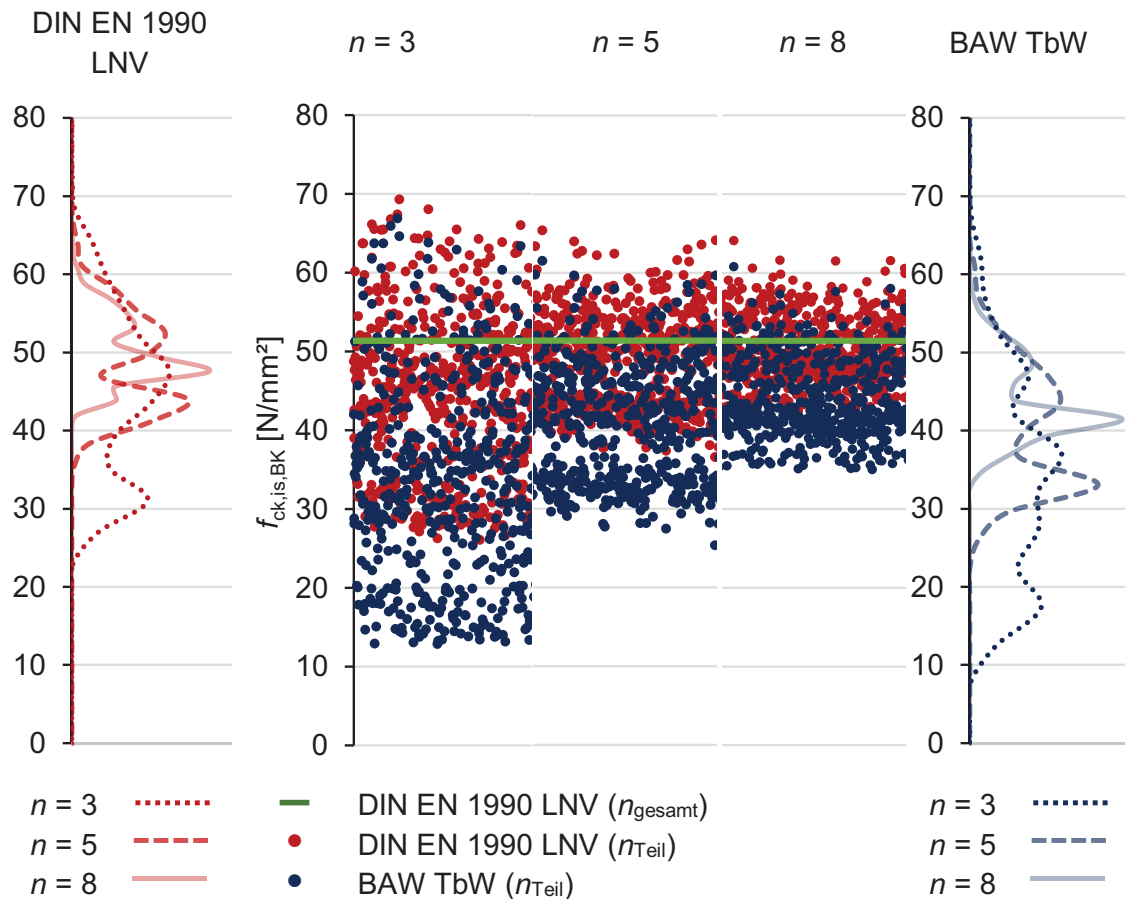


Abb. II. 59 Tropfkörper Kläranlage Blümeltal, Pirmasens: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

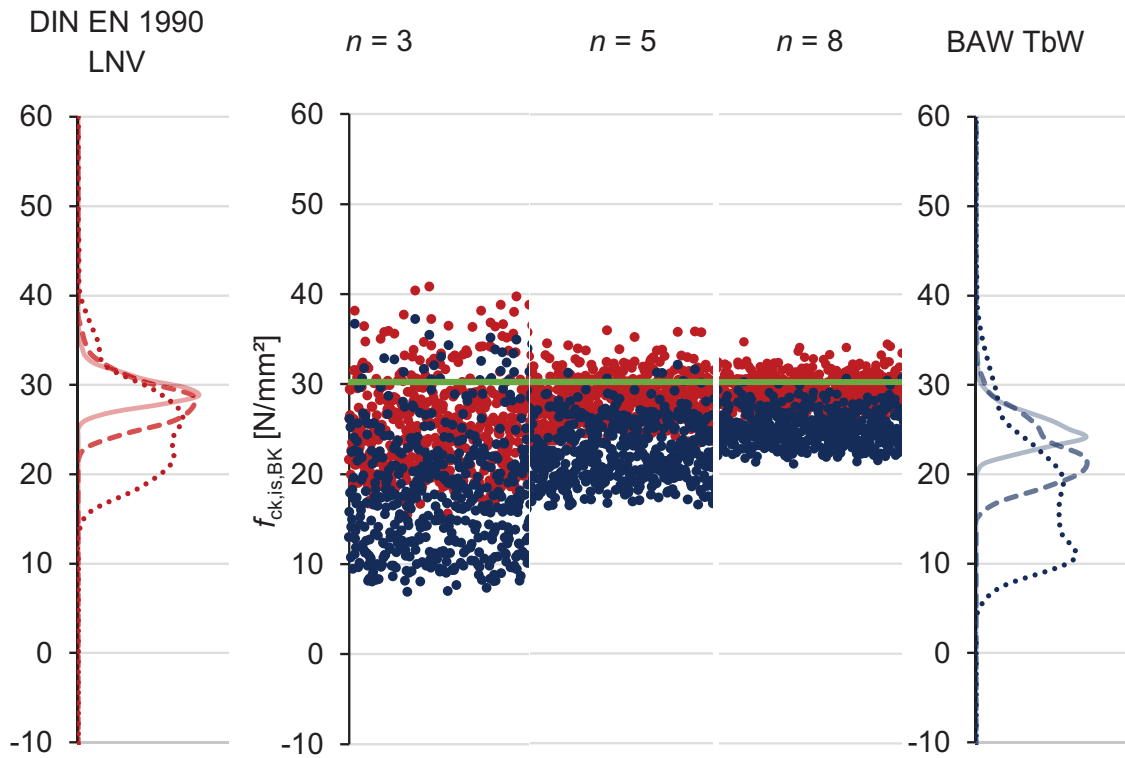


Abb. II. 60 Autobahnunterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

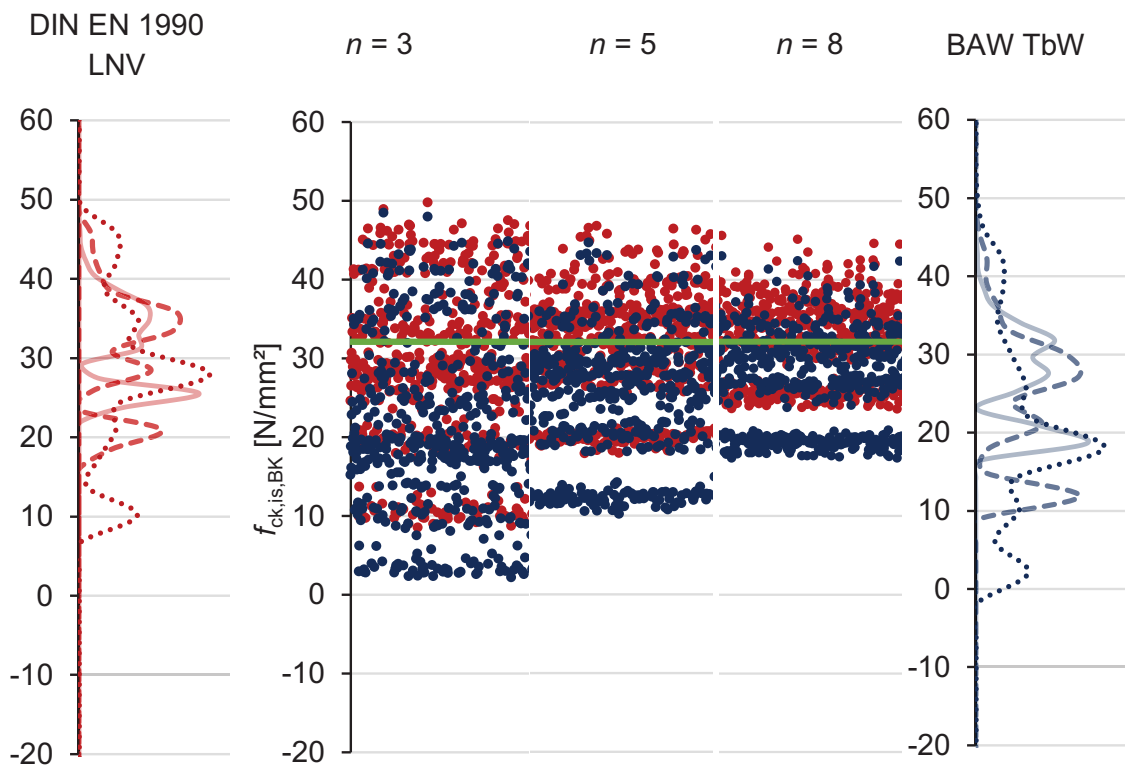


Abb. II. 61 Autobahnunterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

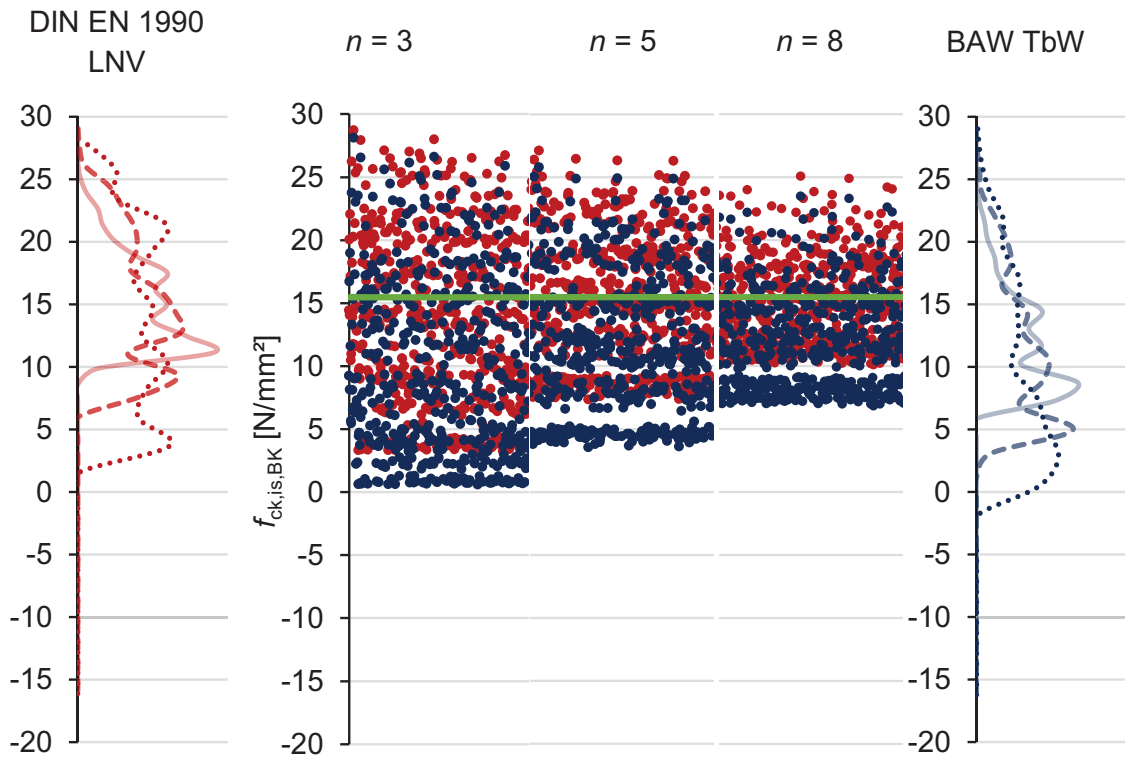


Abb. II. 62 Umspannwerk, Sulzbach: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

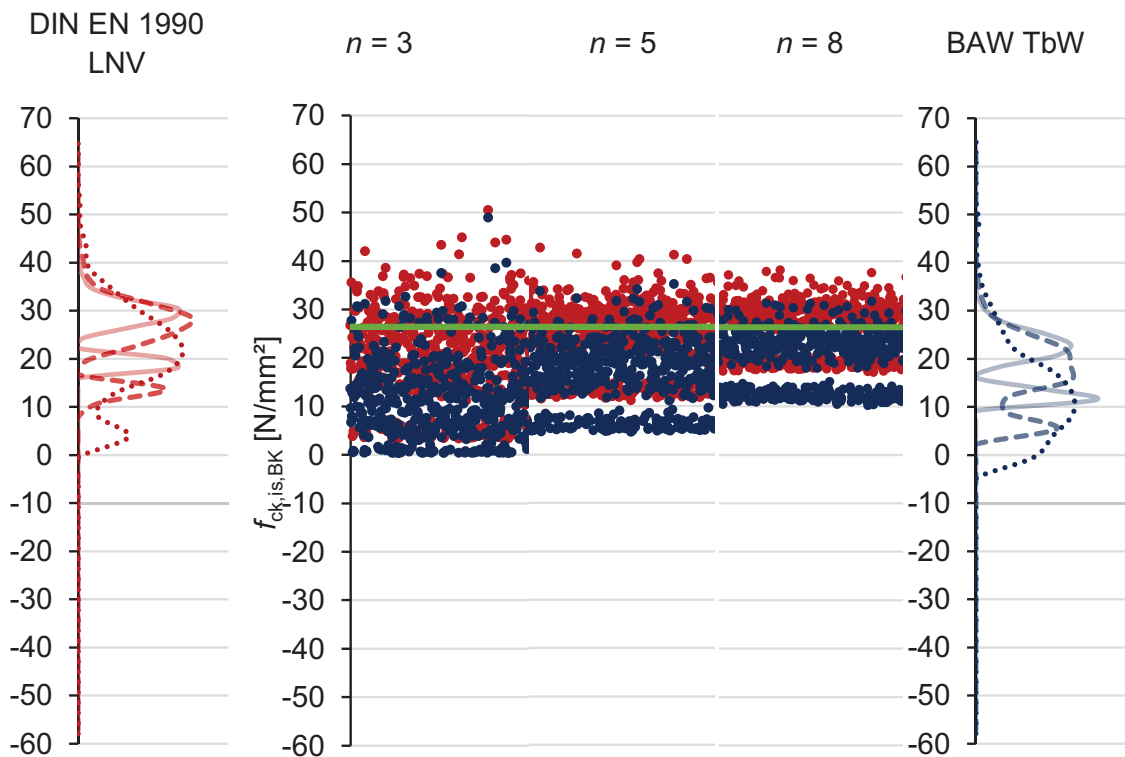


Abb. II. 63 Hochwasserschutzwand, Dormagen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

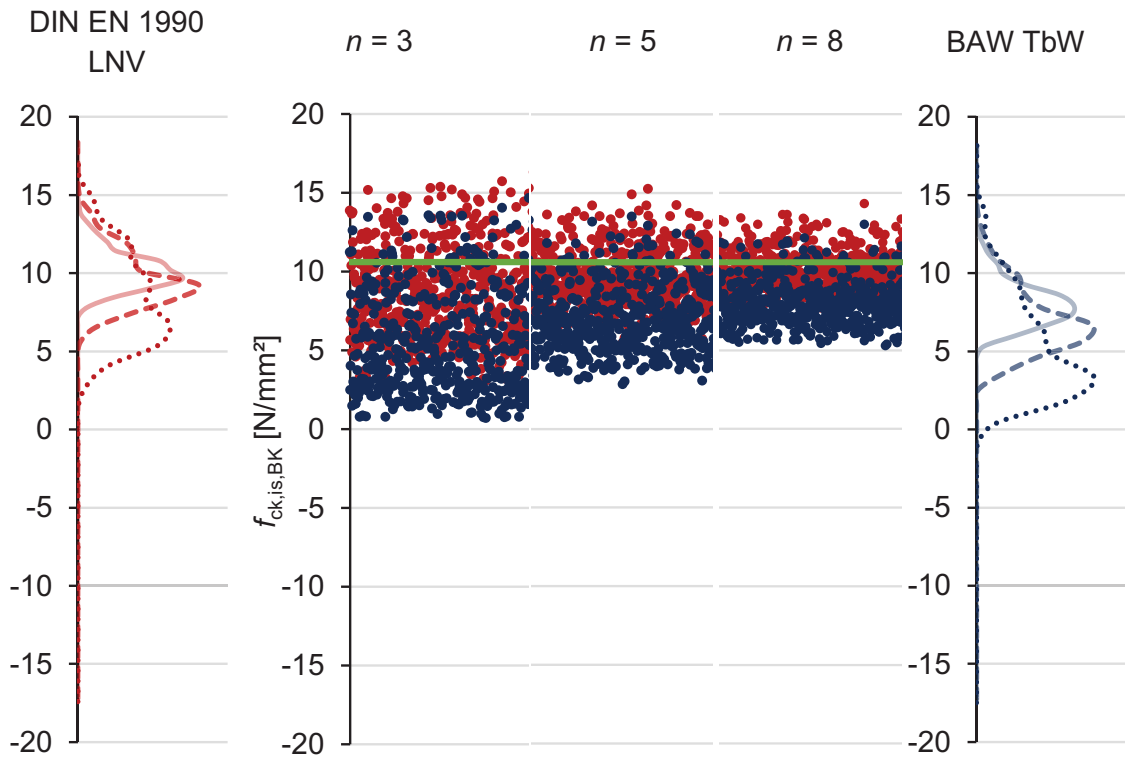


Abb. II. 64 Schwergewichtswand, Dormagen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

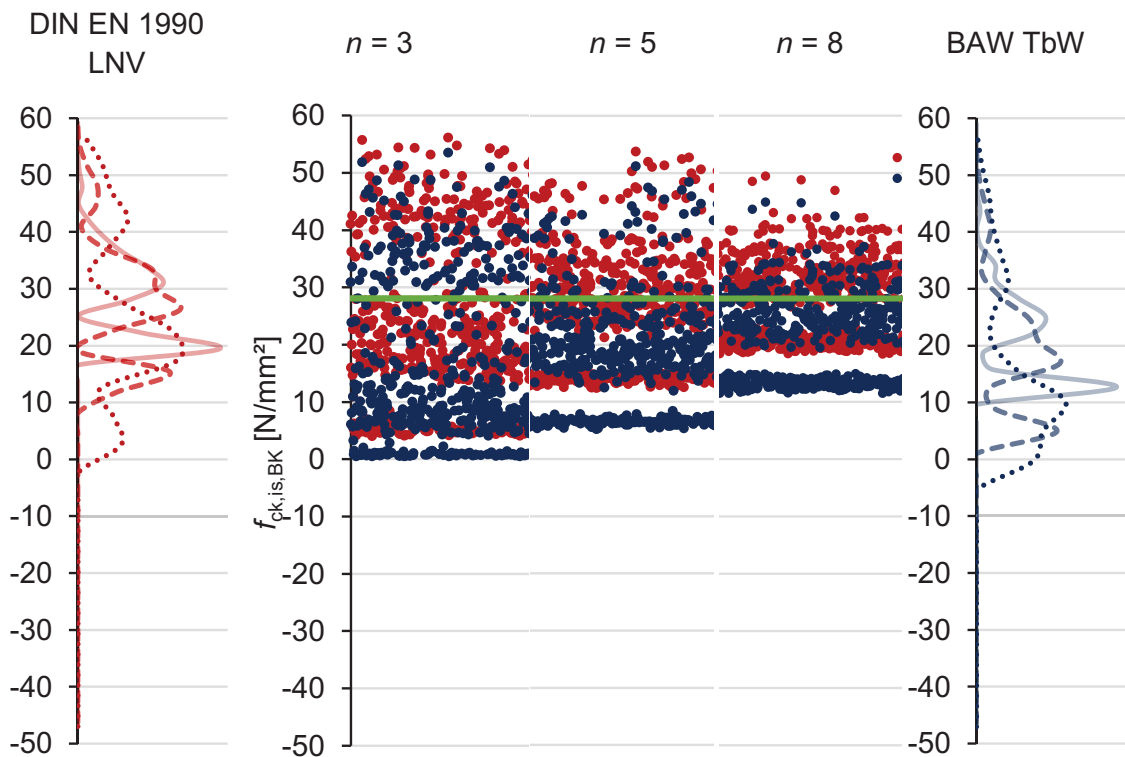


Abb. II. 65 Bodenplatte ACO, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

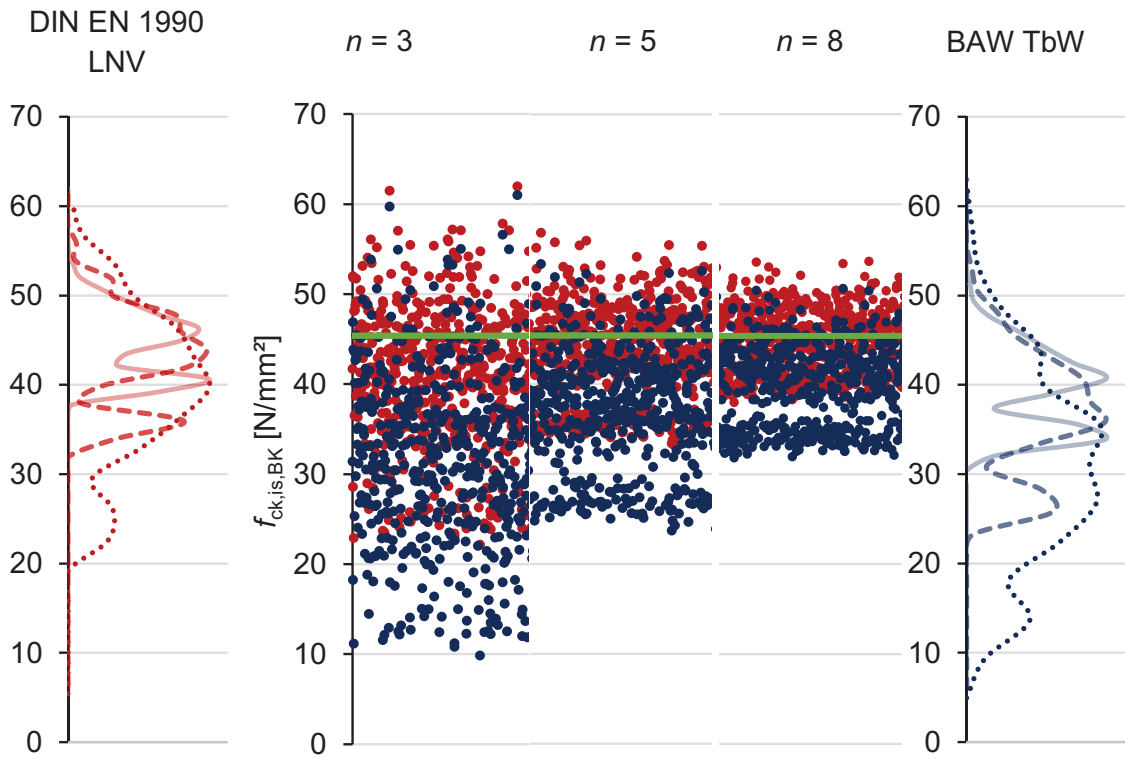


Abb. II. 66 Stützwand Ohmbach Abschnitt I, Pirmasens: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

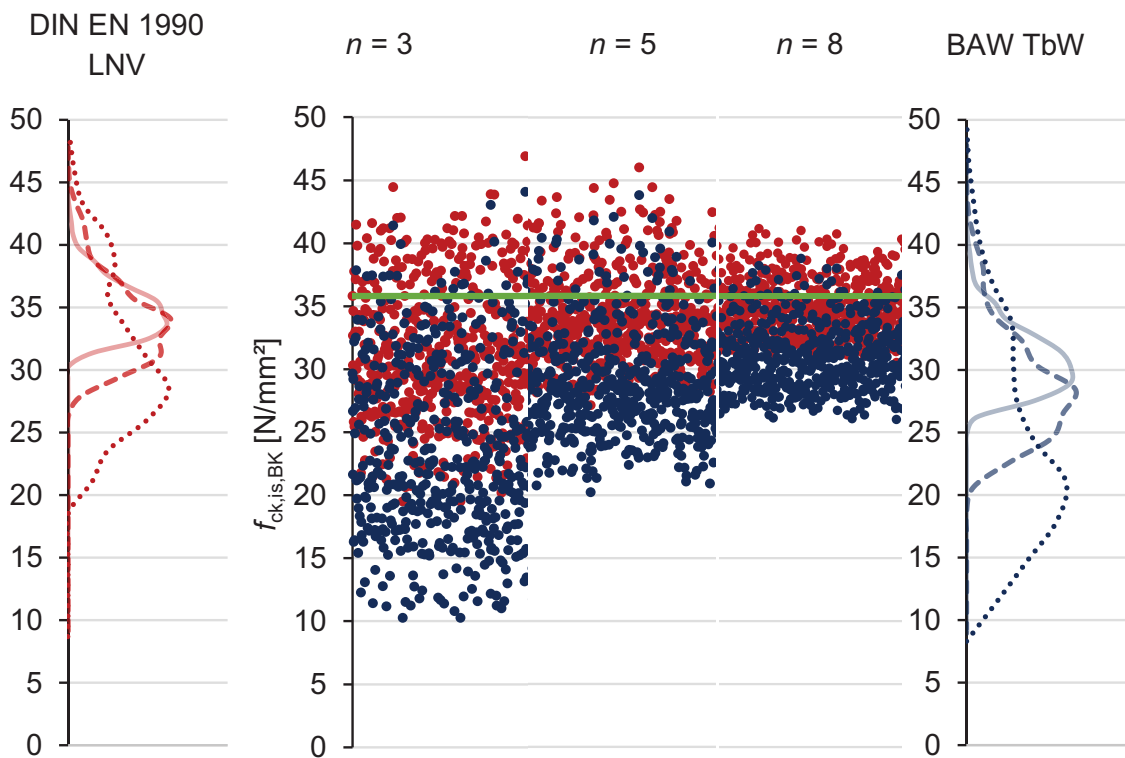


Abb. II. 67 Stützwand Ohmbach Abschnitt II, Pirmasens: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

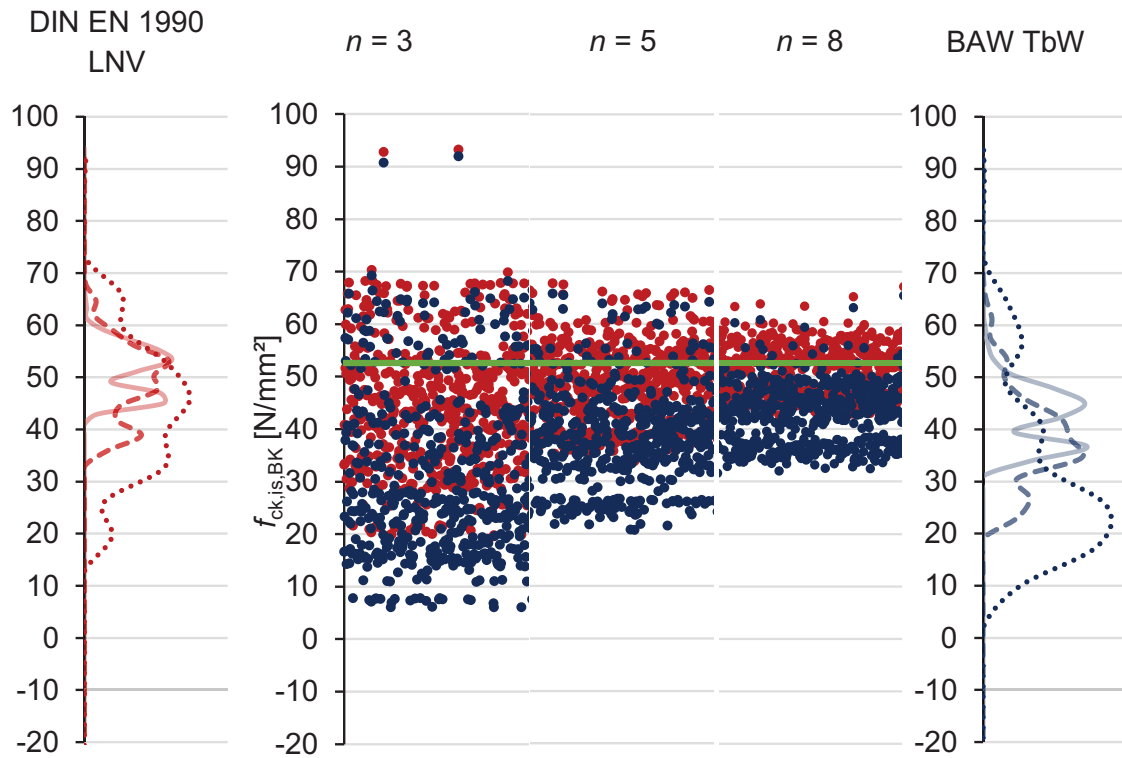


Abb. II. 68 Weserbrücke, Hannoversch Münden: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

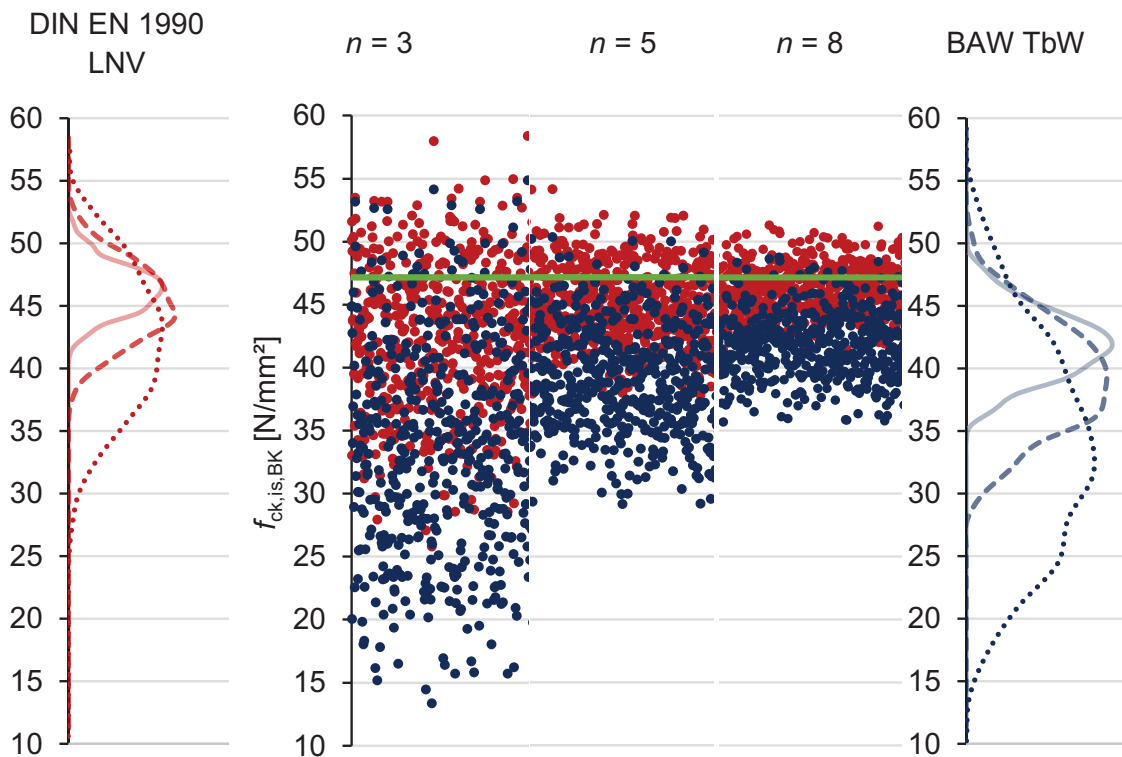


Abb. II. 69 Lahntalbrücke, Limburg: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

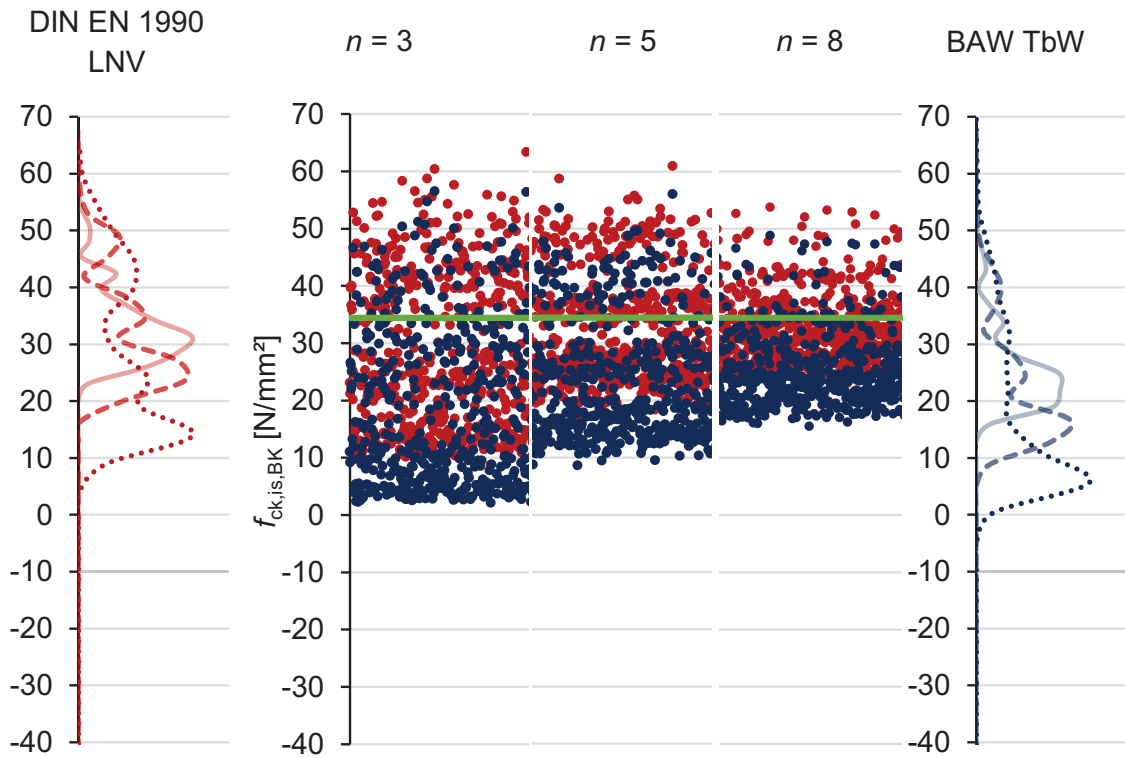


Abb. II.70 Lautertalbrücke Widerlager, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

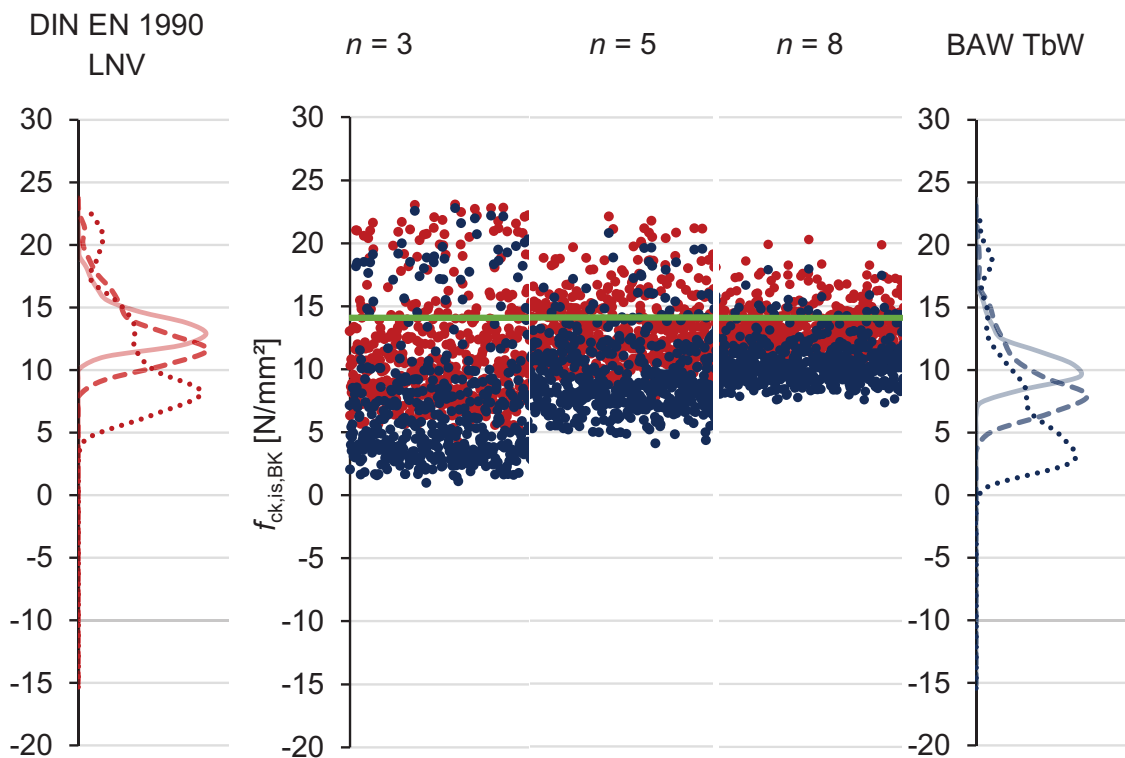


Abb. II.71 Lautertalbrücke Fahrbahn untere Schicht, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

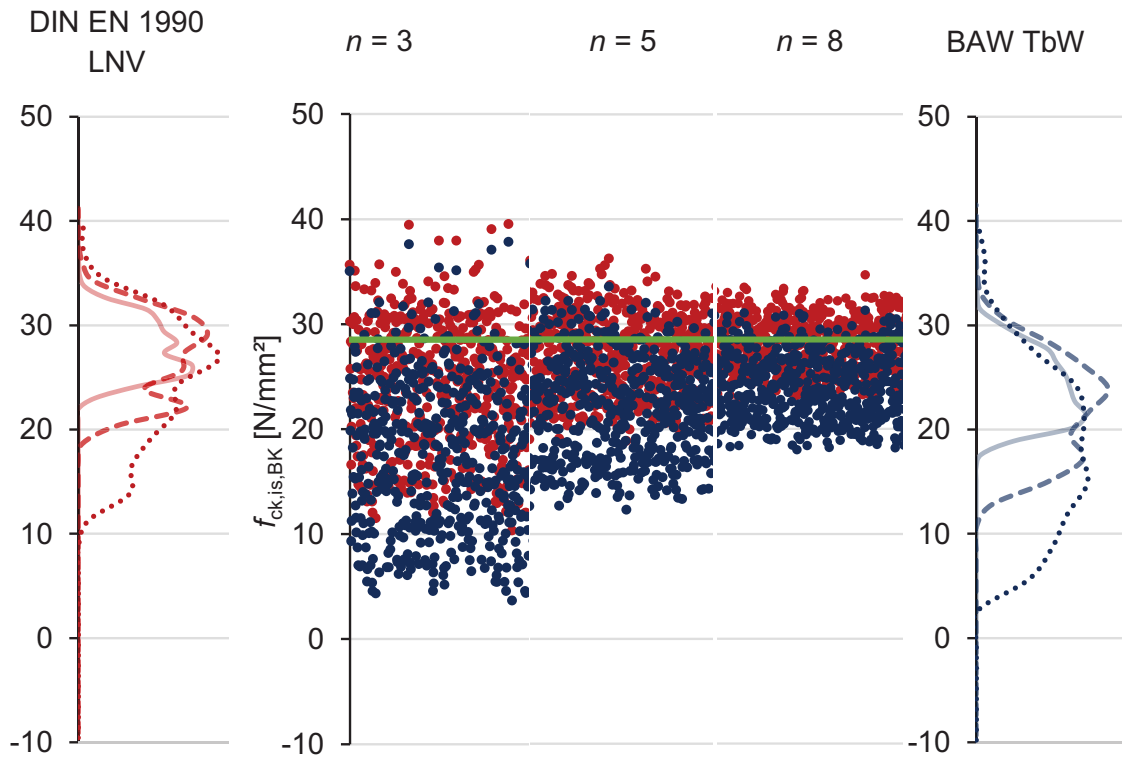


Abb. II. 72 Decke Wohnblock, Ludwigshafen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

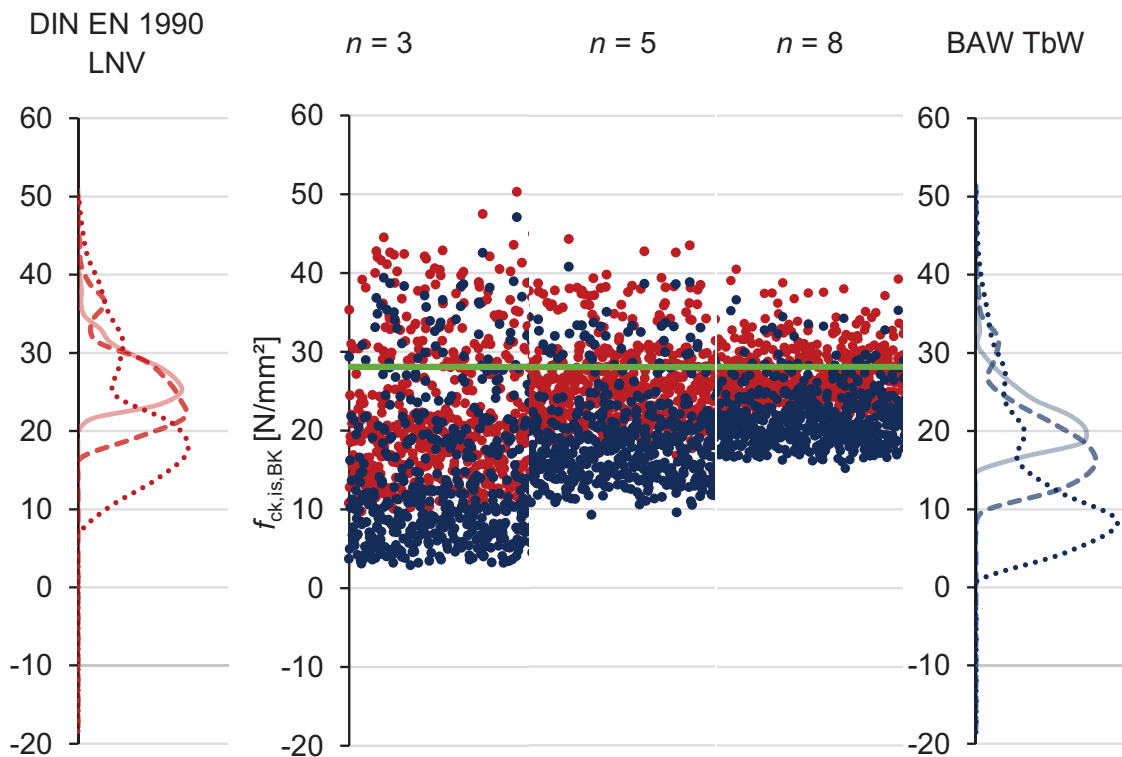


Abb. II. 73 Wand Technische Werke Ludwigshafen, Ludwigshafen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

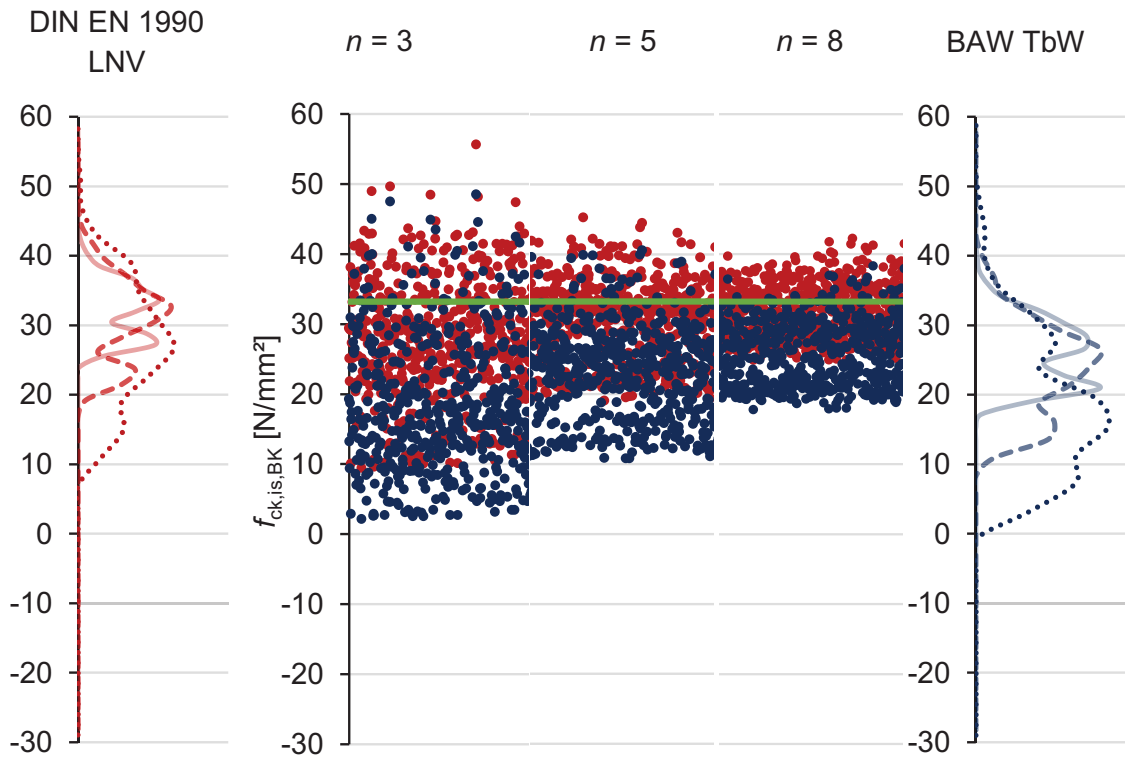


Abb. II. 74 Bauwerk 1: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

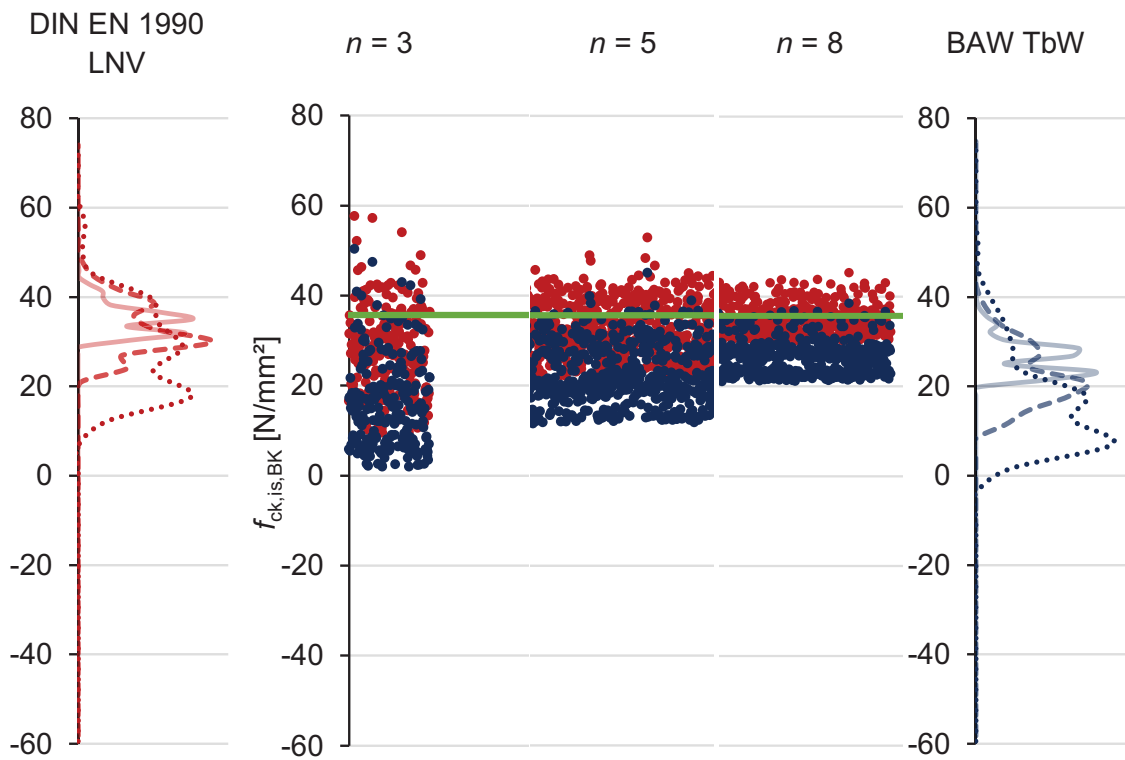


Abb. II. 75 Pfeiler Brücke B270, Langweiler: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

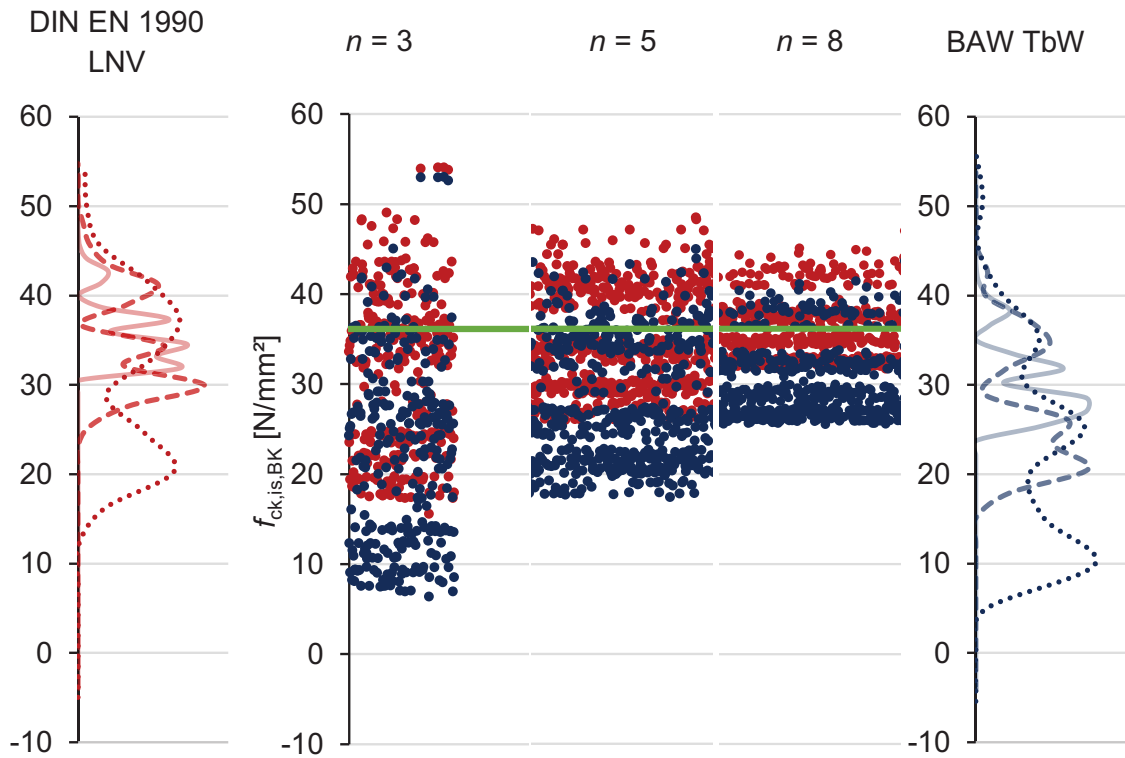


Abb. II. 76 Brücke Autobahnkreuz Mainz-Süd - Auflager, Mainz: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

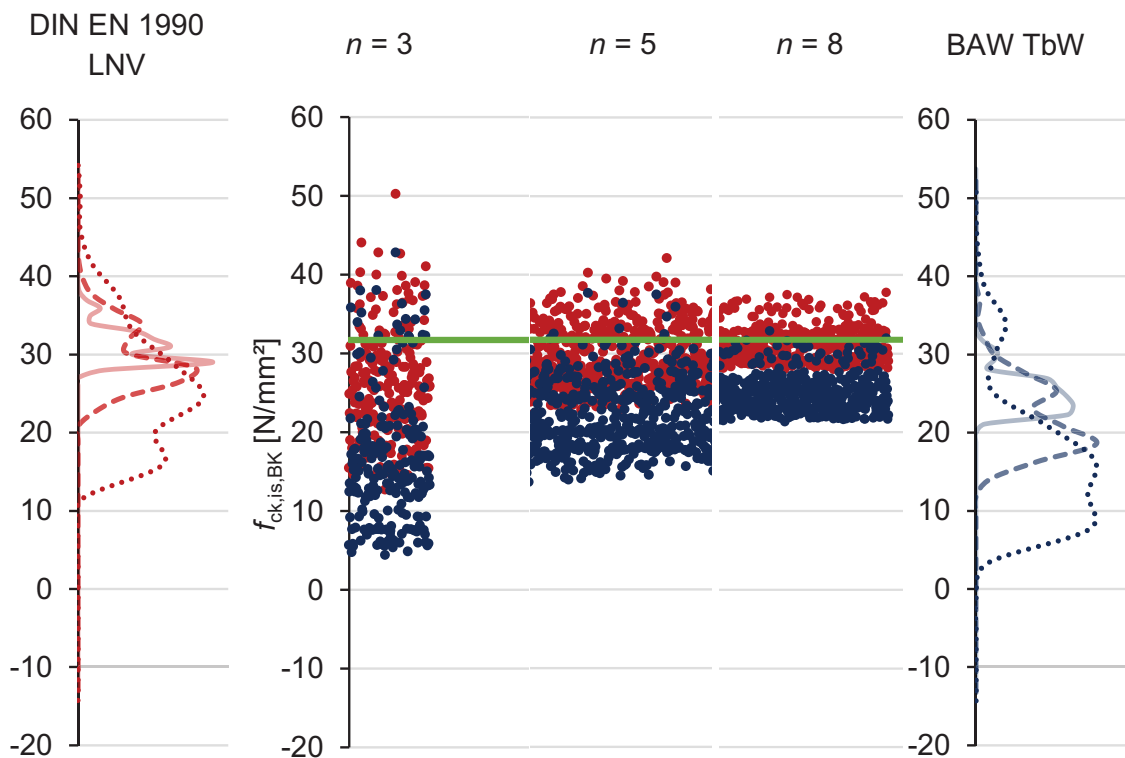


Abb. II. 77 Brücke über den Lockwitzbach, Dresden/Niedersedlitz: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

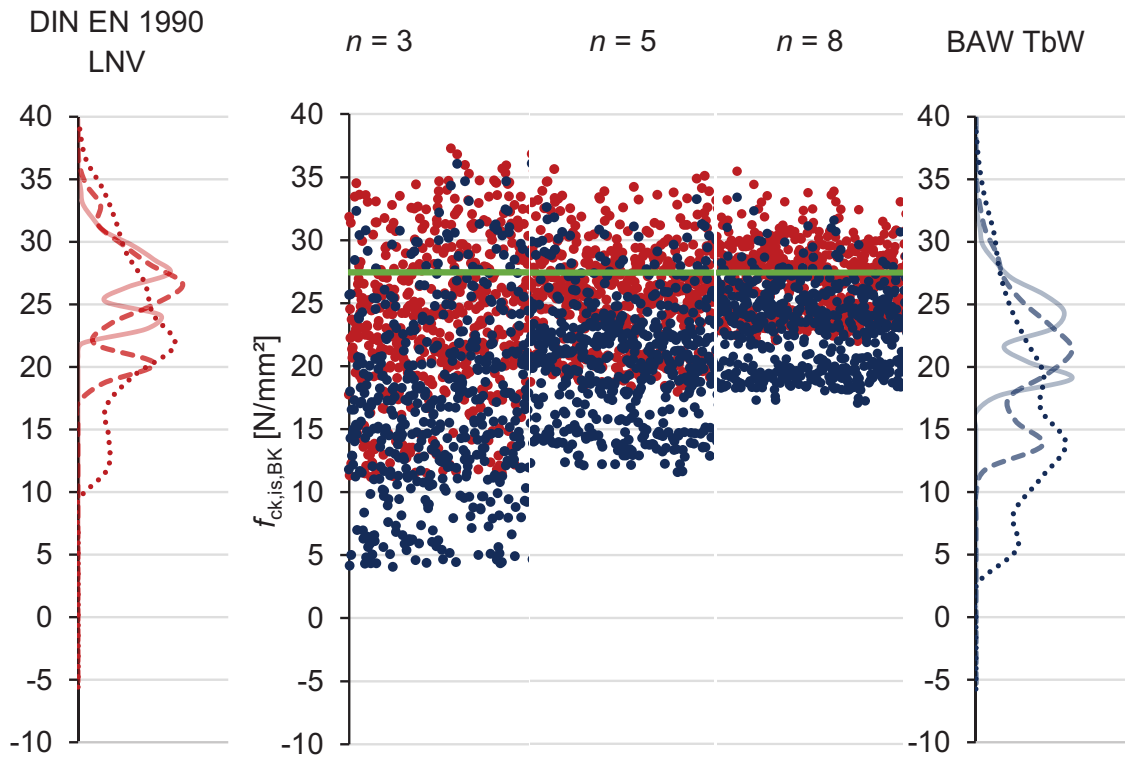


Abb. II.78 Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

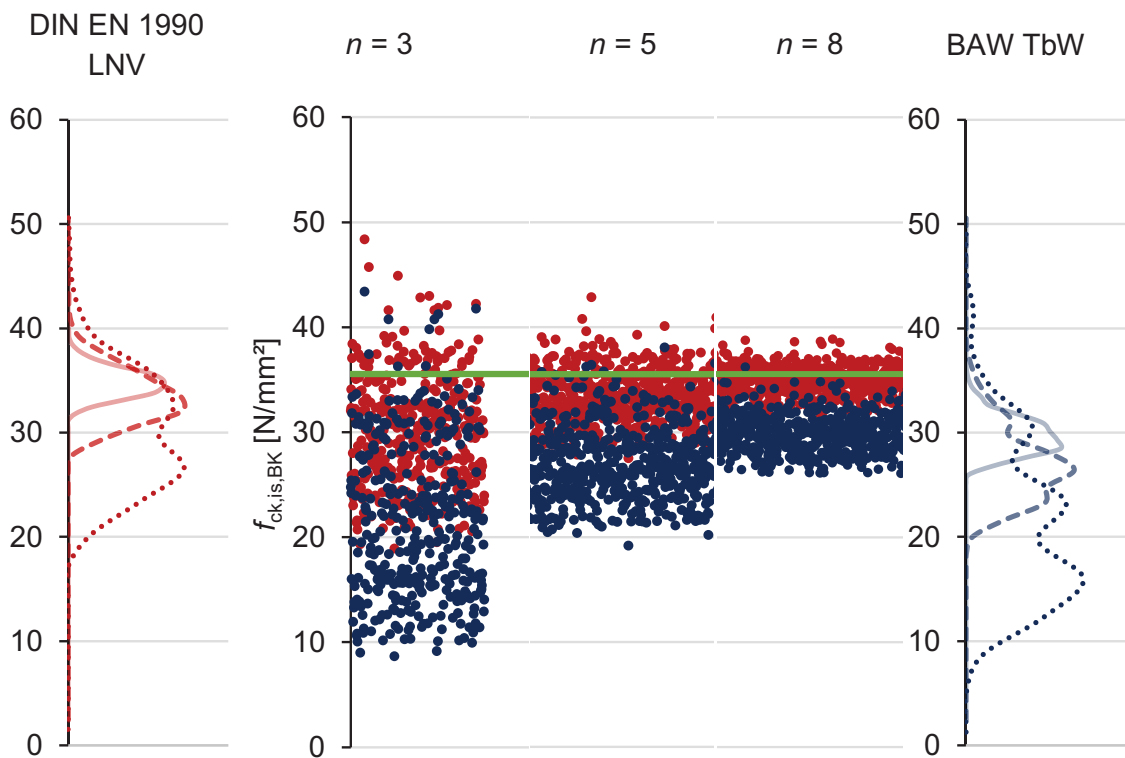


Abb. II.79 Balkonplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

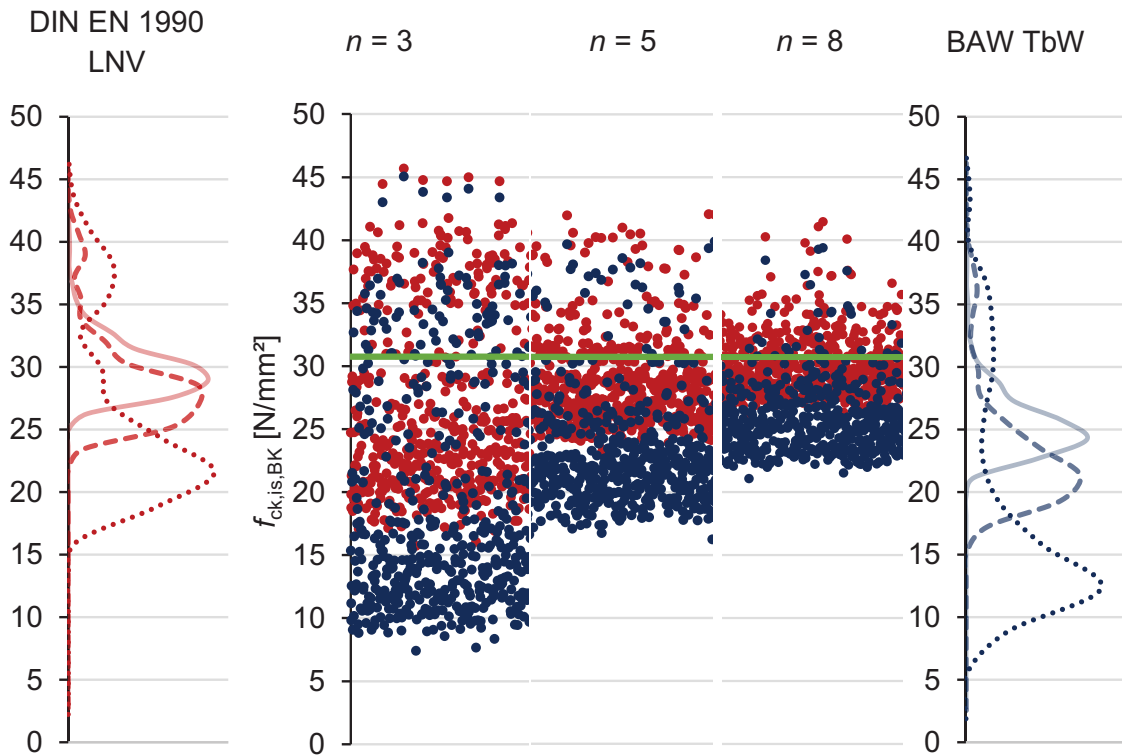


Abb. II. 80 Deckenplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

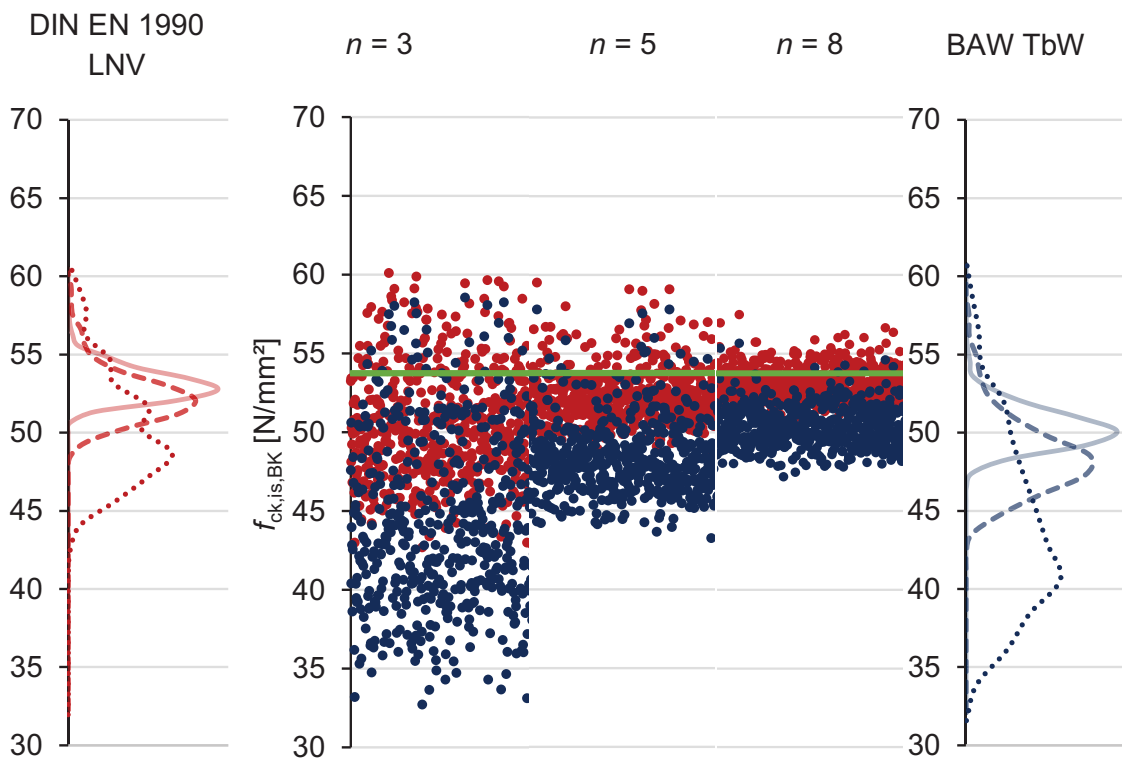


Abb. II. 81 Stützwand, Kusel: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

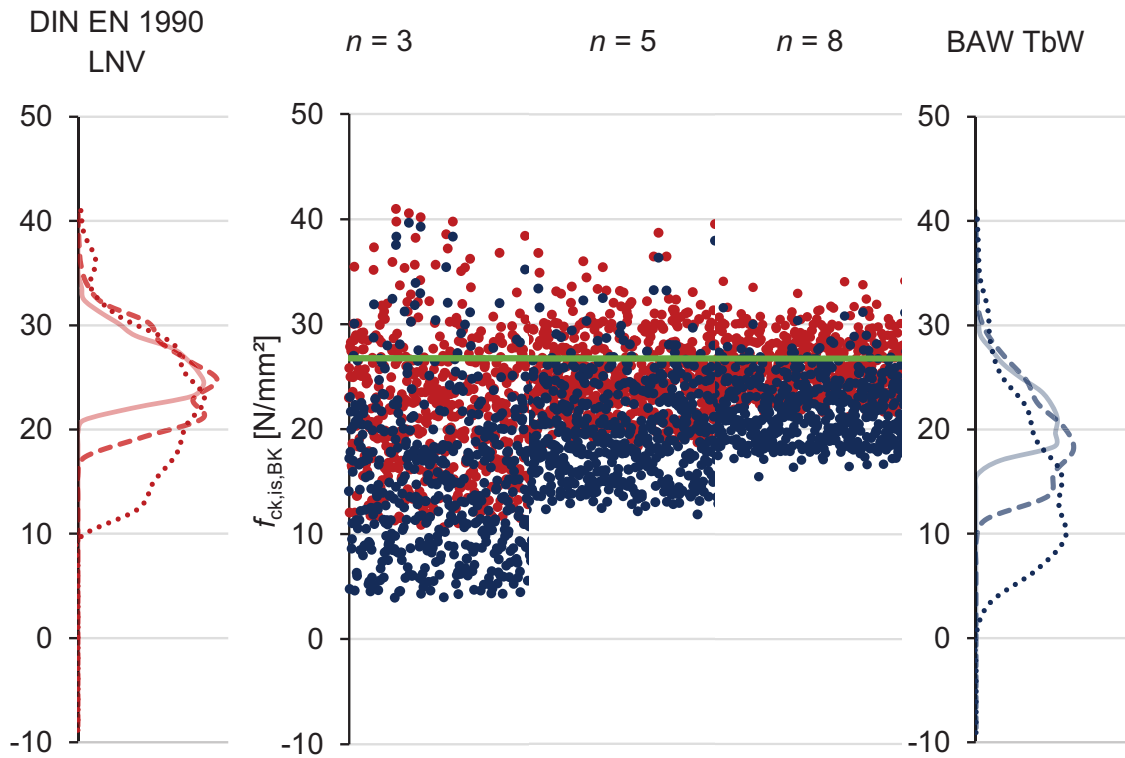


Abb. II. 82 Unterführung A6 Kirchhausen-Biberach (501 A-D), Heilbronn: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

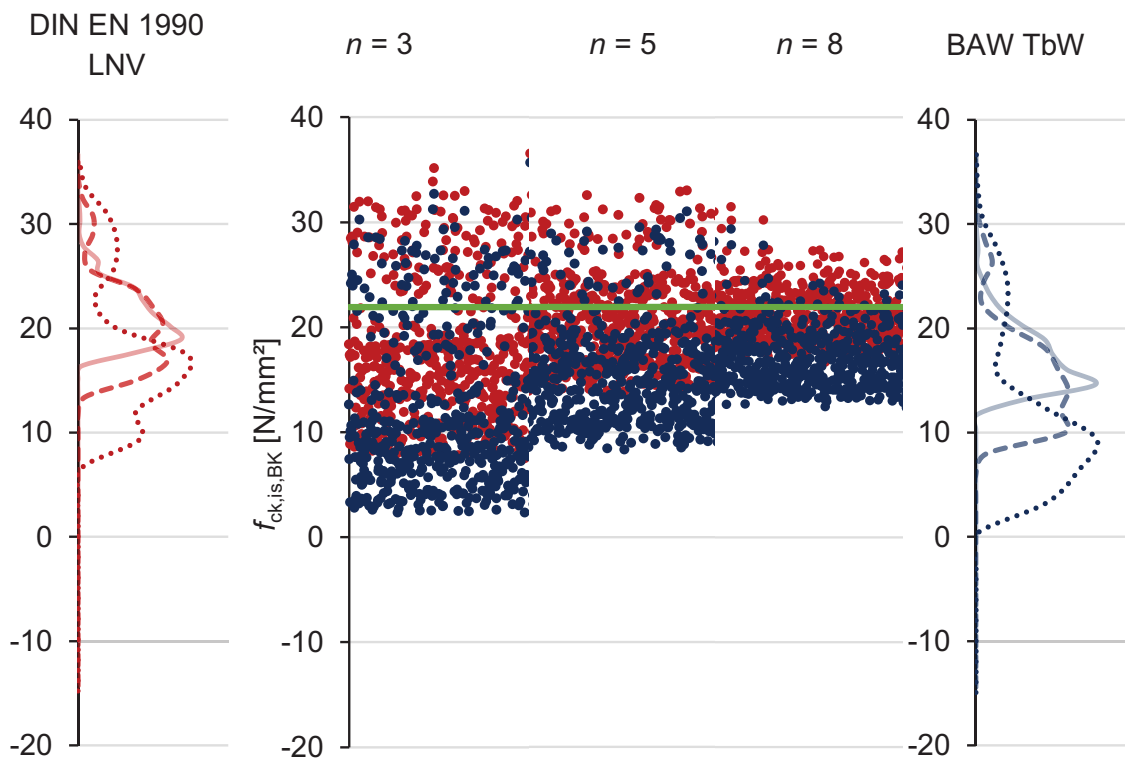


Abb. II.83 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Heilbronn: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

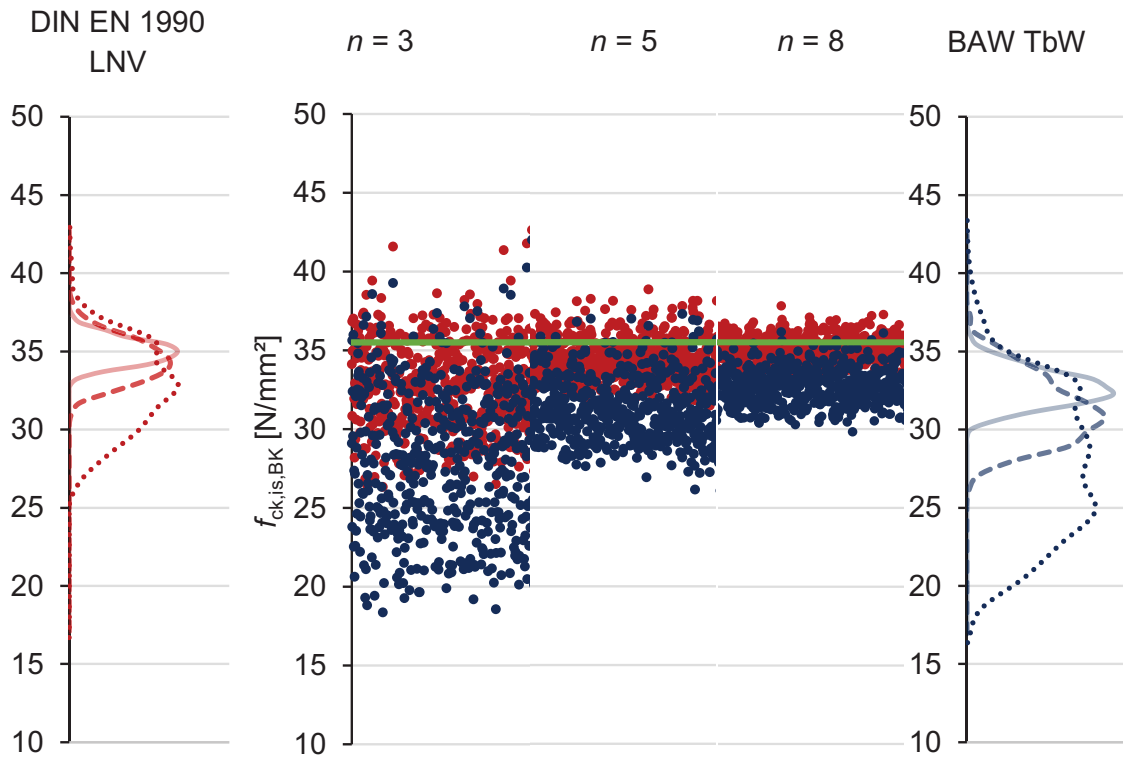


Abb. II. 84 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), Heilbronn: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

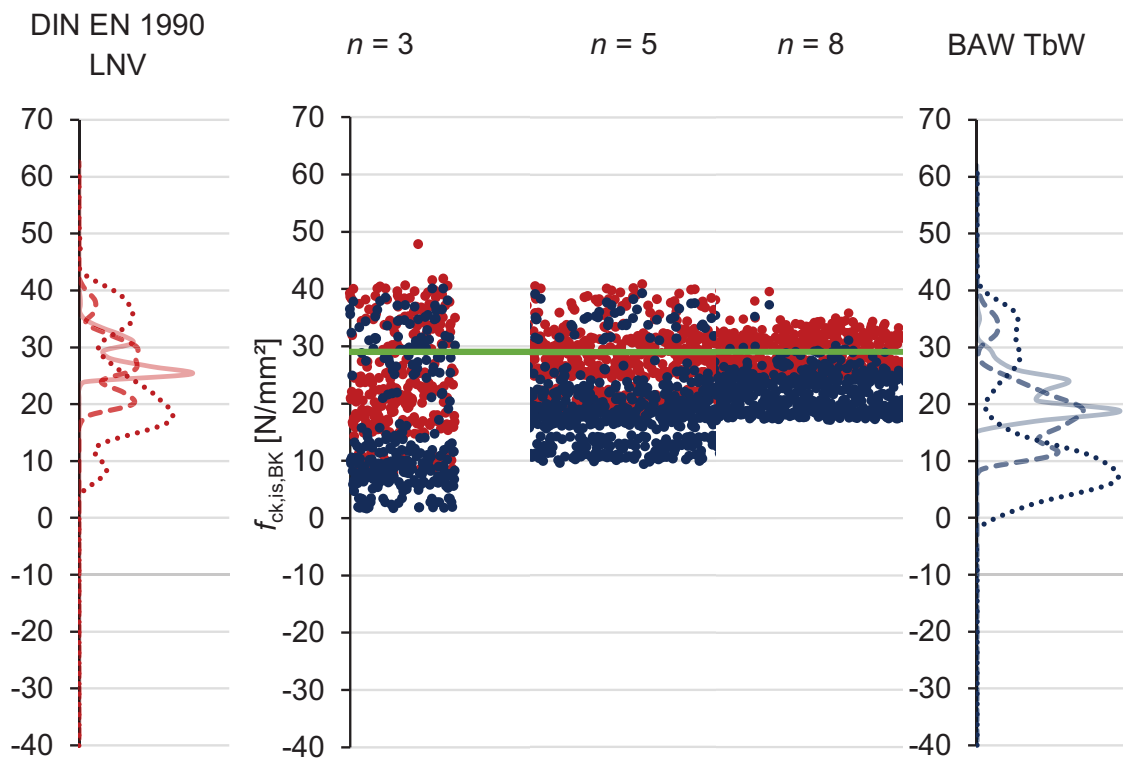


Abb. II. 85 Bauwerk 2 Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

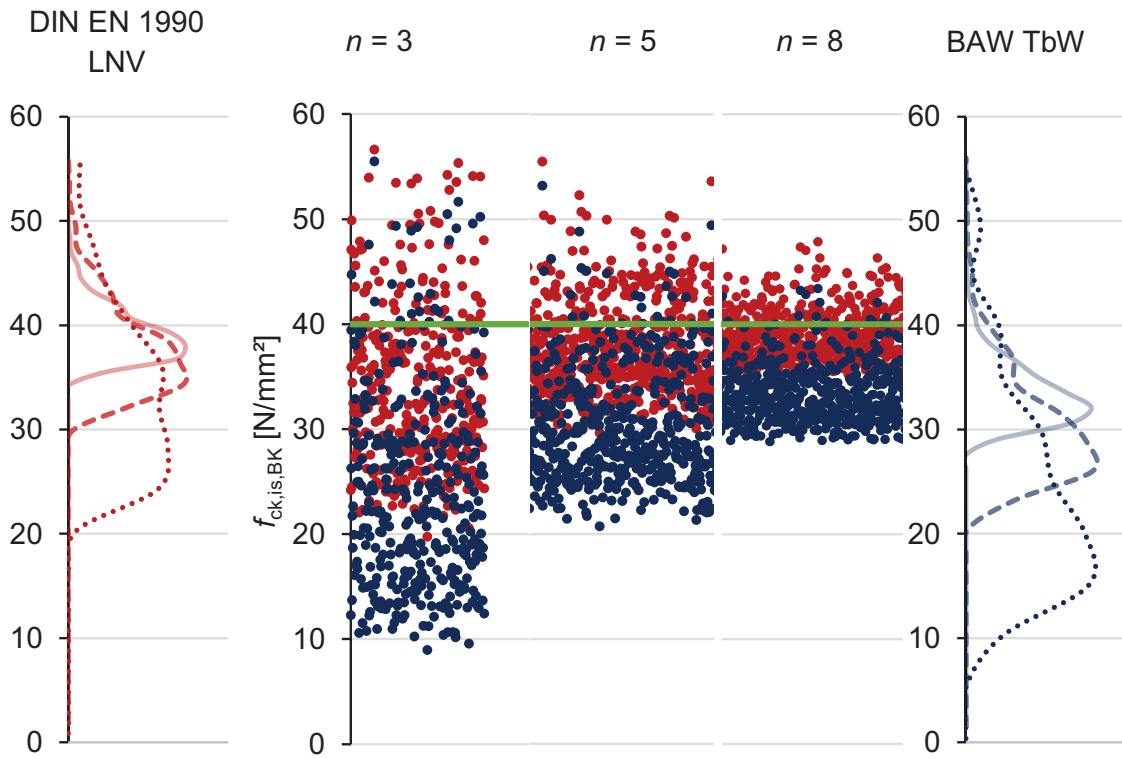


Abb. II. 86 Bauwerk 3: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

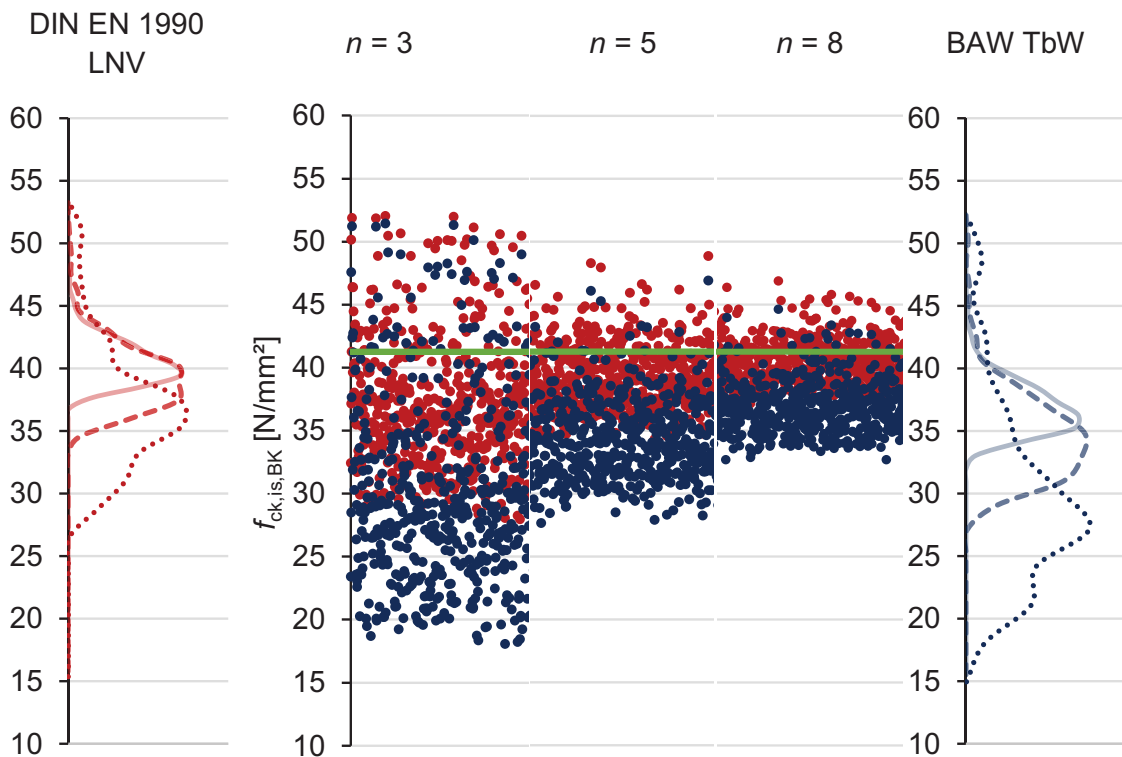


Abb. II. 87 Bauwerk 4: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und BAW TbW

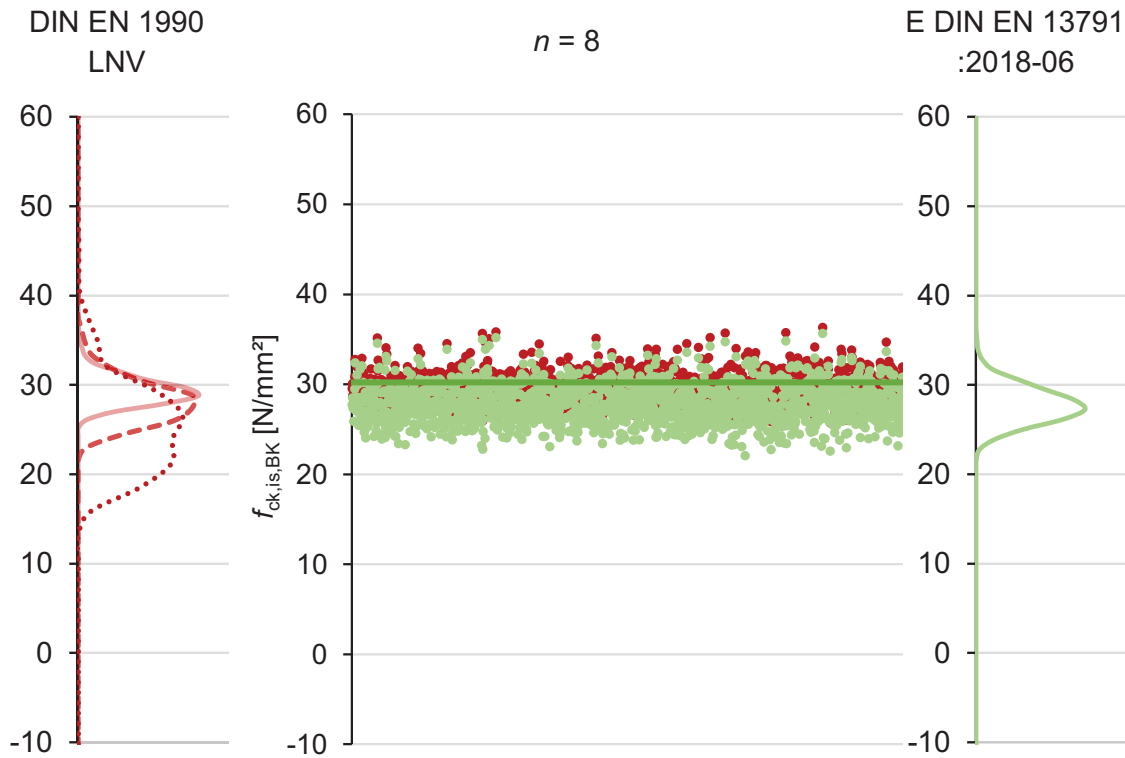


Abb. II. 89 Autobahnunterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

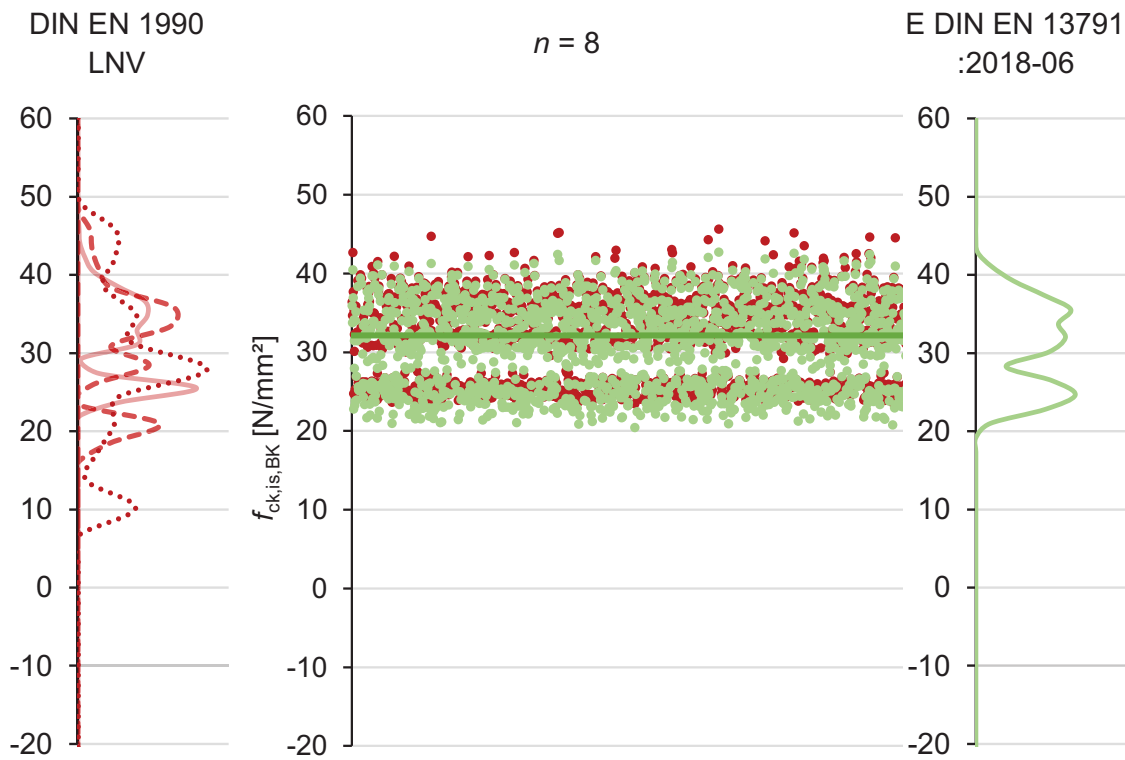


Abb. II. 90 Autobahnunterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

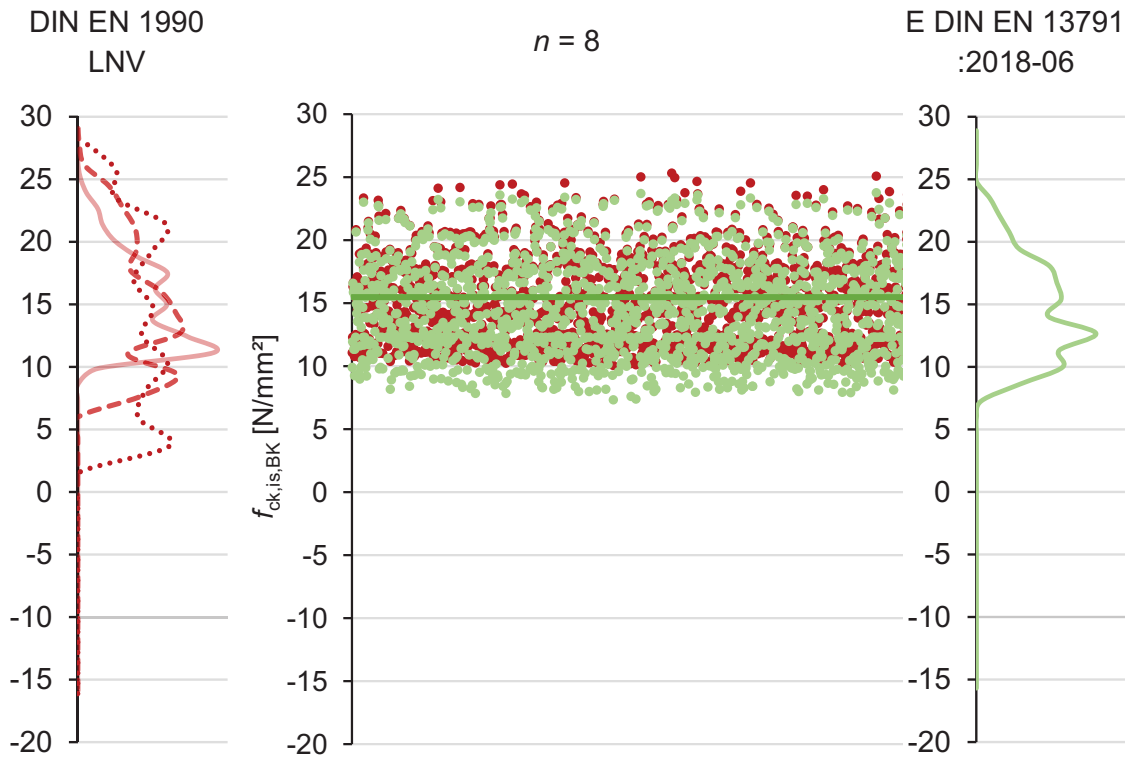


Abb. II. 91 Umspannwerk, Sulzbach: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

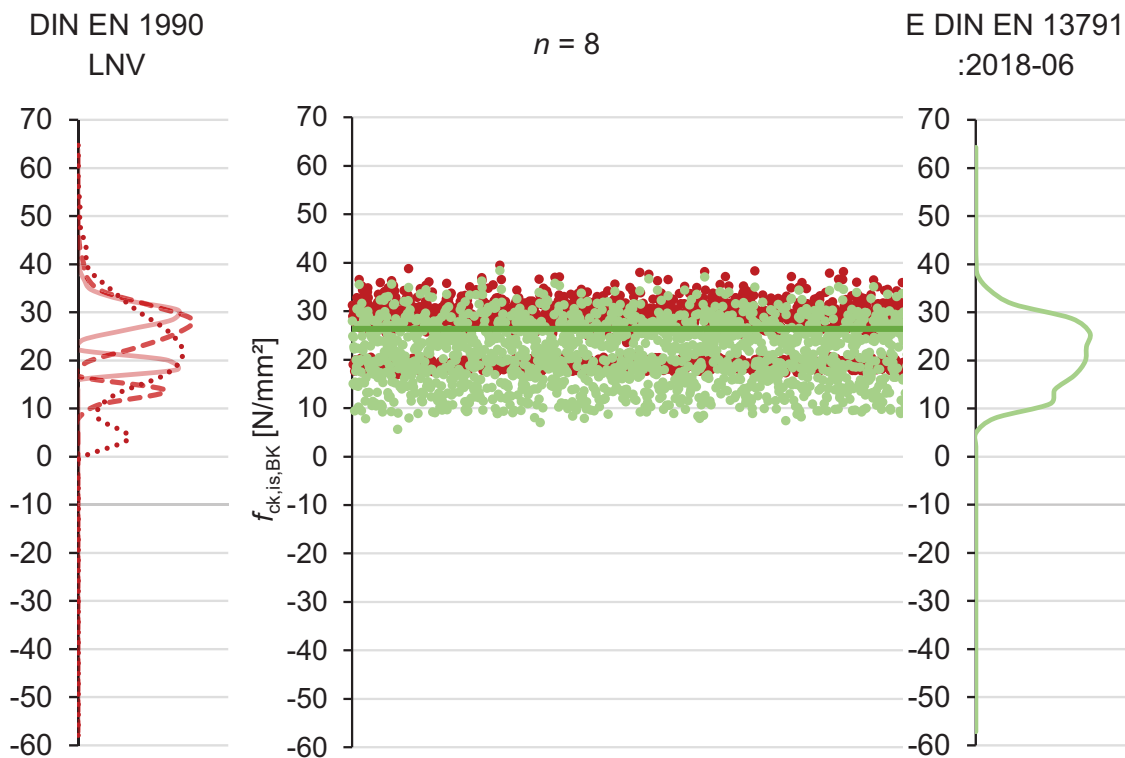


Abb. II. 92 Hochwasserschutzwand, Dormagen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

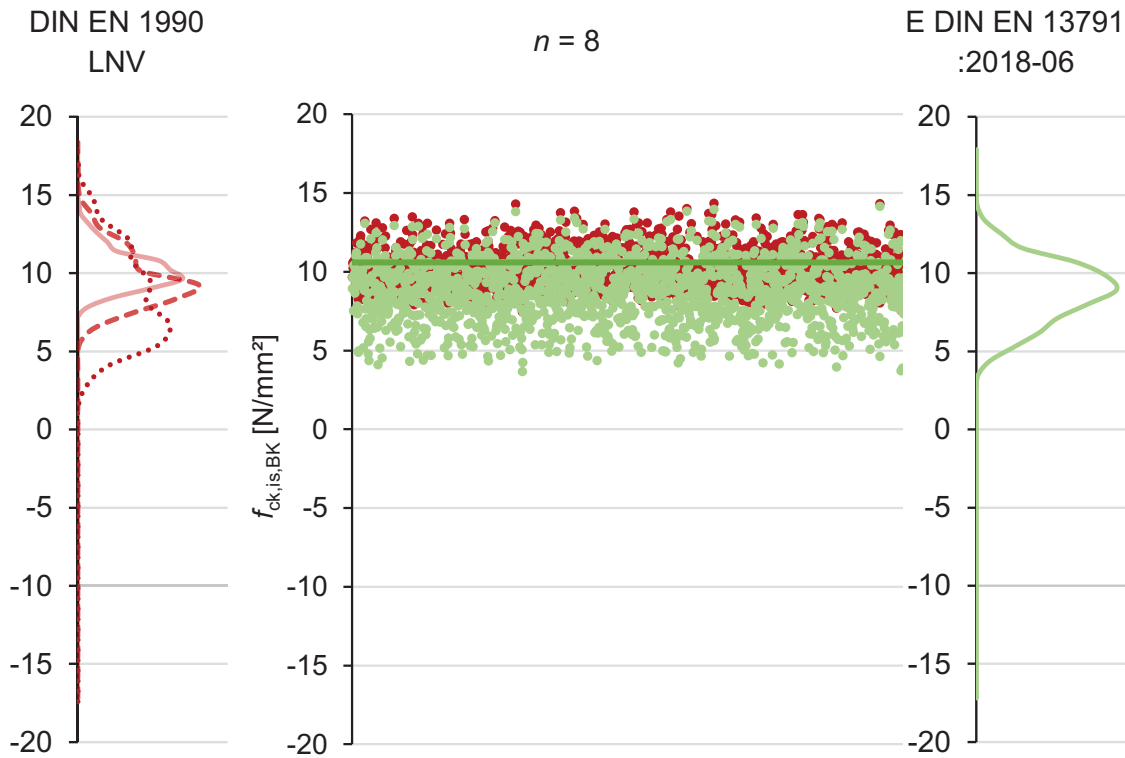


Abb. II. 93 Schwergewichtswand, Dormagen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

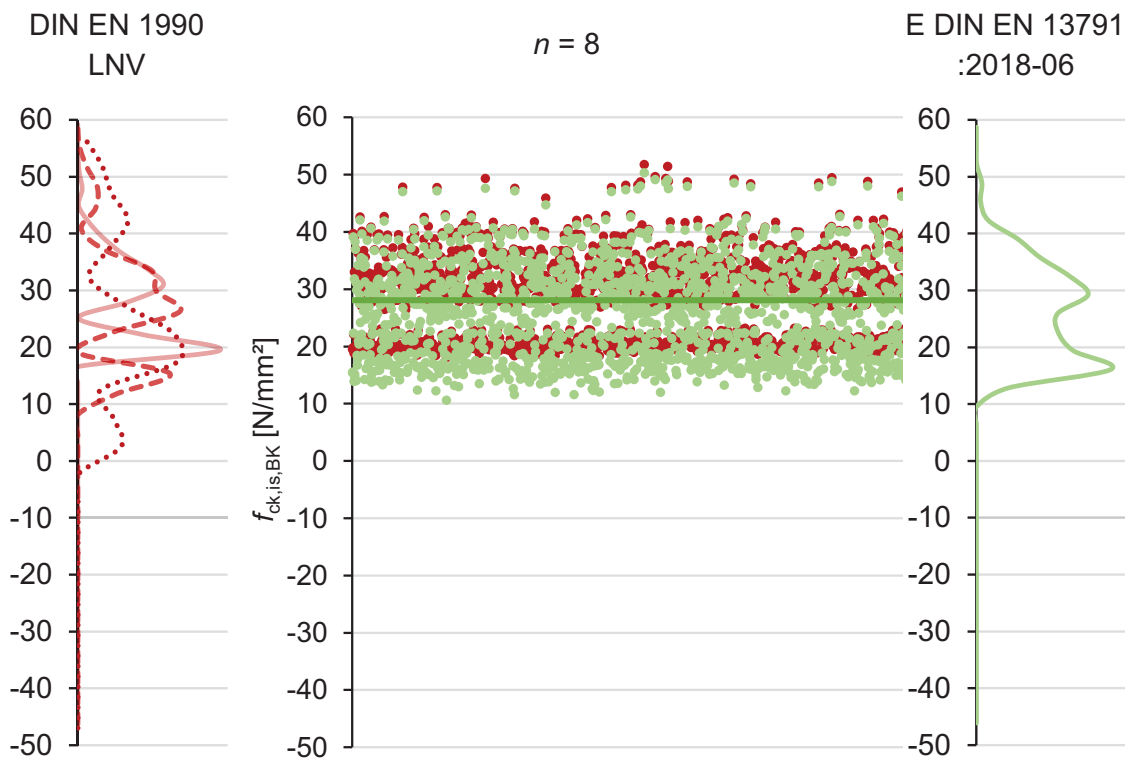


Abb. II. 94 Bodenplatte ACO, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

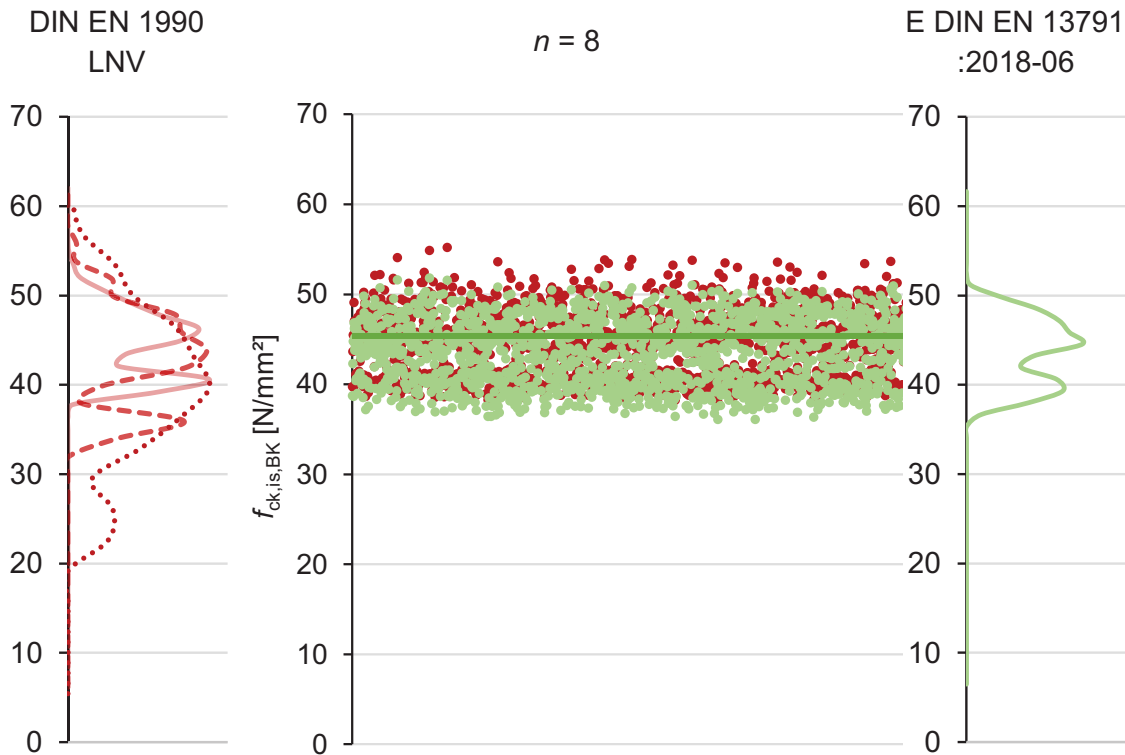


Abb. II. 95 Stützwand Ohmbach Abschnitt I, Pirmasens: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

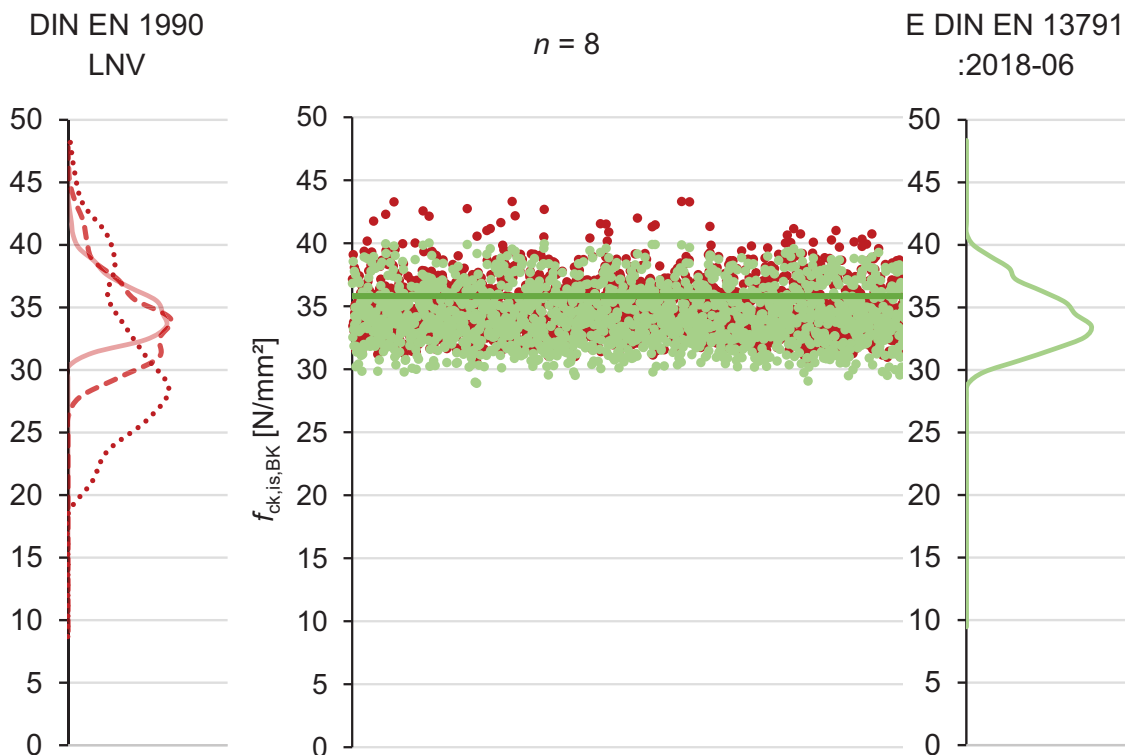


Abb. II. 96 Stützwand Ohmbach Abschnitt II, Pirmasens: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

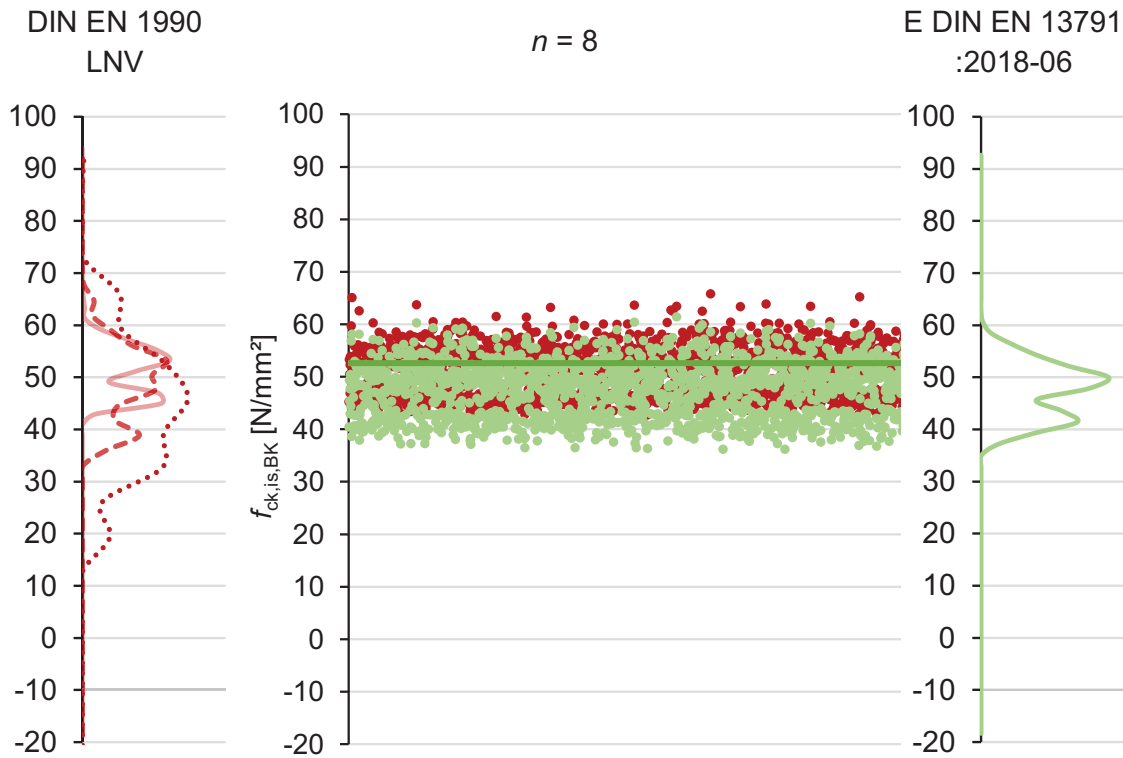


Abb. II. 97 Weserbrücke, Hannoversch Münden: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

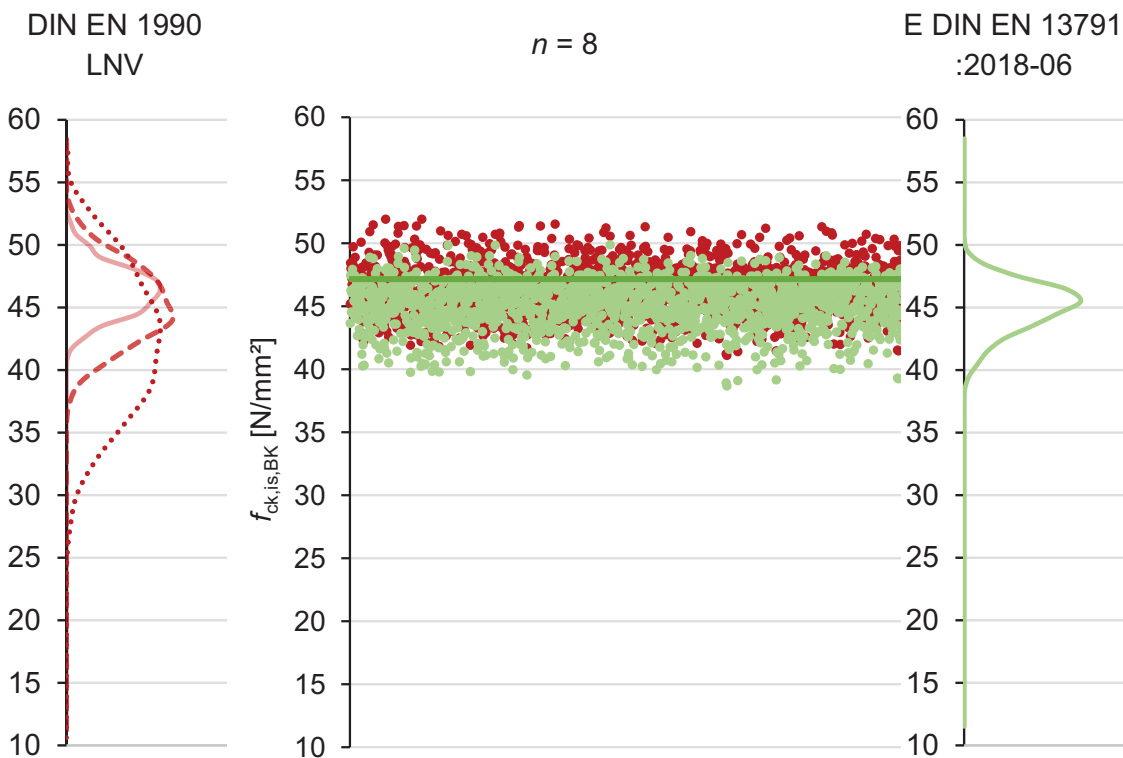


Abb. II. 98 Lahntalbrücke, Limburg: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

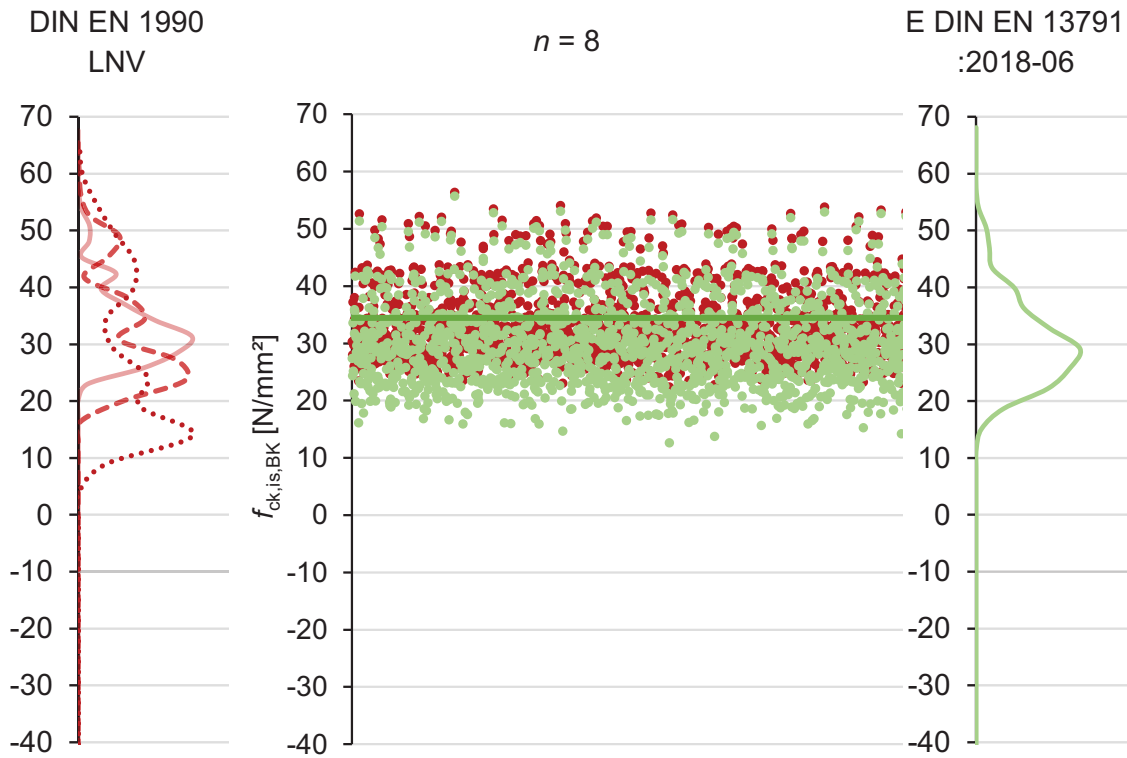


Abb. II. 99 Lautertalbrücke Widerlager, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

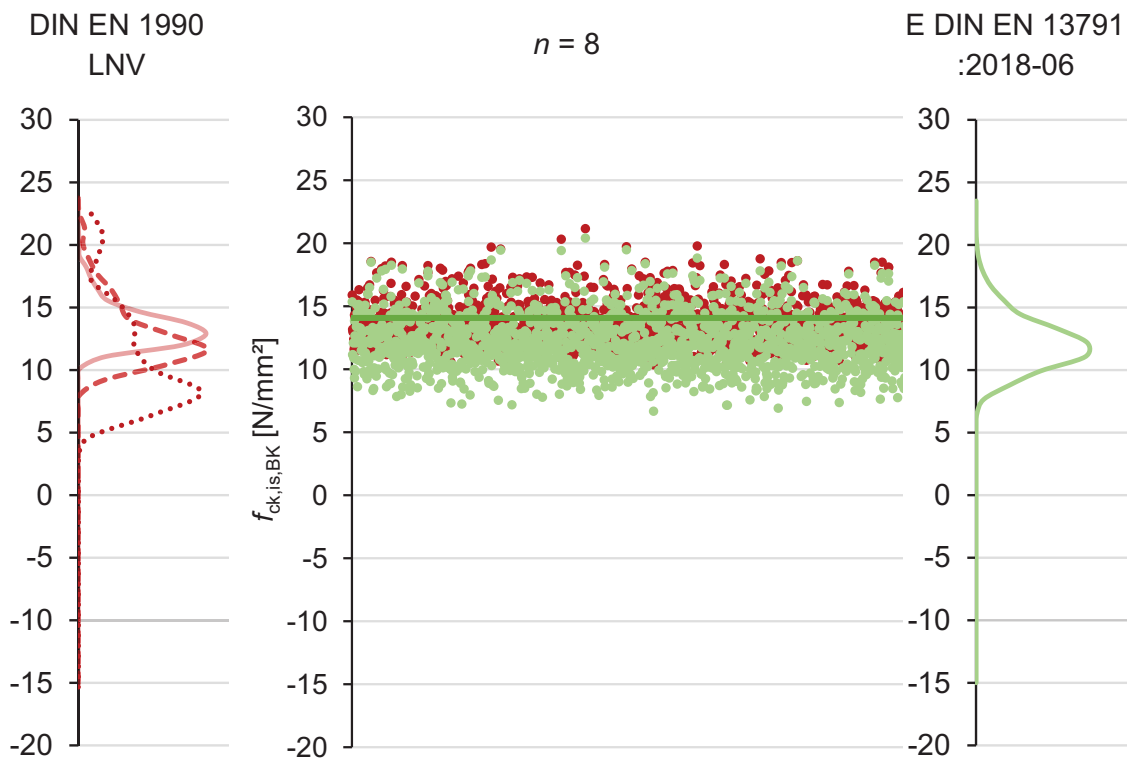


Abb. II. 100 Lautertalbrücke Fahrbahn untere Schicht, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

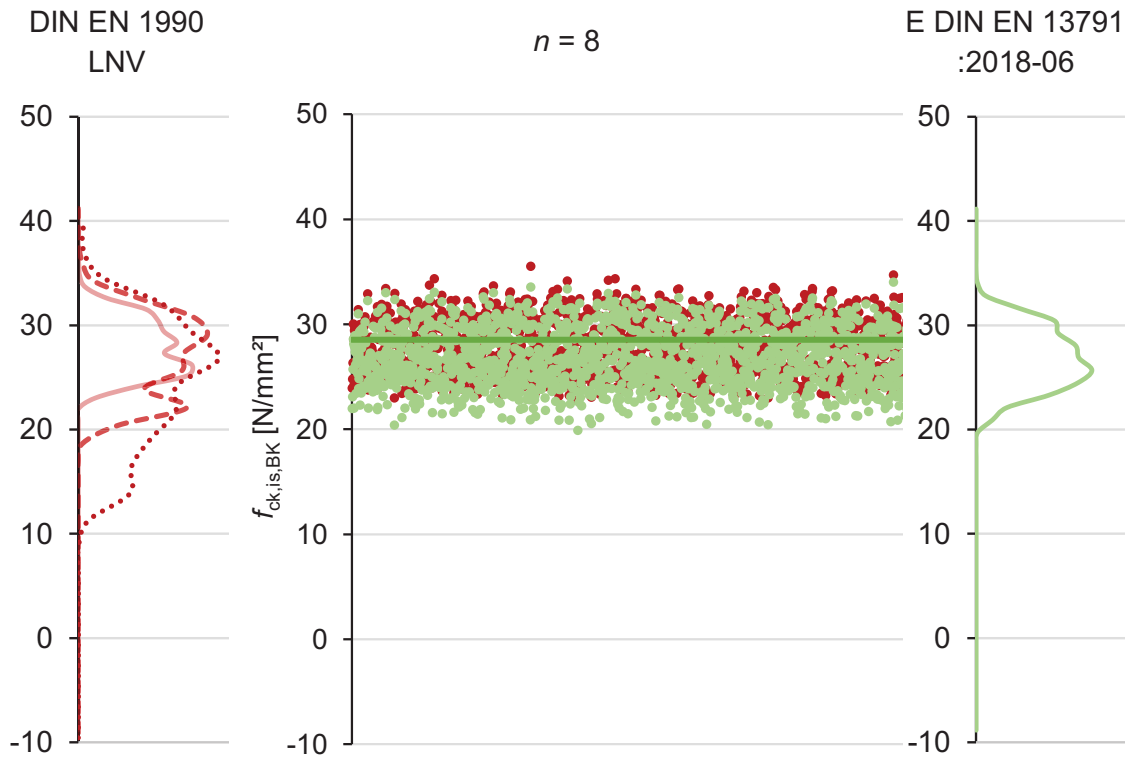


Abb. II. 101 Decke Wohnblock, Ludwigshafen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

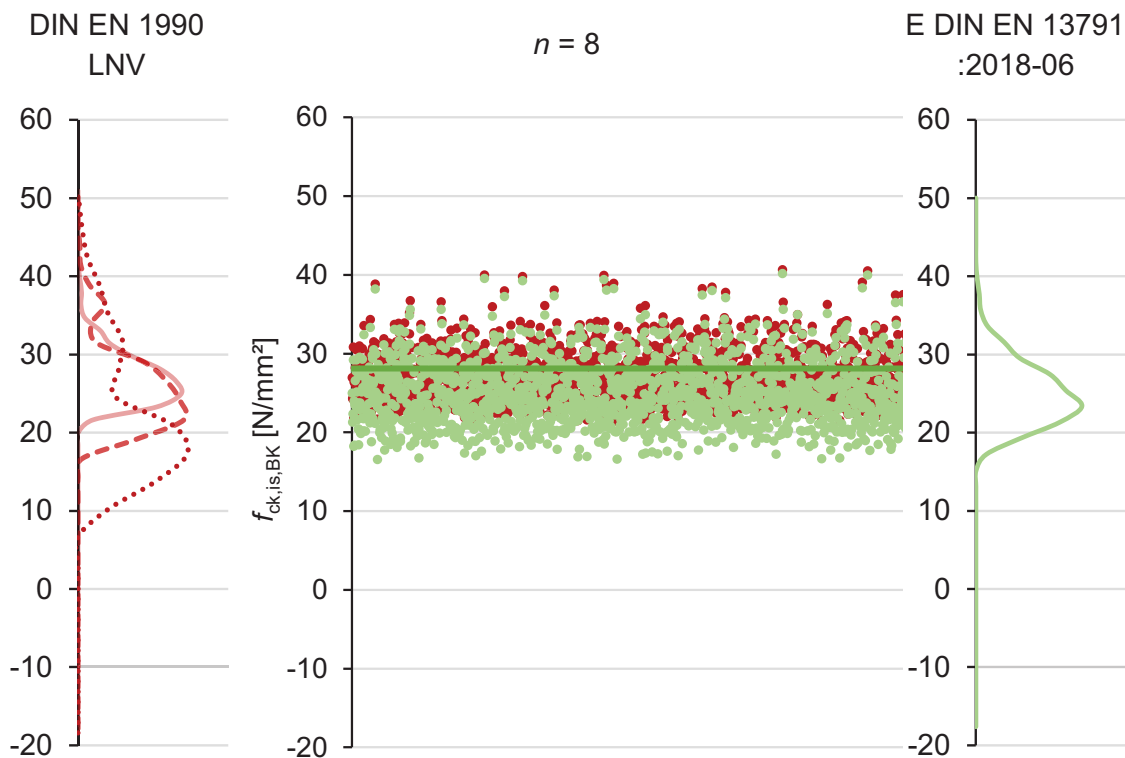


Abb. II. 102 Wand Technische Werke Ludwigshafen, Ludwigshafen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

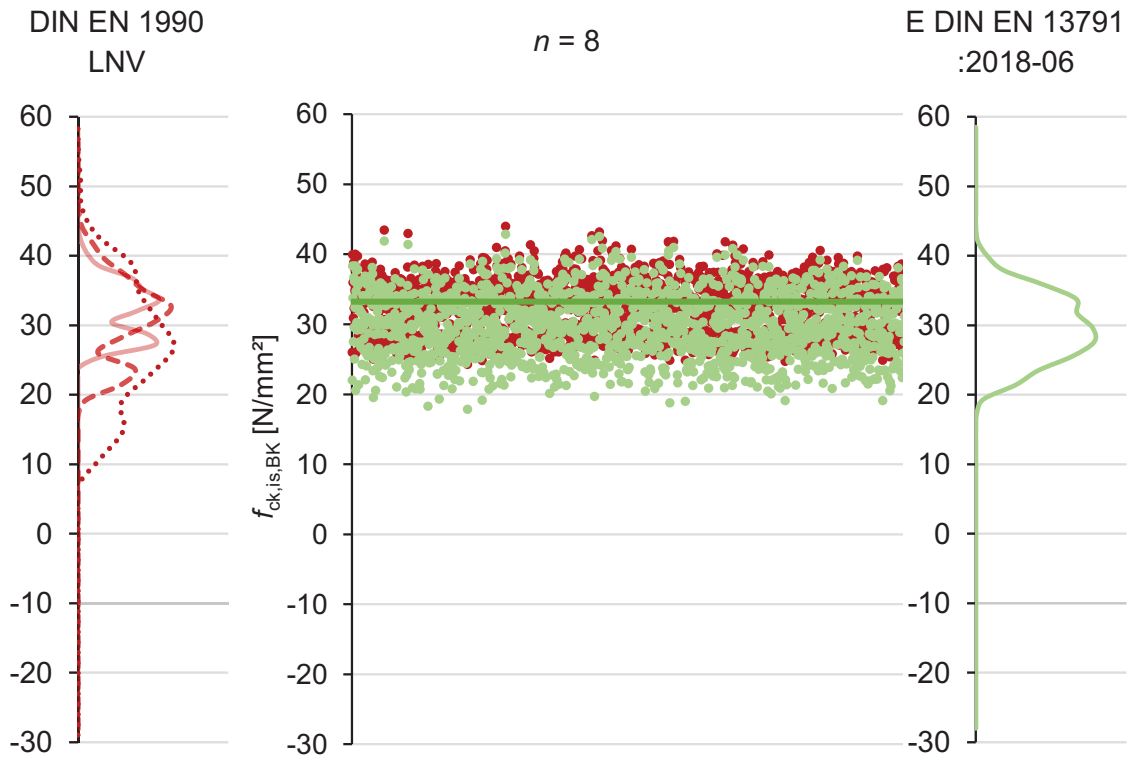


Abb. II. 103 Bauwerk 1: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

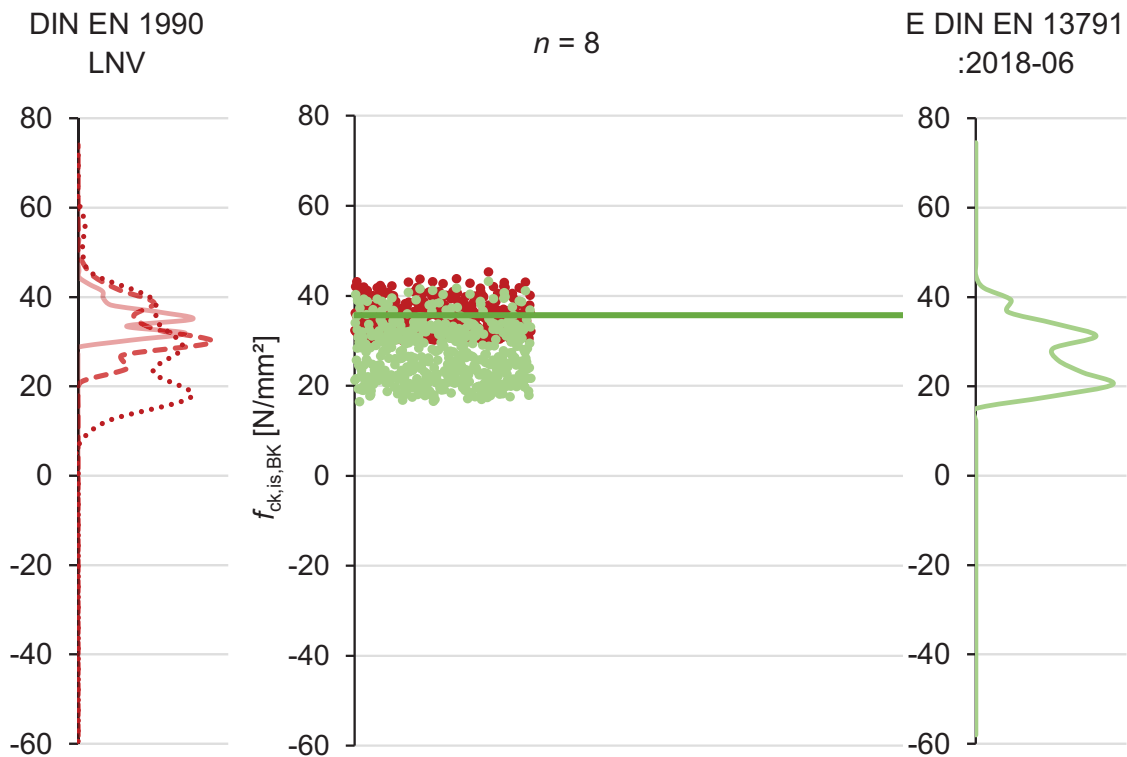


Abb. II. 104 Pfeiler Brücke B270, Langweiler: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

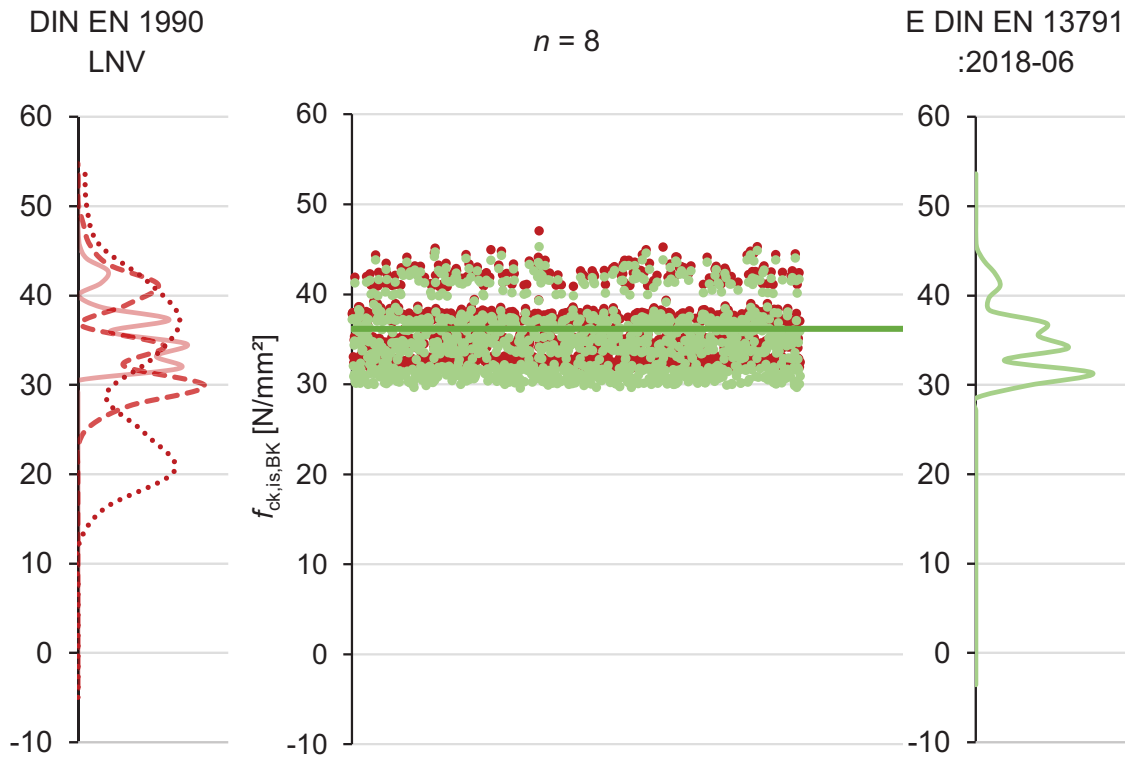


Abb. II. 105 Brücke Autobahnkreuz Mainz-Süd - Auflager, Mainz: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

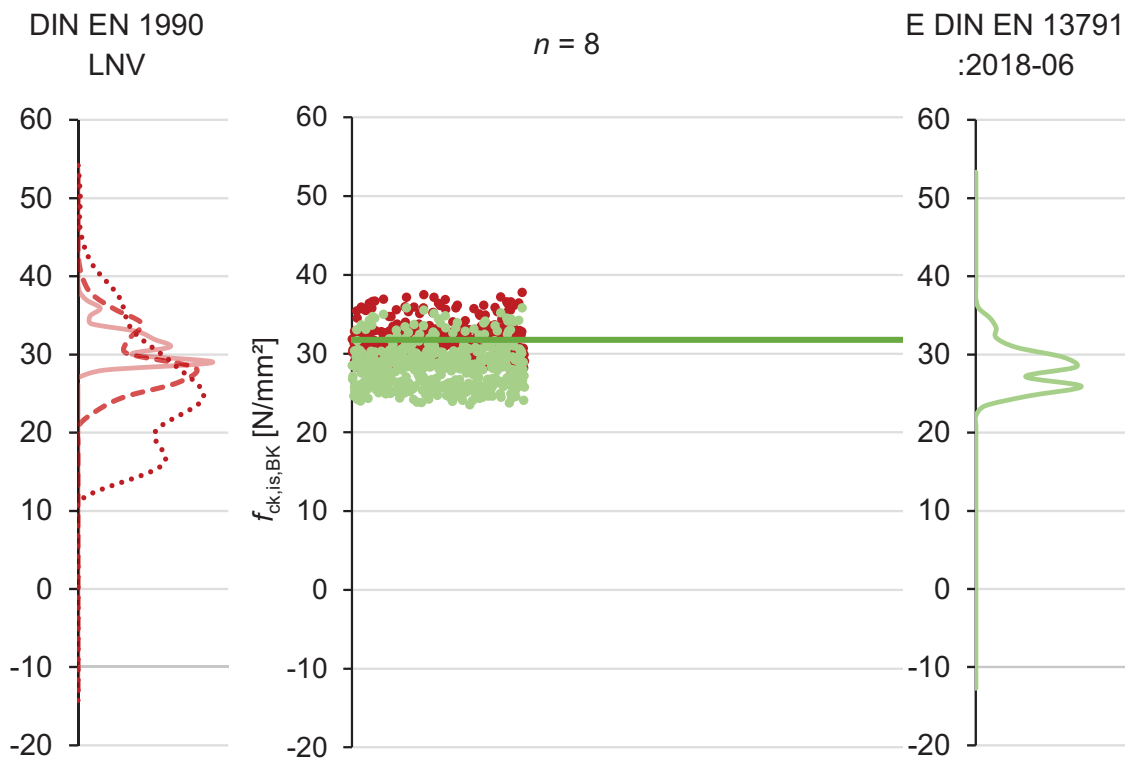


Abb. II. 106 Brücke über den Lockwitzbach, Dresden/Niedersedlitz: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

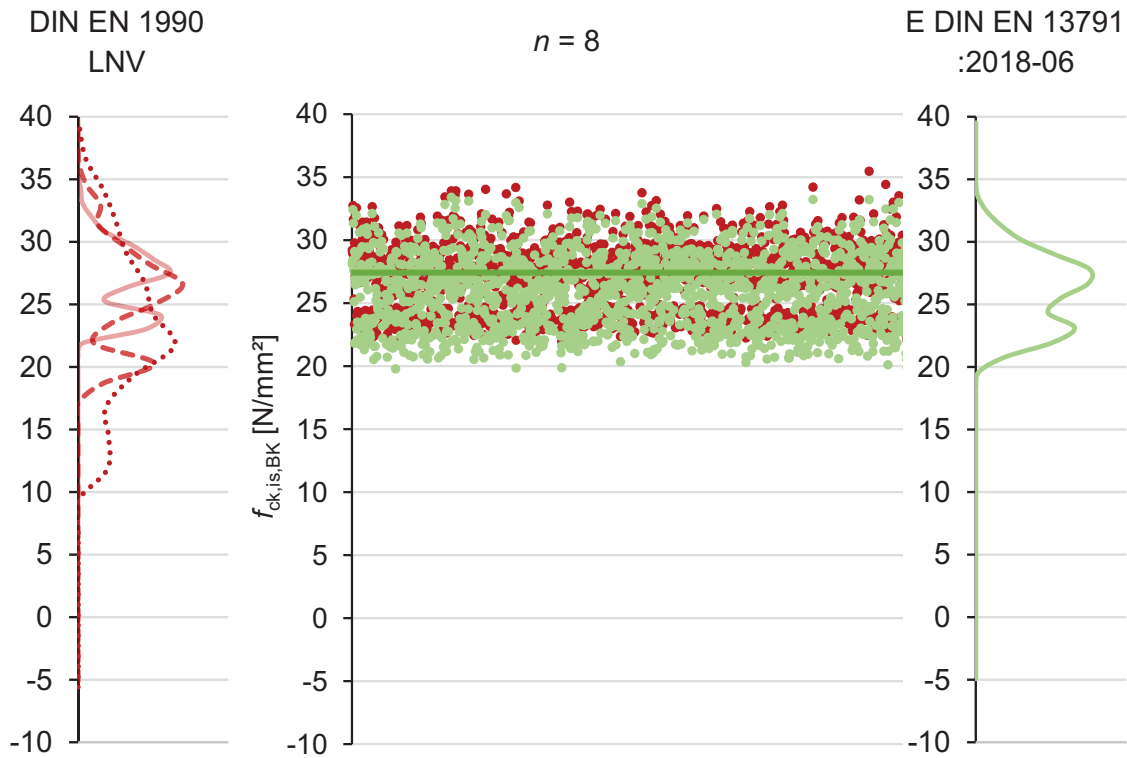


Abb. II. 107 Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

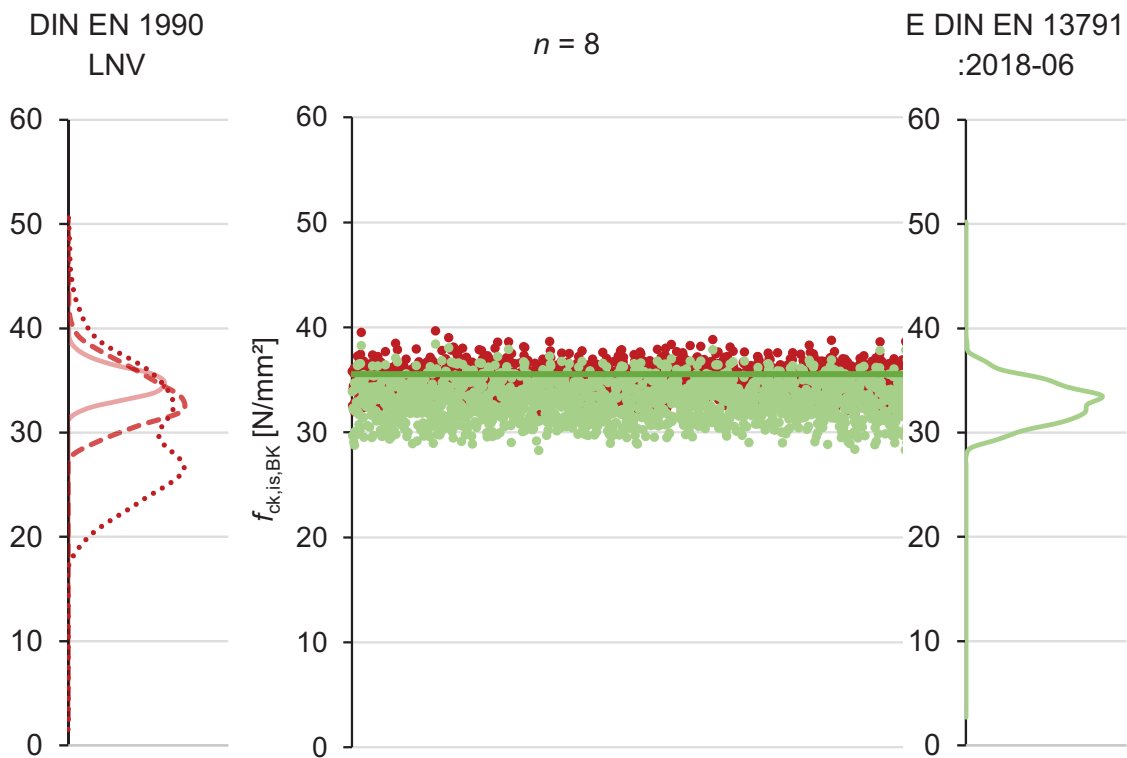


Abb. II. 108 Balkonplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

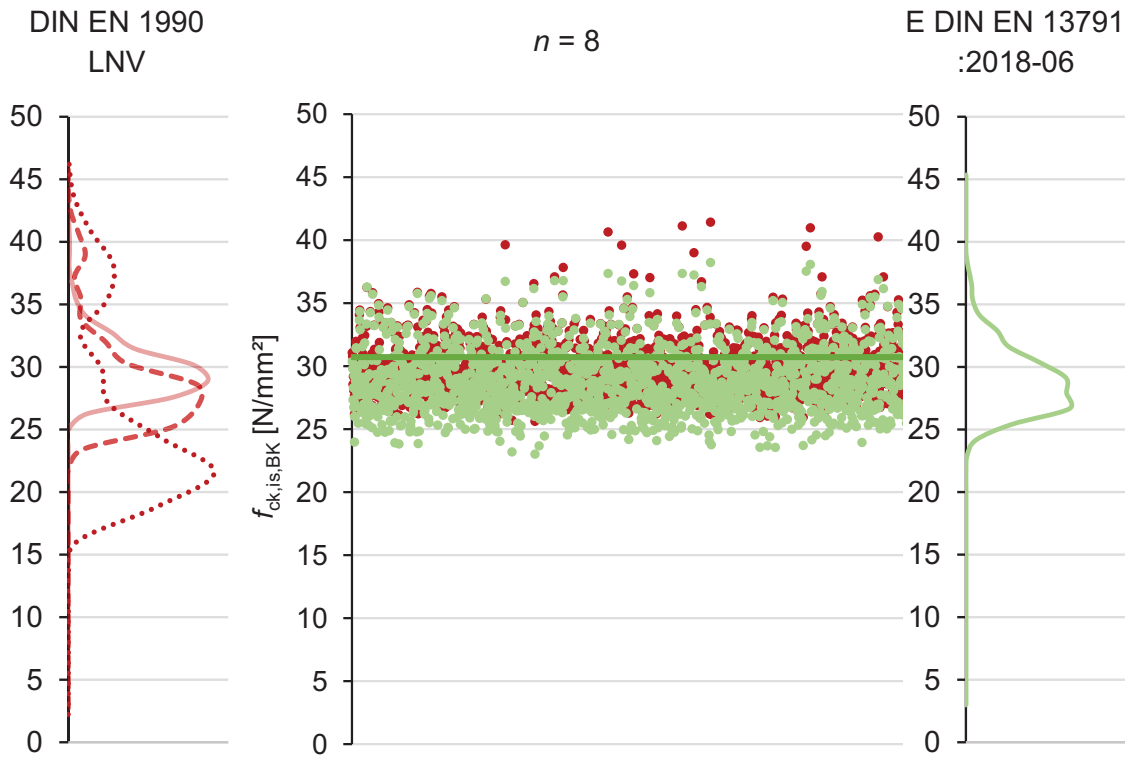


Abb. II. 109 Deckenplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

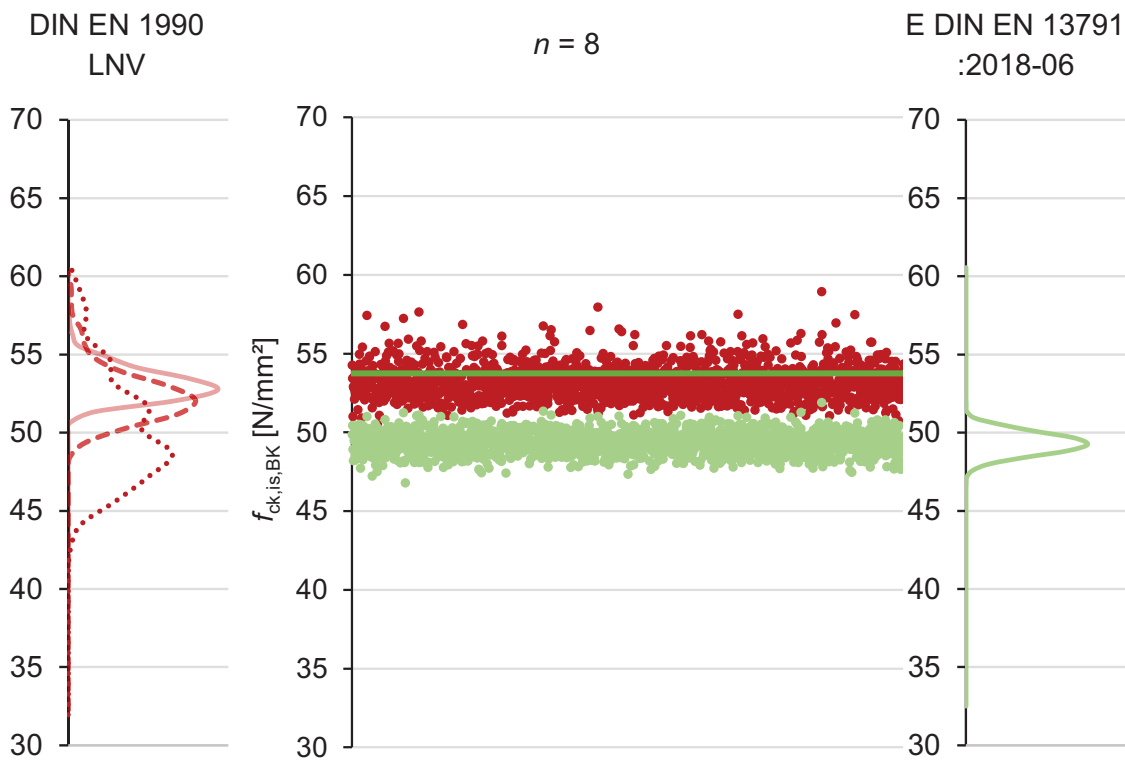


Abb. II. 110 Stützwand, Kusel: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

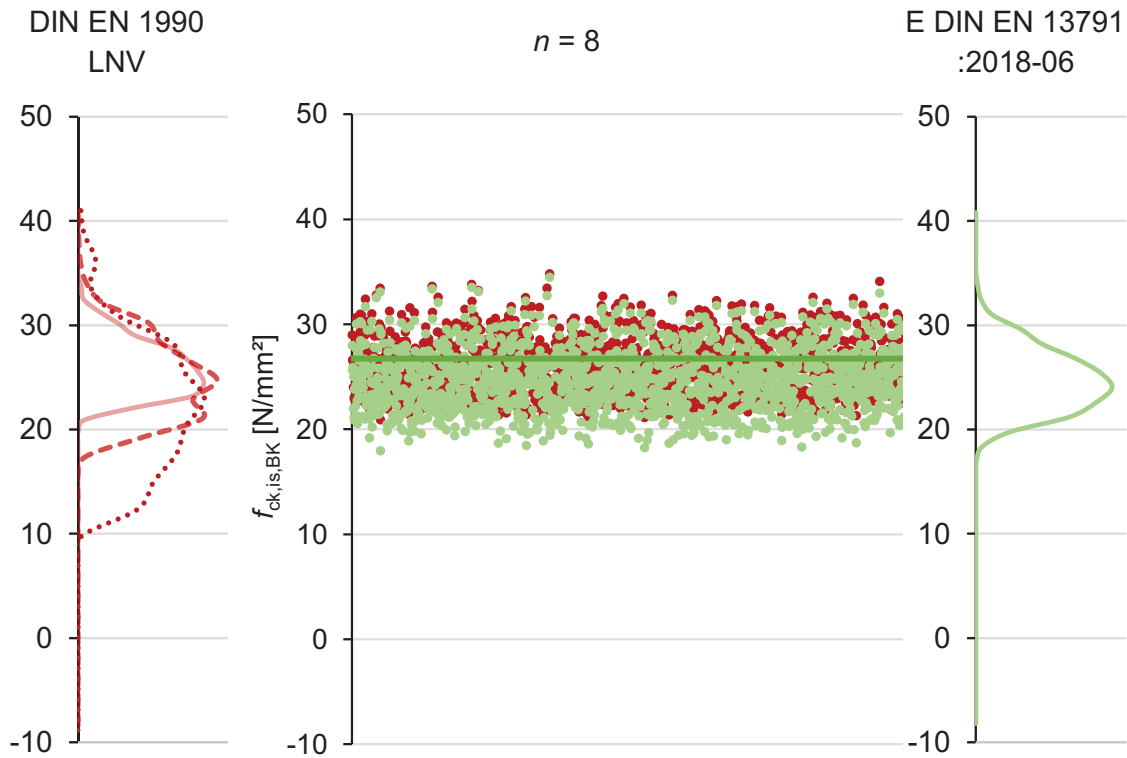


Abb. II. 111 Unterführung A6 Kirchhausen-Biberach (501 A-D), Heilbronn: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

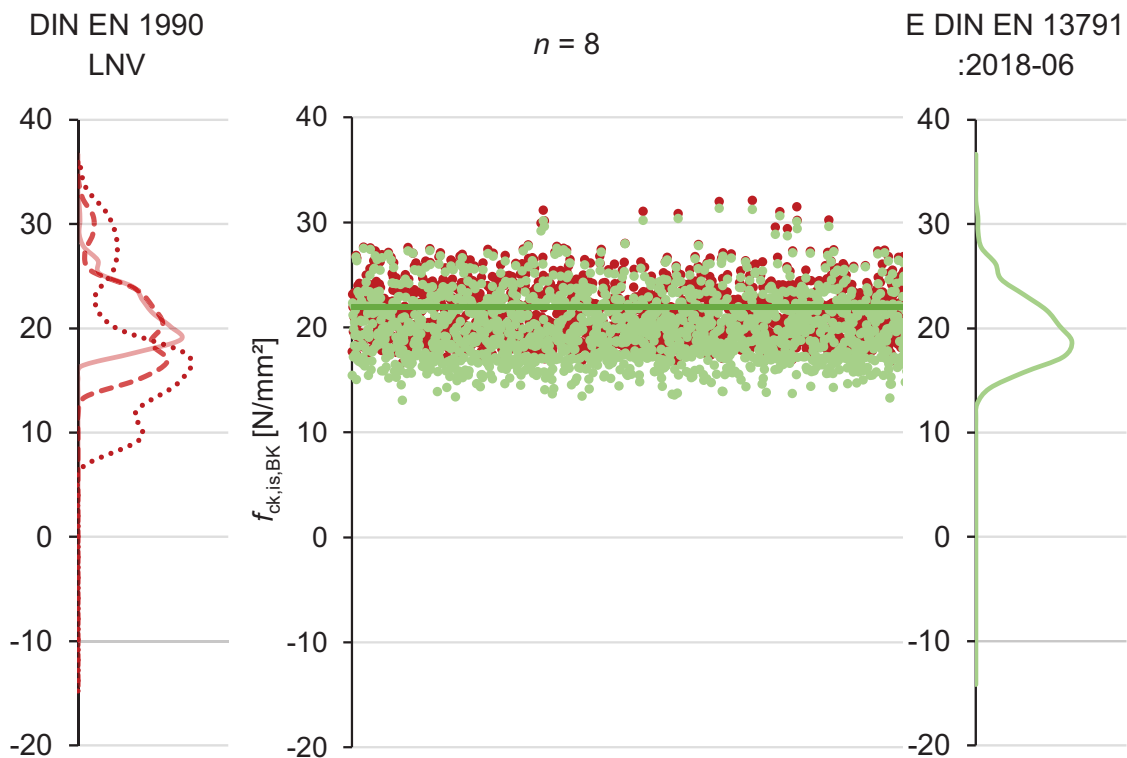


Abb. II. 112 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Heilbronn: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

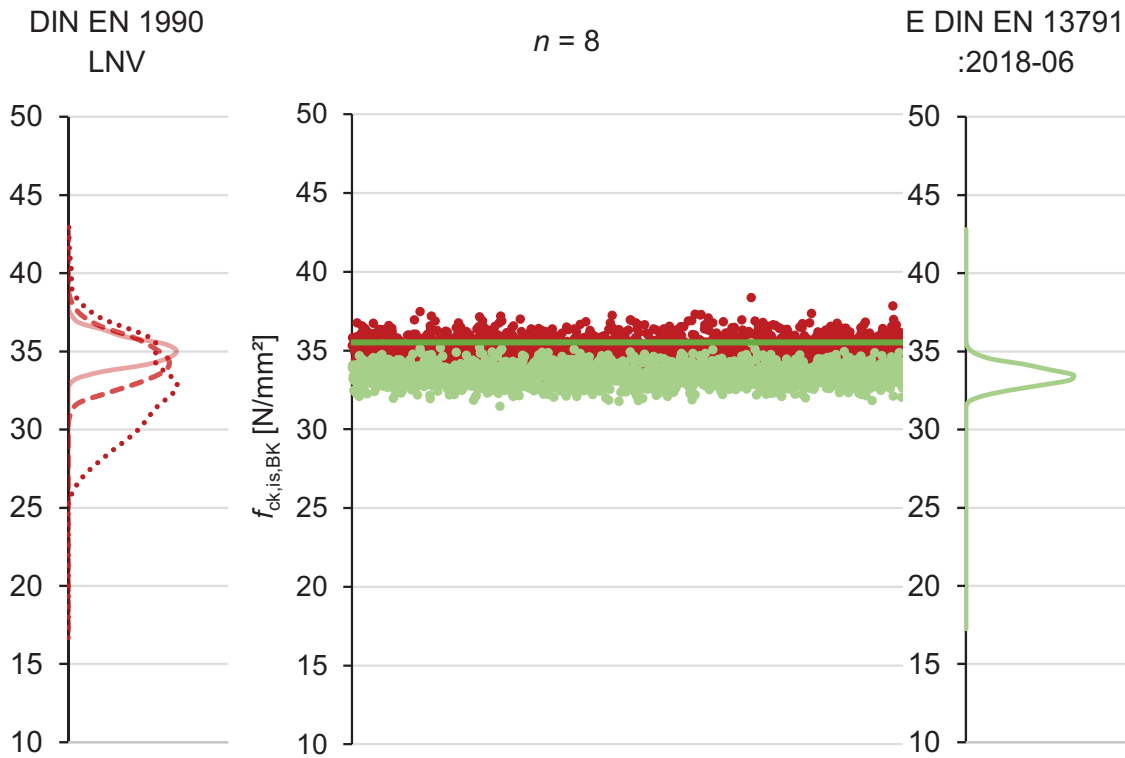


Abb. II. 113 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), Heilbronn: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

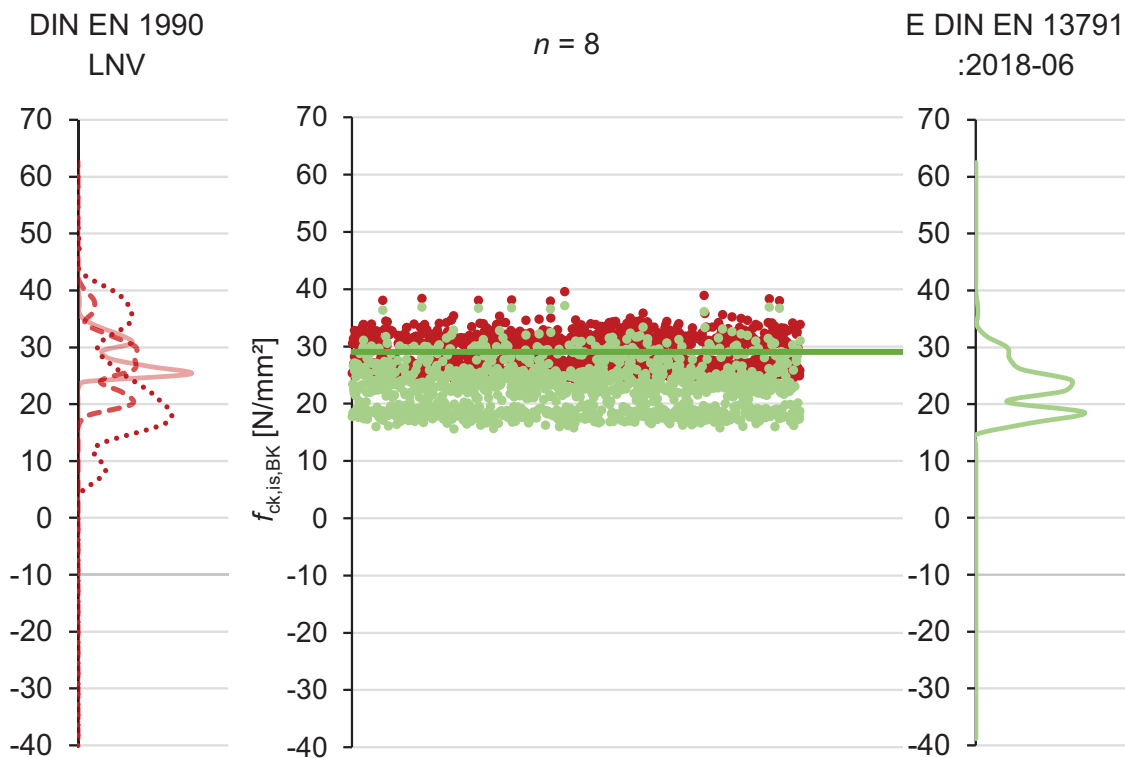


Abb. II. 114 Bauwerk 2: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

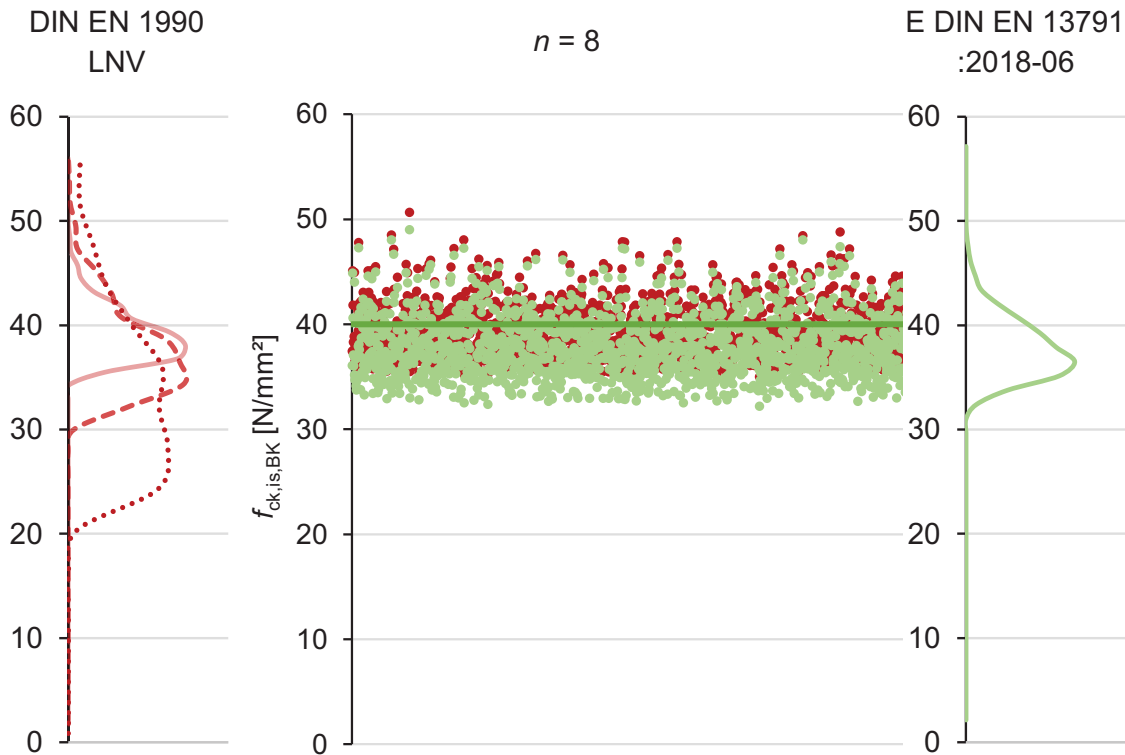


Abb. II. 115 Bauwerk 3: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

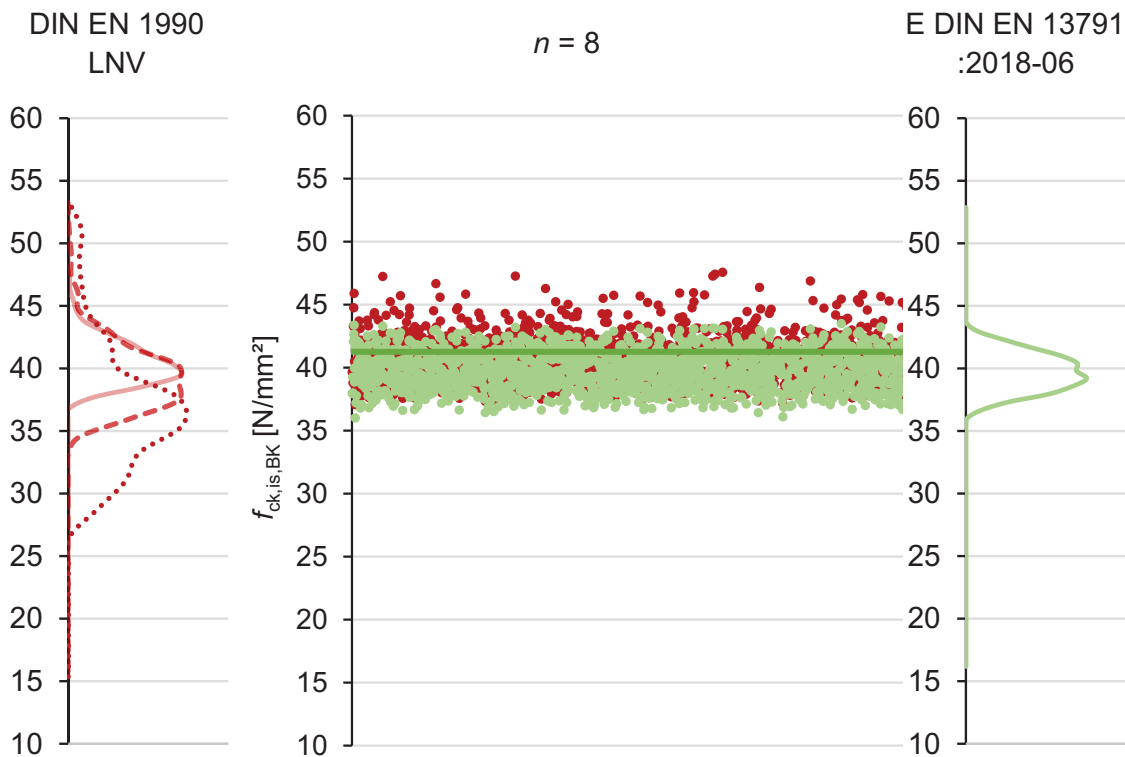


Abb. II. 116 Bauwerk 4: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und E DIN EN 13791:2018-06

Vergleich *DIN EN 1990:2010-12* logarithmische Normalverteilung und *DIN EN 1990:2010-12* Normalverteilung unter Anwendung einer Mindeststandardabweichung $s_{x,min} = 3,0 \text{ N/mm}^2$ (*CEN - N102*)

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse einer Bewertung der Teilstichproben mit einer logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* und einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* in Kombination mit einem Mindestwerte der Standardabweichung $s_{x,min} = 3,0 \text{ N/mm}^2$ gegenübergestellt.

Die mit der logarithmischen Normalverteilung ermittelten Ergebnisse werden durch rote und die mit einer Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* in Kombination mit einem Mindestwert der Standardabweichung $s_{x,min} = 3,0 \text{ N/mm}^2$ ermittelten Ergebnisse durch grüne Punkte dargestellt.

Zusätzlich ist die empirische Verteilungsdichte jeweils für $n = 3$, $n = 5$ und $n = 8$ abgebildet.

Die bei Abb. II.117 beschriebene Legende ist in gleicher Form auch für die Abbildungen Abb. II.118 bis Abb. II.145 gültig.

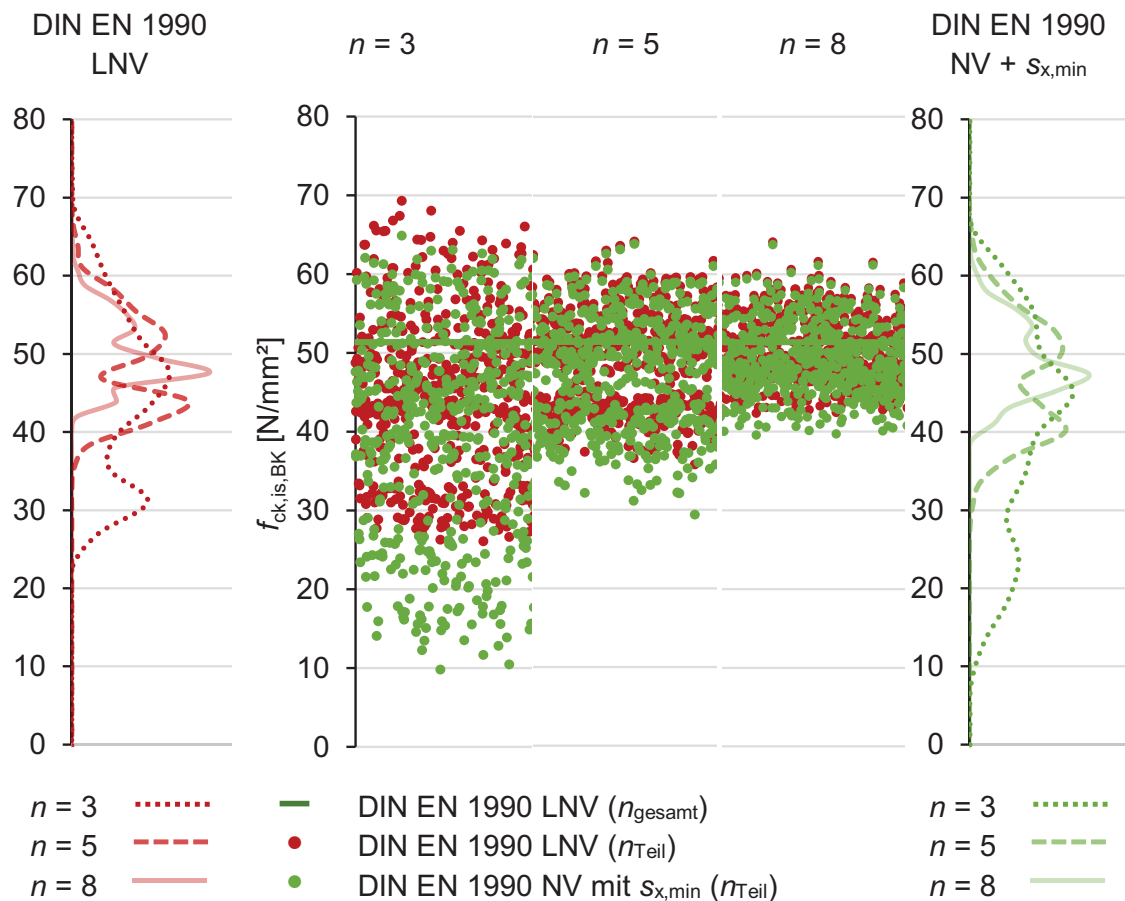


Abb. II. 117 Tropfkörper Kläranlage Blümeltal, Pirmasens: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

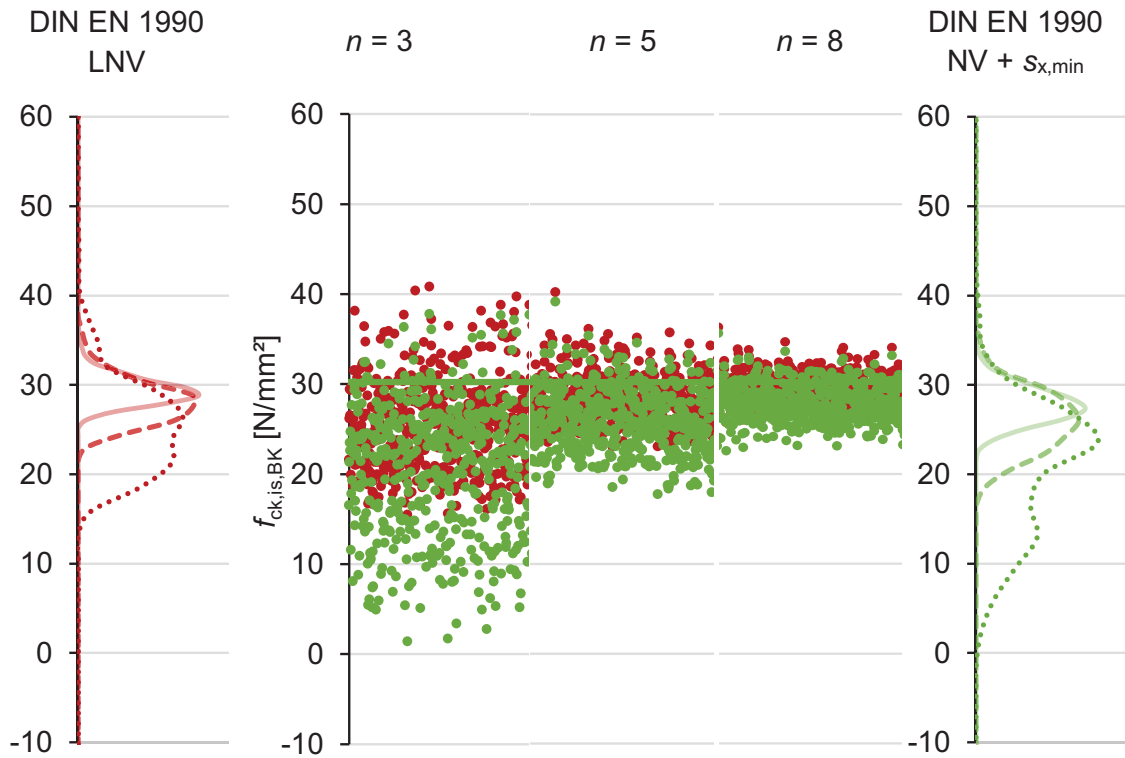


Abb. II. 118 Autobahnunterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

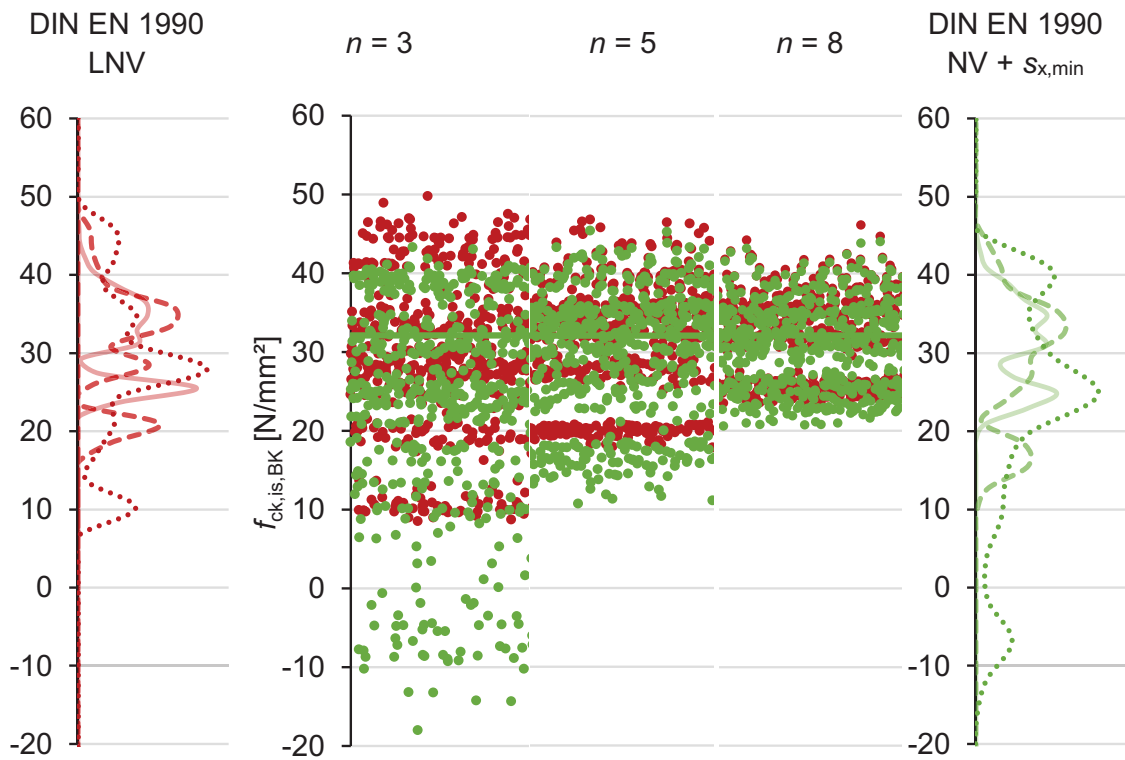


Abb. II. 119 Autobahnunterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

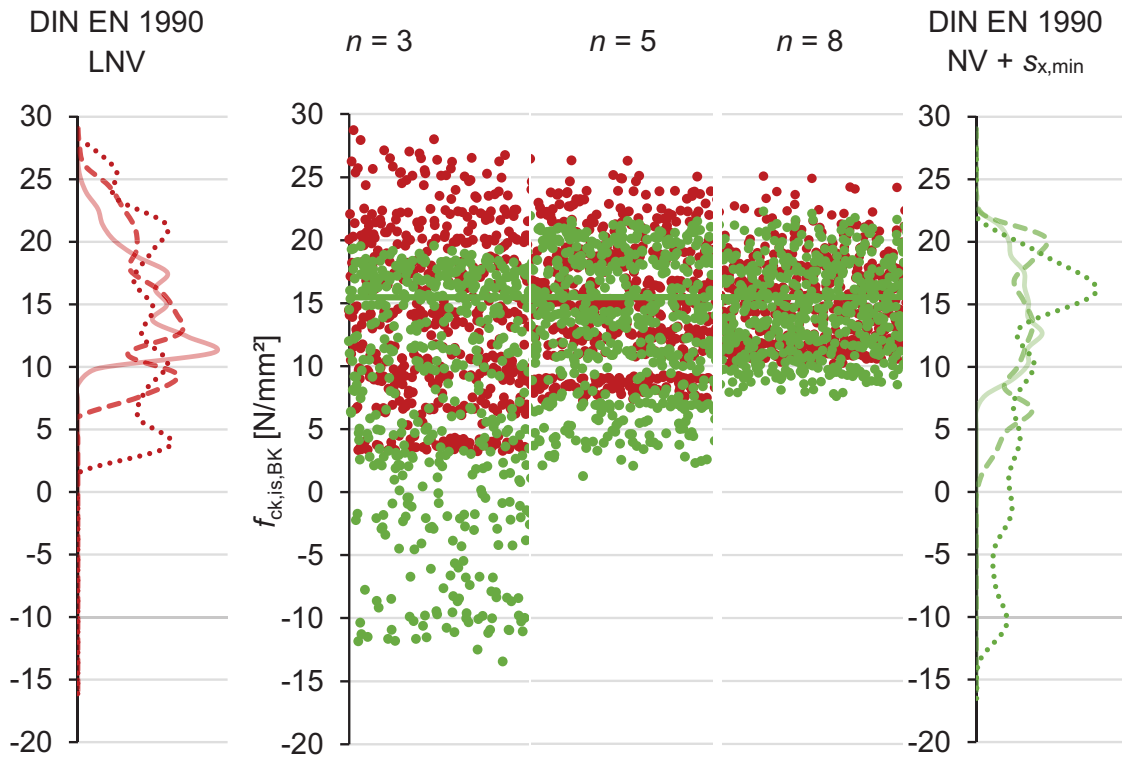


Abb. II. 120 Umspannwerk, Sulzbach: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

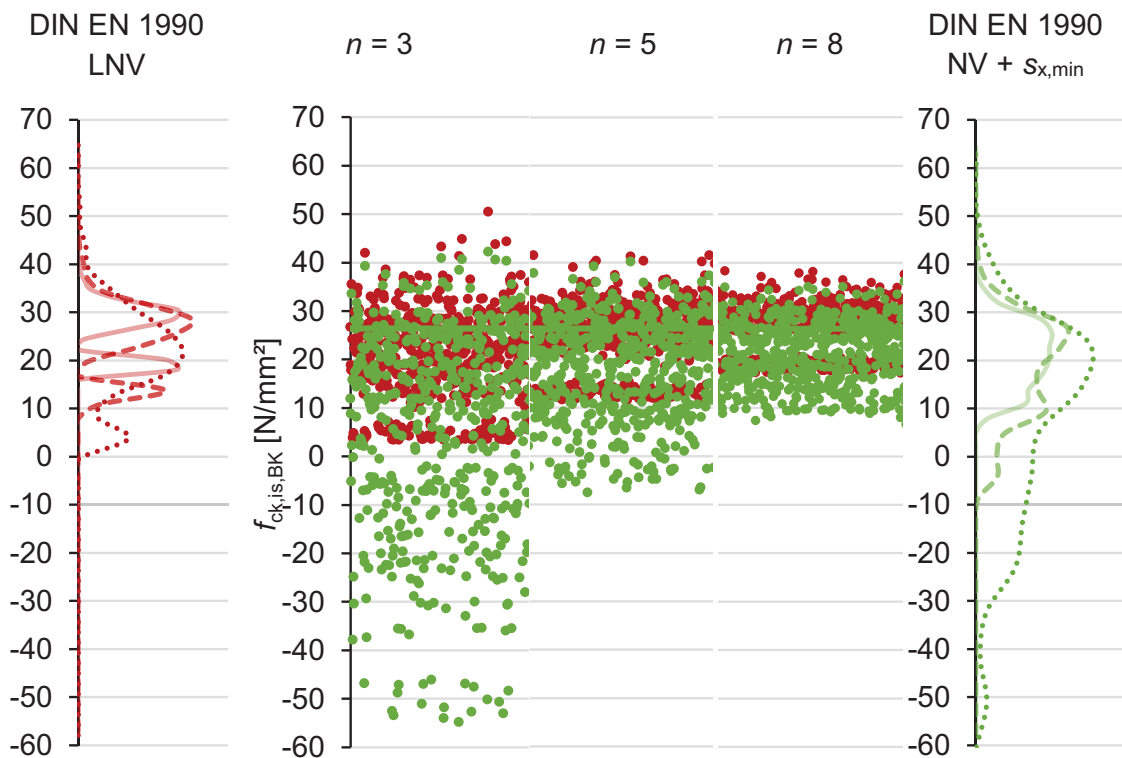


Abb. II. 121 Hochwasserschutzwand, Dormagen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

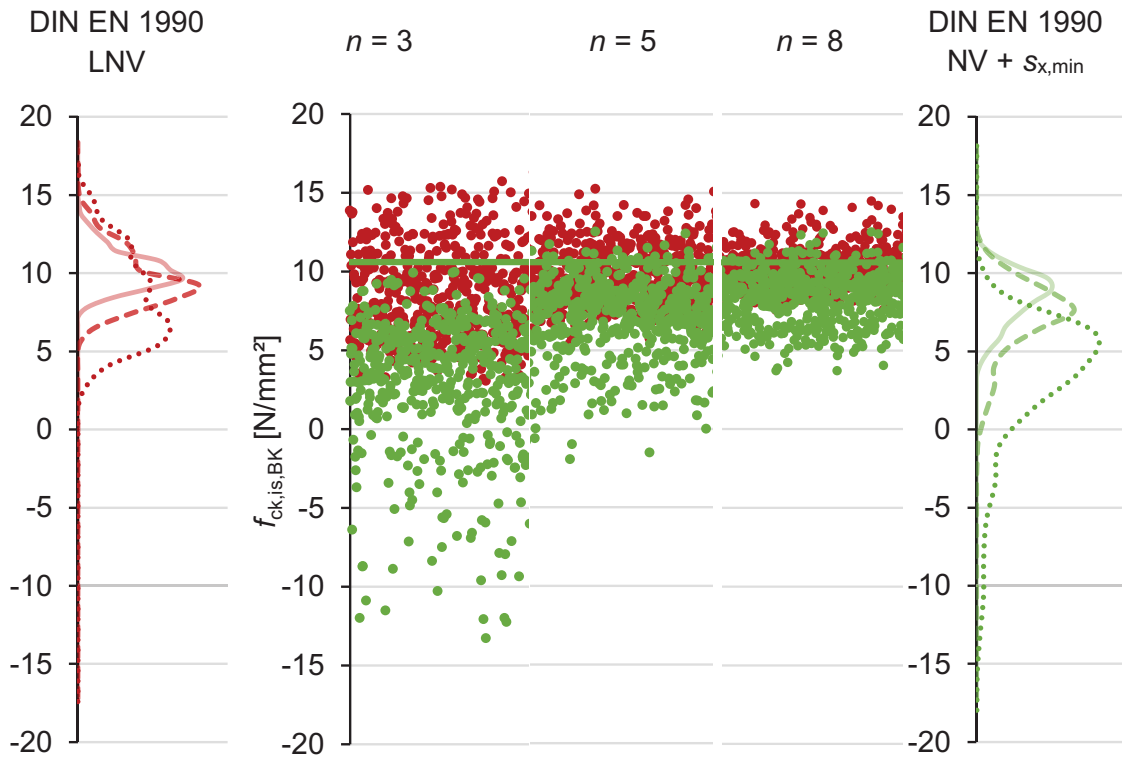


Abb. II. 122 Schwergewichtswand, Dormagen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

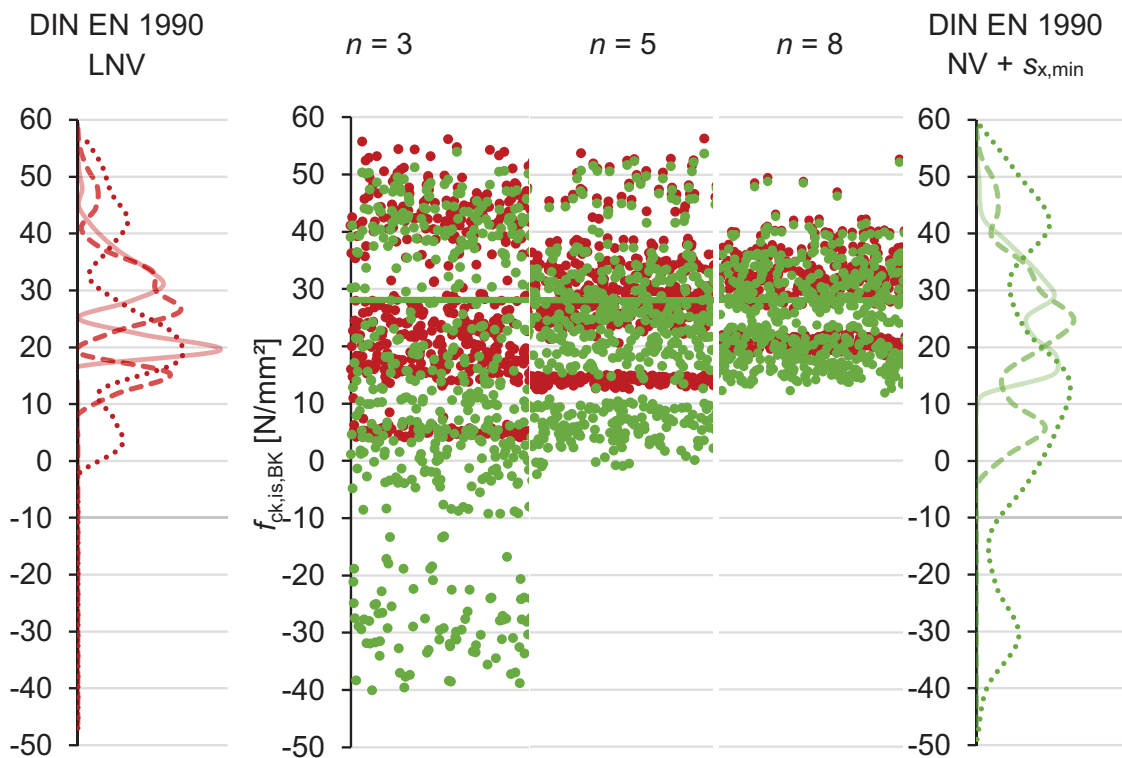


Abb. II. 123 Bodenplatte ACO, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

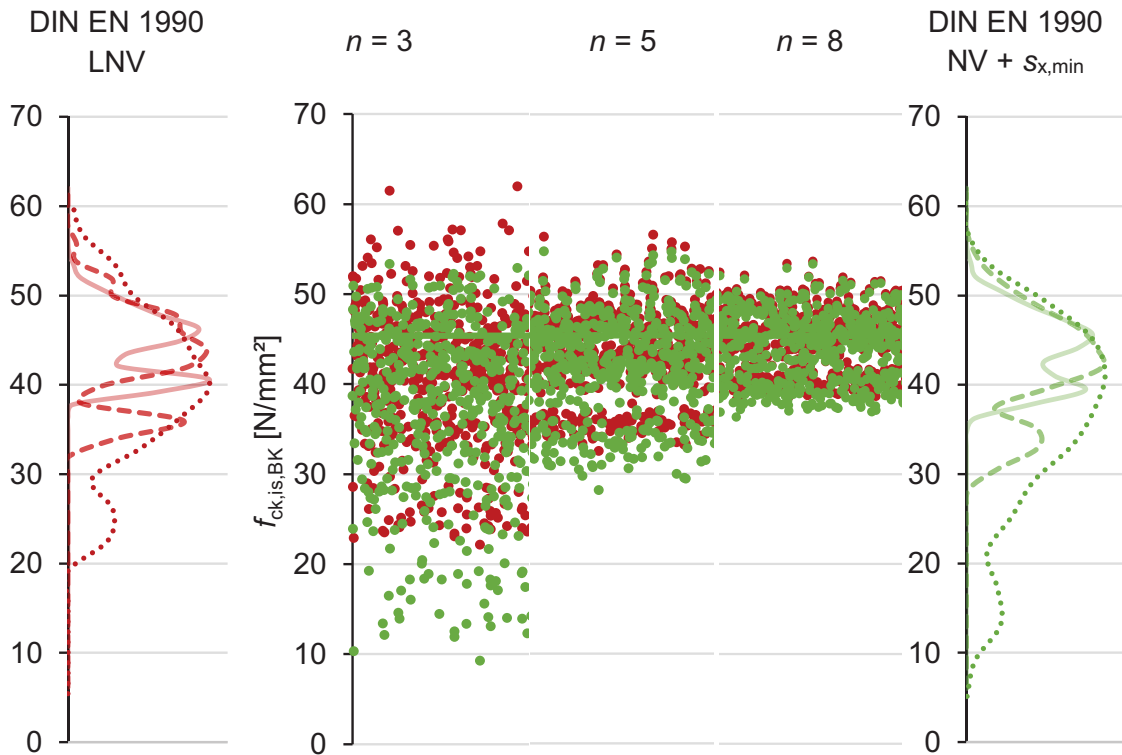


Abb. II. 124 Stützwand Ohmbach Abschnitt I, Pirmasens: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

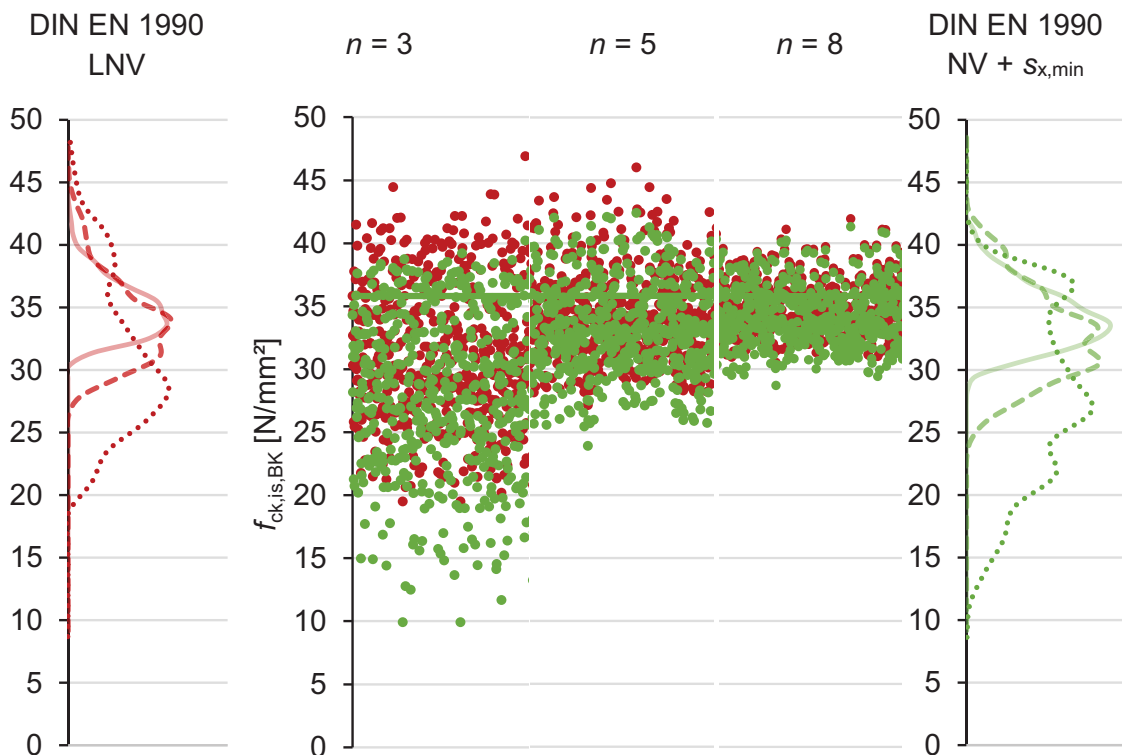


Abb. II. 125 Stützwand Ohmbach Abschnitt II, Pirmasens: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

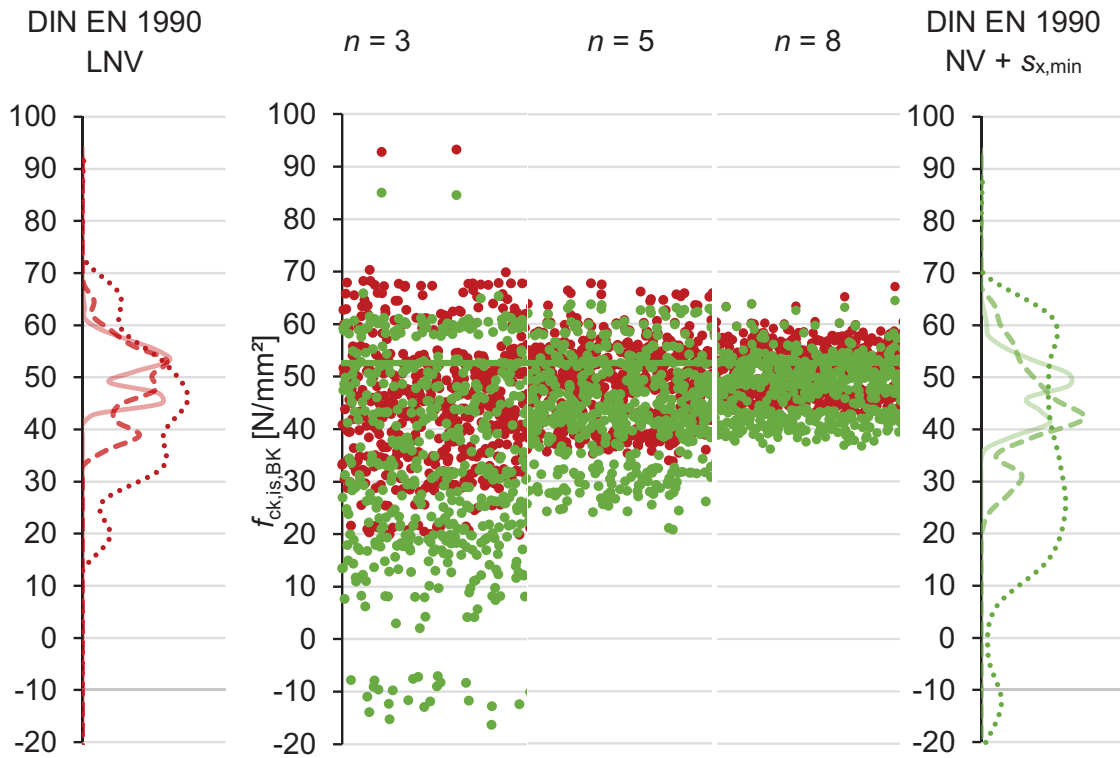


Abb. II. 126 Weserbrücke, Hannoversch Münden: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

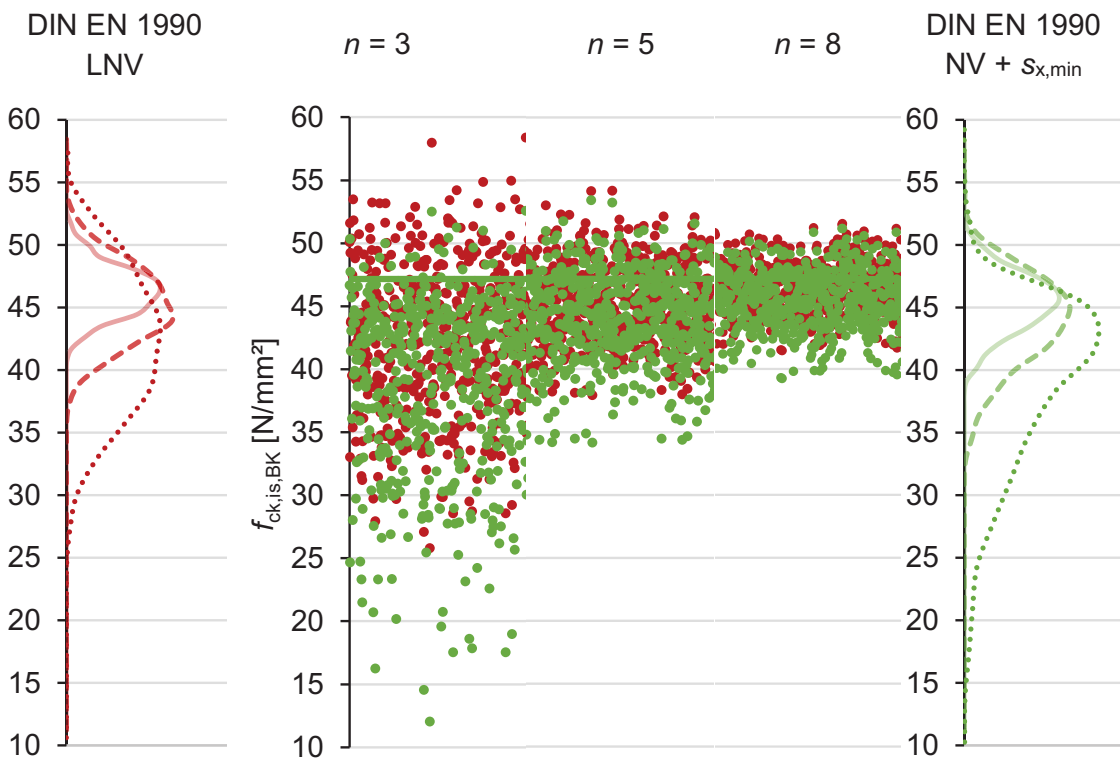


Abb. II. 127 Lahntalbrücke, Limburg: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

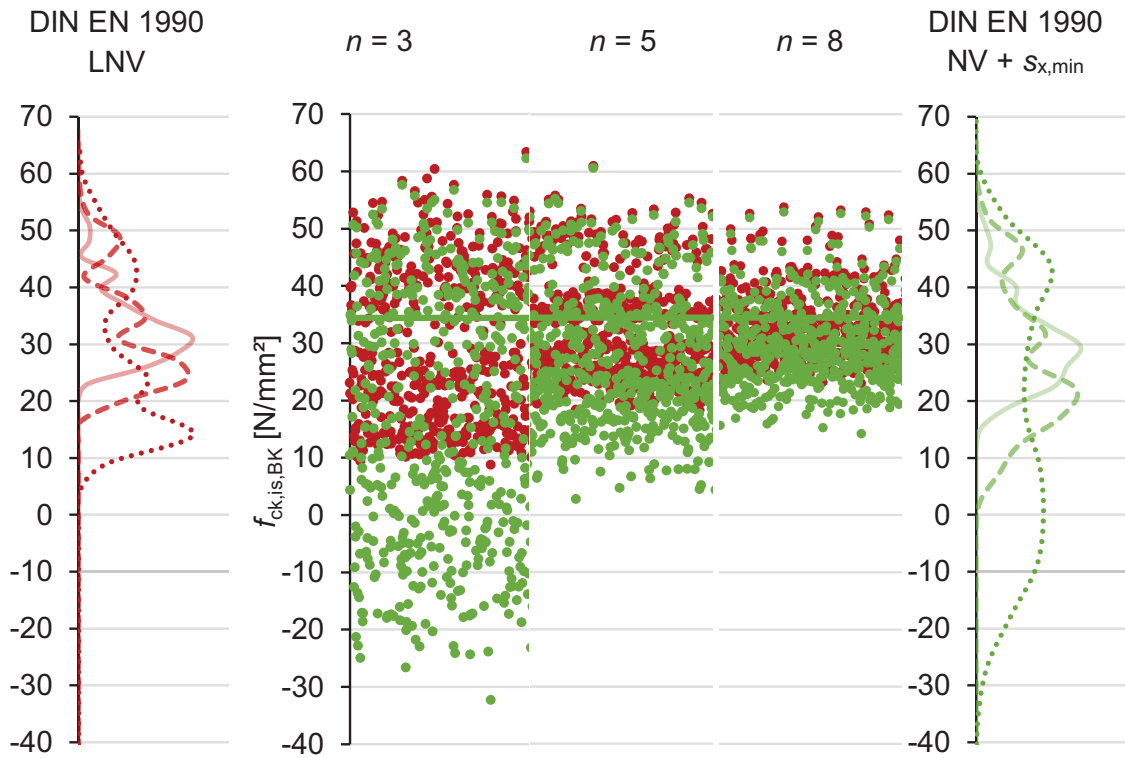


Abb. II. 128 Lautertalbrücke Widerlager, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

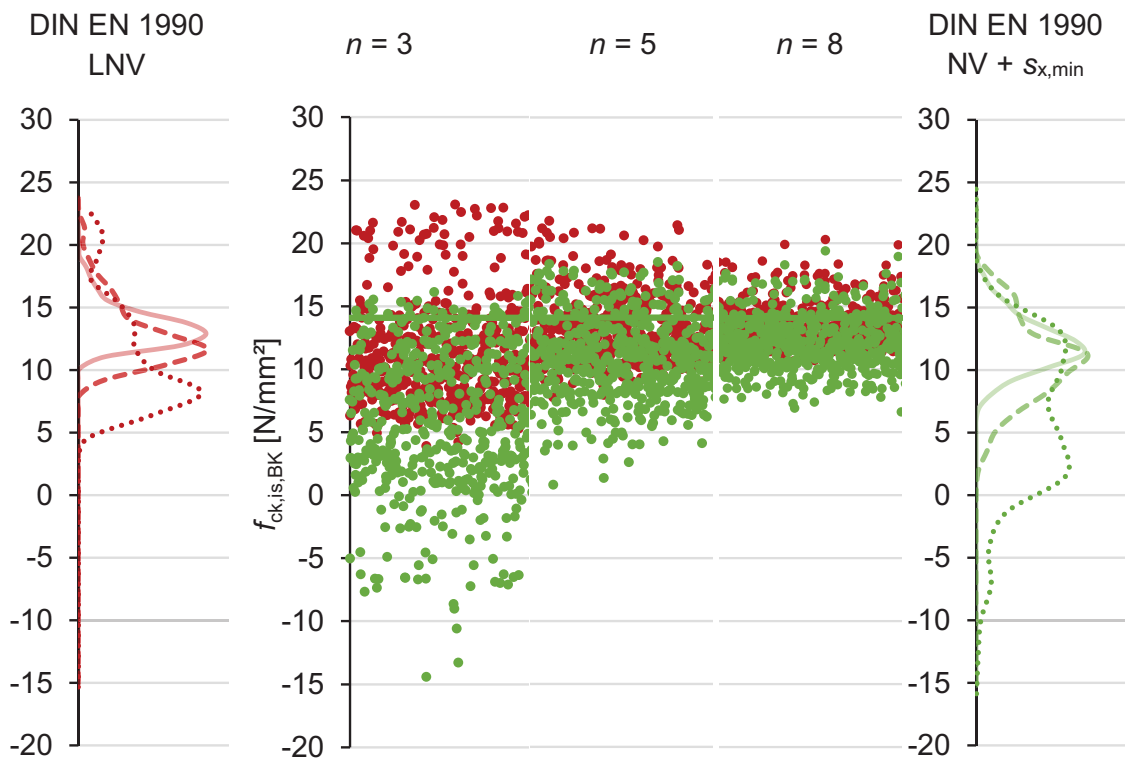


Abb. II. 129 Lautertalbrücke Fahrbahn untere Schicht, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

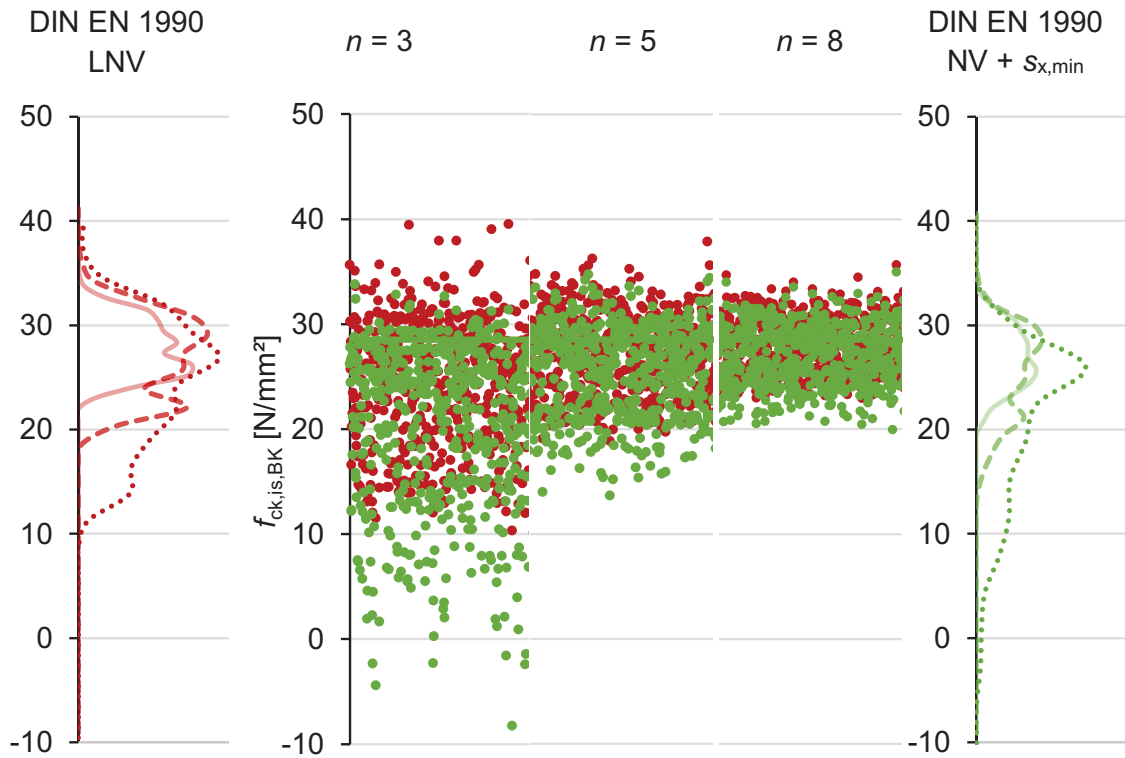


Abb. II. 130 Decke Wohnblock, Ludwigshafen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

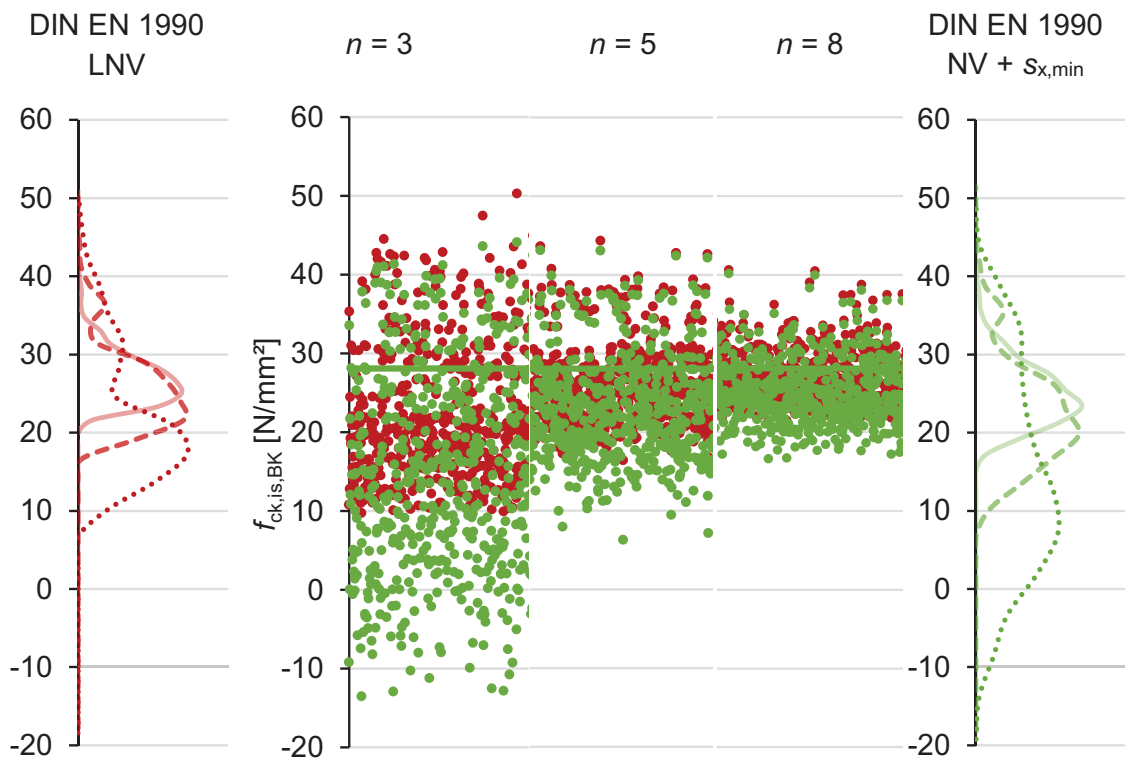


Abb. II. 131 Wand Technische Werke Ludwigshafen, Ludwigshafen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

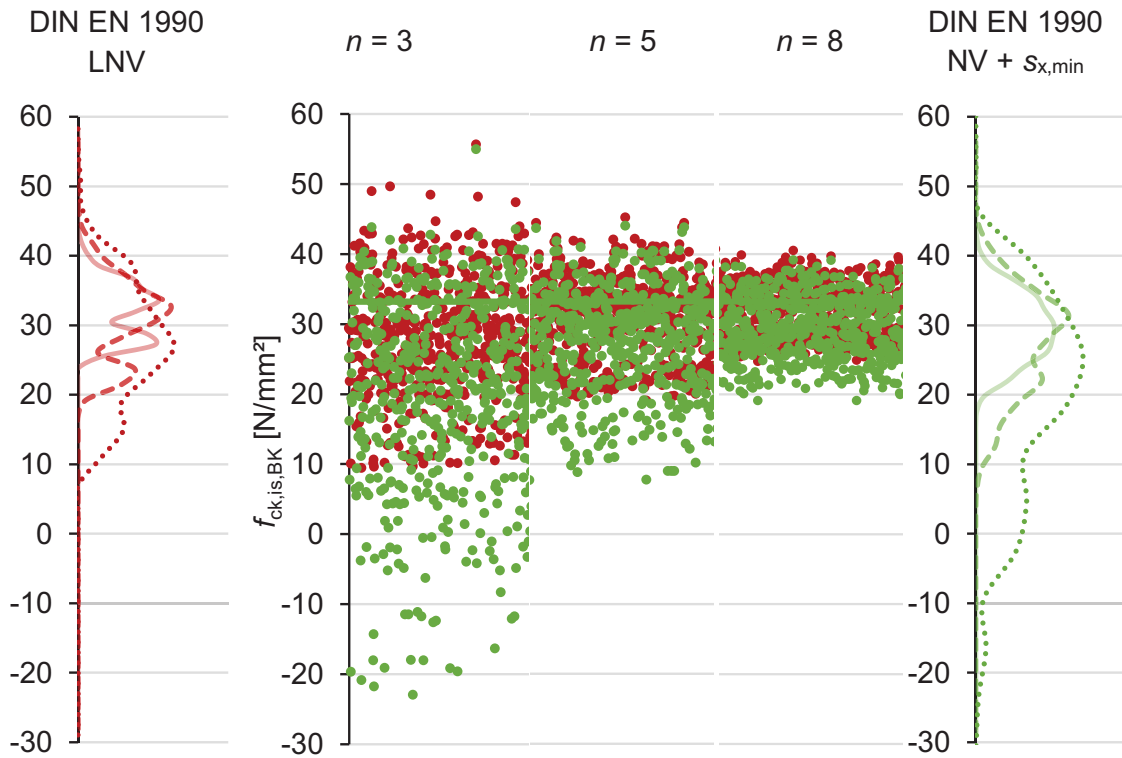


Abb. II. 132 Bauwerk 1: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

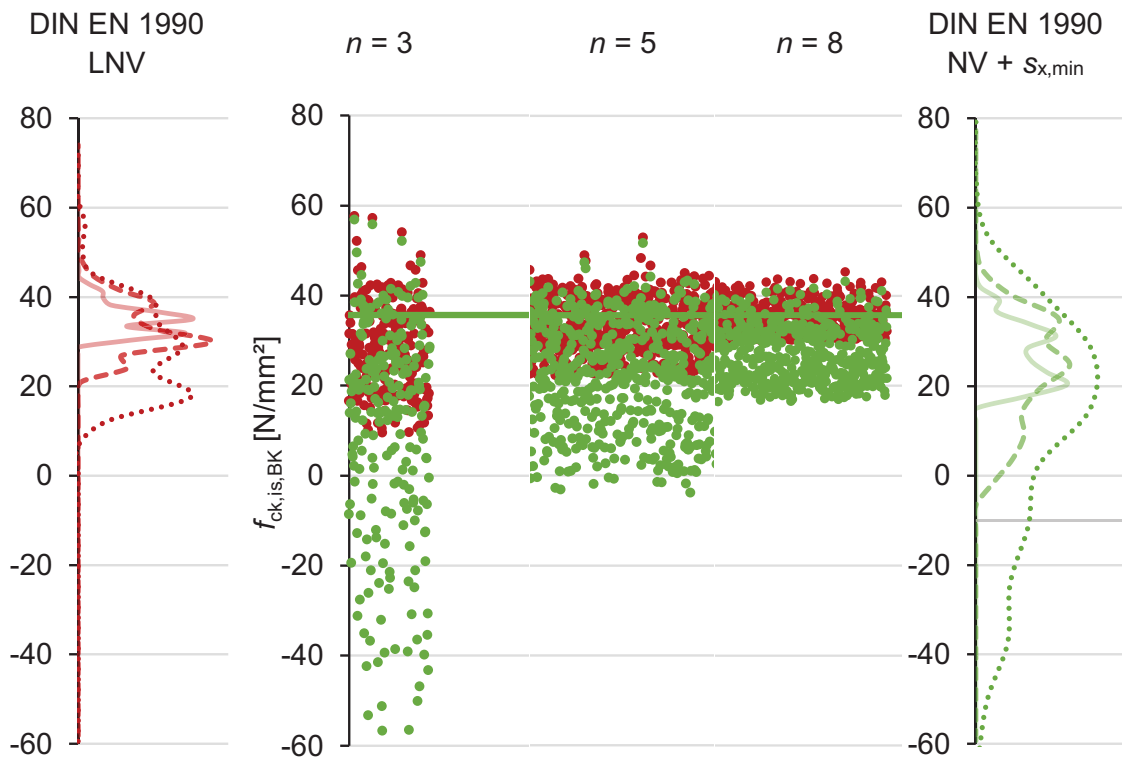


Abb. II. 133 Pfeiler Brücke B270, Langweiler: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

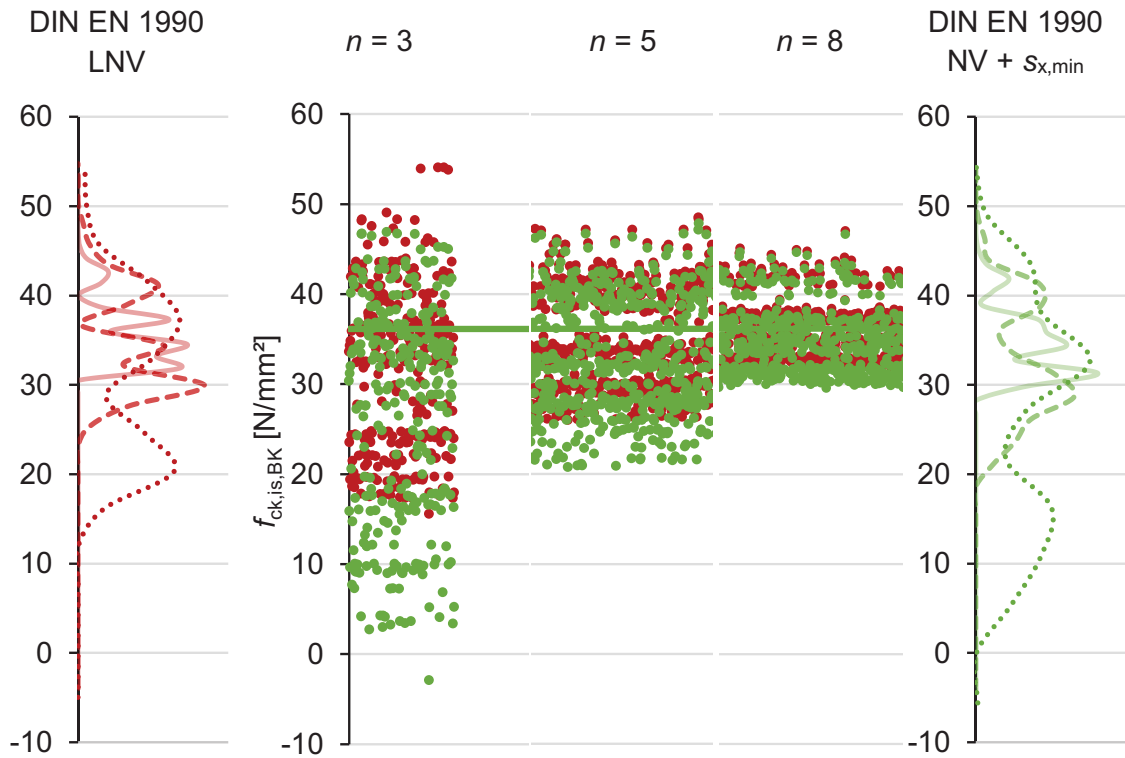


Abb. II. 134 Brücke Autobahnkreuz Mainz-Süd - Auflager, Mainz: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

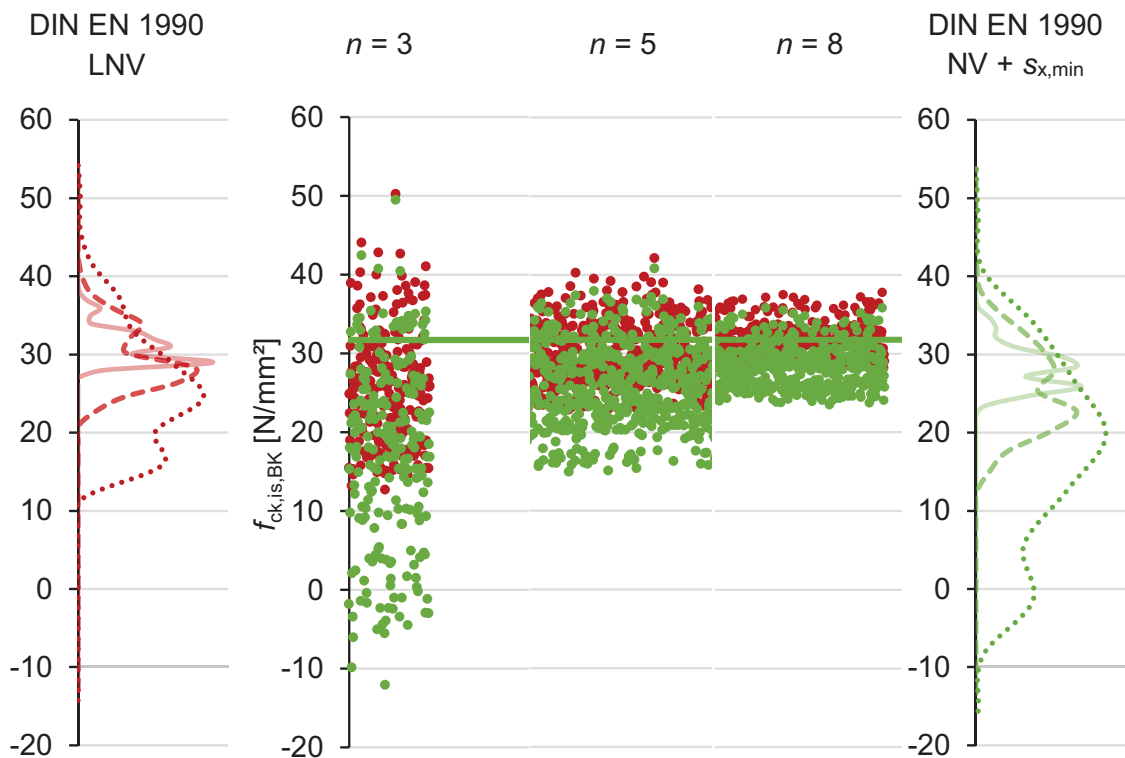


Abb. II. 135 Brücke über den Lockwitzbach, Dresden/Niedersedlitz: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

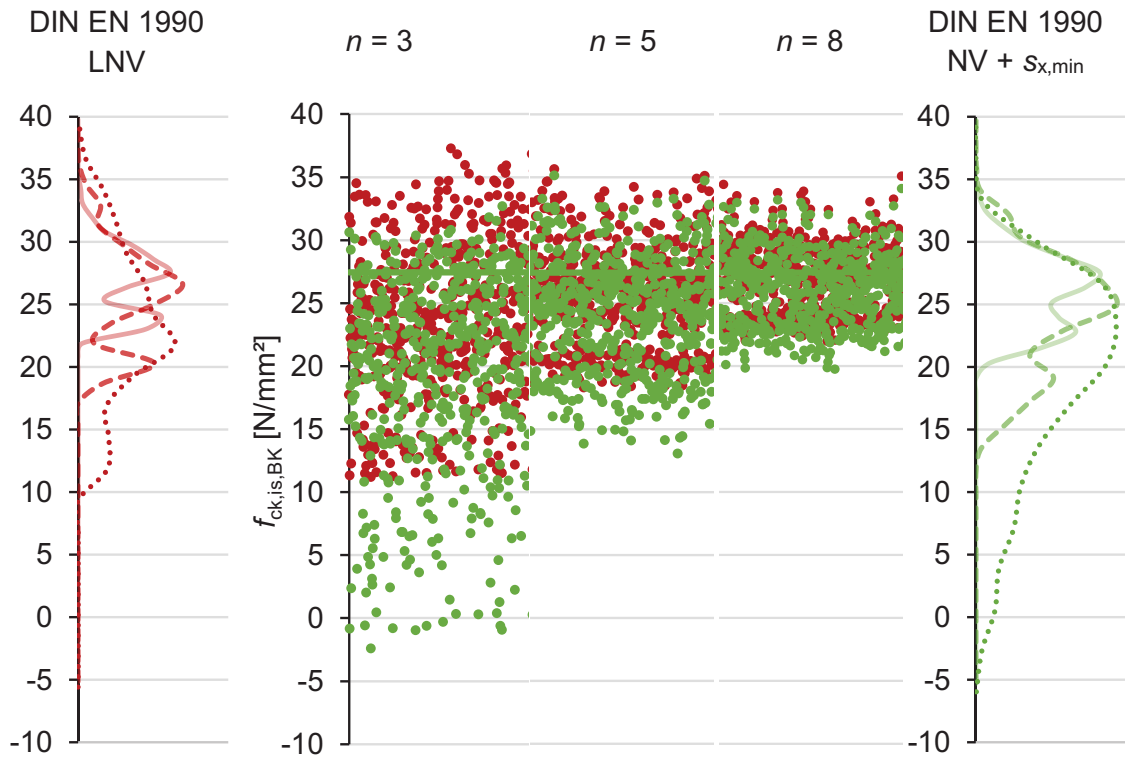


Abb. II. 136 Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

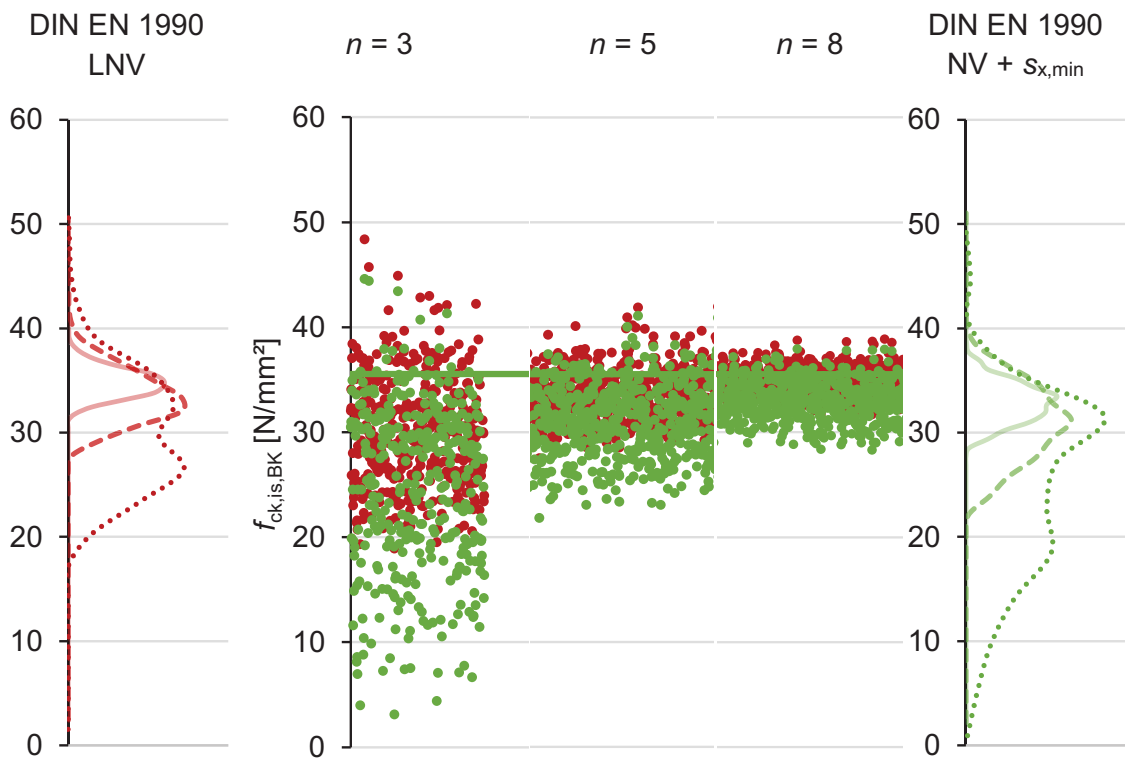


Abb. II. 137 Balkonplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

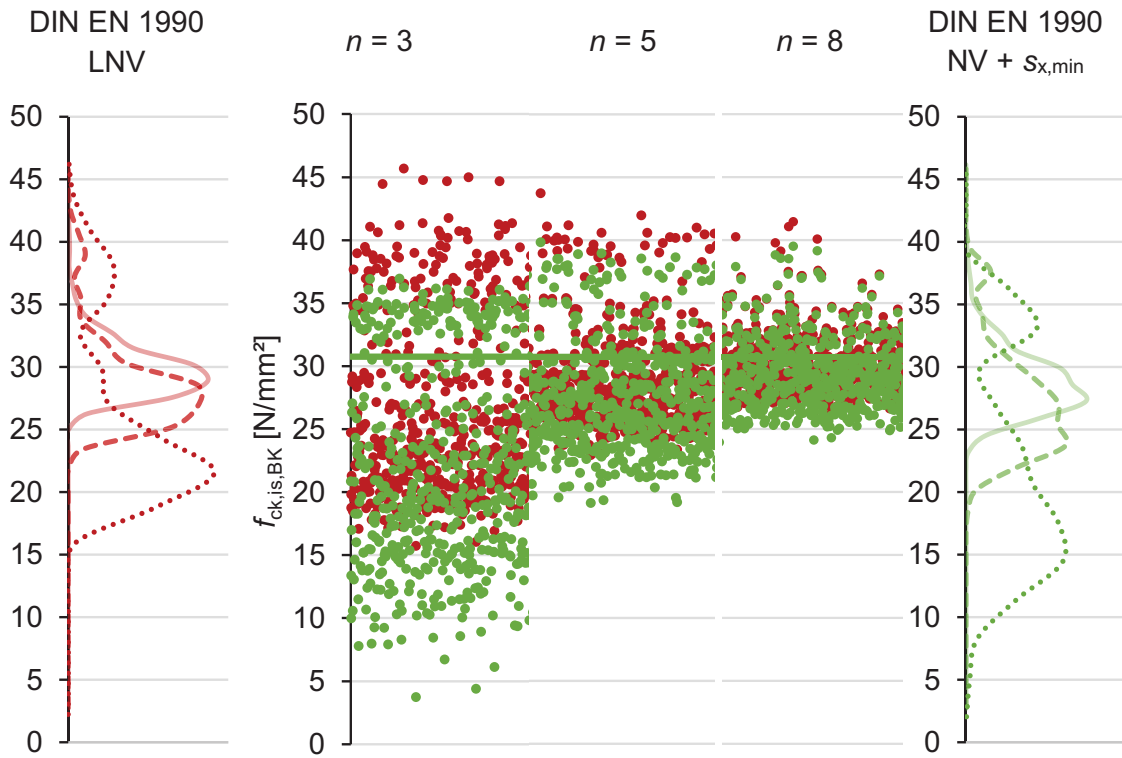


Abb. II. 138 Deckenplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

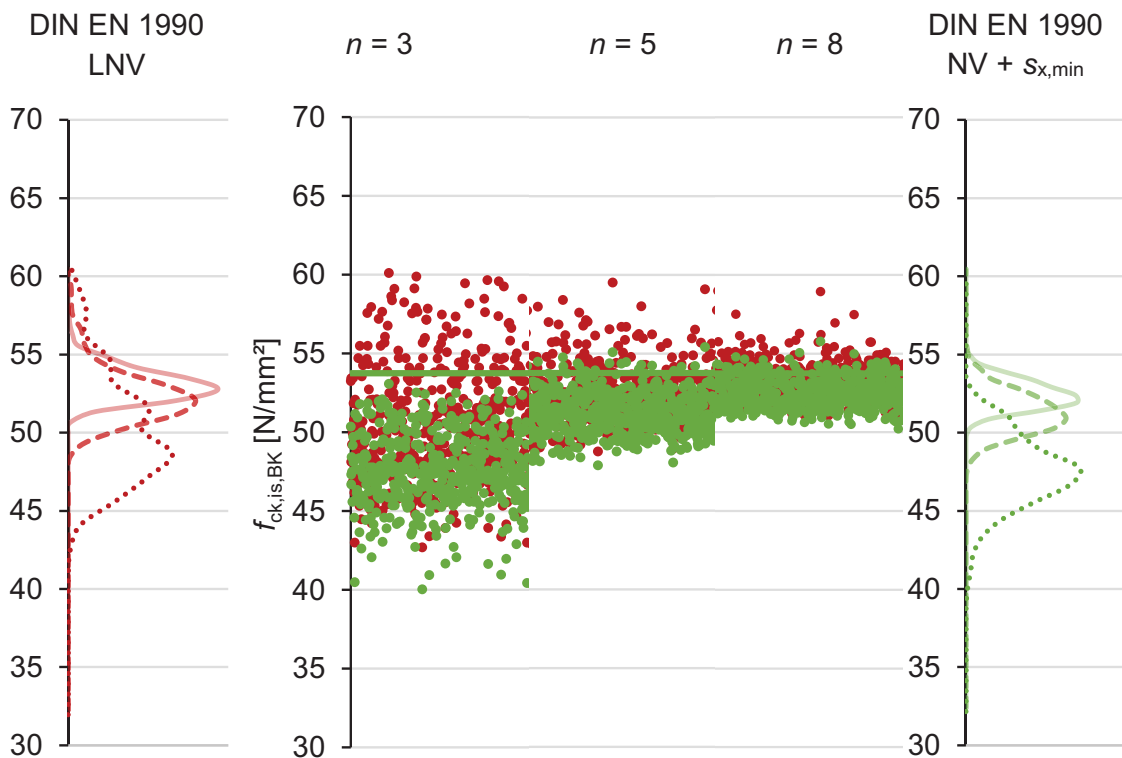


Abb. II. 139 Stützwand, Kusel: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

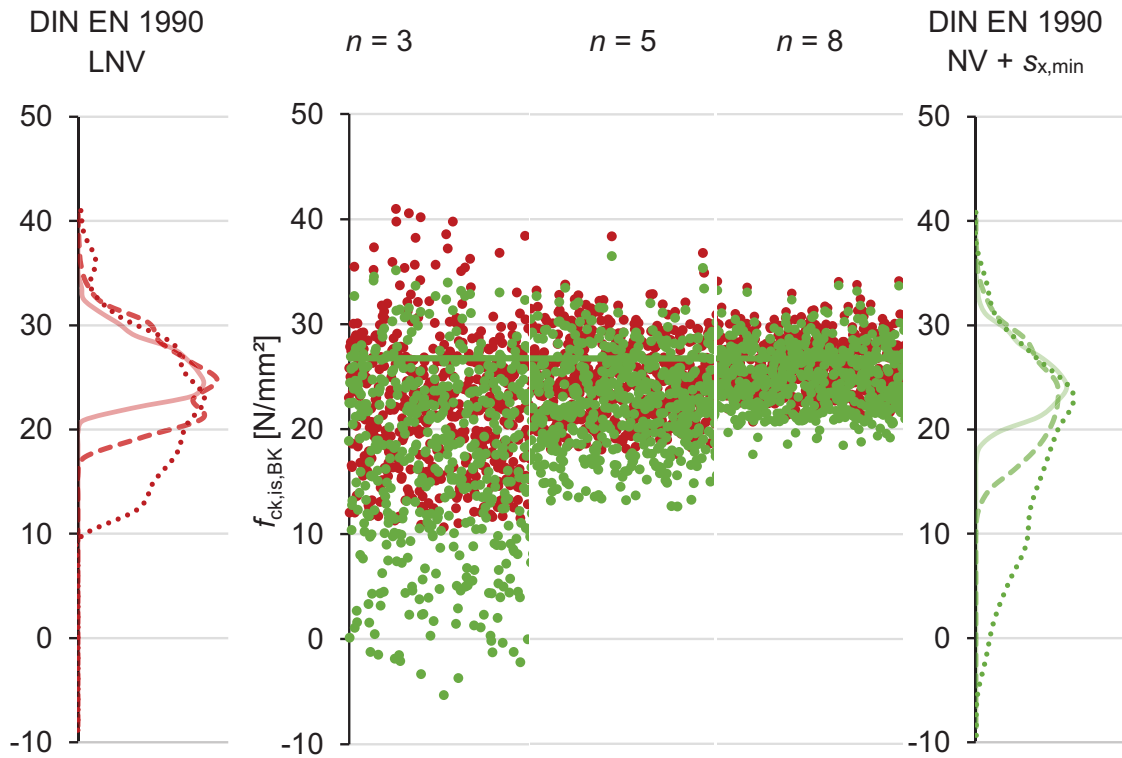


Abb. II. 140 Unterführung A6 Kirchhausen-Biberach (501 A-D), Heilbronn: Vergleich
DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

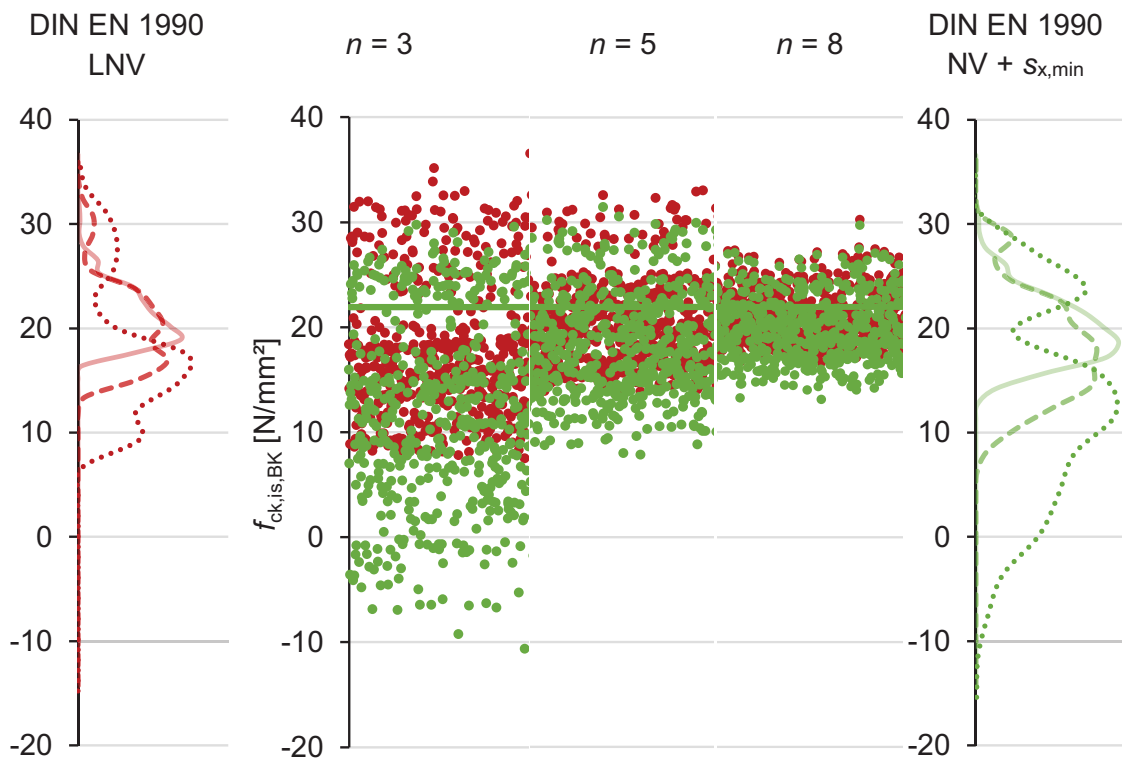


Abb. II. 141 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Heilbronn: Vergleich
DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

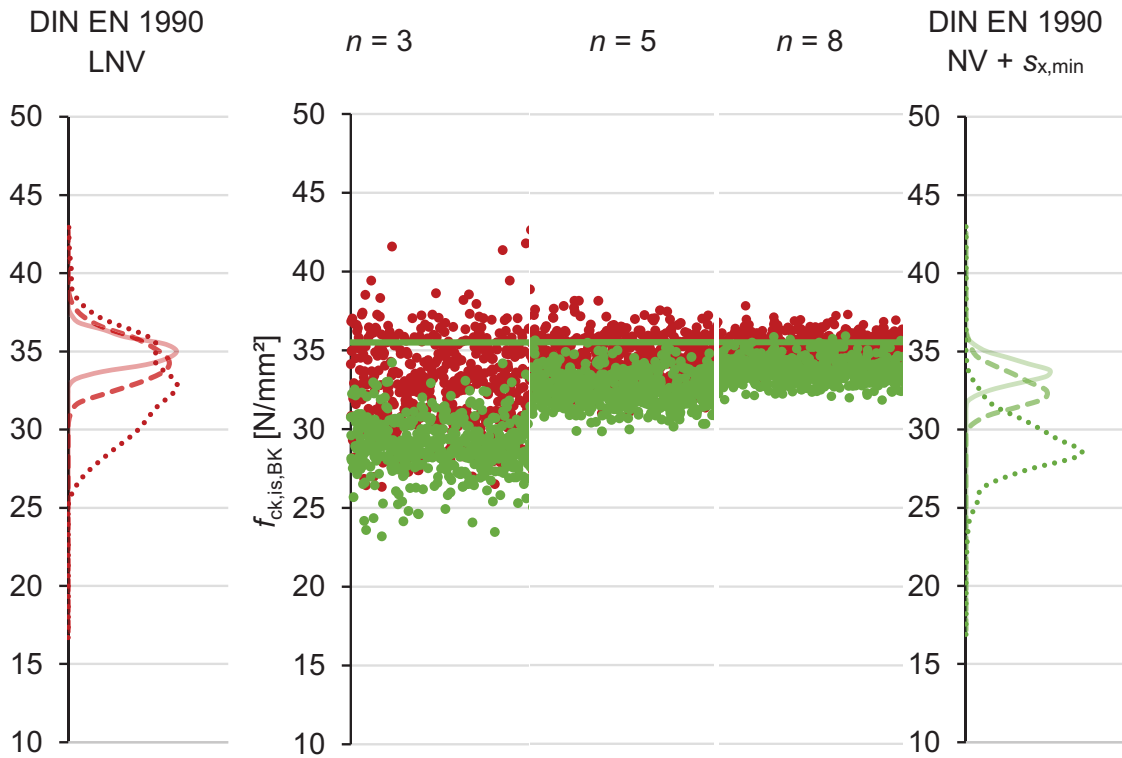


Abb. II. 142 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), Heilbronn: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x, min}$

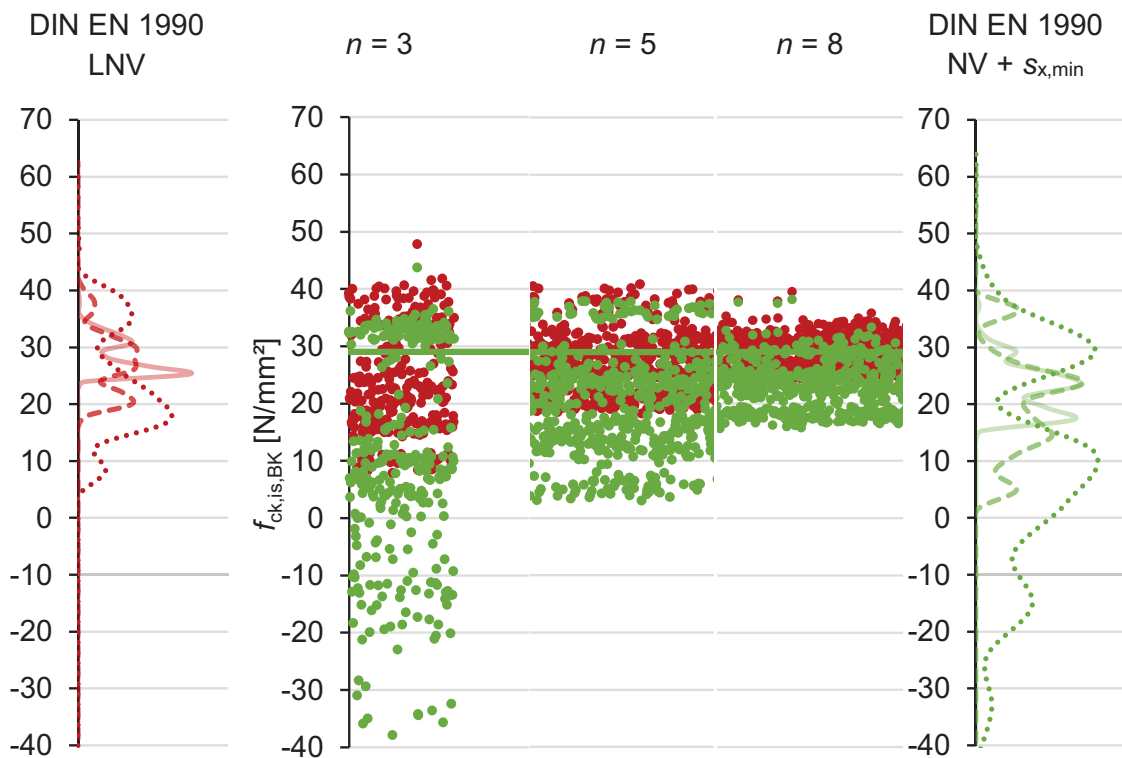


Abb. II. 143 Bauwerk 2: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x, min}$

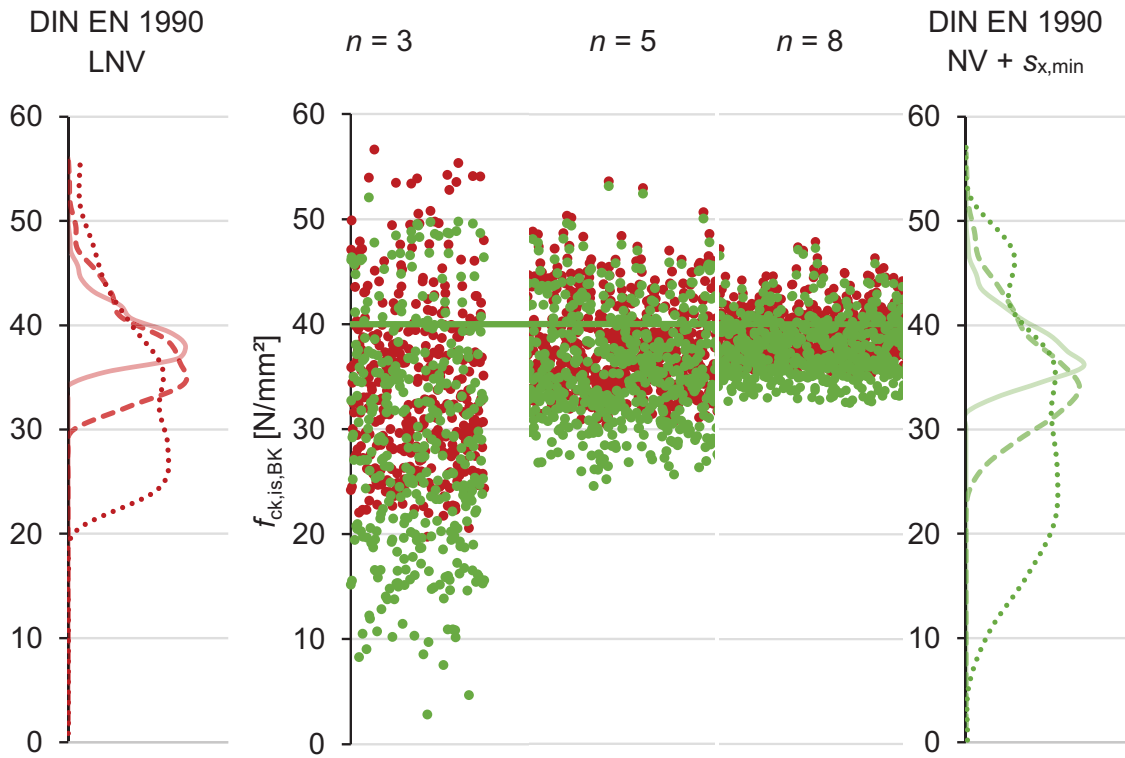


Abb. II. 144 Bauwerk 3: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

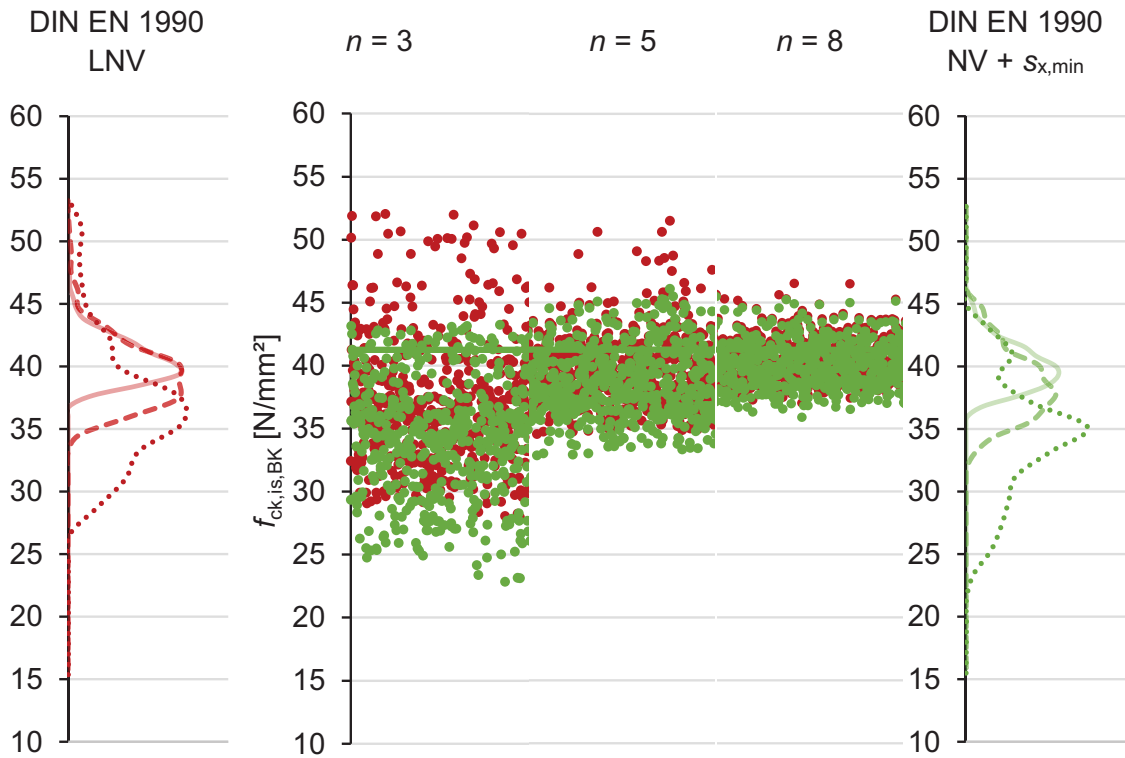


Abb. II. 145 Bauwerk 4: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $s_{x,min}$

Vergleich DIN EN 1990:2010-12 logarithmische Normalverteilung und DIN EN 1990:2010-12 Normalverteilung unter Anwendung eines Mindestvariationskoeffizienten $v_{x,\min} = 0,08$ sowie eines Maximalwertes des Variationskoeffizienten $v_{x,\max} = 0,20$

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse einer Bewertung der Teilstichproben mit einer logarithmischen Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12 und einer Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12 in Kombination mit einem Mindest- und Maximalwert des Variationskoeffizienten $v_{x,\min} = 0,08$ und $v_{x,\max} = 0,08$ gegenübergestellt.

Die mit der logarithmischen Normalverteilung ermittelten Ergebnisse werden durch rote und die mit einer Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12 in Kombination mit einem Mindest- und Maximalwert des Variationskoeffizienten $v_{x,\min} = 0,08$ und $v_{x,\max} = 0,08$ ermittelten Ergebnisse durch violette Punkte dargestellt.

Zusätzlich ist die empirische Verteilungsdichte jeweils für $n = 3$, $n = 5$ und $n = 8$ abgebildet.

Die bei Abb. II.146 beschriebene Legende ist in gleicher Form auch für die Abbildungen Abb. II.147 bis Abb. II.174 gültig.

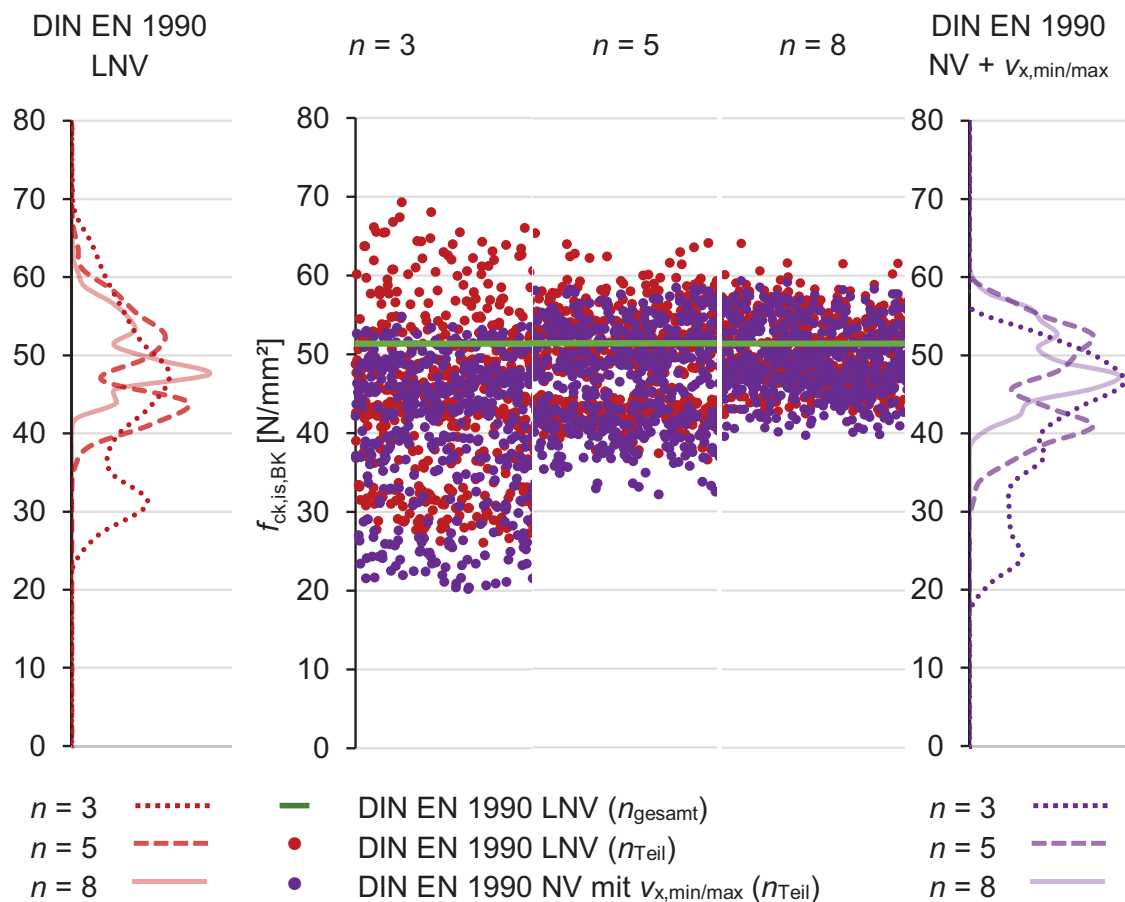


Abb. II. 146 Tropfkörper Kläranlage Blümeltal, Pirmasens: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x,\min/\max}$

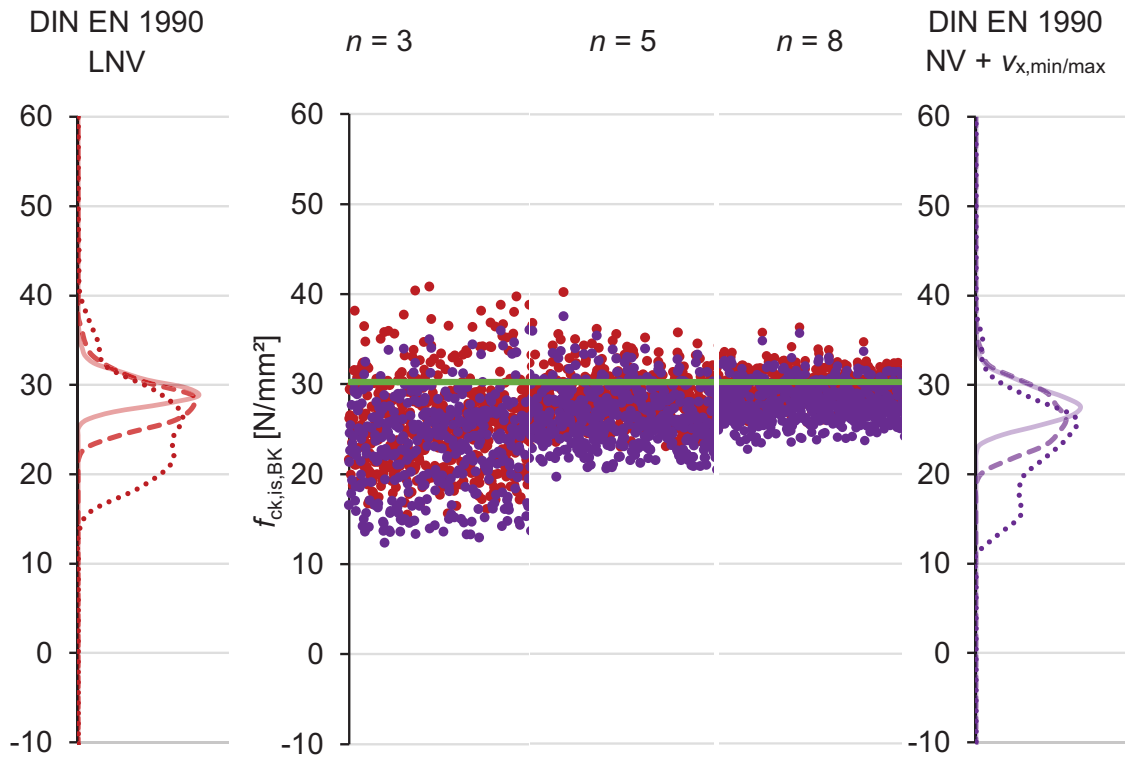


Abb. II. 147 Autobahnunterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x,min/max}$

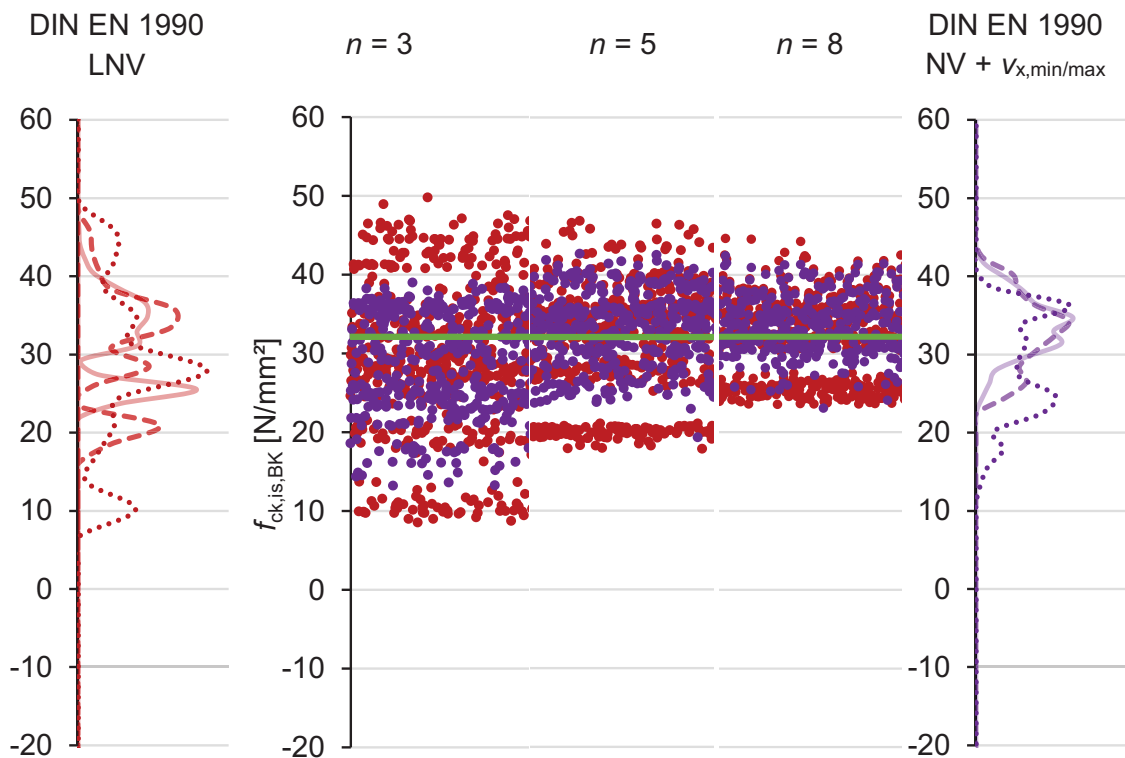


Abb. II. 148 Autobahnunterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x,min/max}$

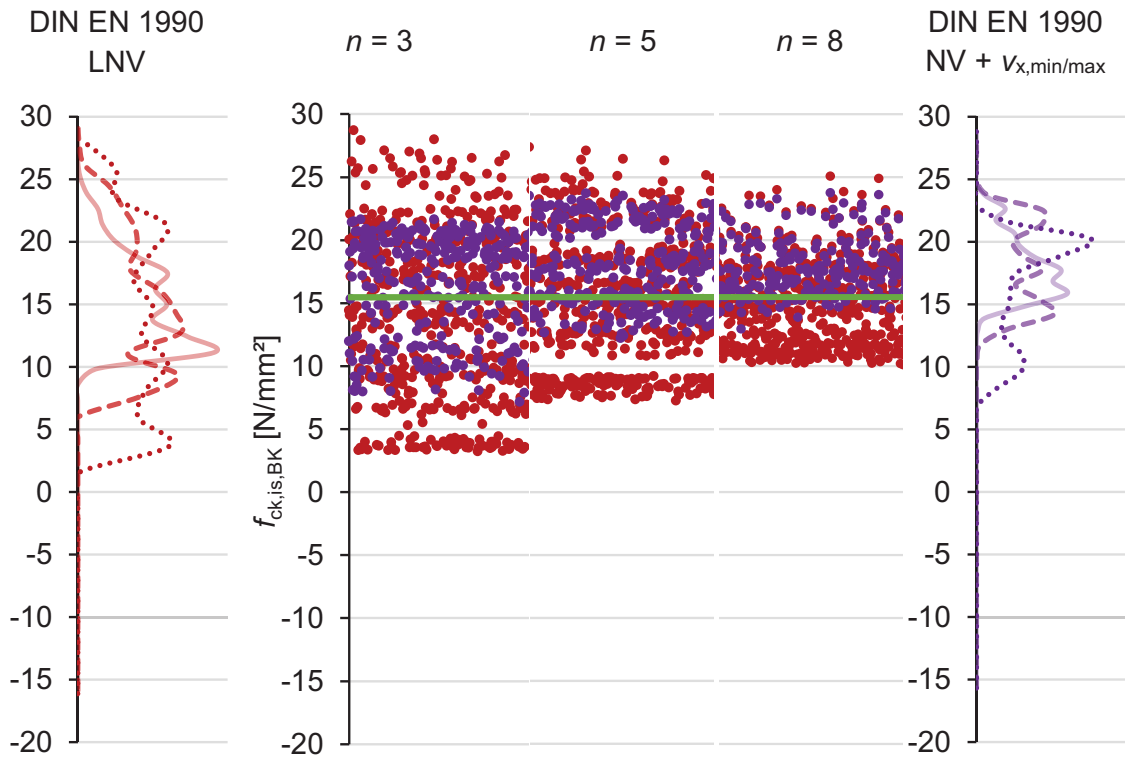


Abb. II. 149 Umspannwerk, Sulzbach: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $V_{x,min/max}$

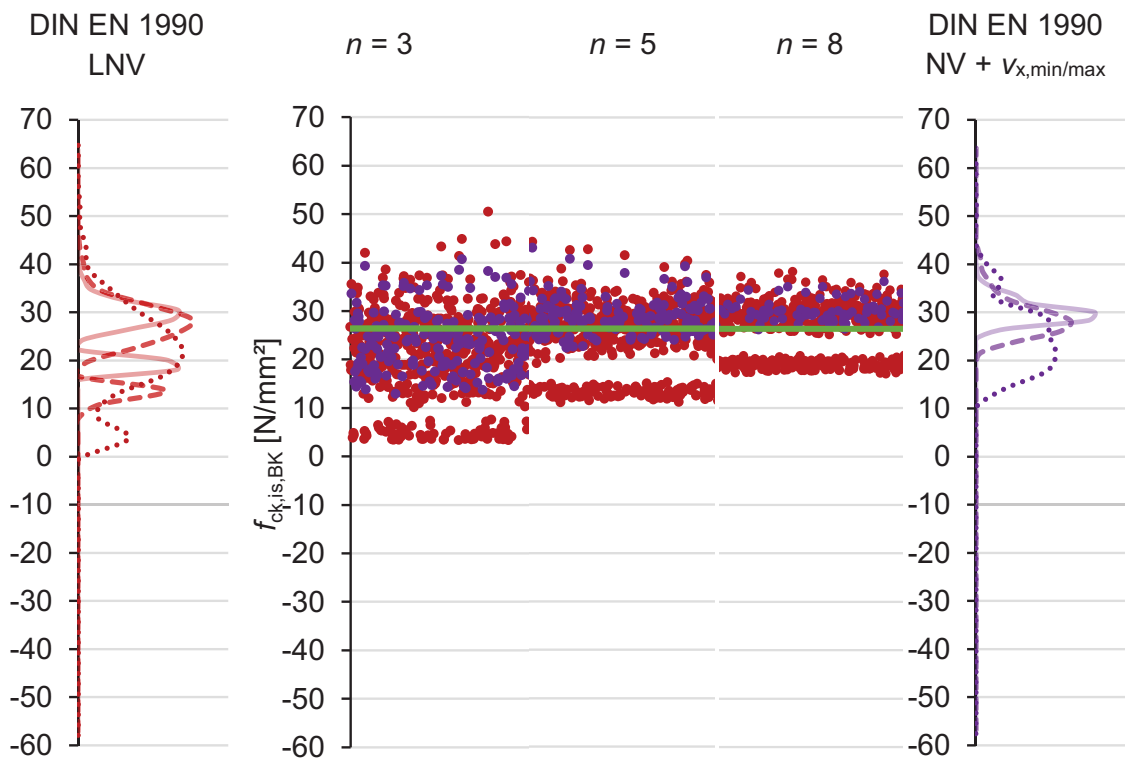


Abb. II. 150 Hochwasserschutzwand, Dormagen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $V_{x,min/max}$

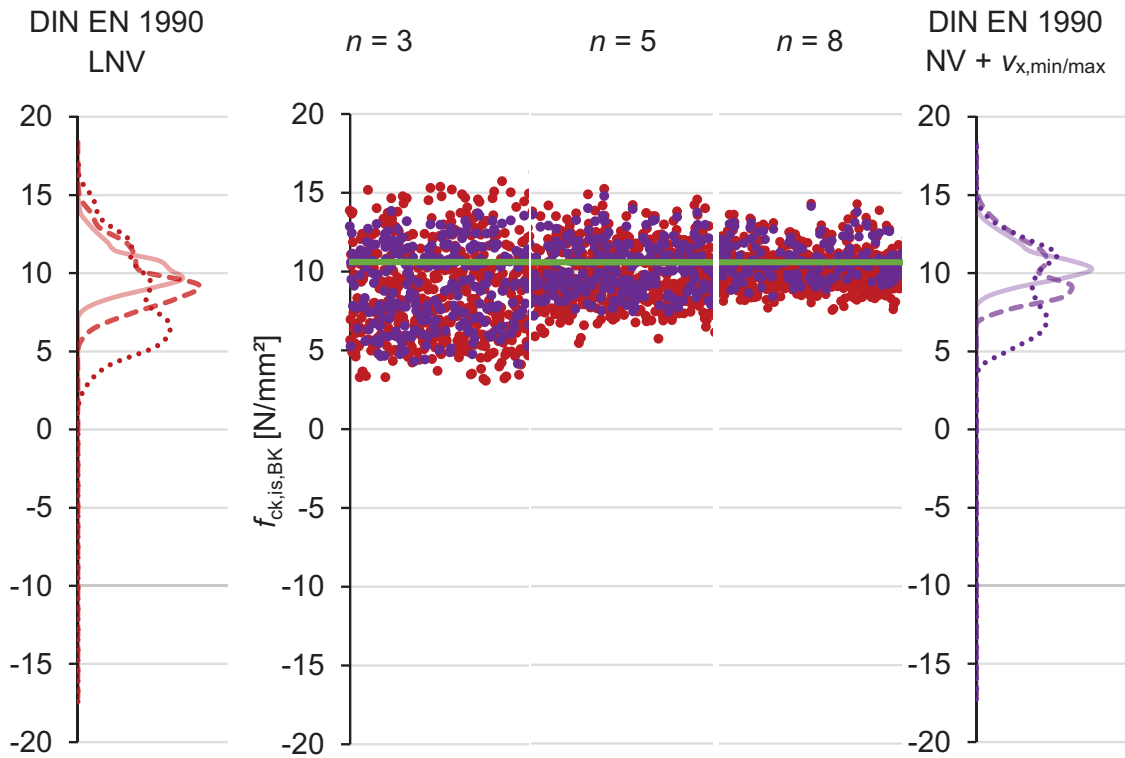


Abb. II. 151 Schwergewichtswand, Dormagen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x,min/max}$

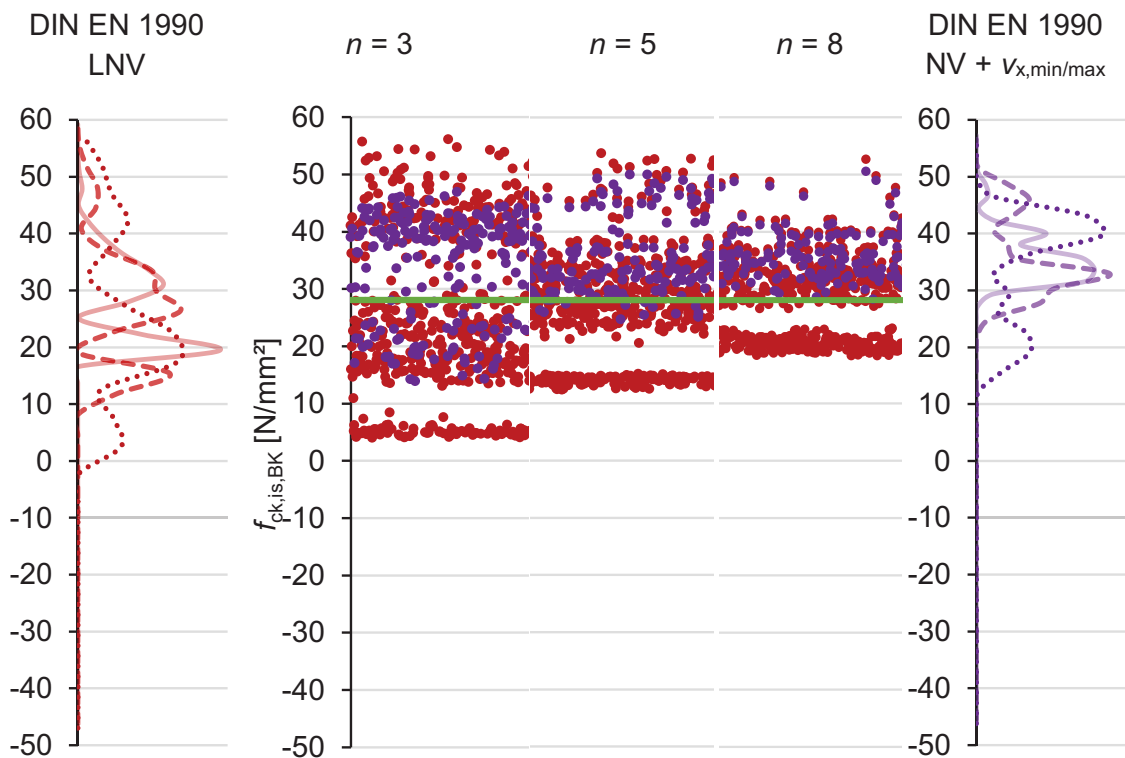


Abb. II. 152 Bodenplatte ACO, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x,min/max}$

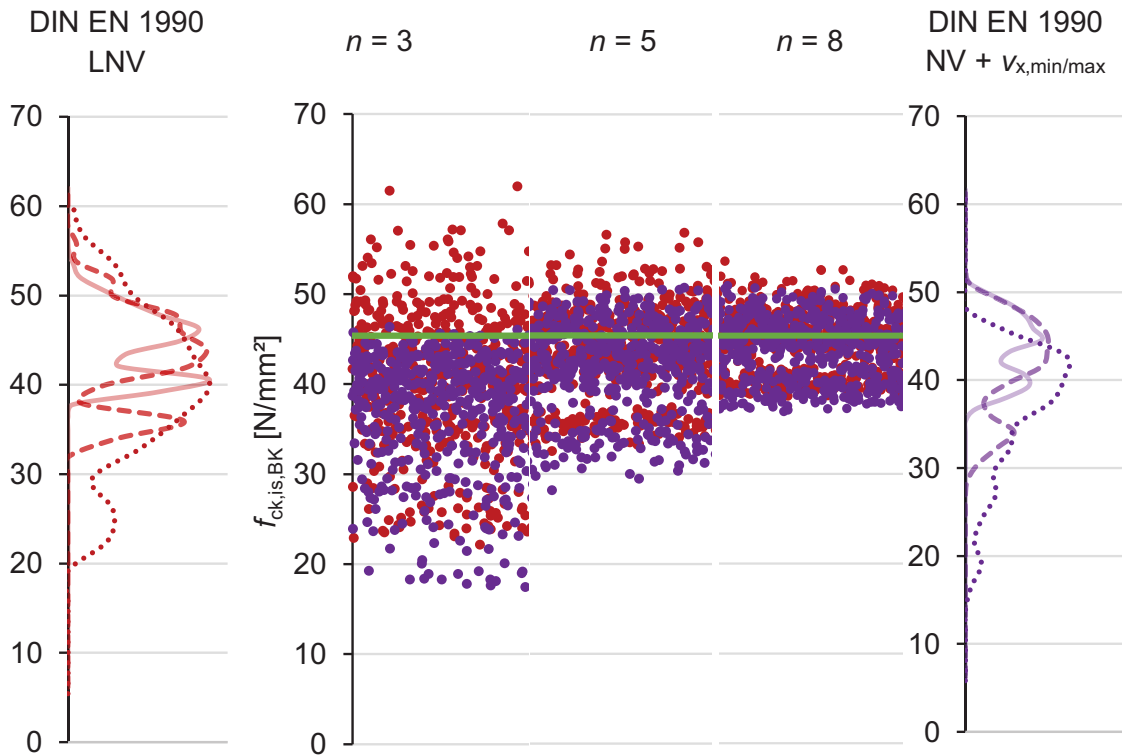


Abb. II. 153 Stützwand Ohmbach Abschnitt I, Pirmasens: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x,min/max}$

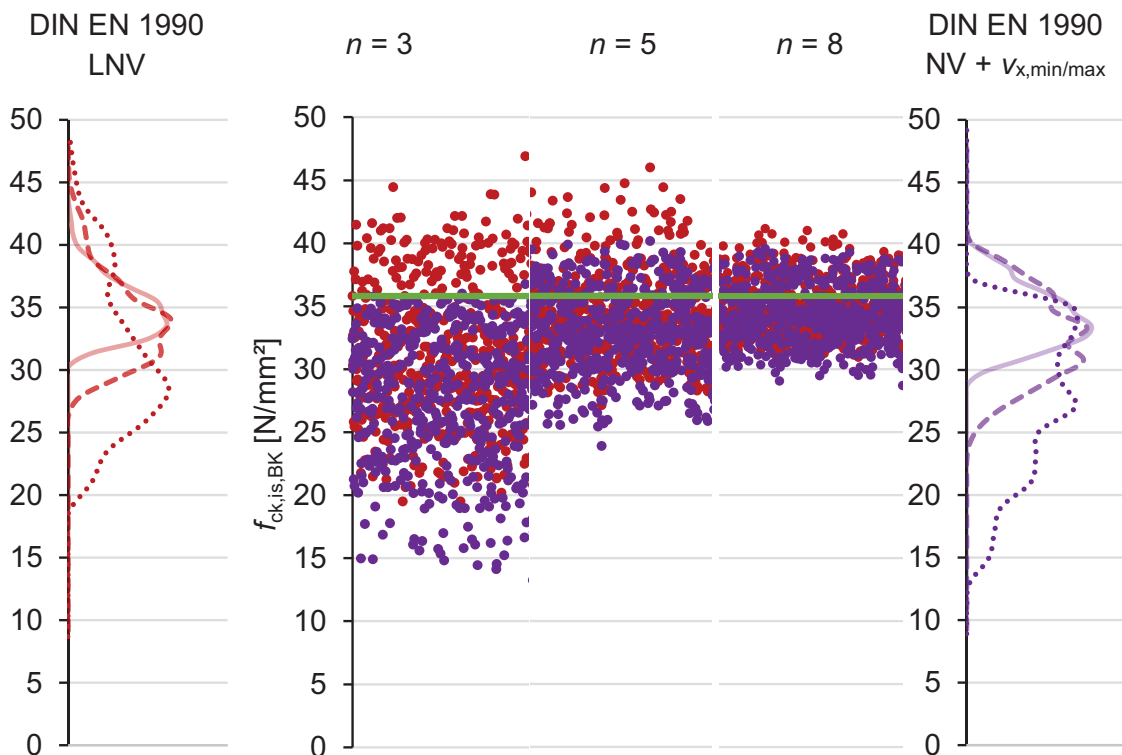


Abb. II. 154 Stützwand Ohmbach Abschnitt II, Pirmasens: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x,min/max}$

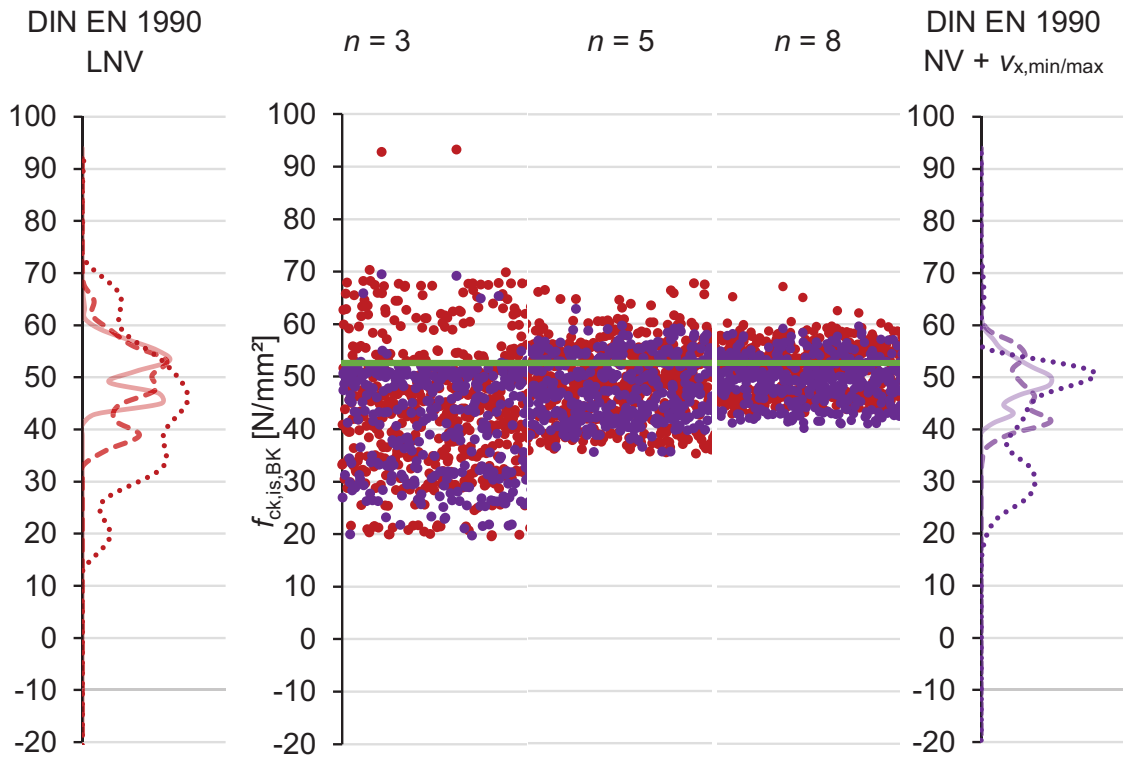


Abb. II. 155 Weserbrücke, Hannoversch Münden: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x, \min/\max}$

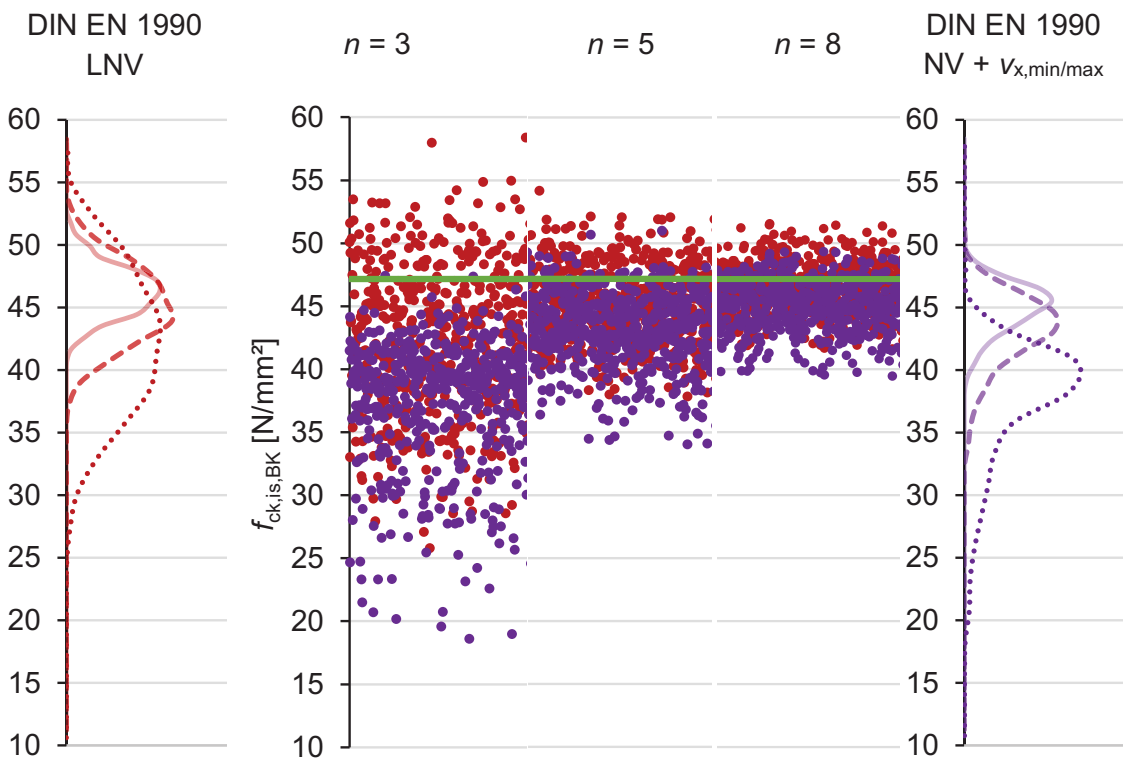


Abb. II. 156 Lahntalbrücke, Limburg: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x, \min/\max}$

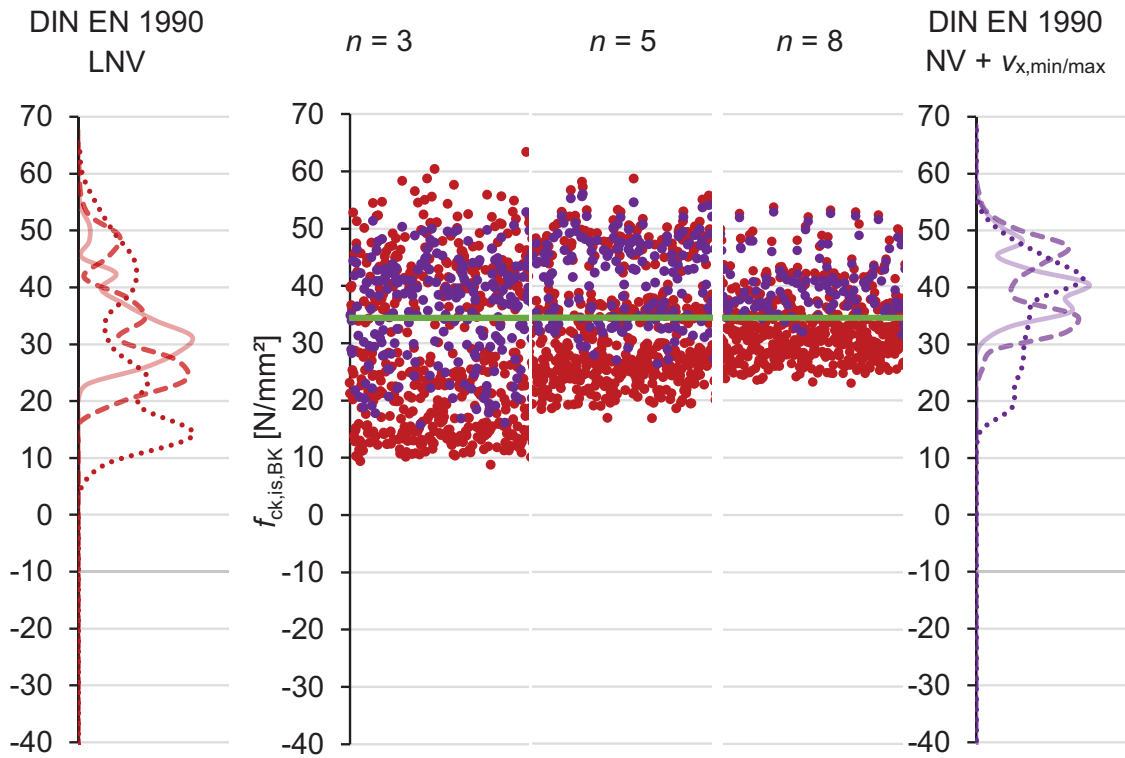


Abb. II. 157 Lautertalbrücke Widerlager, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x, min/max}$

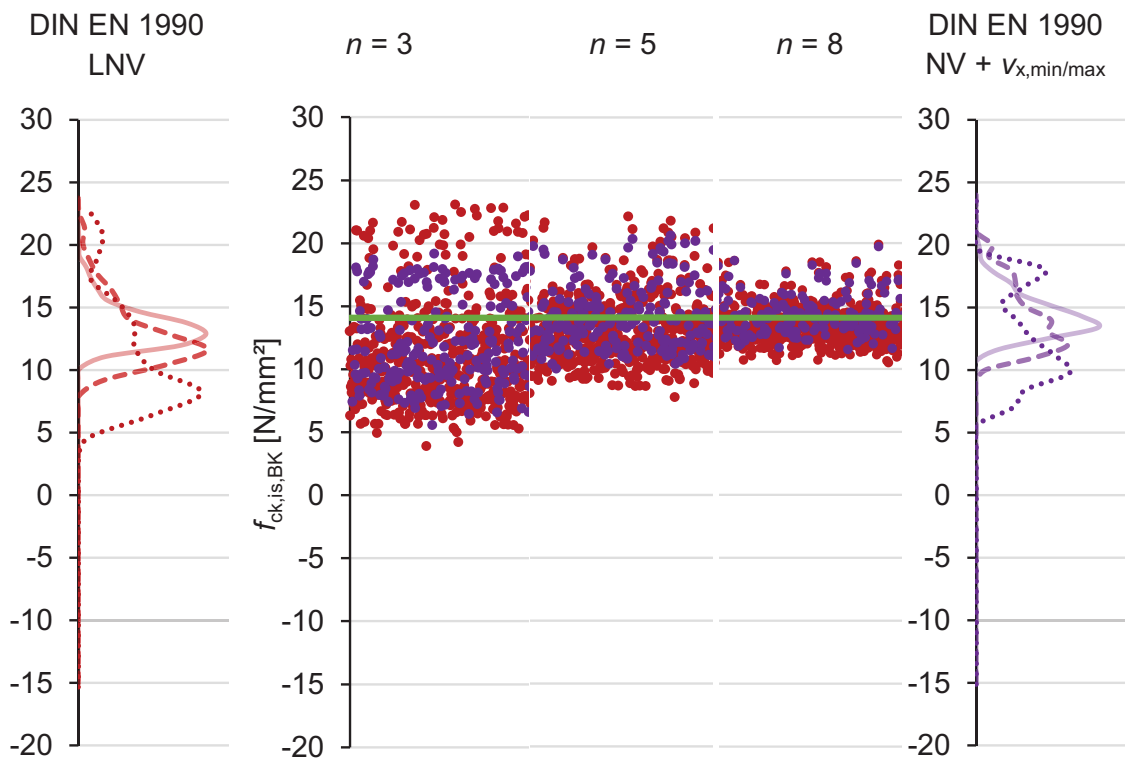


Abb. II. 158 Lautertalbrücke Fahrbahn untere Schicht, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x, min/max}$

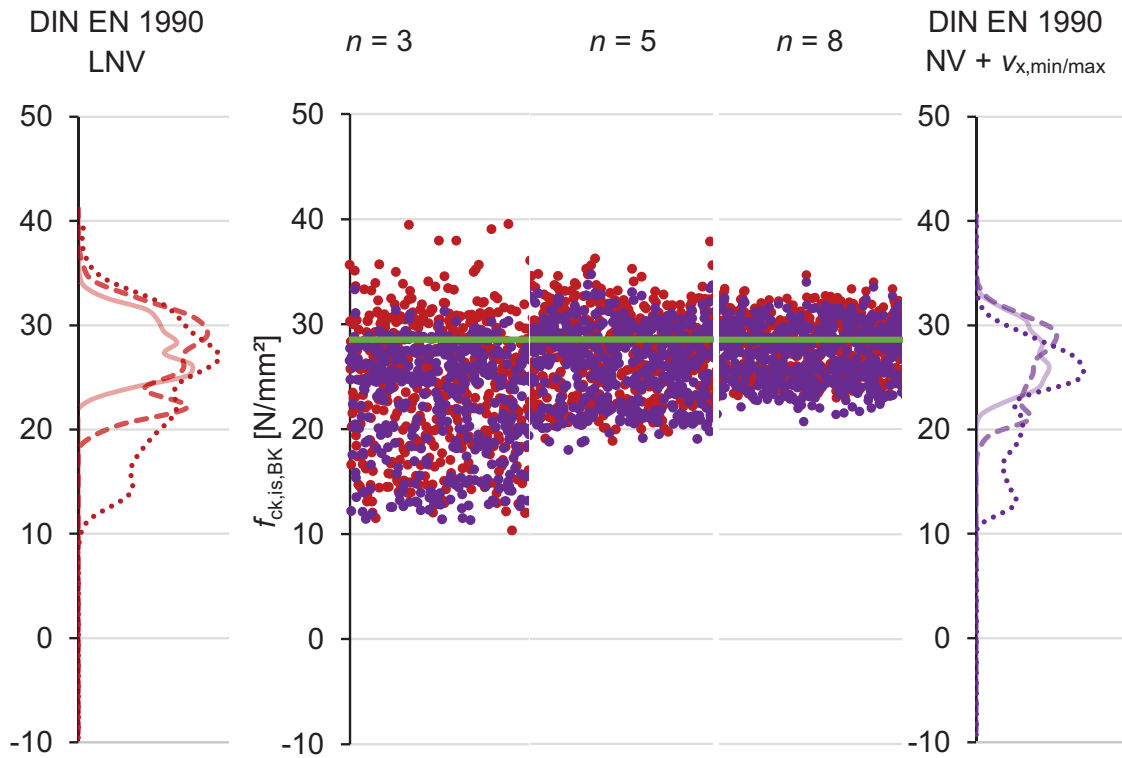


Abb. II. 159 Decke Wohnblock, Ludwigshafen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x,min/max}$

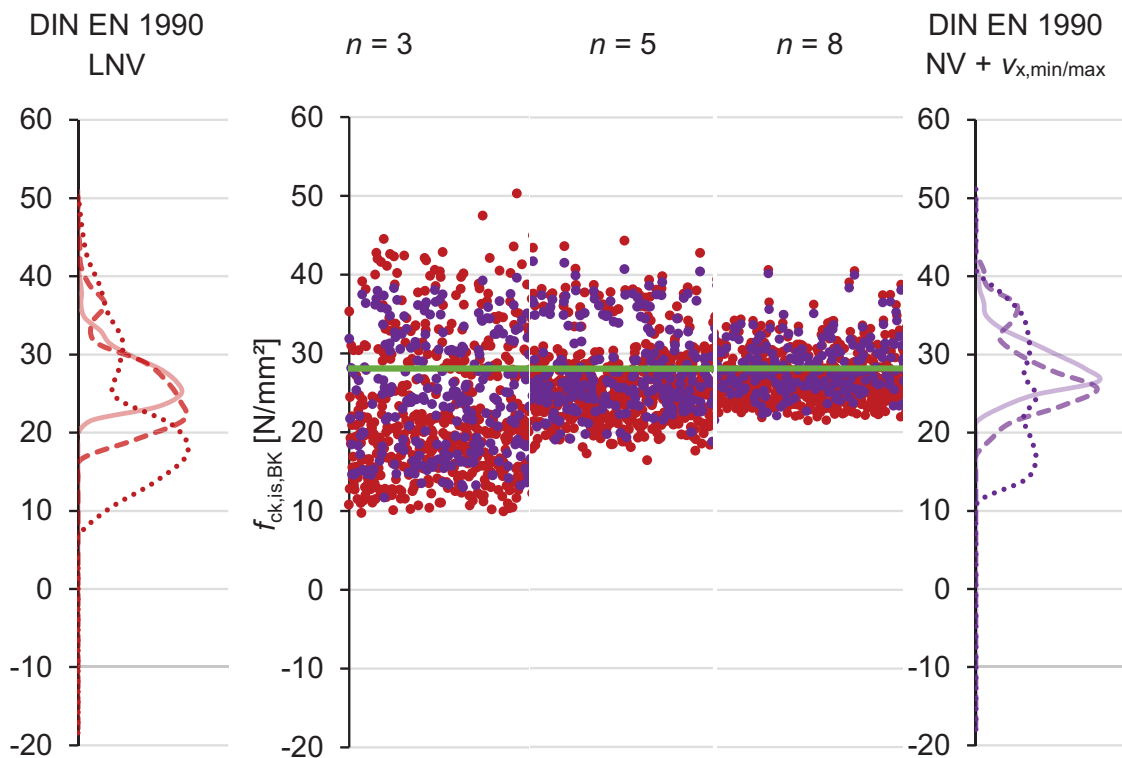


Abb. II. 160 Wand Technische Werke Ludwigshafen, Ludwigshafen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x,min/max}$

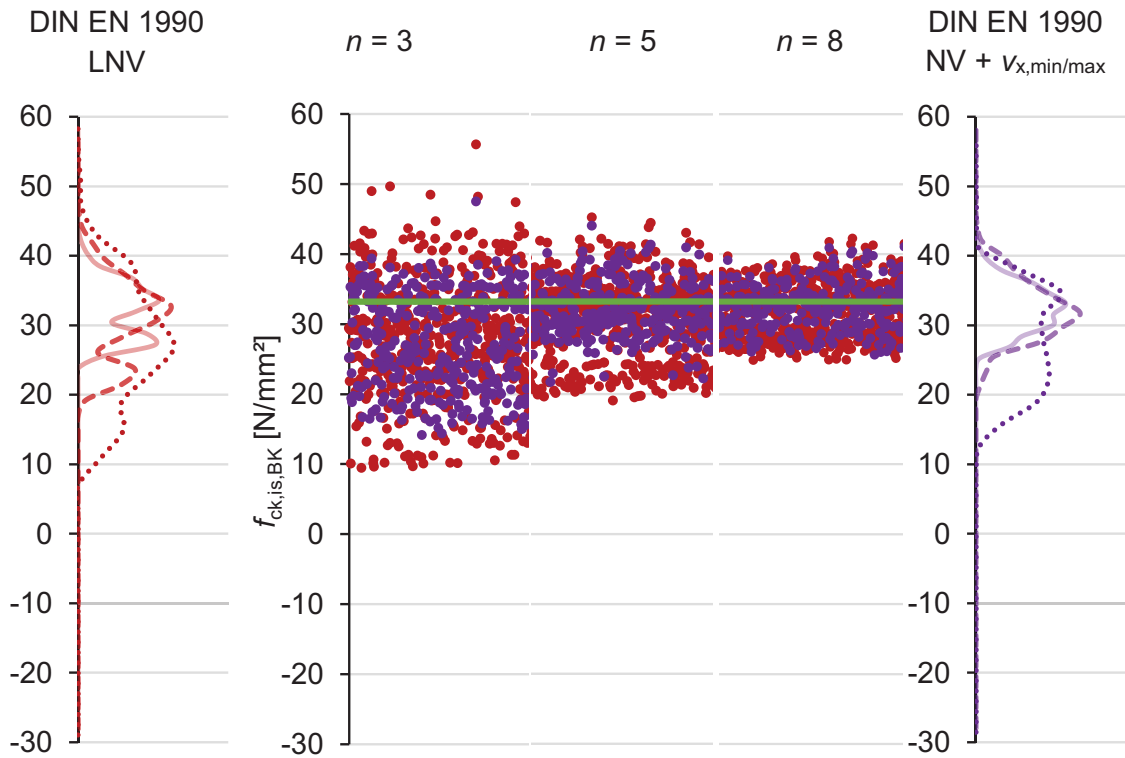


Abb. II. 161 Bauwerk 1: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x, \min/\max}$

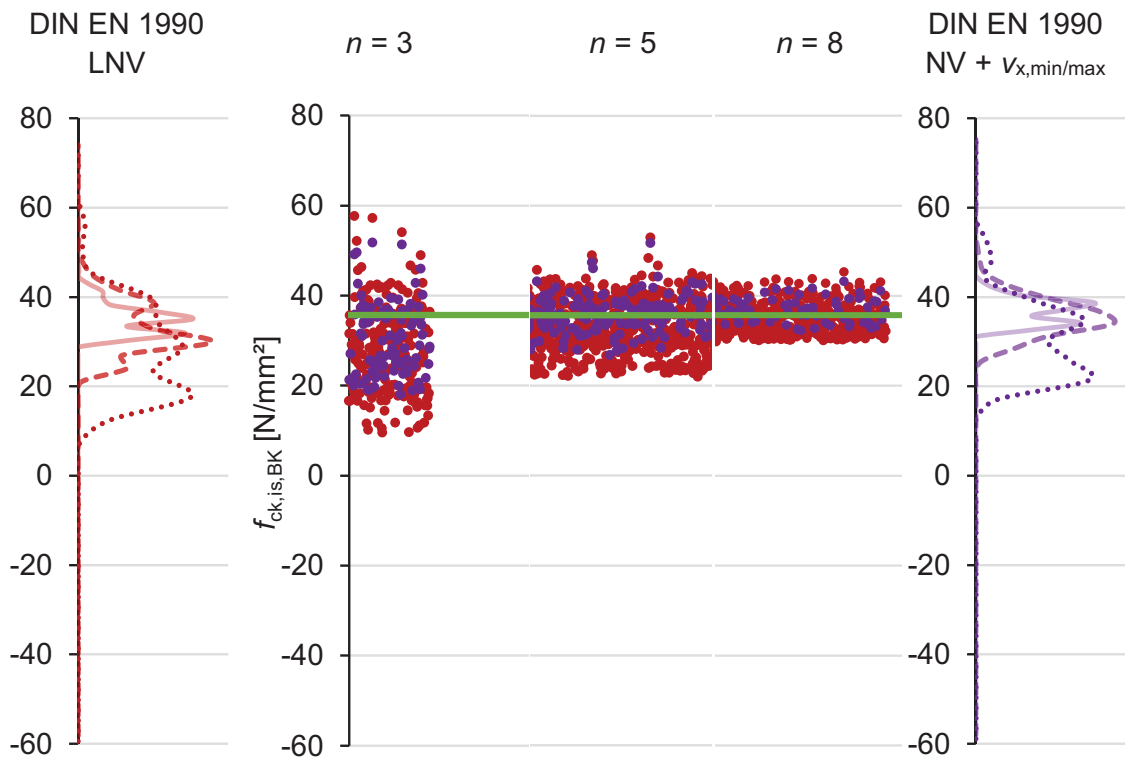


Abb. II. 162 Pfeiler Brücke B270, Langweiler: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x, \min/\max}$

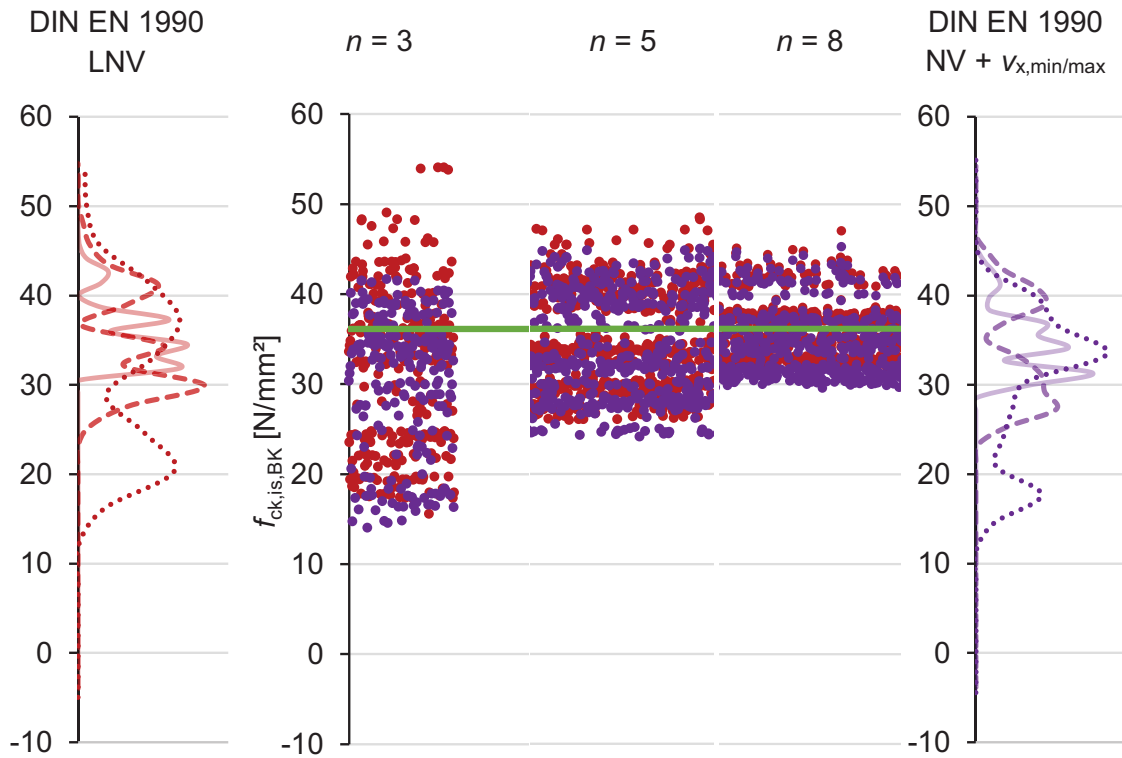


Abb. II. 163 Brücke Autobahnkreuz Mainz-Süd - Auflager, Mainz: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x,min/max}$

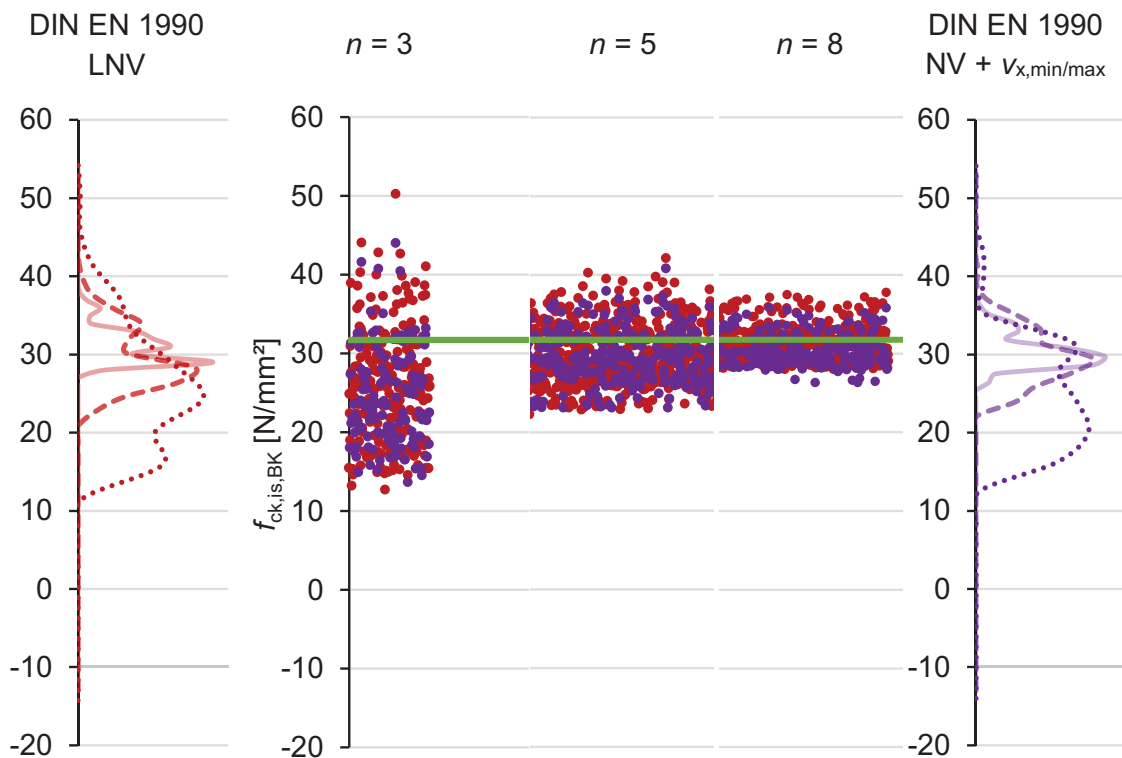


Abb. II. 164 Brücke über den Lockwitzbach, Dresden/Niedersedlitz: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x,min/max}$

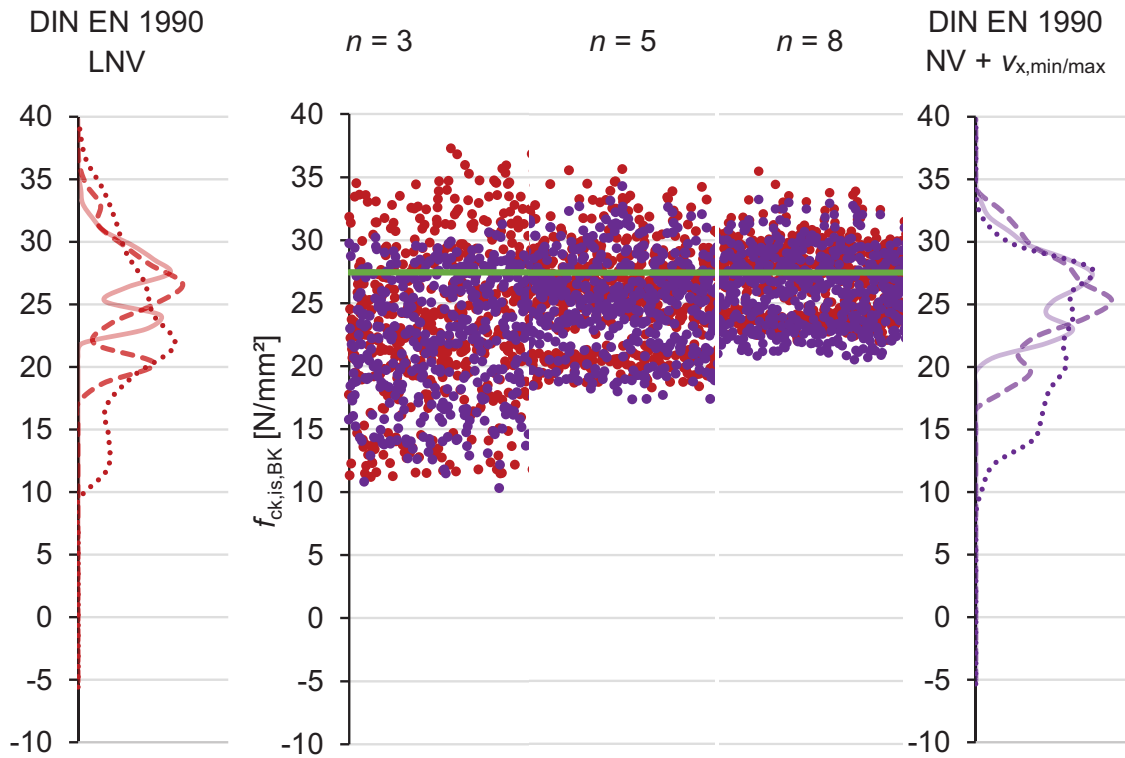


Abb. II. 165 Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x,min/max}$

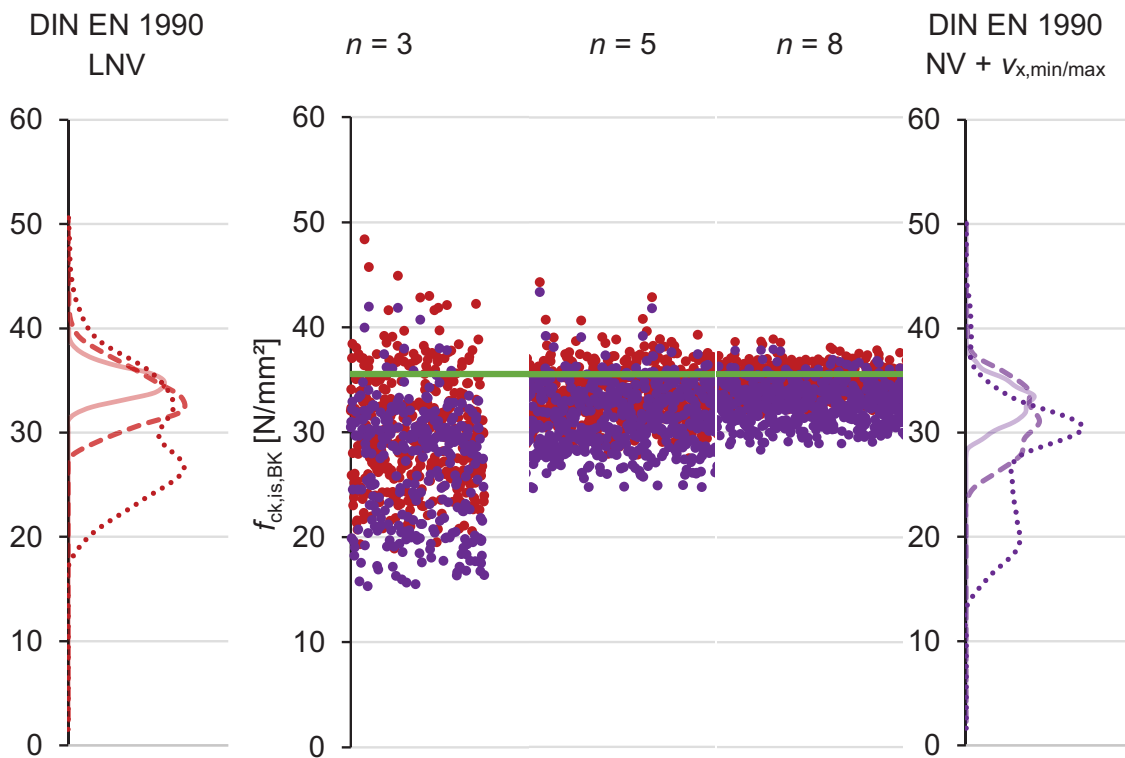


Abb. II. 166 Balkonplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x,min/max}$

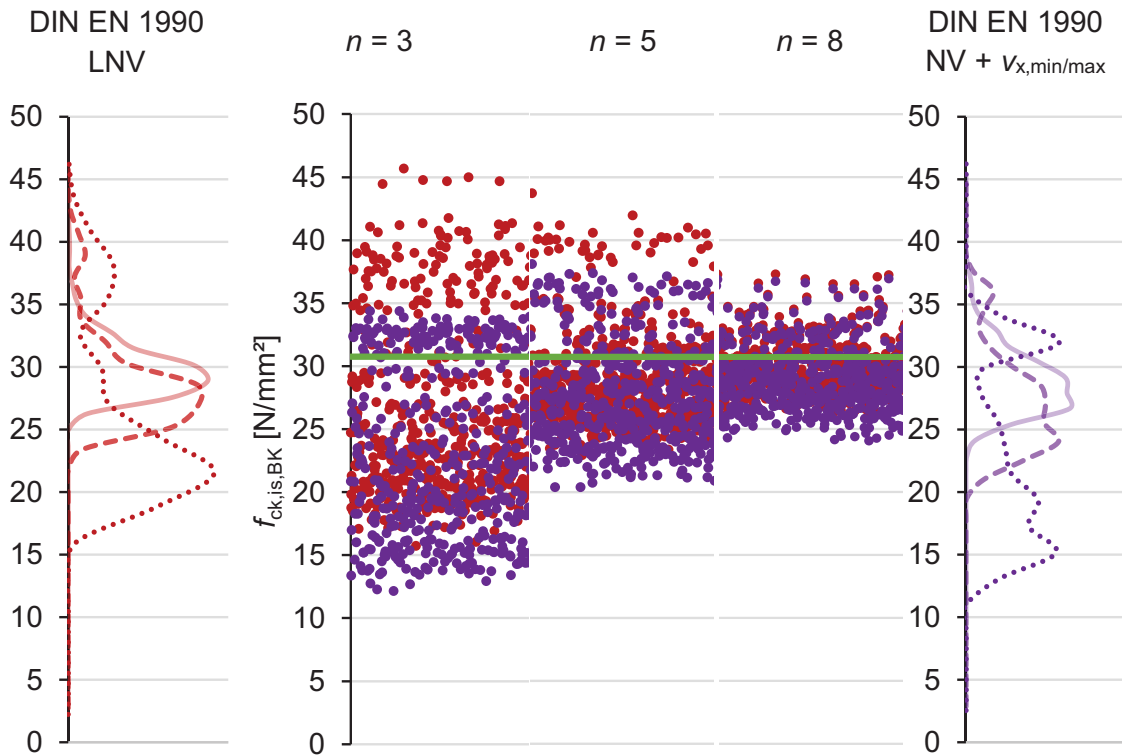


Abb. II. 167 Deckenplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x,min/max}$

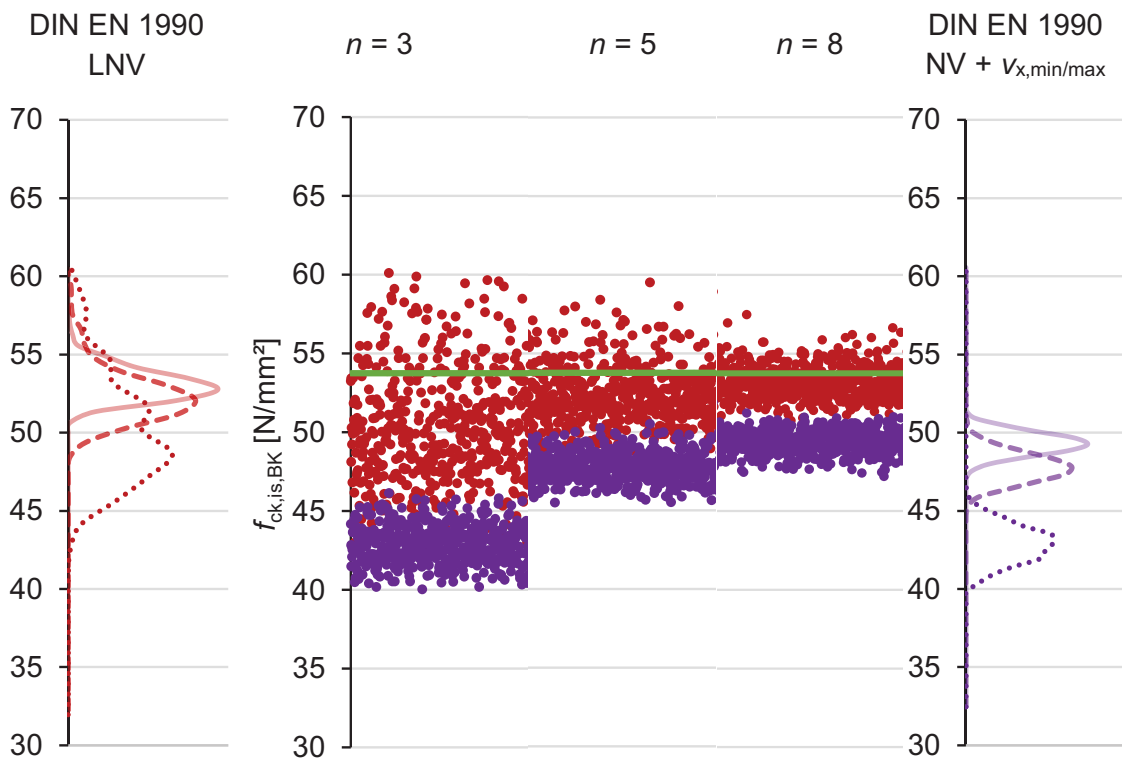


Abb. II. 168 Stützwand, Kusel: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x,min/max}$

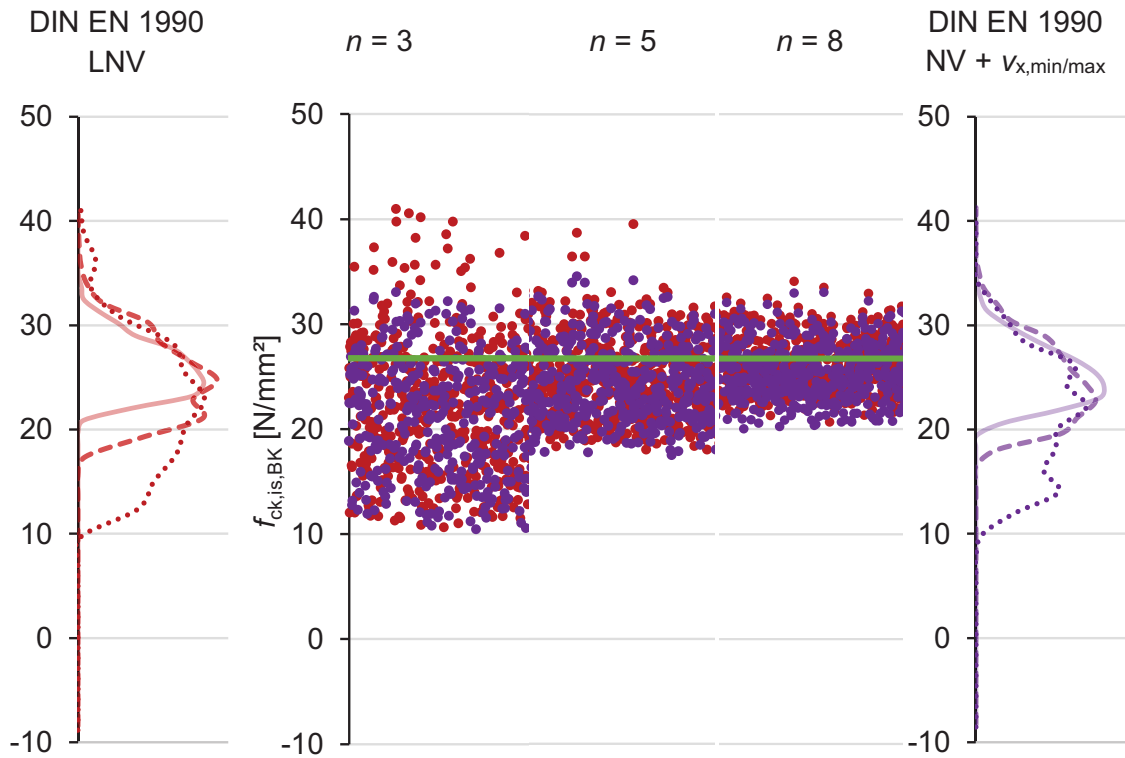


Abb. II. 169 Unterführung A6 Kirchhausen-Biberach (501 A-D), Heilbronn: Vergleich
DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x, \min/\max}$

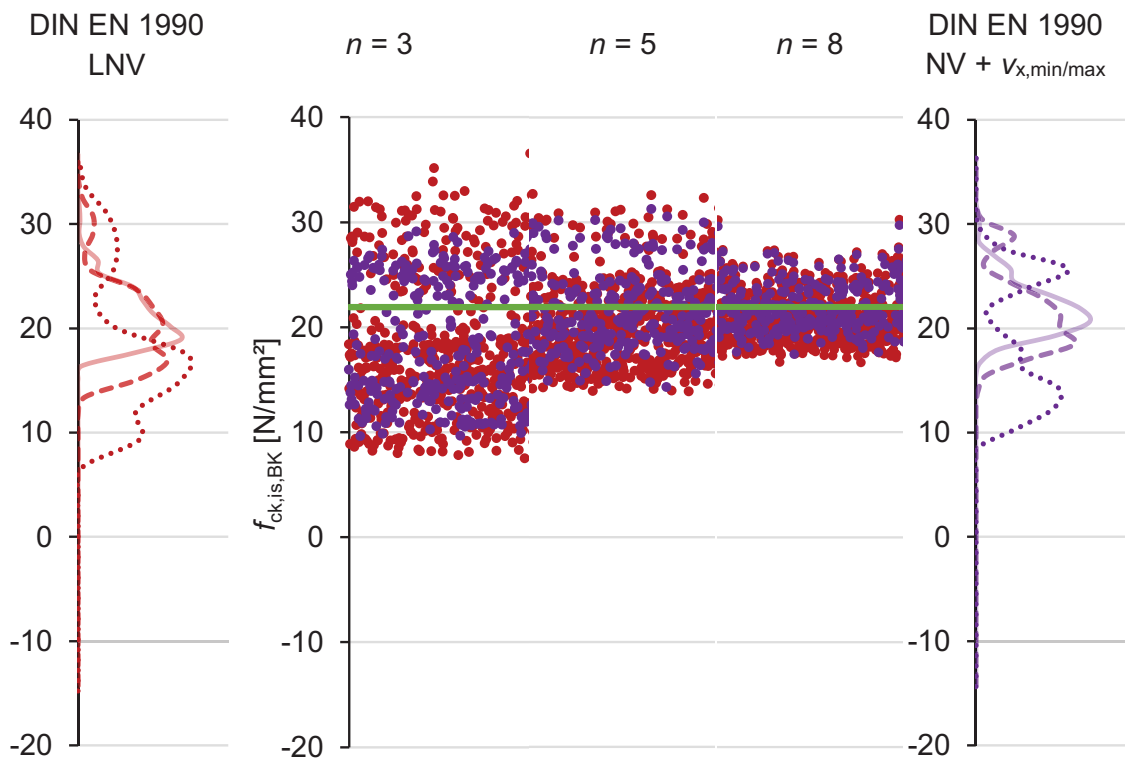


Abb. II. 170 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Heilbronn: Vergleich
DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x, \min/\max}$

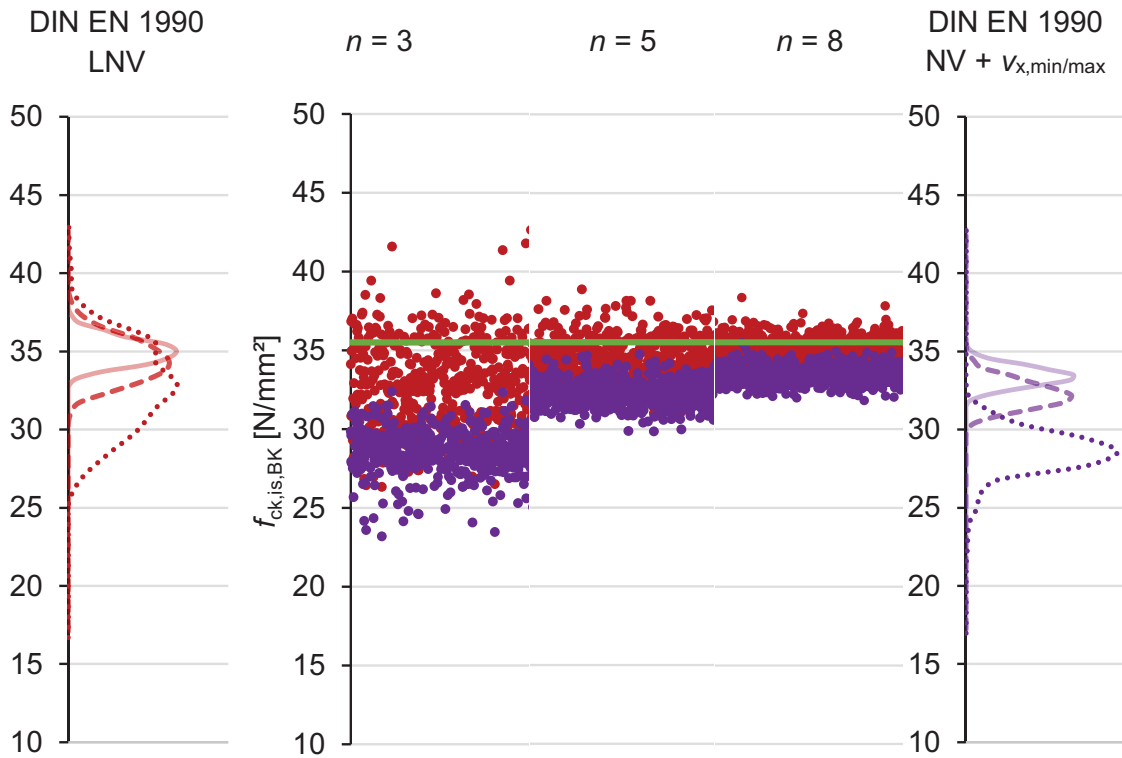


Abb. II. 171 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), Heilbronn: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x, min/max}$

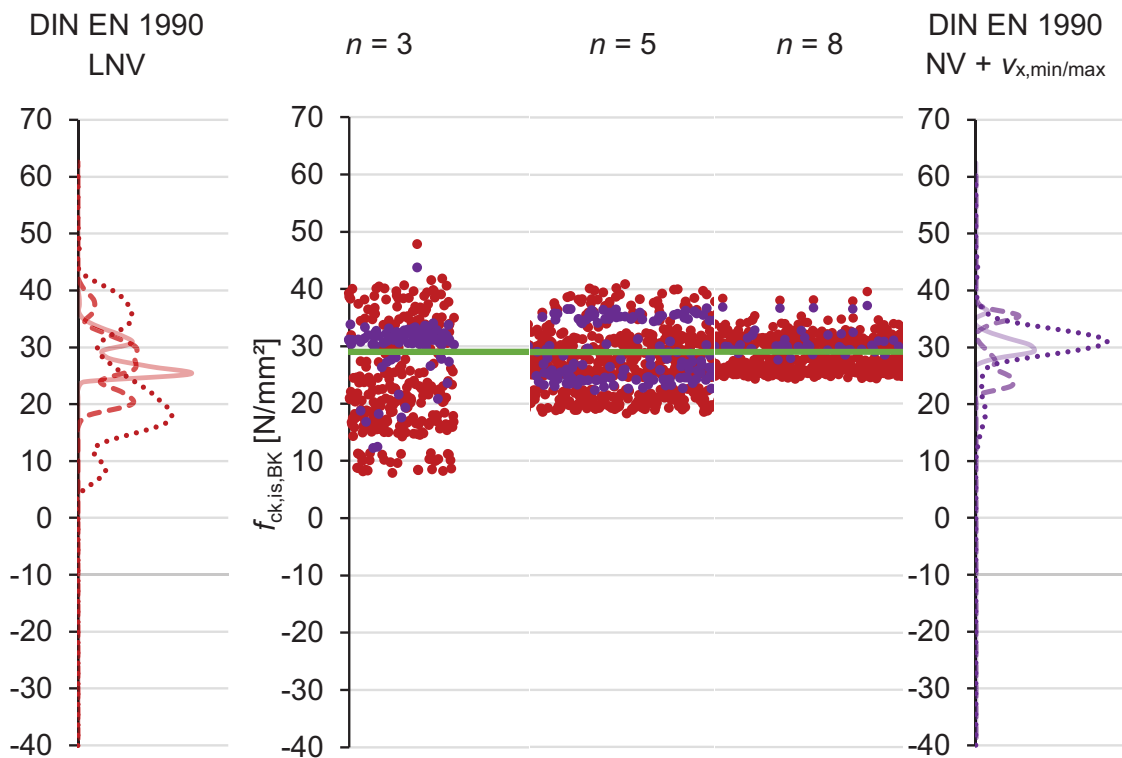


Abb. II. 172 Bauwerk 2: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $v_{x, min/max}$

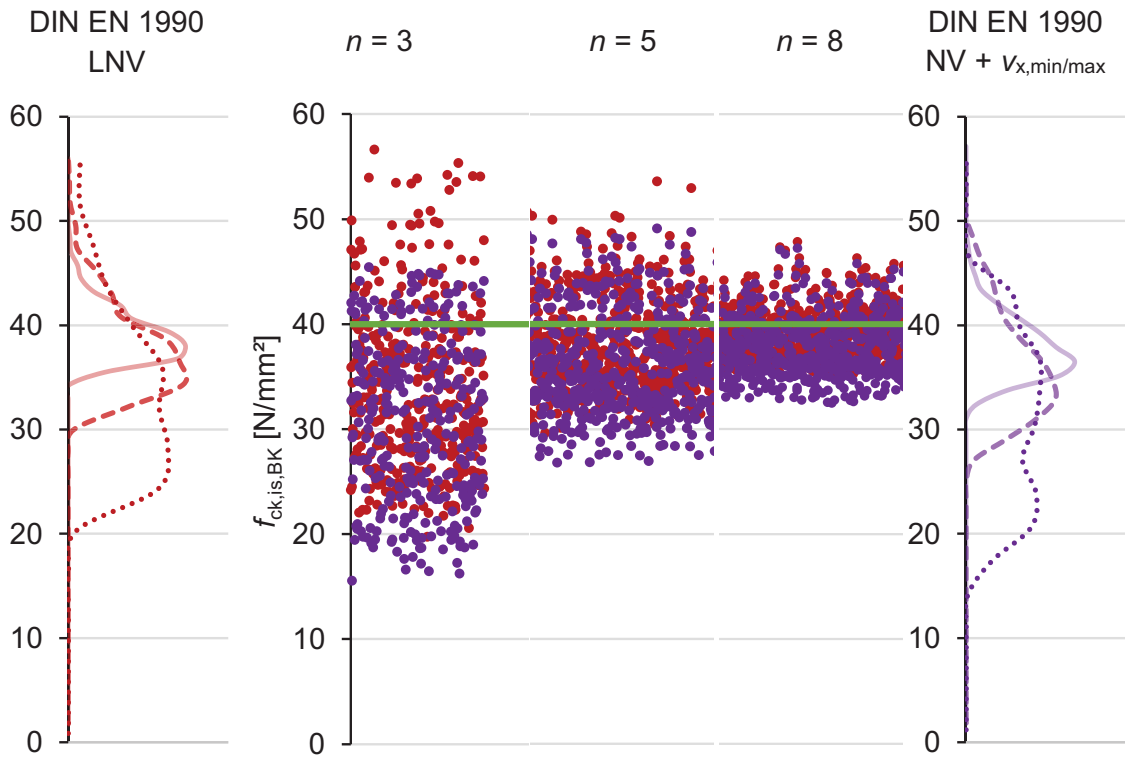


Abb. II. 173 Bauwerk 3: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $V_{x, min/max}$

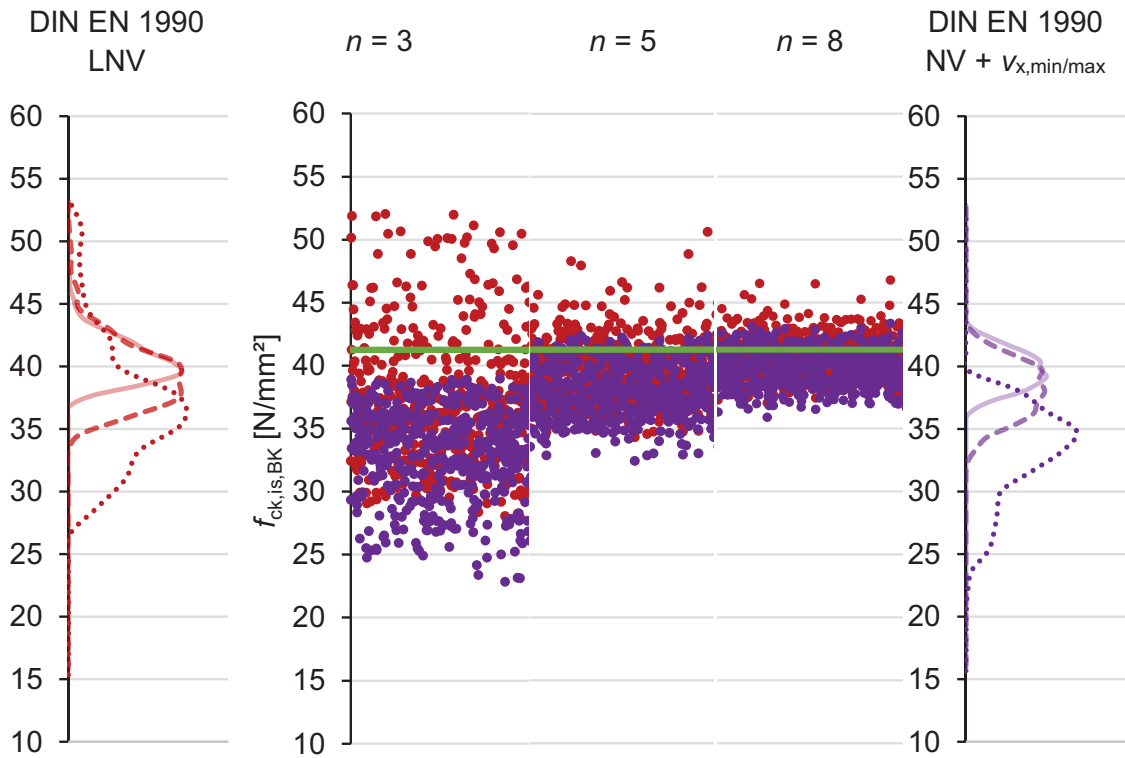


Abb. II. 174 Bauwerk 4: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 1990 – NV mit $V_{x, min/max}$

Vergleich *DIN EN 1990:2010-12* logarithmische Normalverteilung und neu entwickelter Ansatz nach *DIN EN 13791/A20:2017-02*

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse einer Bewertung der Teilstichproben mit einer logarithmischen Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* und dem modifizierten Ansatz B nach *DIN EN 13791/A20:2017-02* gegenübergestellt.

Die mit der logarithmischen Normalverteilung ermittelten Ergebnisse werden durch rote und die mit modifizierten Ansatz B ermittelten Ergebnisse durch gelbe Punkte dargestellt. Die blassgelben Punkte stellen das Ergebnis der Auswertung der Teilstichproben mit einem Variationskoeffizienten größer als 0,20 mit dem modifizierten Ansatz A nach *DIN EN 13791/A20:2017-02* dar.

Zusätzlich ist die empirische Verteilungsdichte jeweils für $n = 3$, $n = 5$ und $n = 8$ abgebildet, wobei lediglich die mit dem modifizierten Ansatz B ermittelten Ergebnisse berücksichtigt wurden.

Die bei Abb. II.175 beschriebene Legende ist in gleicher Form auch für die Abbildungen Abb. II.176 bis Abb. II.203 gültig.

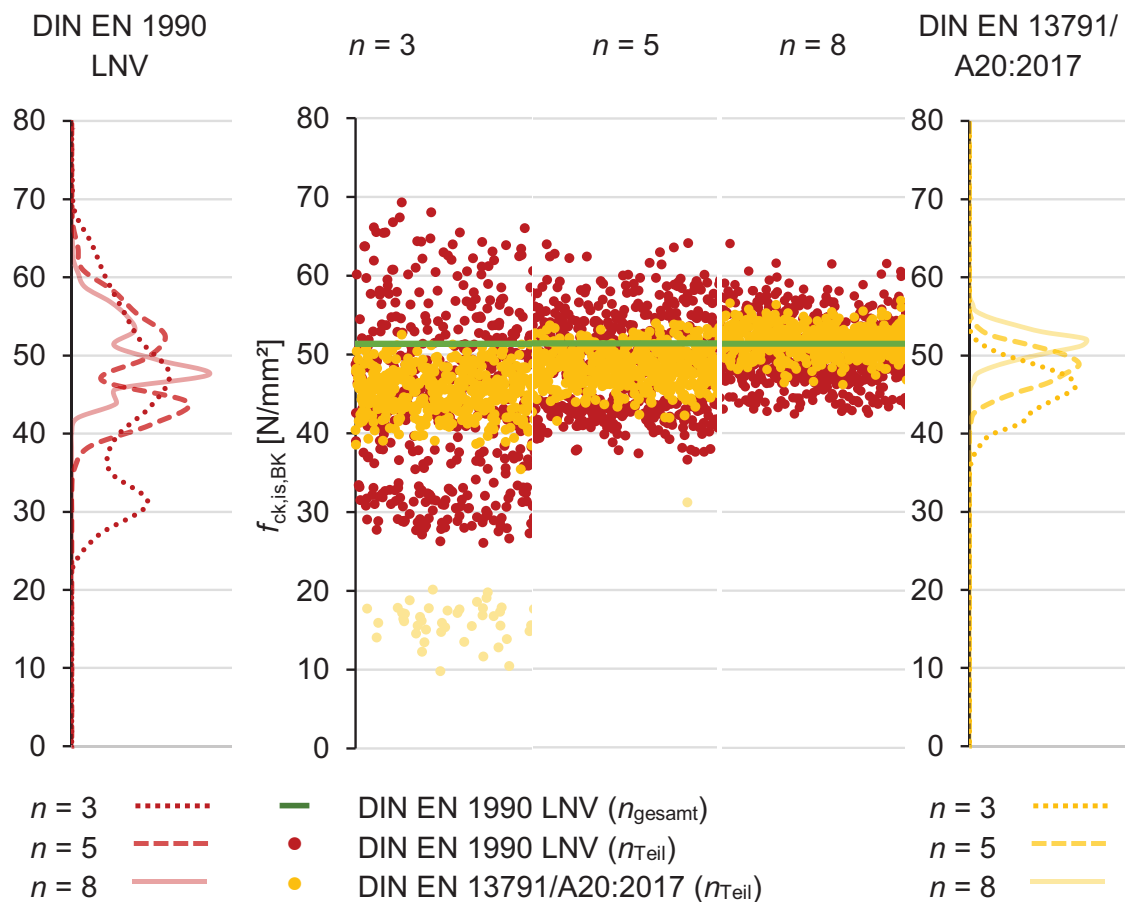


Abb. II. 175 Tropfkörper Kläranlage Blümeltal, Pirmasens: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

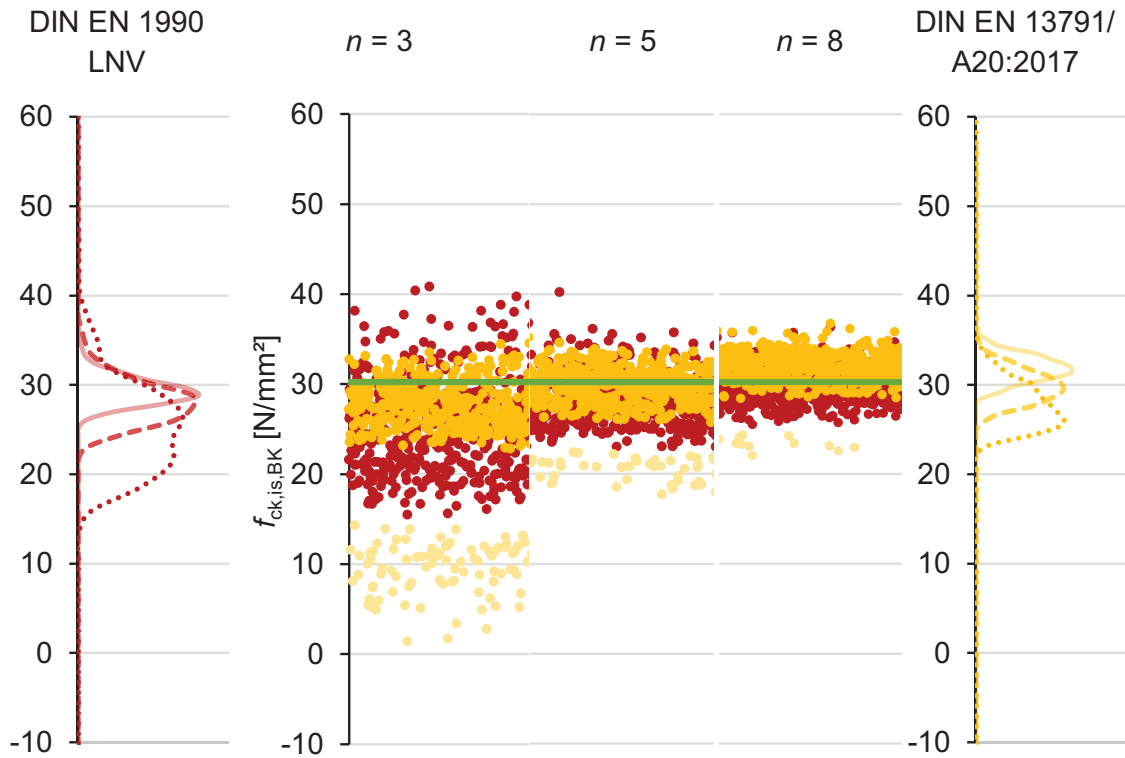


Abb. II. 176 Autobahnunterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

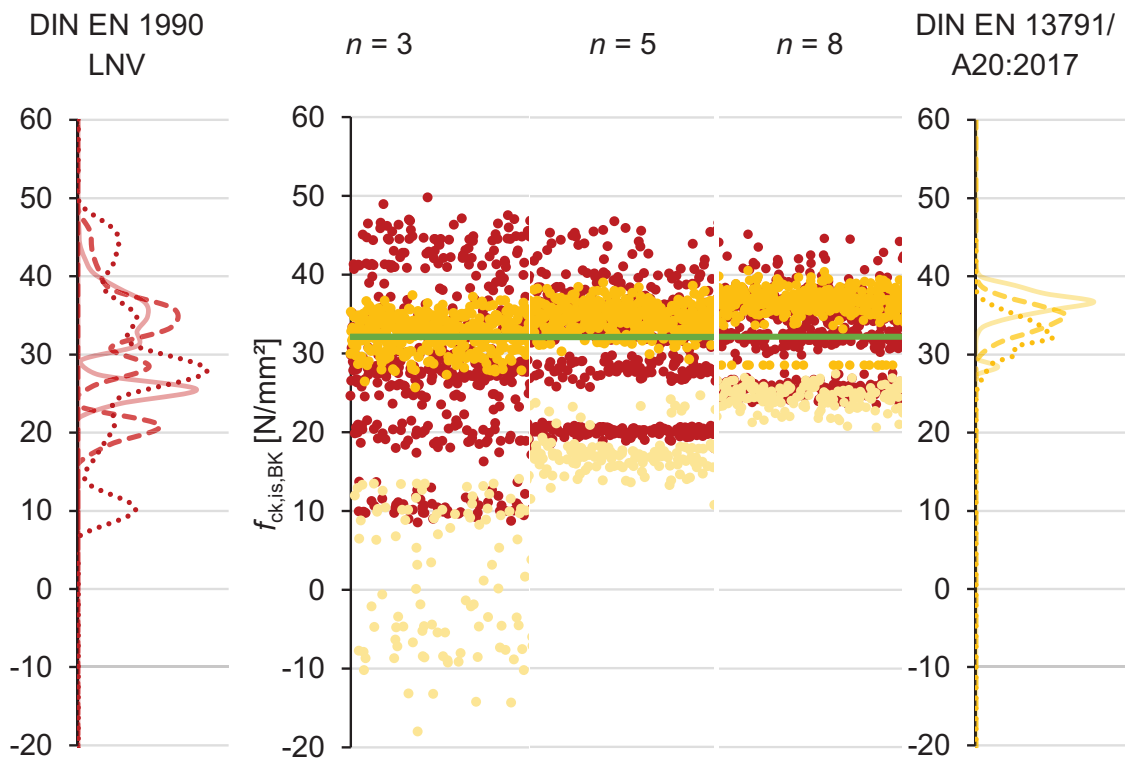


Abb. II. 177 Autobahnunterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

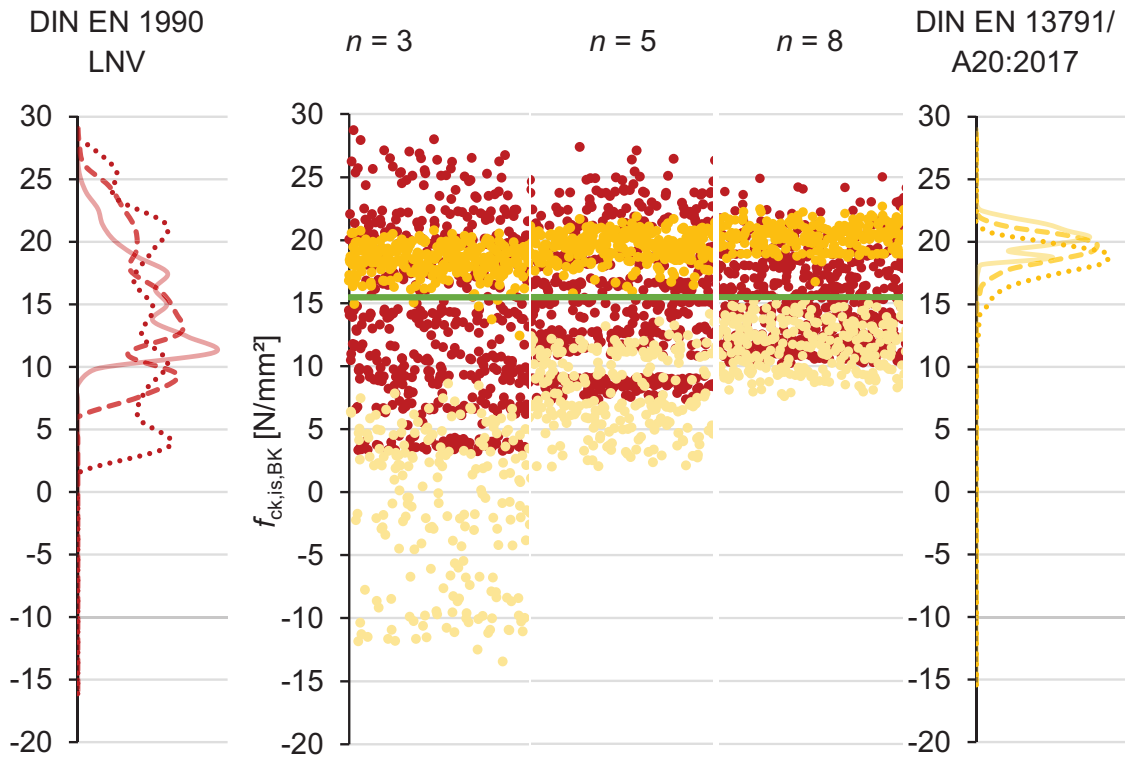


Abb. II. 178 Umspannwerk, Sulzbach: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

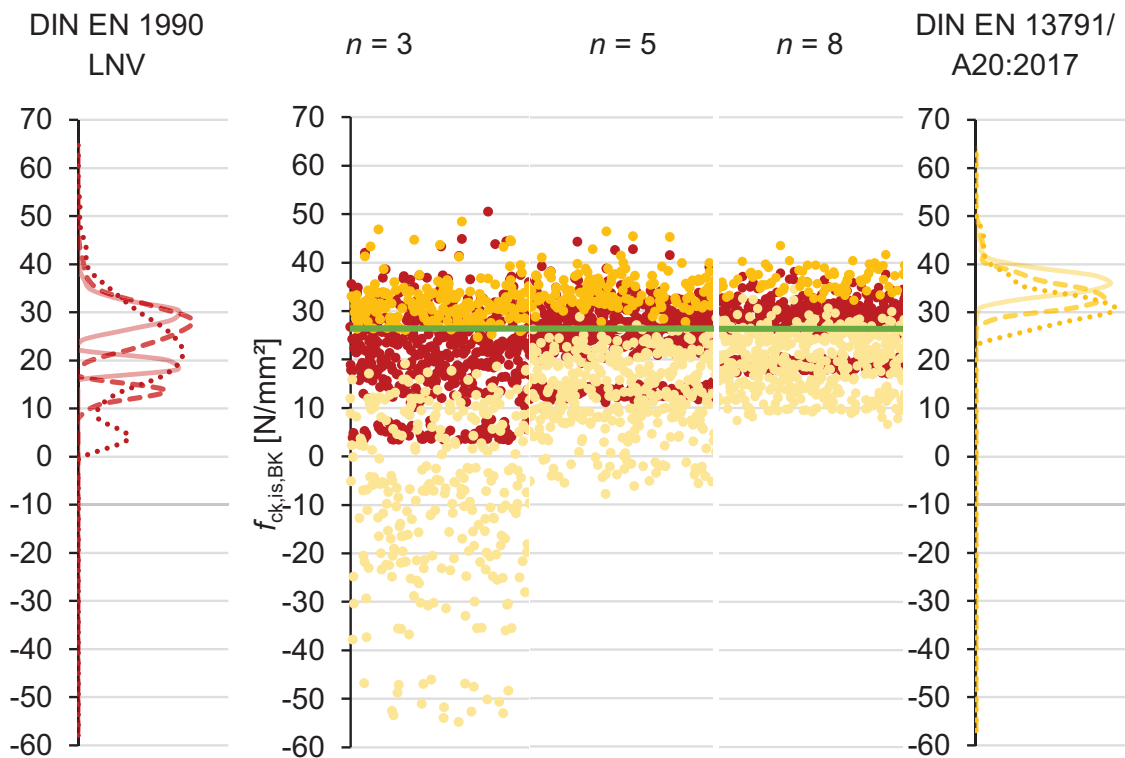


Abb. II. 179 Hochwasserschutzwand, Dormagen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

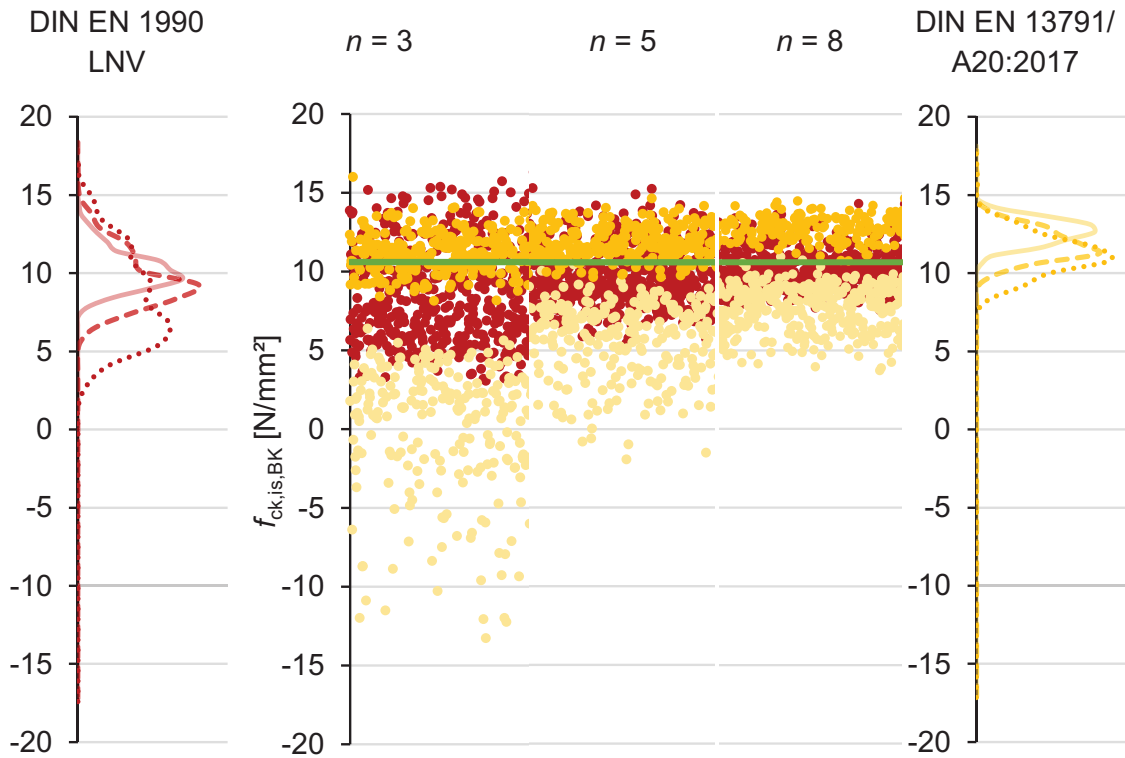


Abb. II. 180 Schwergewichtswand, Dormagen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

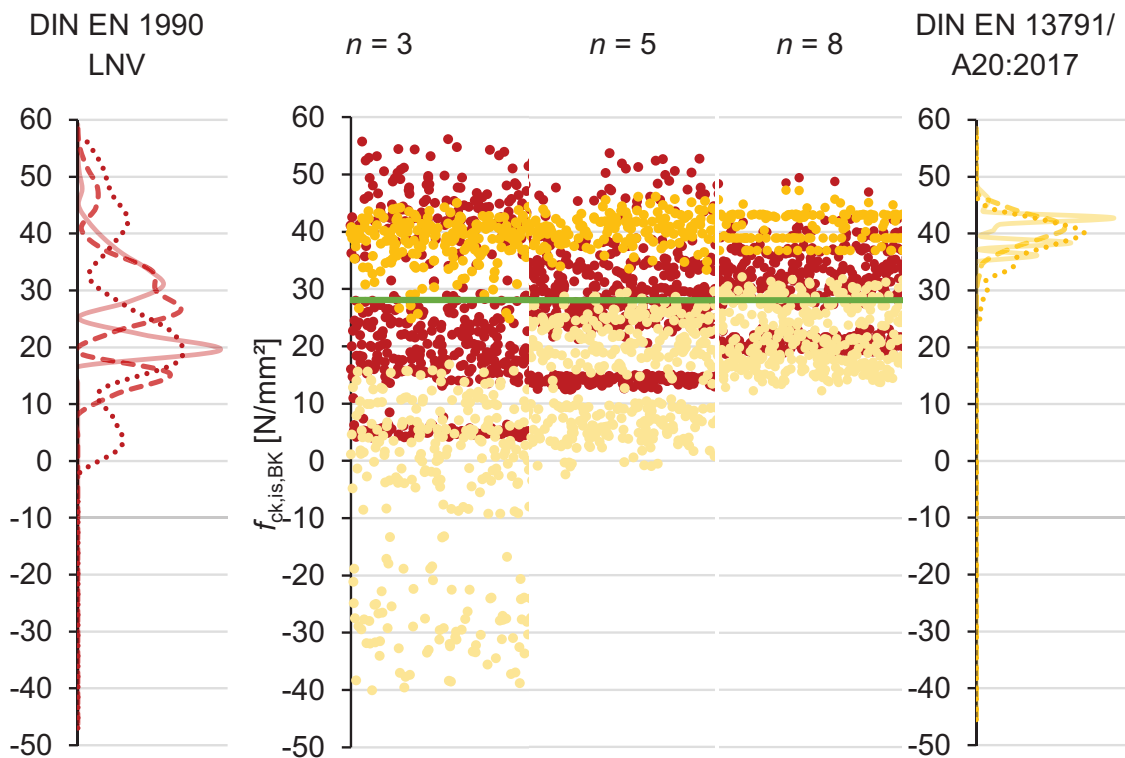


Abb. II. 181 Bodenplatte ACO, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

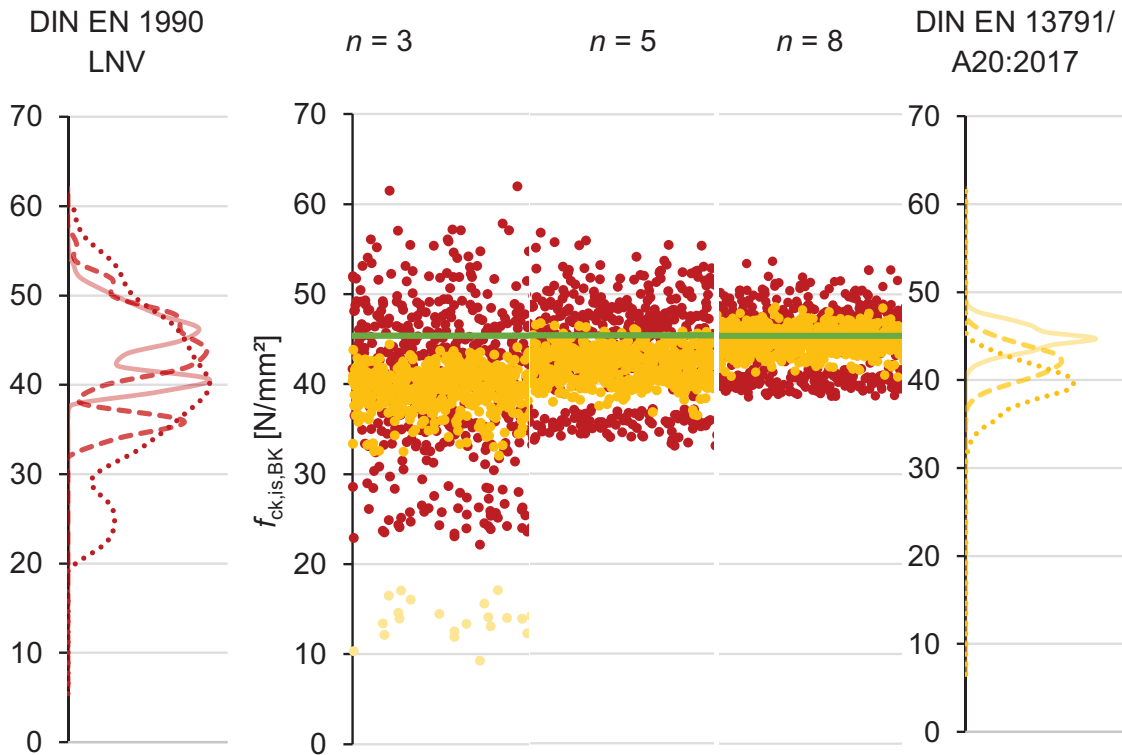


Abb. II. 182 Stützwand Ohmbach Abschnitt I, Pirmasens: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

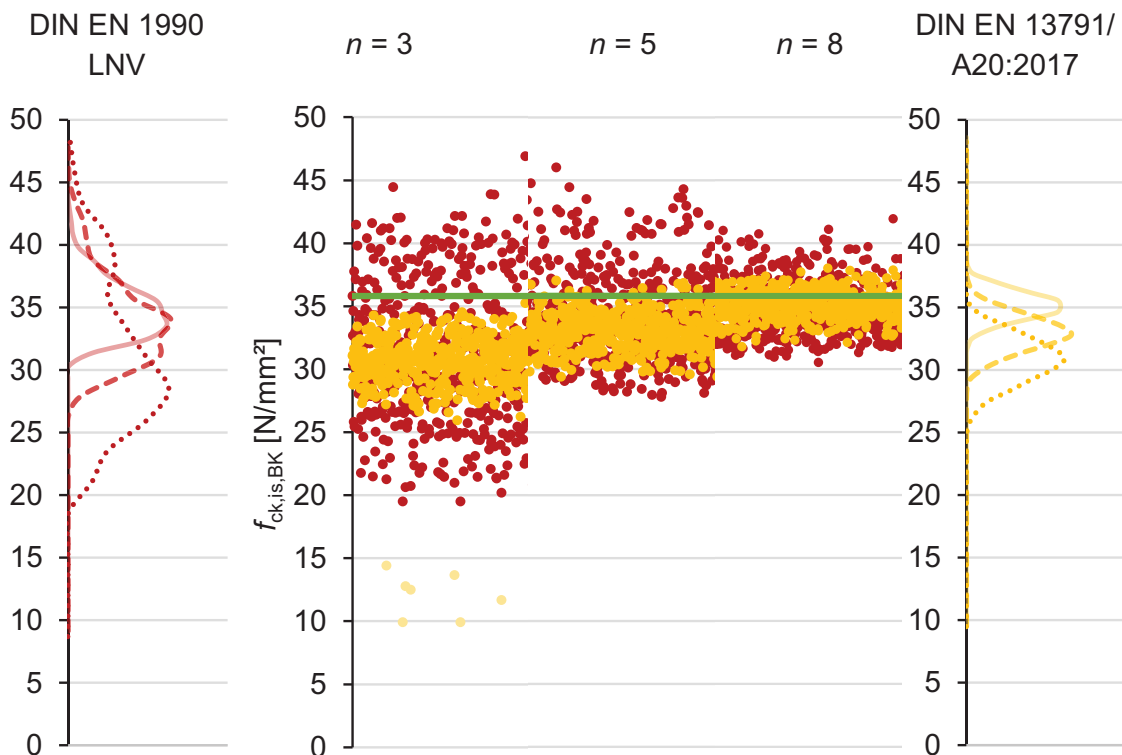


Abb. II. 183 Stützwand Ohmbach Abschnitt II, Pirmasens: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

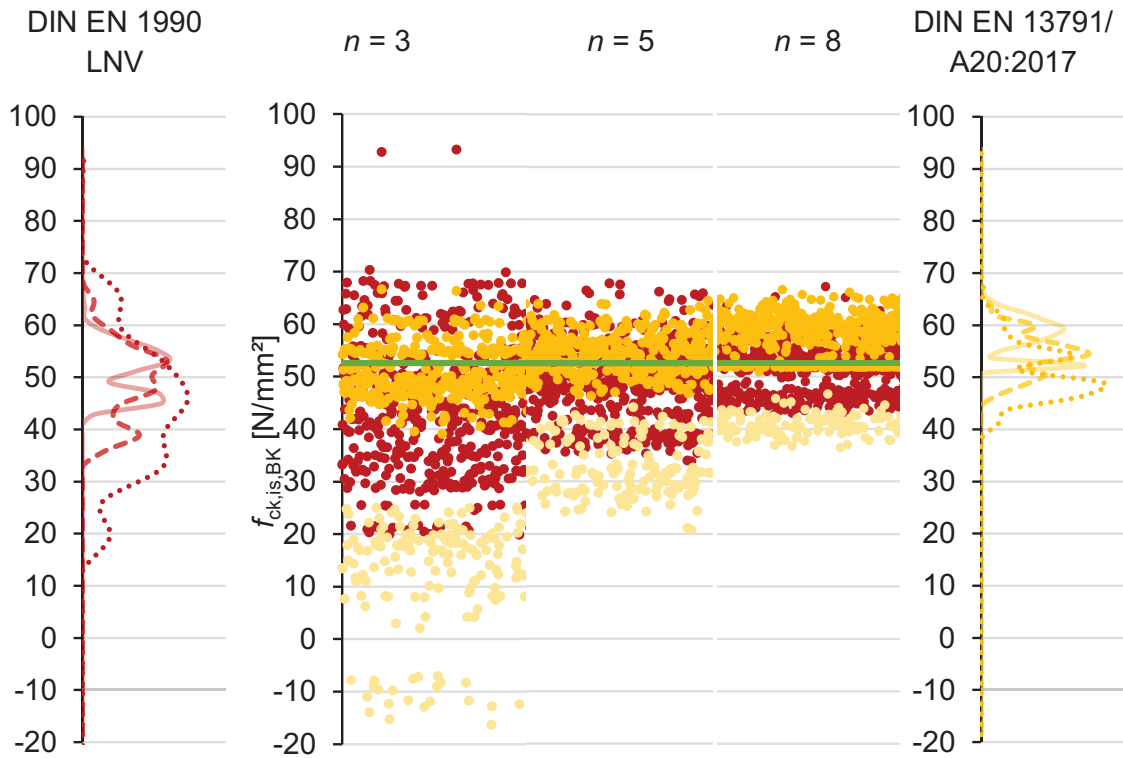


Abb. II. 184 Weserbrücke, Hannoversch Münden: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

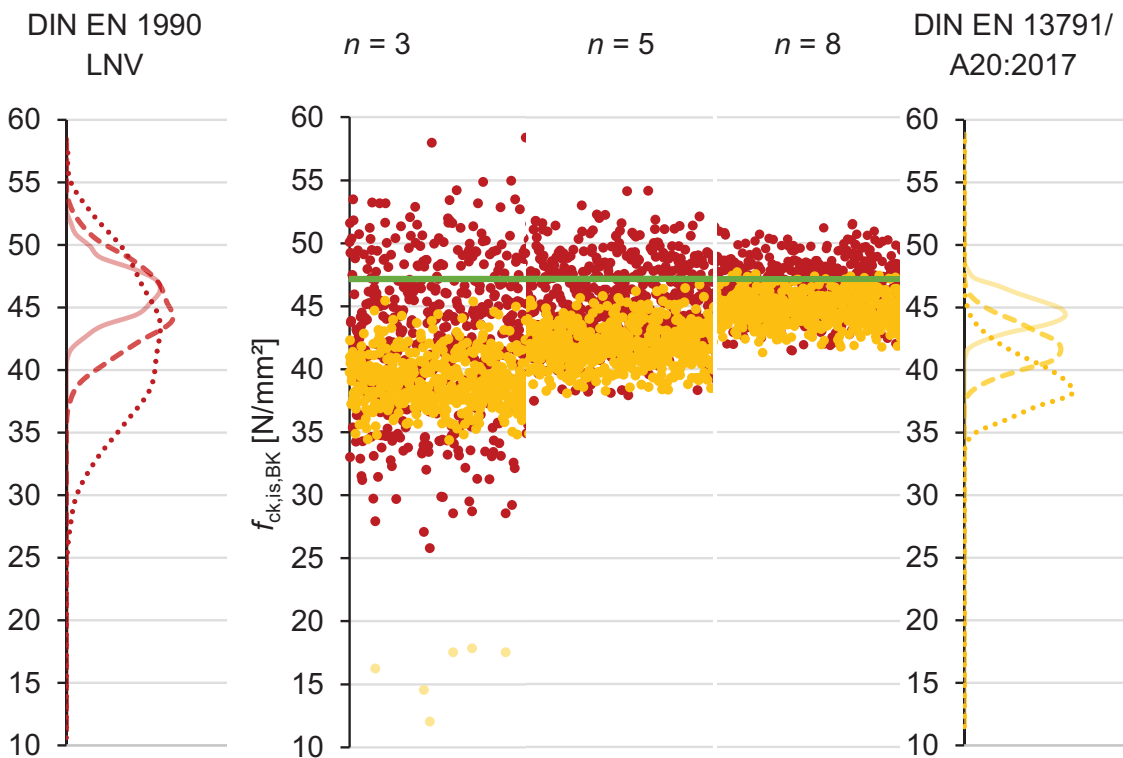


Abb. II. 185 Lahntalbrücke, Limburg: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

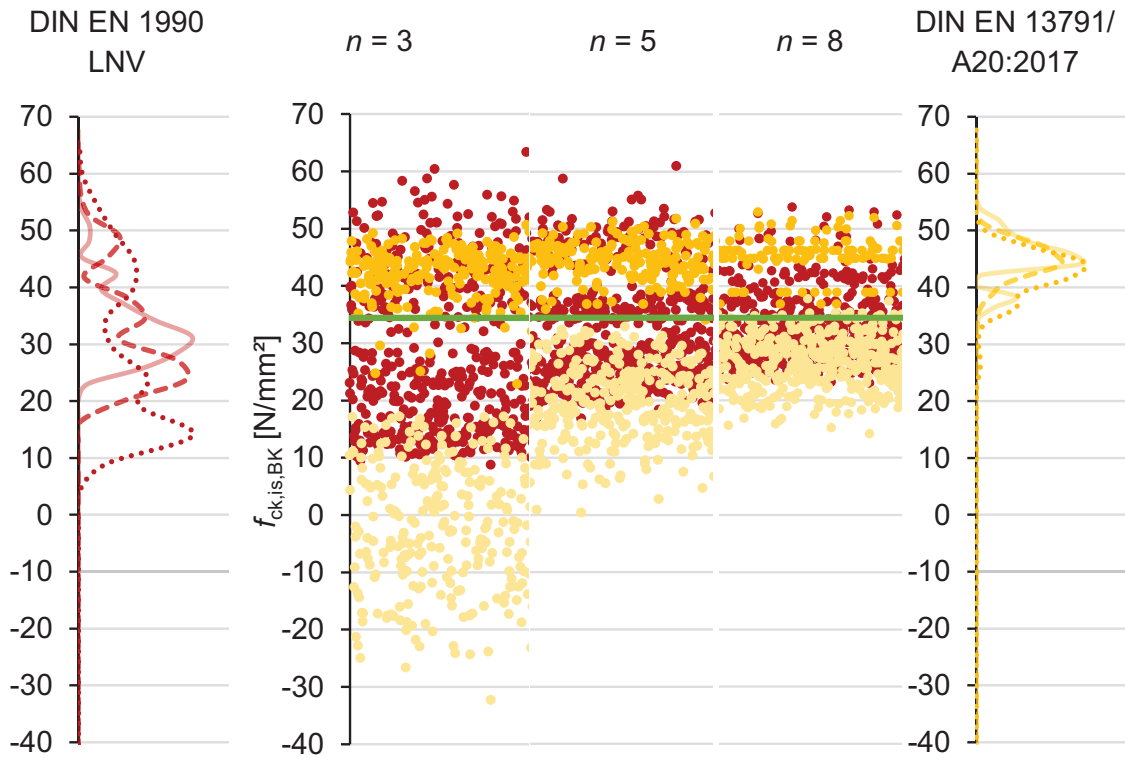


Abb. II. 186 Lautertalbrücke Widerlager, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

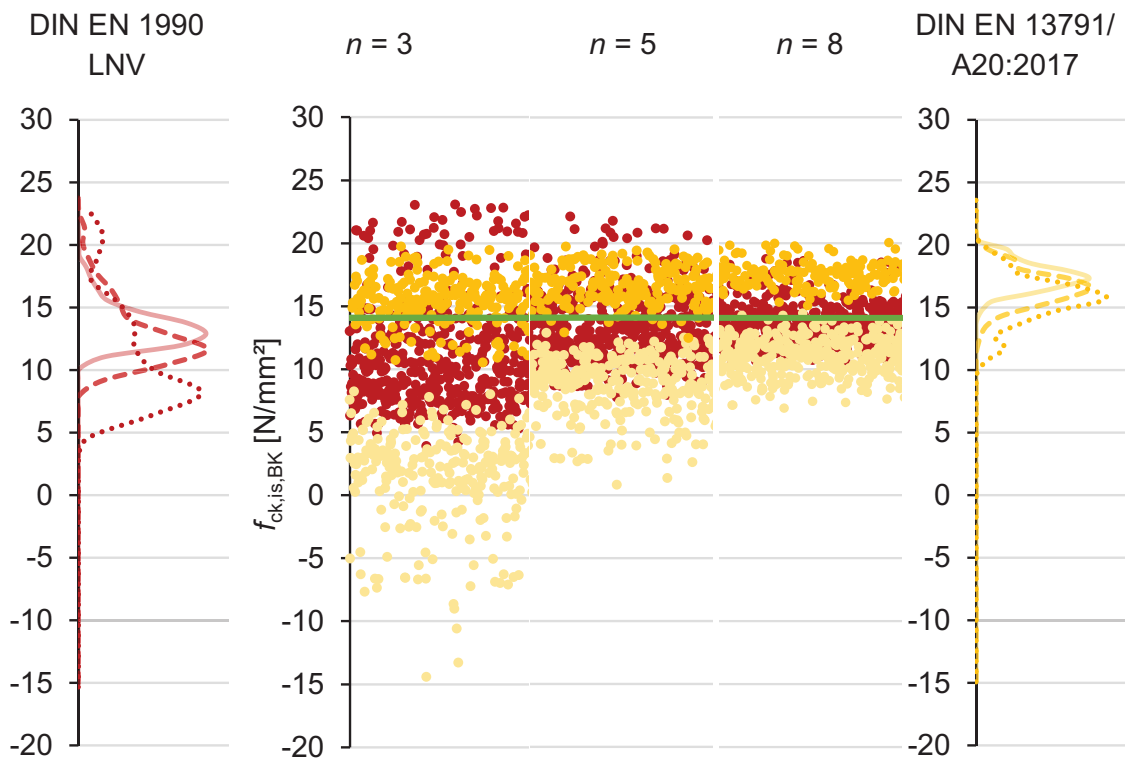


Abb. II. 187 Lautertalbrücke Fahrbahn untere Schicht, Kaiserslautern: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

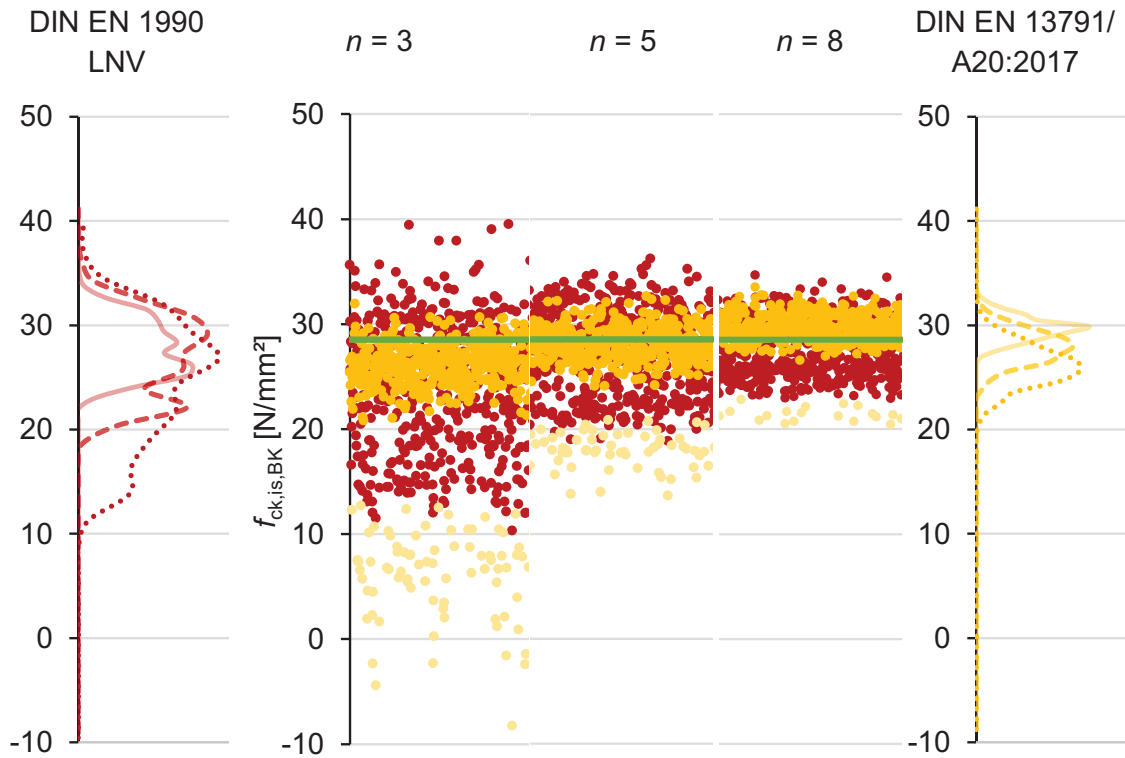


Abb. II. 188 Decke Wohnblock, Ludwigshafen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

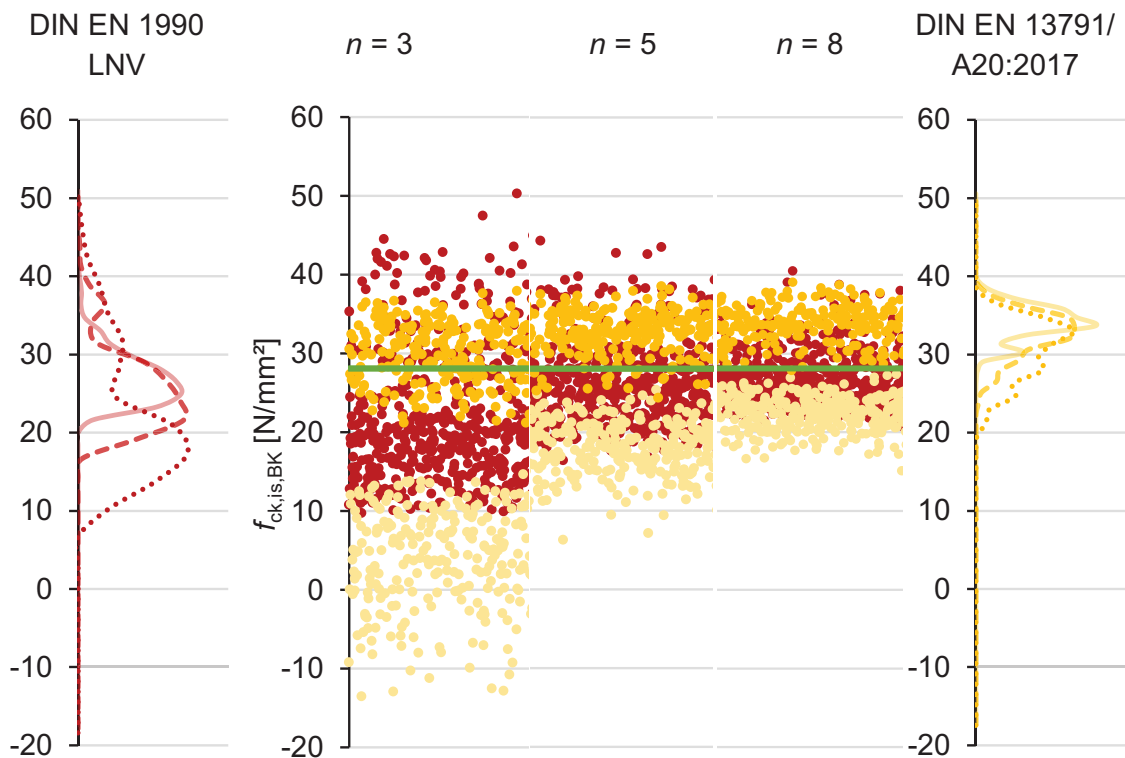


Abb. II. 189 Wand Technische Werke Ludwigshafen, Ludwigshafen: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

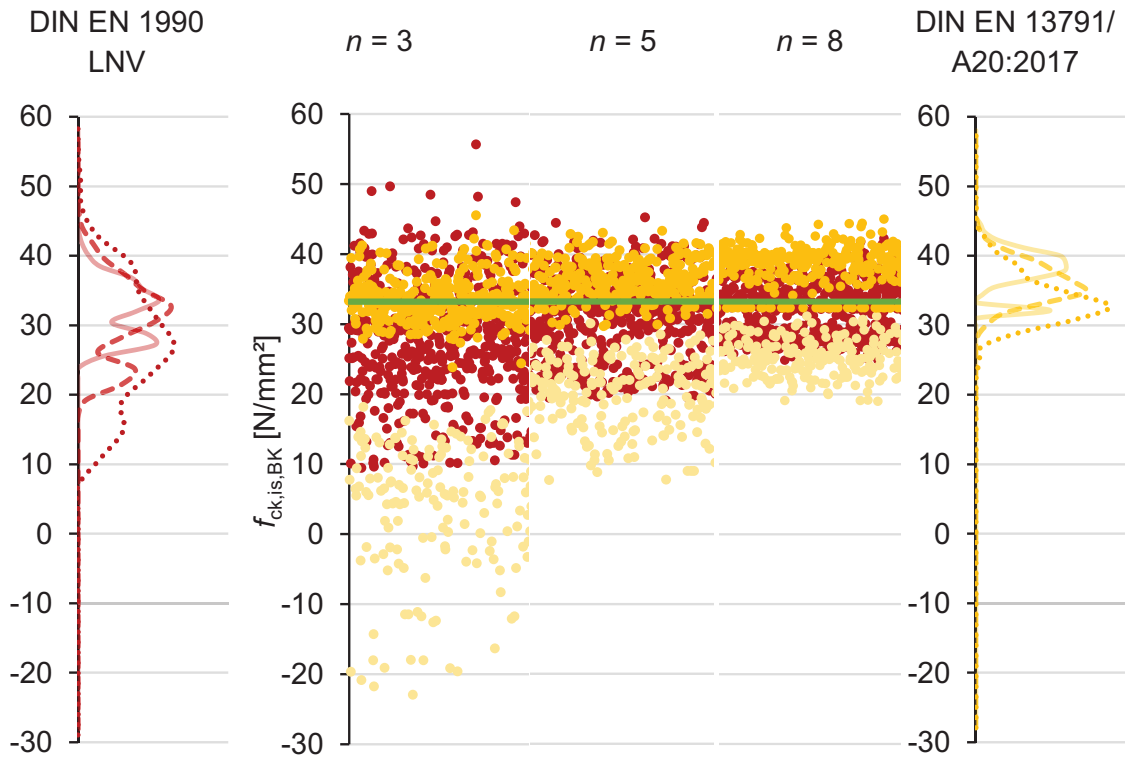


Abb. II. 190 Bauwerk 1: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

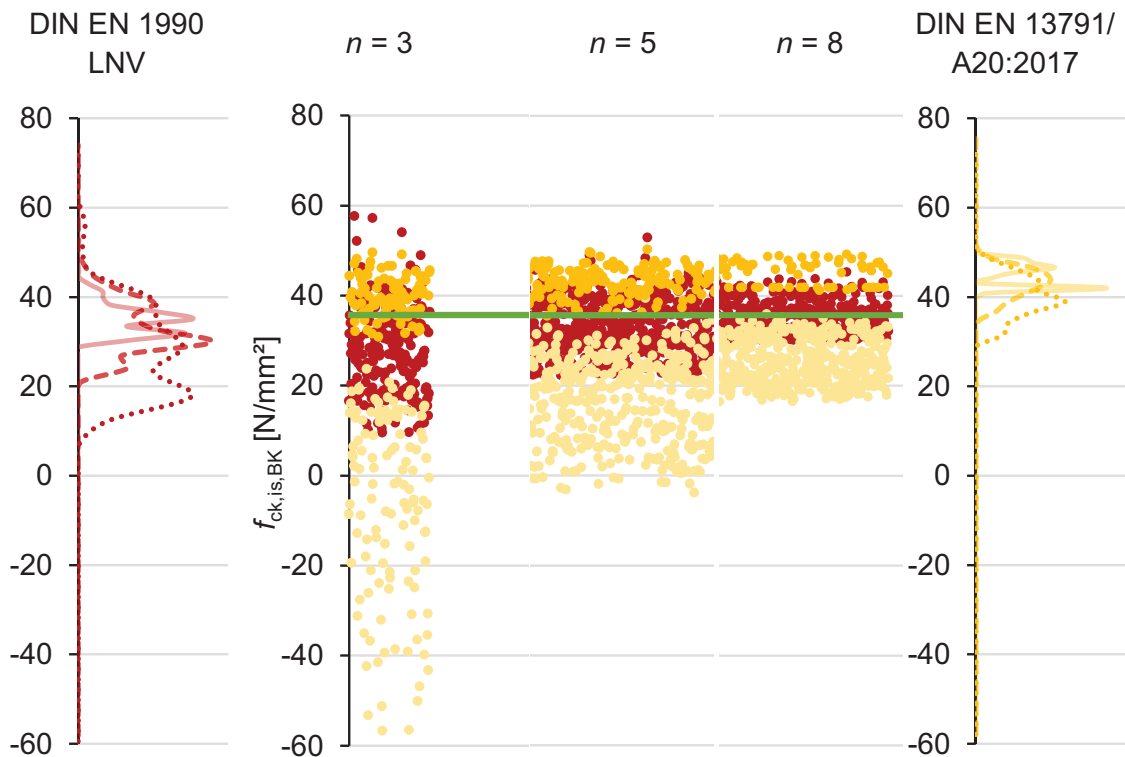


Abb. II. 191 Pfeiler Brücke B270, Langweiler: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

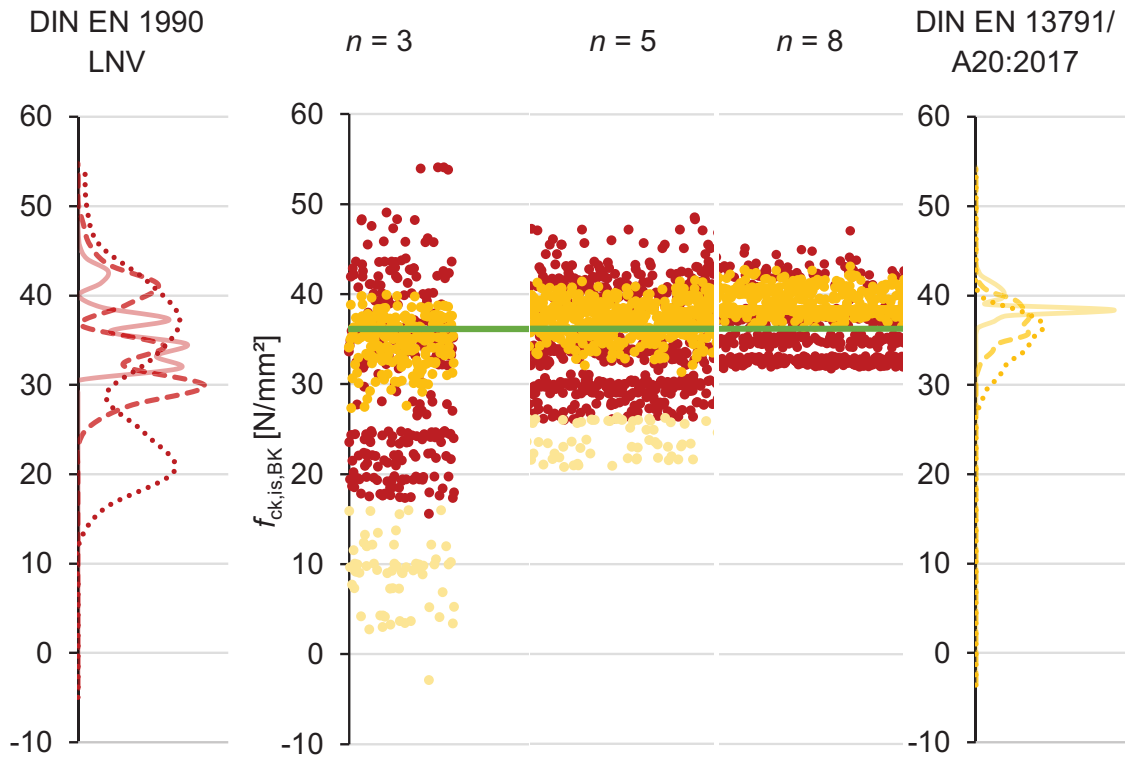


Abb. II. 192 Brücke Autobahnkreuz Mainz-Süd - Auflager, Mainz: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

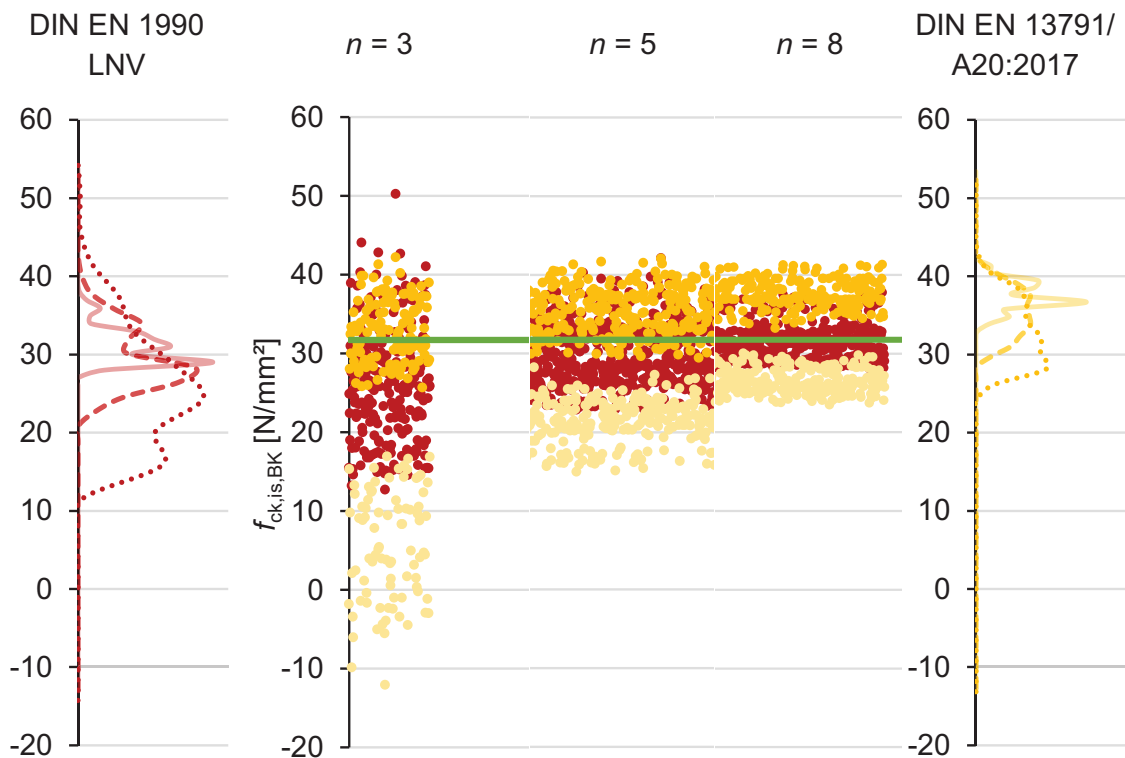


Abb. II. 193 Brücke über den Lockwitzbach, Dresden/Niedersedlitz: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

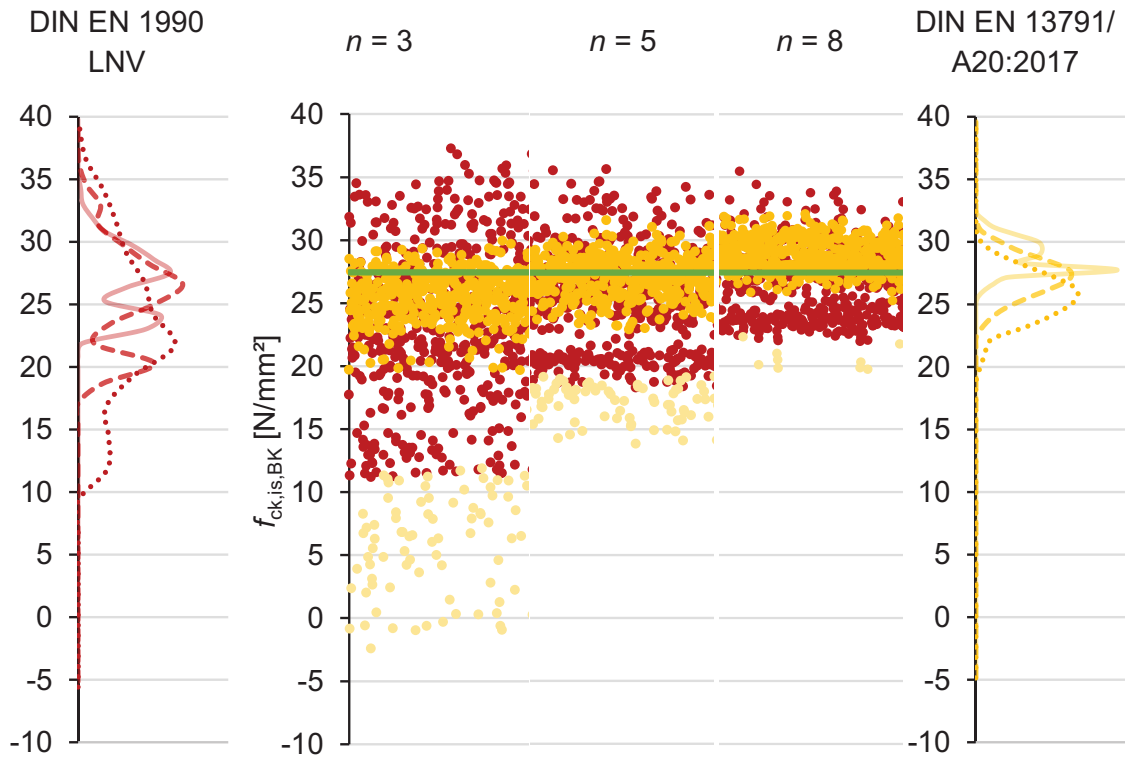


Abb. II. 194 Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

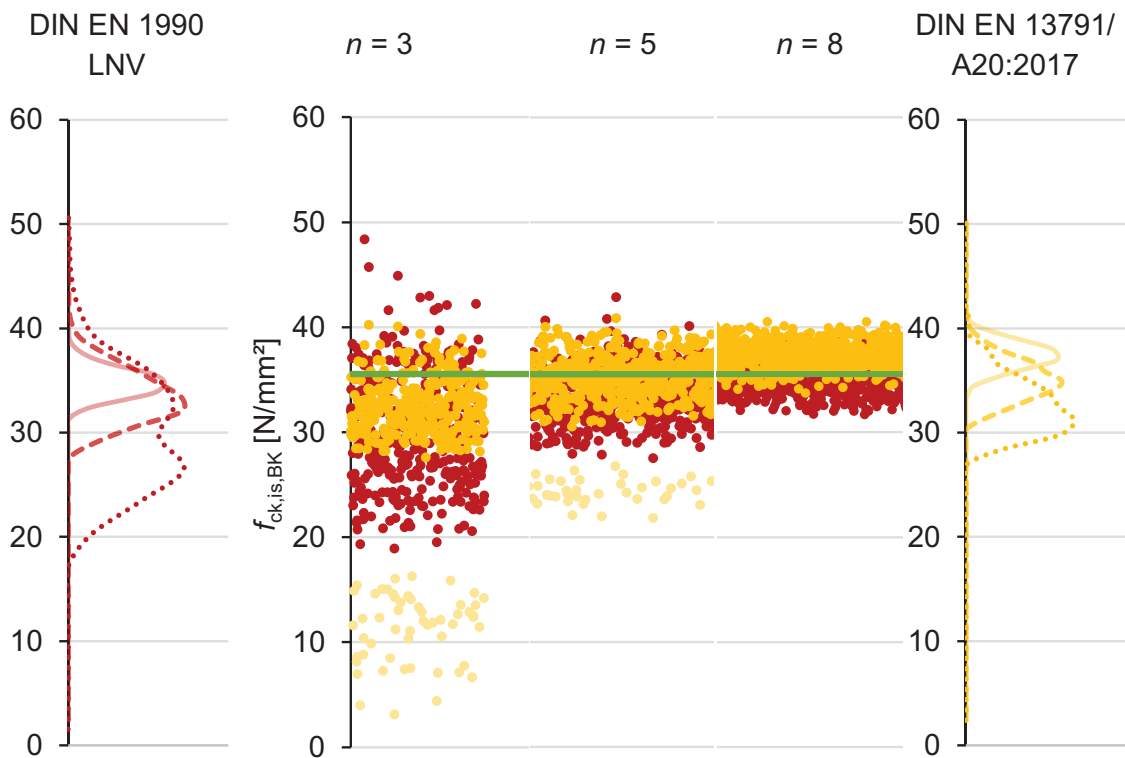


Abb. II. 195 Balkonplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

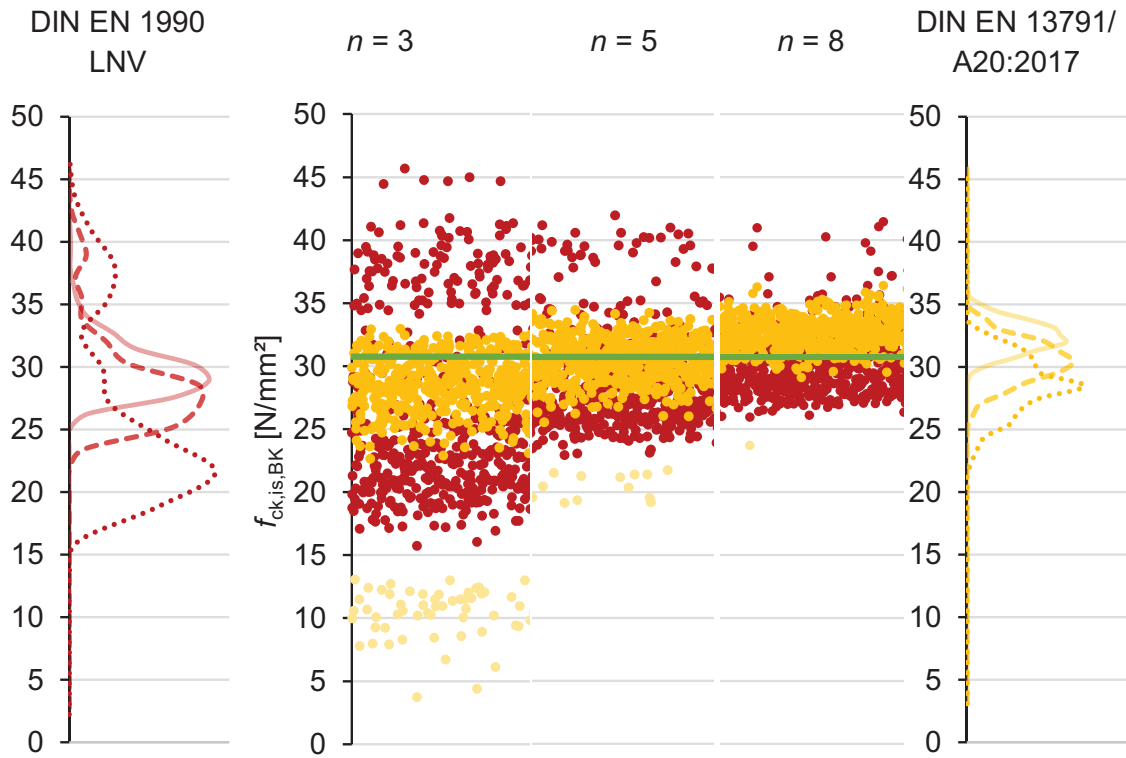


Abb. II. 196 Deckenplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

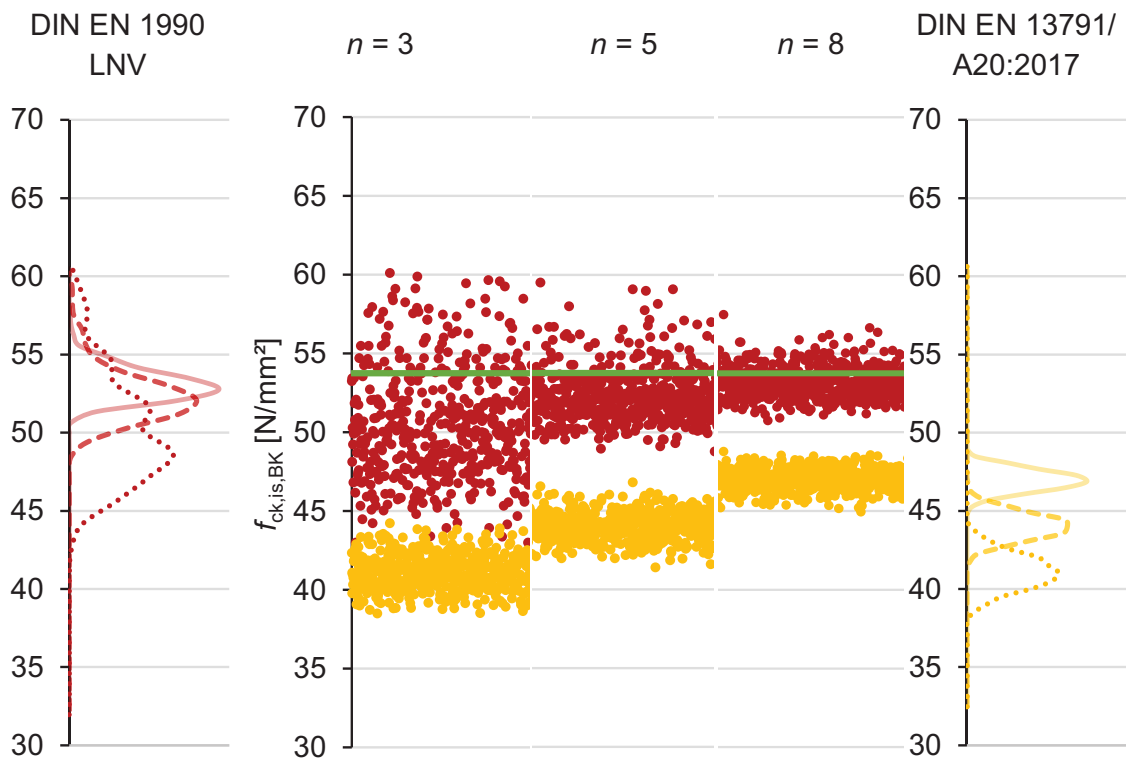


Abb. II. 197 Stützwand, Kusel: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

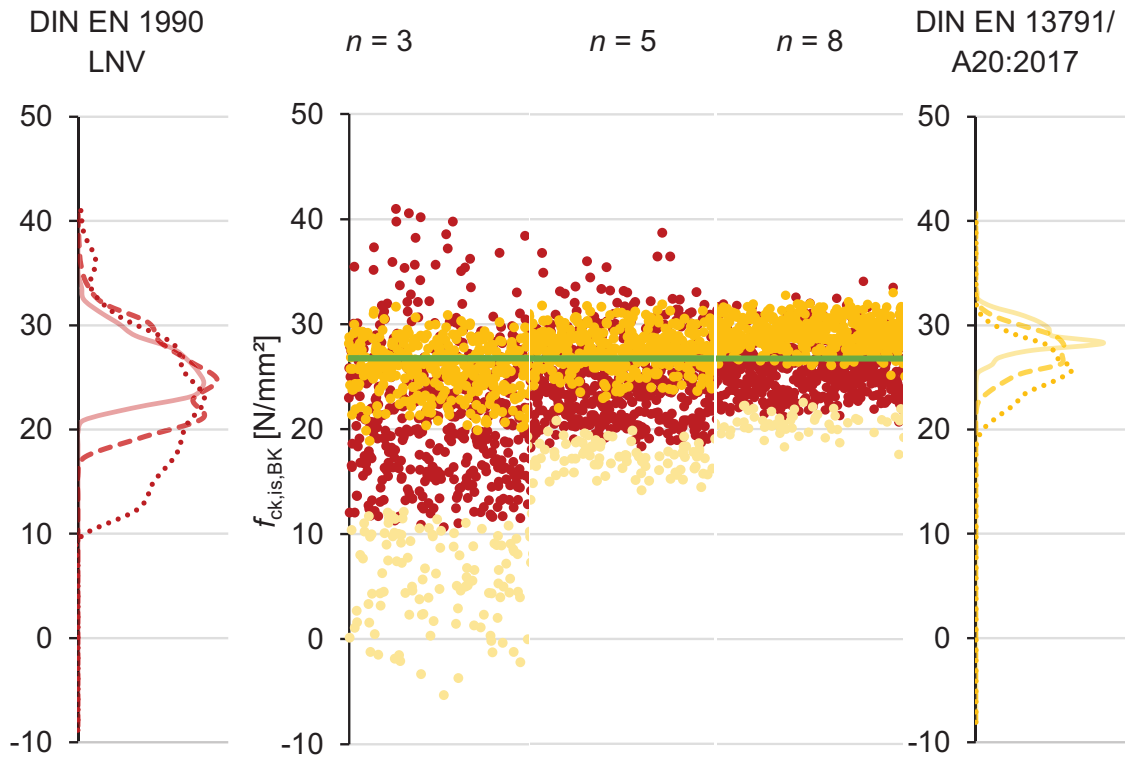


Abb. II. 198 Unterführung A6 Kirchhausen-Biberach (501 A-D), Heilbronn: Vergleich
DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

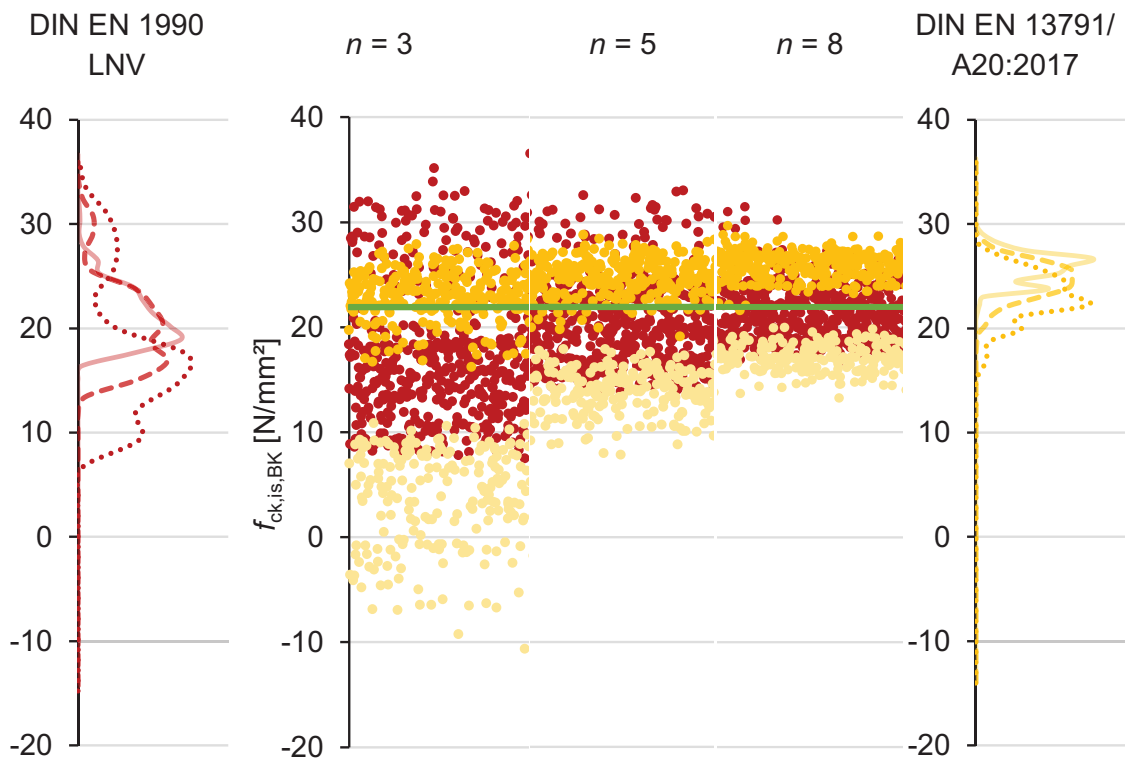


Abb. II. 199 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Heilbronn: Vergleich
DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

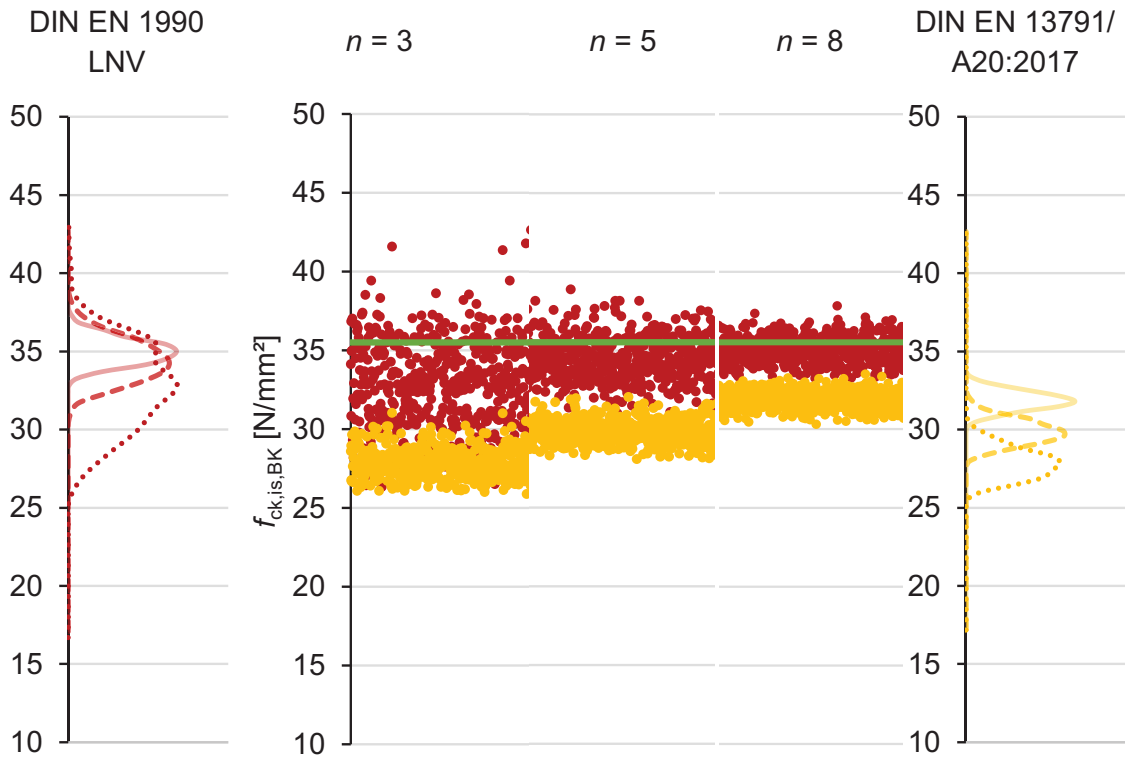


Abb. II. 200 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), Heilbronn: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

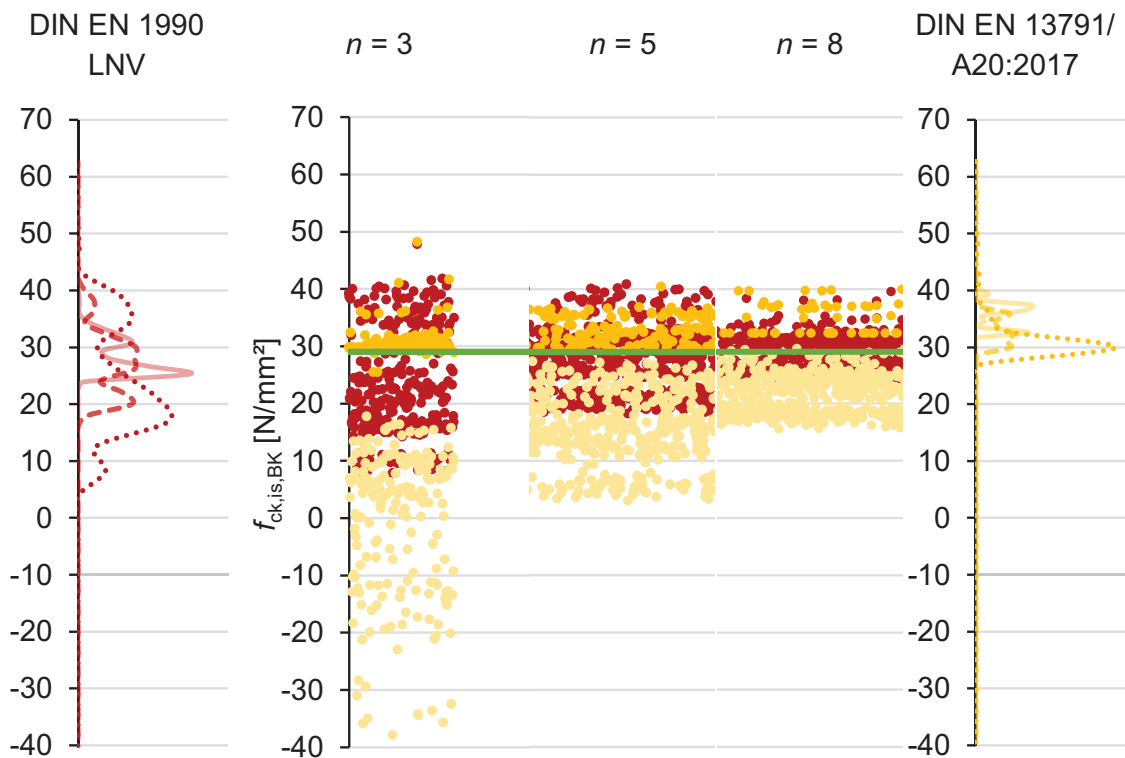


Abb. II. 201 Bauwerk 2: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

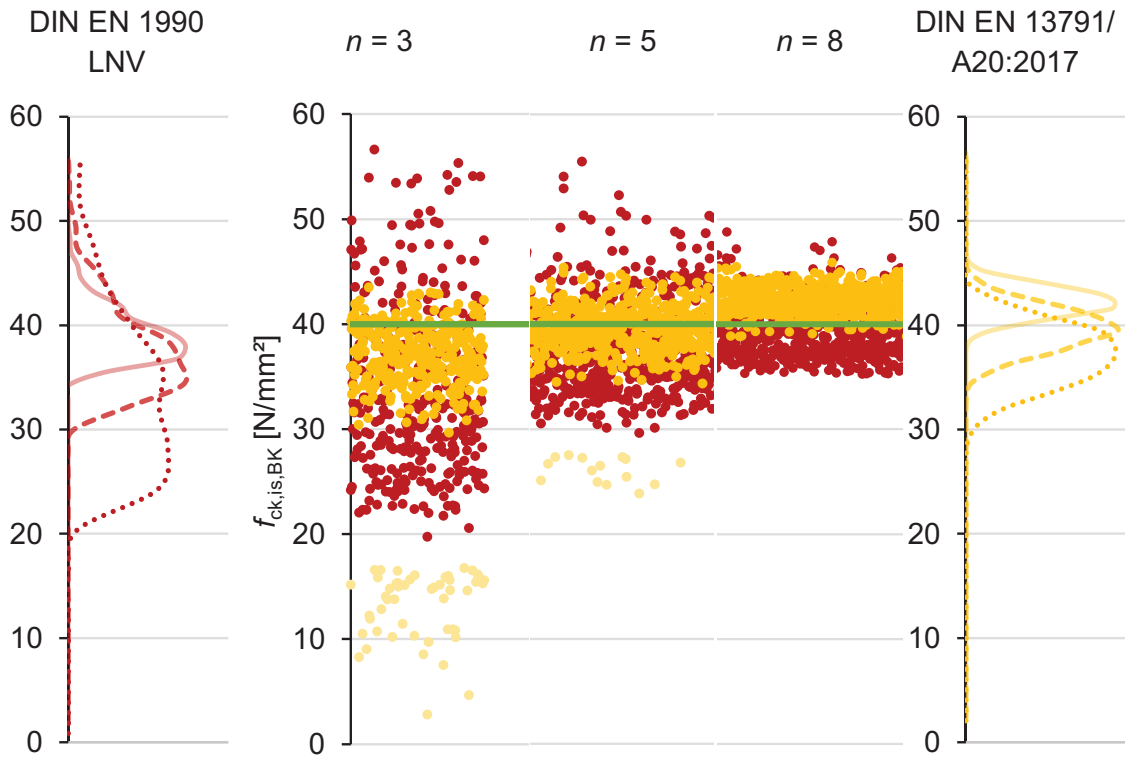


Abb. II. 202 Bauwerk 3: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

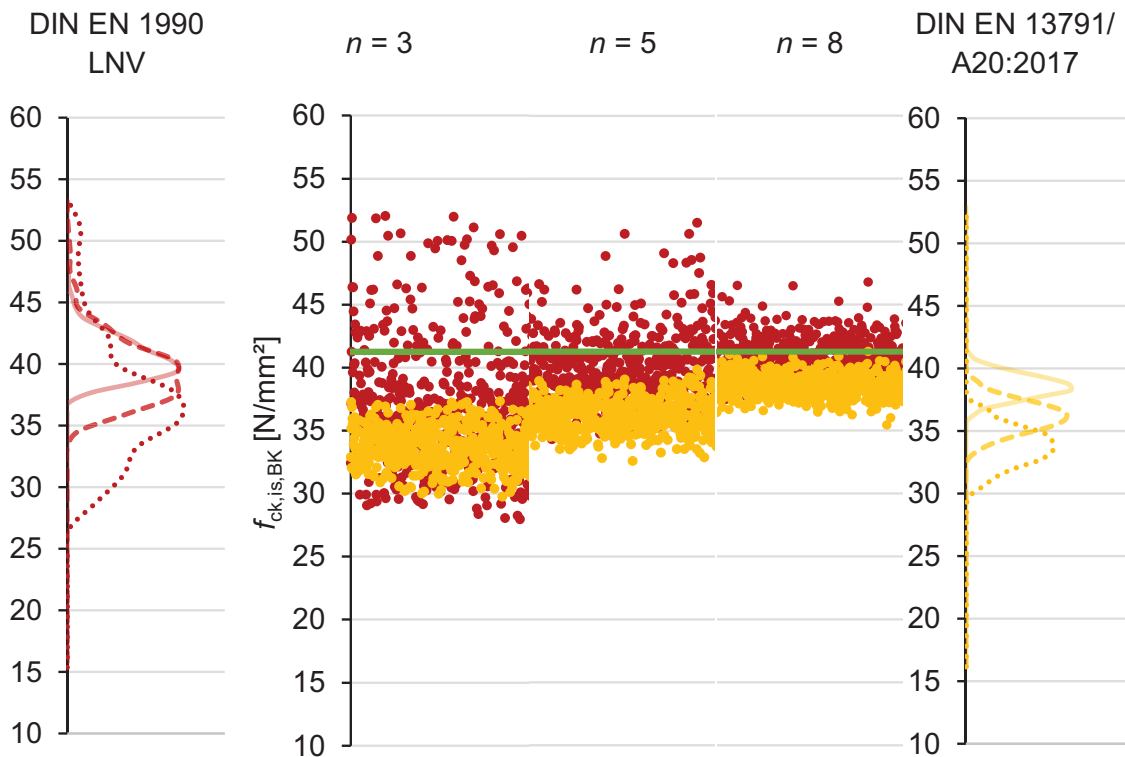


Abb. II. 203 Bauwerk 4: Vergleich DIN EN 1990 – LNV und DIN EN 13791/A20:2017-02

Kenngrößen der Auswertung

Tropfkörper Kläranlage Blümeltal, Pirmasens

Tab. II. 1 Tropfkörper Kläranlage Blümeltal, Pirmasens – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,09	0,01	0,00

Tab. II. 2 Tropfkörper Kläranlage Blümeltal, Pirmasens – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	3,3	71,8	68,5	40,8	23	77	-10,6
5	28,1	69,6	41,5	47,1	31	69	-4,3
8	38,7	64,4	25,7	49,2	33	67	-2,2
DIN EN 1990 LNV							
3	23,3	71,9	48,6	45,0	28	72	-6,4
5	35,0	69,7	34,7	48,8	39	61	-2,5
8	41,9	64,6	22,8	50,2	37	63	-1,2
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	43,6	68,5	24,9	57,2	92	8	5,8
5	47,1	67,2	20,1	56,4	98	2	5,0
8	51,6	65,2	13,6	55,5	100	0	4,1
BAW TbW							
3	10,6	68,8	58,2	33,8	9	91	-17,6
5	24,3	66,8	42,5	40,7	9	91	-10,7
8	34,1	61,5	27,4	44,0	9	91	-7,4
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	38,7	59,8	21,1	49,1	33	67	-2,3
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	3,3	65,4	62,1	40,4	21	79	-11,0
5	28,1	67,2	39,1	47,1	31	69	-4,3
8	38,7	64,4	25,7	49,2	33	67	-2,2
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	18,1	55,1	37,0	40,9	8	92	-10,5
5	31,8	60,4	28,6	46,8	30	70	-4,6
8	38,7	59,8	21,1	49,1	33	67	-2,3
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	35,4	52,8	17,4	45,4	1	99	-6,0
5	40,6	55,7	15,1	48,4	11	89	-2,9
8	46,1	56,9	10,9	51,6	56	44	0,2

Autobahnunterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern

Tab. II. 3 Autobahnunterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,20	0,09	0,01

Tab. II. 4 Autobahnunterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	-0,1	45,8	45,9	21,0	11	89	-9,2
5	16,6	39,8	23,2	26,0	11	89	-4,2
8	22,0	35,6	13,6	27,8	12	88	-2,5
DIN EN 1990 LNV							
3	14,8	46,1	31,3	25,3	14	86	-5,0
5	22,3	40,2	17,9	28,2	19	81	-2,1
8	25,4	36,3	10,9	29,4	26	74	-0,9
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	25,7	43,7	18,1	32,8	76	24	2,6
5	26,1	40,0	13,9	32,8	85	15	2,6
8	28,7	39,9	11,1	33,8	98	2	3,6
BAW TbW							
3	6,4	42,6	36,2	17,6	5	95	-12,7
5	15,5	36,6	21,1	22,4	1	99	-7,8
8	20,3	32,0	11,7	25,0	1	99	-5,2
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	22,0	35,6	13,6	27,8	12	88	-2,5
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	-0,1	40,6	40,7	20,4	5	95	-9,8
5	16,6	39,1	22,5	25,9	10	90	-4,3
8	22,0	35,6	13,6	27,8	12	88	-2,5
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	12,4	37,1	24,7	23,1	4	96	-7,2
5	19,7	37,5	17,9	26,5	11	89	-3,8
8	22,7	35,6	12,9	27,8	12	88	-2,4
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	22,9	35,5	12,6	27,7	16	84	-2,5
5	24,8	35,3	10,4	29,8	40	60	-0,4
8	27,8	36,7	8,9	31,9	87	13	1,7

Autobahnunterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern

Tab. II. 5 Autobahnunterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,22	0,25	0,32

Tab. II. 6 Autobahnunterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	-18,0	50,1	68,1	23,6	29	71	-8,5
5	10,7	48,1	37,4	29,1	44	56	-3,1
8	20,4	46,0	25,6	30,8	44	56	-1,3
DIN EN 1990 LNV							
3	8,5	50,1	41,6	28,6	36	64	-3,5
5	17,8	48,1	30,3	31,0	54	46	-1,2
8	23,4	46,1	22,7	31,6	51	49	-0,5
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	24,9	46,7	21,8	37,6	85	15	5,5
5	28,3	45,4	17,2	36,5	77	23	4,4
8	28,5	44,8	16,3	35,3	64	36	3,2
BAW TbW							
3	2,2	49,2	47,0	20,6	17	83	-11,5
5	10,0	47,0	37,1	24,5	15	85	-7,6
8	17,3	44,2	27,0	26,4	20	80	-5,7
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	20,4	42,7	22,3	30,8	44	56	-1,4
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	-18,0	43,6	61,6	22,9	27	73	-9,3
5	10,7	45,4	34,7	29,0	44	56	-3,2
8	20,4	44,8	24,4	30,8	44	56	-1,3
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	13,2	39,2	26,1	28,4	35	65	-3,8
5	19,3	42,6	23,3	32,8	59	41	0,7
8	23,0	42,7	19,6	33,7	65	35	1,6
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	25,6	37,6	11,9	32,4	58	42	0,3
5	26,4	39,3	12,9	34,5	90	10	2,4
8	28,5	40,6	12,1	36,2	94	6	4,1

Umspannwerk, Sulzbach

Tab. II. 7 Umspannwerk, Sulzbach – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,41	0,47	0,54

Tab. II. 8 Umspannwerk, Sulzbach – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	-15,0	29,0	44,0	9,6	36	64	-5,9
5	1,3	27,7	26,5	13,5	38	62	-2,0
8	7,3	25,5	18,2	14,5	39	61	-0,9
DIN EN 1990 LNV							
3	3,1	29,0	25,8	13,9	41	59	-1,5
5	7,2	27,8	20,5	15,1	43	57	-0,4
8	10,0	25,6	15,6	15,2	44	56	-0,3
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	7,5	22,8	15,3	17,6	75	25	2,1
5	10,8	22,4	11,6	17,4	73	27	2,0
8	13,8	22,4	8,5	17,7	64	36	2,2
BAW TbW							
3	0,6	5,5	27,9	9,6	25	75	-5,9
5	3,5	26,7	23,2	11,3	23	77	-4,2
8	6,7	24,3	17,6	12,0	18	82	-3,5
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	7,3	23,8	16,5	14,5	39	61	-1,0
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	-15,0	19,7	34,7	8,2	32	68	-7,3
5	1,3	22,4	21,1	13,1	38	62	-2,4
8	7,3	22,4	15,0	14,5	39	61	-1,0
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	7,2	21,7	14,6	16,2	61	39	0,7
5	10,4	23,9	13,5	18,0	72	28	2,5
8	12,9	23,8	10,9	18,0	86	14	2,5
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	11,8	20,8	9,0	18,3	96	4	2,8
5	14,5	22,0	7,5	19,4	100	0	3,9
8	16,7	22,7	6,0	20,3	100	0	4,8

Hochwasserschutzwand, Dormagen

Tab. II. 9 Hochwasserschutzwand, Dormagen – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,57	0,70	0,85

Tab. II. 10 Hochwasserschutzwand, Dormagen – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	-55,7	52,1	107,8	7,5	16	84	-18,9
5	-8,7	47,1	55,9	17,9	23	77	-8,5
8	5,6	41,8	36,2	21,0	24	76	-5,3
DIN EN 1990 LNV							
3	3,1	53,9	50,8	21,5	30	70	-4,9
5	11,1	47,2	36,1	24,9	50	50	-1,5
8	16,9	42,2	25,4	25,8	58	42	-0,6
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	22,2	64,0	41,8	37,5	86	14	11,1
5	22,4	55,8	33,4	35,7	78	22	9,3
8	22,4	48,7	26,3	32,9	63	37	6,6
BAW TbW							
3	0,3	0,5	50,9	12,5	9	91	-13,9
5	4,1	44,5	40,4	16,9	7	93	-9,5
8	10,2	38,0	27,8	19,2	9	91	-7,2
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	5,6	41,8	36,2	21,0	24	76	-5,3
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	-55,7	52,1	107,8	7,2	16	84	-19,2
5	-8,7	46,0	54,7	17,9	23	77	-8,5
8	5,6	41,8	36,2	21,0	24	76	-5,3
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	13,0	51,8	38,9	24,5	37	63	-1,9
5	21,5	43,7	22,2	29,0	74	26	2,6
8	25,0	41,8	16,7	30,2	98	2	3,8
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	24,6	49,7	25,0	32,0	95	5	5,7
5	27,7	47,6	19,9	34,2	100	0	7,8
8	30,2	45,9	15,7	36,4	100	0	10,0

Schergewichtswand, DormagenTab. II. 11 Schergewichtswand, Dormagen – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,46	0,53	0,62

Tab. II. 12 Schergewichtswand, Dormagen – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	-16,7	18,1	34,8	4,9	18	82	-5,7
5	-2,0	16,5	18,5	7,8	19	81	-2,8
8	3,2	14,1	11,0	8,8	17	83	-1,8
DIN EN 1990 LNV							
3	2,3	18,1	15,7	8,5	25	75	-2,1
5	5,4	16,6	11,1	9,7	29	71	-0,9
8	7,2	14,5	7,2	10,2	34	66	-0,4
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	3,9	16,7	12,7	9,3	24	76	-1,3
5	5,6	14,5	8,9	9,3	20	80	-1,3
8	7,1	13,9	6,8	10,3	37	63	-0,4
BAW TbW							
3	0,4	1,5	17,4	5,3	7	93	-5,3
5	2,8	15,6	12,7	7,0	6	94	-3,6
8	4,9	13,0	8,0	8,1	6	94	-2,5
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	3,2	14,1	11,0	8,8	17	83	-1,8
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	-16,7	11,6	28,3	3,0	0	100	-7,6
5	-2,0	12,5	14,5	7,1	4	96	-3,5
8	3,2	12,5	9,3	8,5	8	92	-2,1
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	4,1	15,2	11,0	9,0	32	68	-1,6
5	7,1	15,5	8,4	10,2	40	60	-0,4
8	8,1	14,1	6,0	10,6	45	55	0,0
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	7,7	16,6	8,9	11,2	69	31	0,6
5	9,4	16,1	6,7	11,8	90	10	1,2
8	10,5	15,9	5,4	12,7	100	0	2,1

Bodenplatte ACO, Kaiserslautern

Tab. II. 13 Bodenplatte ACO, Kaiserslautern – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,57	0,65	0,71

Tab. II. 14 Bodenplatte ACO, Kaiserslautern – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	-44,5	57,8	102,3	12,9	29	71	-15,1
5	-4,3	56,1	60,4	22,5	33	67	-5,5
8	10,5	52,1	41,6	25,9	43	57	-2,2
DIN EN 1990 LNV							
3	4,0	57,8	53,8	25,3	34	66	-2,8
5	11,9	56,2	44,3	27,3	47	53	-0,8
8	18,0	52,7	34,7	28,1	54	46	0,0
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	22,0	57,3	35,3	40,5	84	16	12,4
5	23,3	55,3	32,0	36,8	74	26	8,7
8	23,3	54,2	30,9	32,8	59	41	4,7
BAW TbW							
3	0,5	11,0	56,4	16,3	24	76	-11,8
5	5,2	53,4	48,3	19,1	15	85	-9,0
8	11,2	49,0	37,8	21,1	18	82	-7,0
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	10,5	50,5	40,0	25,8	43	57	-2,2
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	-44,5	53,9	98,4	12,7	29	71	-15,4
5	-4,3	54,2	58,4	22,5	33	67	-5,6
8	10,5	52,1	41,6	25,9	43	57	-2,2
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	13,8	47,0	33,1	33,6	68	32	5,6
5	22,6	50,7	28,1	35,8	91	9	7,7
8	28,2	50,5	22,3	35,8	100	0	7,7
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	24,9	45,0	20,2	38,4	98	2	10,3
5	30,9	46,8	15,9	40,7	100	0	12,6
8	36,7	48,1	11,4	40,9	100	0	12,8

Stützwand Ohmbach Abschnitt I, Pirmasens

Tab. II. 15 Stützwand Ohmbach Abschnitt I, Pirmasens – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,06	0,00	0,00

Tab. II. 16 Stützwand Ohmbach Abschnitt I, Pirmasens – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	7,1	62,0	54,8	37,1	23	77	-8,3
5	28,2	56,7	28,5	42,1	31	69	-3,3
8	35,7	55,0	19,2	43,8	36	64	-1,6
DIN EN 1990 LNV							
3	21,7	62,0	40,2	40,3	27	73	-5,1
5	32,5	56,8	24,3	43,4	38	62	-2,0
8	37,8	55,2	17,4	44,5	45	55	-0,9
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	38,1	57,4	19,2	48,9	81	19	3,5
5	41,1	55,5	14,4	48,5	77	23	3,1
8	44,3	55,7	11,4	48,5	65	35	3,1
BAW TbW							
3	9,8	25,3	51,2	30,9	9	91	-14,5
5	23,3	53,6	30,3	36,7	9	91	-8,7
8	31,1	52,1	21,0	39,4	9	91	-6,0
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	35,7	51,8	16,0	43,6	36	64	-1,8
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	7,1	54,3	47,1	36,5	20	80	-8,8
5	28,2	55,5	27,4	42,1	31	69	-3,3
8	35,7	55,0	19,2	43,8	36	64	-1,6
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	16,3	47,0	30,7	36,5	3	97	-8,9
5	28,2	50,9	22,7	41,6	27	73	-3,8
8	35,7	51,8	16,0	43,6	36	64	-1,8
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	31,6	45,1	13,5	39,4	0	100	-6,0
5	36,1	46,9	10,8	42,0	3	97	-3,4
8	40,2	49,3	9,1	44,7	33	67	-0,6

Stützwand Ohmbach Abschnitt II, Pirmasens

Tab. II. 17 Stützwand Ohmbach Abschnitt II, Pirmasens – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,01	0,00	0,00

Tab. II. 18 Stützwand Ohmbach Abschnitt II, Pirmasens – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	9,9	48,5	38,6	28,9	22	78	-6,9
5	23,8	45,9	22,1	33,0	22	78	-2,8
8	28,7	43,2	14,5	34,3	25	75	-1,5
DIN EN 1990 LNV							
3	19,5	48,5	29,0	31,4	25	75	-4,4
5	27,0	46,0	19,1	34,0	27	73	-1,8
8	30,5	43,3	12,8	34,9	31	69	-0,9
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	29,1	43,4	14,3	37,0	67	33	1,2
5	30,9	42,4	11,5	36,9	73	27	1,1
8	33,7	41,6	7,9	37,9	93	7	2,1
BAW TbW							
3	10,3	16,4	37,5	23,8	8	92	-12,0
5	20,1	44,0	23,8	28,7	7	93	-7,1
8	25,4	41,4	15,9	30,9	4	96	-4,9
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	28,7	40,0	11,3	34,2	25	75	-1,6
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	9,9	40,3	30,4	28,1	16	84	-7,7
5	23,8	42,4	18,6	32,8	22	78	-3,0
8	28,7	41,6	12,9	34,3	25	75	-1,5
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	13,3	36,8	23,6	27,6	2	98	-8,2
5	23,8	40,2	16,4	32,6	20	80	-3,2
8	28,7	40,0	11,3	34,2	25	75	-1,6
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	25,3	35,3	10,0	30,8	0	100	-5,0
5	28,4	37,0	8,6	33,0	2	98	-2,9
8	31,8	38,1	6,3	35,2	28	72	-0,7

Weserbrücke, Hannoversch MündenTab. II. 19 Weserbrücke, Hannoversch Münden – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,30	0,25	0,24

Tab. II. 20 Weserbrücke, Hannoversch Münden – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	-17,3	93,2	110,5	34,5	20	80	-18,1
5	20,1	68,7	48,6	44,0	18	82	-8,5
8	35,3	67,1	31,8	47,4	16	84	-5,1
DIN EN 1990 LNV							
3	19,4	93,2	73,9	44,5	24	76	-8,1
5	33,6	68,7	35,2	49,1	34	66	-3,5
8	42,2	67,1	24,9	51,1	44	56	-1,4
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	48,9	88,2	39,3	63,9	85	15	11,3
5	51,8	75,8	24,0	61,9	74	26	9,3
8	51,8	75,1	23,3	59,9	61	39	7,3
BAW TbW							
3	6,0	39,3	86,0	30,9	14	86	-21,7
5	20,4	67,2	46,8	38,1	8	92	-14,5
8	31,6	65,4	33,8	42,5	3	97	-10,1
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	35,3	61,4	26,1	47,4	16	84	-5,2
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	-17,3	85,1	102,3	33,9	20	80	-18,6
5	20,1	64,1	44,0	44,0	18	82	-8,6
8	35,3	64,4	29,1	47,4	16	84	-5,1
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	19,7	69,5	49,8	41,1	3	97	-11,5
5	34,2	63,7	29,5	47,3	25	75	-5,2
8	40,1	61,4	21,3	49,4	21	79	-3,1
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	39,1	66,6	27,5	51,0	38	62	-1,6
5	44,9	67,5	22,5	54,5	67	33	2,0
8	50,7	67,7	17,0	57,7	78	22	5,1

Lahntalbrücke, Limburg

Tab. II. 21 Lahntalbrücke, Limburg – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,01	0,00	0,00

Tab. II. 22 Lahntalbrücke, Limburg – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	12,0	58,3	46,2	39,9	18	82	-7,3
5	32,5	56,6	24,1	44,1	22	78	-3,1
8	38,7	52,0	13,4	45,5	24	76	-1,7
DIN EN 1990 LNV							
3	25,8	58,4	32,6	42,3	21	79	-4,9
5	36,8	56,8	20,0	45,3	28	72	-1,9
8	41,1	52,2	11,2	46,4	35	65	-0,8
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	41,4	58,5	17,1	48,9	70	30	1,7
5	42,9	55,7	12,8	48,9	78	22	1,7
8	45,2	54,6	9,4	49,8	96	4	2,7
BAW TbW							
3	13,3	46,0	41,5	33,7	6	94	-13,5
5	28,2	53,7	25,5	39,4	3	97	-7,8
8	35,2	50,7	15,4	42,0	3	97	-5,2
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	38,7	50,9	12,2	45,0	12	88	-2,2
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	12,0	53,0	41,0	38,9	5	95	-8,3
5	32,5	54,5	22,0	43,9	19	81	-3,3
8	38,7	51,7	13,0	45,4	24	76	-1,7
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	18,6	47,9	29,3	37,3	0	100	-9,9
5	32,5	51,0	18,5	43,1	6	94	-4,1
8	38,7	50,9	12,2	45,0	12	88	-2,2
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	33,9	45,9	12,0	39,1	0	100	-8,1
5	37,4	47,0	9,6	41,9	0	100	-5,2
8	41,0	48,5	7,5	44,7	2	98	-2,5

Lautertalbrücke Widerlager, Kaiserslautern

Tab. II. 23 Lautertalbrücke Widerlager, Kaiserslautern – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,53	0,65	0,75

Tab. II. 24 Lautertalbrücke Widerlager, Kaiserslautern – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	-39,6	67,4	107,0	16,4	28	72	-18,1
5	0,4	60,6	60,3	27,0	25	75	-7,5
8	12,6	55,9	43,4	30,3	26	74	-4,1
DIN EN 1990 LNV							
3	7,7	67,5	59,8	28,5	37	63	-6,0
5	16,8	61,0	44,2	32,0	37	63	-2,4
8	22,3	56,3	34,0	33,2	32	68	-1,3
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	25,7	66,2	40,5	46,0	86	14	11,5
5	31,7	63,0	31,3	42,6	79	21	8,1
8	34,4	60,7	26,3	39,1	65	35	4,6
BAW TbW							
3	1,7	22,8	62,5	17,9	15	85	-16,5
5	8,6	56,0	47,4	22,7	17	83	-11,7
8	14,9	51,6	36,7	25,5	11	89	-9,0
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	12,6	55,7	43,1	30,3	26	74	-4,1
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	-39,6	63,1	102,7	16,2	28	72	-18,2
5	0,4	60,6	60,3	27,0	25	75	-7,5
8	12,6	55,9	43,4	30,3	26	74	-4,1
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	13,4	53,5	40,1	35,6	59	41	1,1
5	24,3	57,0	32,7	40,1	71	29	5,6
8	30,5	55,7	25,2	40,6	91	9	6,1
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	22,9	51,3	28,4	42,0	95	5	7,5
5	33,6	52,5	18,9	44,7	100	0	10,2
8	34,4	54,1	19,7	45,4	100	0	10,9

Lautertalbrücke Fahrbahn untere Schicht, Kaiserslautern

Tab. II. 25 Lautertalbrücke Fahrbahn untere Schicht, Kaiserslautern – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

<i>n</i>	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,51	0,60	0,68

Tab. II. 26 Lautertalbrücke Fahrbahn untere Schicht, Kaiserslautern – Kenngrößen der Auswertung

<i>n</i>	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	-14,4	23,5	37,9	7,0	16	84	-7,1
5	0,8	22,5	21,7	11,0	18	82	-3,1
8	6,6	21,0	14,4	12,2	18	82	-1,9
DIN EN 1990 LNV							
3	3,9	23,5	19,6	11,3	23	77	-2,8
5	7,7	22,5	14,8	12,9	26	74	-1,1
8	10,3	21,2	10,9	13,5	29	71	-0,6
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	7,6	21,5	13,9	14,7	58	42	0,6
5	9,2	20,1	10,9	14,7	63	37	0,6
8	11,7	19,6	7,9	15,6	88	12	1,5
BAW TbW							
3	1,0	4,6	21,8	7,0	11	89	-7,1
5	4,1	21,7	17,7	9,3	8	92	-4,8
8	7,3	19,7	12,4	10,6	5	95	-3,5
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	6,6	20,4	13,8	12,2	18	82	-1,9
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	-14,4	17,0	31,5	6,0	7	93	-8,1
5	0,8	19,9	19,1	10,8	17	83	-3,3
8	6,6	19,4	12,8	12,1	18	82	-1,9
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	5,6	19,2	13,6	12,4	32	68	-1,7
5	9,7	20,6	10,9	14,2	44	56	0,1
8	11,1	20,4	9,4	14,4	53	47	0,3
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	10,2	20,0	9,7	15,6	81	19	1,5
5	12,2	20,3	8,1	16,6	95	5	2,5
8	14,2	20,4	6,3	17,5	100	0	3,4

Decke Wohnblock, Ludwigshafen

Tab. II. 27 Decke Wohnblock, Ludwigshafen – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,14	0,10	0,03

Tab. II. 28 Decke Wohnblock, Ludwigshafen – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	-8,2	40,8	49,0	21,4	22	78	-7,2
5	13,5	39,9	26,4	25,6	30	70	-2,9
8	19,9	35,4	15,5	26,9	30	70	-1,7
DIN EN 1990 LNV							
3	10,3	40,8	30,5	24,7	29	71	-3,9
5	18,7	39,9	21,2	27,1	40	60	-1,4
8	22,7	35,6	13,0	27,9	40	60	-0,7
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	21,5	38,7	17,1	30,2	71	29	1,6
5	23,6	36,7	13,1	30,2	78	22	1,6
8	27,2	35,9	8,7	30,9	97	3	2,3
BAW TbW							
3	3,7	21,4	36,2	17,9	7	93	-10,6
5	11,9	38,9	27,0	22,1	8	92	-6,5
8	17,9	33,3	15,4	24,0	9	91	-4,6
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	19,9	34,4	14,5	26,8	30	70	-1,7
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	-8,2	34,0	42,3	20,4	10	90	-8,1
5	13,5	35,2	21,7	25,4	27	73	-3,2
8	19,9	35,0	15,1	26,8	30	70	-1,7
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	10,3	33,4	23,1	22,8	10	90	-5,8
5	18,0	35,2	17,2	26,3	32	68	-2,3
8	20,7	34,4	13,7	27,0	31	69	-1,5
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	20,0	32,0	12,0	26,1	13	87	-2,4
5	22,9	32,8	9,8	27,9	37	63	-0,6
8	26,6	33,5	7,0	29,7	84	16	1,2

Wand Technische Werke Ludwigshafen, Ludwigshafen

Tab. II. 29 Wand Technische Werke Ludwigshafen, Ludwigshafen – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,50	0,54	0,57

Tab. II. 30 Wand Technische Werke Ludwigshafen, Ludwigshafen – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	-16,6	50,2	66,8	15,1	19	81	-13,0
5	6,3	46,3	40,0	22,5	17	83	-5,6
8	15,1	40,1	25,0	25,0	21	79	-3,1
DIN EN 1990 LNV							
3	9,1	50,3	41,2	22,6	27	73	-5,5
5	16,4	46,5	30,1	25,8	27	73	-2,3
8	20,7	40,6	19,9	27,1	32	68	-1,0
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	21,9	47,2	25,3	34,7	93	7	6,6
5	24,7	44,9	20,3	34,0	98	2	5,9
8	28,0	43,5	15,5	33,3	100	0	5,2
BAW TbW							
3	2,7	21,8	44,3	14,1	10	90	-14,0
5	9,3	43,2	33,9	18,8	10	90	-9,3
8	15,2	37,1	22,0	21,5	5	95	-6,6
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	15,1	40,1	25,0	25,0	21	79	-3,1
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	-16,6	44,1	60,7	14,9	19	81	-13,2
5	6,3	45,0	38,6	22,5	17	83	-5,6
8	15,1	40,1	25,0	25,0	21	79	-3,1
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	11,6	39,6	28,0	25,0	37	63	-3,1
5	18,2	42,3	24,1	27,9	37	63	-0,2
8	21,5	40,1	18,6	28,5	48	52	0,4
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	20,2	38,0	17,7	30,4	73	27	2,3
5	23,7	39,0	15,2	32,5	91	9	4,4
8	27,2	39,6	12,4	34,0	100	0	5,9

Bauwerk 1Tab. II. 31 Bauwerk 1 – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,35	0,41	0,41

Tab. II. 32 Bauwerk 1 – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	-27,0	55,0	81,9	20,0	20	80	-13,3
5	7,0	45,9	39,0	27,4	23	77	-5,8
8	17,7	43,1	25,4	29,6	25	75	-3,6
DIN EN 1990 LNV							
3	8,9	55,7	46,8	27,5	27	73	-5,7
5	18,9	46,5	27,5	31,0	37	63	-2,2
8	24,2	44,0	19,7	32,1	43	57	-1,1
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	27,0	58,1	31,1	40,3	86	14	7,1
5	30,2	53,5	23,3	39,4	78	22	6,2
8	32,3	50,2	17,9	38,2	64	36	5,0
BAW TbW							
3	2,2	16,4	47,3	18,1	7	93	-15,1
5	10,3	42,2	31,9	23,5	7	93	-9,7
8	17,3	40,3	22,9	26,1	6	94	-7,1
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	17,7	42,8	25,2	29,6	25	75	-3,6
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	-27,0	55,0	81,9	19,7	19	81	-13,6
5	7,0	45,6	38,6	27,4	23	77	-5,8
8	17,7	43,1	25,4	29,6	25	75	-3,6
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	12,4	47,5	35,2	27,6	26	74	-5,6
5	21,4	45,0	23,6	32,3	39	61	-0,9
8	25,0	42,8	17,9	32,5	42	58	-0,7
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	23,8	45,6	21,7	33,7	50	50	0,5
5	27,9	45,4	17,5	36,2	86	14	3,0
8	32,1	45,0	12,9	38,0	85	15	4,8

Pfeiler Brücke B270, Langweiler

Tab. II. 33 Pfeiler Brücke B270, Langweiler – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,56	0,69	0,85

Tab. II. 34 Pfeiler Brücke B270, Langweiler – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	-56,7	56,9	113,6	10,1	13	87	-25,5
5	-3,9	51,6	55,5	23,1	15	85	-12,6
8	16,4	43,1	26,8	26,9	9	91	-8,8
DIN EN 1990 LNV							
3	9,6	57,7	48,1	28,0	24	76	-7,7
5	21,9	52,9	31,0	33,0	34	66	-2,7
8	29,7	45,2	15,5	34,9	37	63	-0,8
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	37,1	74,7	37,6	49,8	100	0	14,1
5	40,0	68,7	28,7	47,6	100	0	11,9
8	41,8	56,6	14,8	45,0	100	0	9,3
BAW TbW							
3	2,0	6,9	48,4	16,0	4	96	-19,7
5	11,6	45,0	33,5	22,5	3	97	-13,1
8	21,0	38,4	17,4	26,4	1	99	-9,3
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	16,4	43,1	26,8	26,9	9	91	-8,8
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	-56,7	56,9	113,6	10,1	13	87	-25,6
5	-3,9	51,6	55,5	23,1	15	85	-12,6
8	16,4	43,1	26,8	26,9	9	91	-8,8
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	18,0	51,8	33,7	30,2	28	72	-5,5
5	26,8	51,6	24,9	35,7	46	54	0,0
8	32,3	43,1	10,9	36,8	60	40	1,1
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	30,8	49,6	18,8	39,9	81	19	4,2
5	35,3	50,3	15,0	43,1	99	1	7,4
8	41,2	49,2	8,0	45,0	100	0	9,3

Brücke Autobahnkreuz Mainz-Süd - Auflager, MainzTab. II. 35 Brücke Autobahnkreuz Mainz-Süd - Auflager, Mainz – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,22	0,11	0,00

Tab. II. 36 Brücke Autobahnkreuz Mainz-Süd - Auflager, Mainz – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	-2,9	54,1	57,0	26,7	25	75	-9,5
5	20,7	51,2	30,4	32,7	35	65	-3,5
8	29,5	46,6	17,1	34,6	31	69	-1,5
DIN EN 1990 LNV							
3	15,6	54,1	38,5	31,5	35	65	-4,7
5	26,0	51,4	25,4	34,6	36	64	-1,6
8	31,7	47,0	15,3	35,7	39	61	-0,5
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	32,1	50,0	18,0	41,9	94	6	5,8
5	34,8	49,2	14,4	41,2	99	1	5,1
8	38,2	47,9	9,7	40,1	100	0	4,0
BAW TbW							
3	6,4	16,1	46,6	22,3	10	90	-13,8
5	17,3	48,4	31,1	27,5	13	87	-8,7
8	25,5	43,7	18,2	30,1	13	87	-6,0
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	29,5	45,2	15,7	34,6	31	69	-1,5
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3$ N/mm²							
3	-2,9	46,9	49,8	26,3	25	75	-9,8
5	20,7	49,2	28,4	32,7	35	65	-3,5
8	29,5	46,6	17,1	34,6	31	69	-1,5
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	14,0	41,7	27,6	30,4	24	76	-5,7
5	24,1	45,7	21,6	33,7	39	61	-2,4
8	29,5	45,2	15,7	34,6	31	69	-1,5
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	27,3	39,9	12,6	34,9	39	61	-1,2
5	31,3	42,1	10,8	37,1	67	33	0,9
8	35,9	43,1	7,2	38,9	100	0	2,8

Brücke über den Lockwitzbach, Dresden/Niedersedlitz

Tab. II. 37 Brücke über den Lockwitzbach, Dresden/Niedersedlitz – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,39	0,48	0,55

Tab. II. 38 Brücke über den Lockwitzbach, Dresden/Niedersedlitz – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	-12,1	49,5	61,6	17,7	13	87	-14,0
5	13,5	40,8	27,2	25,6	15	85	-6,1
8	23,5	35,8	12,3	28,3	11	89	-3,5
DIN EN 1990 LNV							
3	12,7	50,3	37,5	25,8	20	80	-6,0
5	22,3	42,1	19,8	29,6	31	69	-2,1
8	28,0	37,7	9,8	31,1	35	65	-0,6
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	29,7	53,3	23,6	39,6	97	3	7,9
5	32,1	49,1	17,0	39,0	100	0	7,2
8	35,5	45,6	10,2	38,1	100	0	6,4
BAW TbW							
3	4,4	17,2	38,4	16,1	8	92	-15,6
5	13,7	37,7	24,0	21,9	2	98	-9,9
8	21,3	32,9	11,5	25,0	0	100	-6,7
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	23,5	35,8	12,3	28,3	11	89	-3,5
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	-12,1	49,5	61,6	17,4	13	87	-14,3
5	13,5	40,8	27,2	25,6	15	85	-6,1
8	23,5	35,8	12,3	28,3	11	89	-3,5
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	13,7	44,0	30,4	24,6	17	83	-7,1
5	23,0	40,8	17,8	29,7	28	72	-2,1
8	26,3	35,8	9,5	30,4	24	76	-1,3
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	25,7	42,2	16,5	32,8	56	44	1,0
5	29,3	42,1	12,8	35,3	87	13	3,6
8	33,2	41,3	8,1	37,6	100	0	5,8

Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, SchifferstadtTab. II. 39 Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,16	0,13	0,02

Tab. II. 40 Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	-4,3	39,6	43,9	20,2	21	79	-7,2
5	12,7	36,9	24,2	24,4	25	75	-3,1
8	19,4	35,3	15,8	26,0	34	66	-1,4
DIN EN 1990 LNV							
3	10,6	39,8	29,1	23,6	26	74	-3,9
5	17,7	37,1	19,4	25,8	34	66	-1,6
8	21,8	35,5	13,6	26,9	46	54	-0,6
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	20,6	37,0	16,4	29,1	73	27	1,7
5	23,2	35,6	12,4	29,0	78	22	1,6
8	25,5	34,2	8,7	29,8	96	4	2,3
BAW TbW							
3	3,7	5,0	32,8	16,8	9	91	-10,6
5	11,5	34,8	23,3	20,8	9	91	-6,7
8	17,1	33,4	16,3	23,0	8	92	-4,5
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	19,4	33,7	14,3	26,0	34	66	-1,5
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	-4,3	33,9	38,3	19,4	14	86	-8,0
5	12,7	35,6	22,9	24,2	25	75	-3,2
8	19,4	34,2	14,7	26,0	34	66	-1,5
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	9,8	32,2	22,4	22,1	17	83	-5,4
5	17,3	34,7	17,4	25,4	29	71	-2,1
8	20,1	33,7	13,6	26,1	34	66	-1,3
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	19,3	30,8	11,5	25,6	17	83	-1,8
5	22,7	32,0	9,3	27,2	45	55	-0,2
8	25,2	32,1	6,9	28,8	89	11	1,4

Balkonplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt

Tab. II. 41 Balkonplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

<i>n</i>	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,15	0,06	0,00

Tab. II. 42 Balkonplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt – Kenngrößen der Auswertung

<i>n</i>	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	3,1	47,9	44,8	25,4	13	87	-10,1
5	21,8	43,3	21,5	31,0	13	87	-4,5
8	28,3	38,5	10,2	32,9	8	92	-2,6
DIN EN 1990 LNV							
3	18,9	48,4	29,5	30,1	16	84	-5,4
5	27,5	44,3	16,8	33,5	22	78	-2,0
8	31,6	39,7	8,1	34,8	30	70	-0,7
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	32,4	50,4	18,0	39,8	88	12	4,2
5	33,6	47,8	14,1	39,8	96	4	4,2
8	35,8	45,1	9,3	40,8	100	0	5,2
BAW TbW							
3	8,7	19,5	34,7	21,2	2	98	-14,3
5	19,2	38,3	19,1	26,9	1	99	-8,6
8	26,1	36,2	10,1	29,8	0	100	-5,7
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	28,3	38,4	10,2	32,9	8	92	-2,6
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	3,1	44,6	41,5	24,8	4	96	-10,8
5	21,8	43,3	21,5	31,0	11	89	-4,6
8	28,3	38,4	10,2	32,9	8	92	-2,6
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	15,4	41,9	26,6	26,7	4	96	-8,8
5	24,5	43,3	18,8	31,3	9	91	-4,2
8	28,3	38,4	10,2	32,9	8	92	-2,6
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	27,6	40,2	12,6	32,5	15	85	-3,0
5	30,5	41,1	10,6	35,1	40	60	-0,5
8	33,5	40,9	7,4	37,4	92	8	1,9

Deckenplatte Altersheim Schifferstadt, SchifferstadtTab. II. 43 Deckenplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,11	0,02	0,00

Tab. II. 44 Deckenplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	3,6	45,7	42,1	22,4	23	77	-8,3
5	18,5	43,6	25,1	27,3	17	83	-3,4
8	23,0	41,3	18,3	28,9	21	79	-1,8
DIN EN 1990 LNV							
3	15,7	45,7	30,0	26,2	24	76	-4,6
5	22,7	43,7	21,0	28,9	22	78	-1,9
8	25,6	41,4	15,8	29,9	29	71	-0,8
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	24,9	40,4	15,5	33,6	79	21	2,8
5	26,0	39,8	13,8	33,6	89	11	2,8
8	30,2	39,5	9,3	34,5	100	0	3,7
BAW TbW							
3	7,3	9,1	37,7	18,5	15	85	-12,2
5	16,2	41,7	25,6	23,1	8	92	-7,7
8	20,7	39,4	18,6	25,4	4	96	-5,3
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	23,0	38,2	15,2	28,9	21	79	-1,8
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	3,6	37,3	33,7	21,6	22	78	-9,1
5	18,5	39,8	21,3	27,2	17	83	-3,5
8	23,0	39,5	16,5	28,9	21	79	-1,8
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	12,1	34,6	22,5	22,6	24	76	-8,1
5	19,7	38,1	18,4	27,3	17	83	-3,5
8	23,0	38,2	15,2	28,9	21	79	-1,8
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	22,3	33,2	10,9	28,5	18	82	-2,2
5	24,7	35,1	10,4	30,5	44	56	-0,3
8	29,0	36,4	7,4	32,4	91	9	1,7

Stützwand, Kusel

Tab. II. 45 Stützwand, Kusel – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,00	0,00	0,00

Tab. II. 46 Stützwand, Kusel – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	40,0	60,4	20,4	49,6	17	83	-4,2
5	47,6	59,5	11,8	52,1	17	83	-1,6
8	49,7	58,9	9,1	52,9	21	79	-0,8
DIN EN 1990 LNV							
3	42,7	60,4	17,8	50,3	18	82	-3,4
5	48,5	59,5	11,0	52,4	18	82	-1,3
8	50,3	58,9	8,6	53,1	25	75	-0,6
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	47,8	56,2	8,4	51,7	10	90	-2,0
5	48,2	55,4	7,2	51,7	4	96	-2,0
8	49,7	55,8	6,1	52,7	11	89	-1,1
BAW TbW							
3	32,7	42,6	26,6	44,1	6	94	-9,7
5	42,9	58,4	15,5	48,5	4	96	-5,2
8	46,5	57,4	10,9	50,3	2	98	-3,4
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	46,8	51,9	5,1	49,3	0	100	-4,4
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	40,0	53,1	13,1	47,5	0	100	-6,2
5	47,6	55,4	7,8	51,3	4	96	-2,5
8	49,7	55,8	6,1	52,4	9	91	-1,3
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	40,0	46,2	6,2	42,9	0	100	-10,9
5	44,9	50,8	5,9	47,8	0	100	-6,0
8	46,8	51,9	5,1	49,3	0	100	-4,4
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	38,3	44,2	5,9	41,1	0	100	-12,6
5	41,4	46,8	5,4	44,0	0	100	-9,7
8	44,5	49,4	4,9	47,0	0	100	-6,8

Unterführung A6 Kirchhausen-Biberach (501 A-D), HeilbronnTab. II. 47 Unterführung A6 Kirchhausen-Biberach (501 A-D), Heilbronn – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,24	0,20	0,11

Tab. II. 48 Unterführung A6 Kirchhausen-Biberach (501 A-D), Heilbronn – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	-7,5	40,9	48,4	18,2	17	83	-8,6
5	11,2	39,4	28,2	23,1	23	77	-3,7
8	17,3	34,4	17,1	24,7	24	76	-2,0
DIN EN 1990 LNV							
3	9,9	41,0	31,0	22,3	24	76	-4,4
5	17,0	39,5	22,5	24,9	31	69	-1,8
8	20,6	34,8	14,2	25,9	36	64	-0,8
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	20,0	38,2	18,3	29,4	79	21	2,6
5	22,1	36,4	14,3	29,3	88	12	2,6
8	25,3	35,7	10,5	29,9	99	1	3,2
BAW TbW							
3	3,6	20,0	36,6	15,2	7	93	-11,5
5	10,8	37,9	27,1	19,5	6	94	-7,3
8	15,5	31,7	16,2	21,7	6	94	-5,0
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	17,3	34,4	17,1	24,7	24	76	-2,0
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	-7,5	35,1	42,6	17,6	12	88	-9,2
5	11,2	36,5	25,2	23,0	22	78	-3,7
8	17,3	34,4	17,1	24,7	24	76	-2,0
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	9,8	33,0	23,2	21,2	15	85	-5,5
5	16,9	35,3	18,4	24,5	28	72	-2,2
8	20,0	34,4	14,4	25,2	27	73	-1,5
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	18,9	31,7	12,8	25,7	35	65	-1,0
5	21,9	32,6	10,7	27,5	65	35	0,8
8	25,0	33,4	8,4	29,1	95	5	2,3

Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Heilbronn

Tab. II. 49 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Heilbronn – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,39	0,42	0,42

Tab. II. 50 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Heilbronn – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	-13,4	36,5	50,0	13,2	23	77	-8,7
5	6,3	34,1	27,9	18,2	21	79	-3,7
8	13,0	31,6	18,6	19,9	26	74	-2,0
DIN EN 1990 LNV							
3	6,8	36,6	29,8	18,1	25	75	-3,8
5	13,1	34,2	21,1	20,3	31	69	-1,6
8	16,6	32,1	15,5	21,2	37	63	-0,7
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	15,5	32,9	17,3	24,9	81	19	3,0
5	17,7	31,4	13,7	24,9	89	11	2,9
8	20,8	31,3	10,5	25,3	99	1	3,4
BAW TbW							
3	2,0	10,6	33,7	11,8	14	86	-10,1
5	7,6	32,5	24,9	15,2	8	92	-6,8
8	12,2	29,8	17,6	17,1	7	93	-4,8
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	13,0	31,3	18,3	19,9	26	74	-2,0
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	-13,4	29,8	43,2	12,5	22	78	-9,4
5	6,3	31,4	25,1	18,1	21	79	-3,8
8	13,0	31,3	18,2	19,9	26	74	-2,0
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	9,3	29,1	19,8	18,5	36	64	-3,4
5	14,3	31,3	17,0	21,4	37	63	-0,5
8	16,6	31,3	14,7	21,9	44	56	0,0
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	15,8	27,9	12,1	23,0	72	28	1,0
5	18,5	28,8	10,3	24,6	93	7	2,7
8	21,4	29,8	8,4	25,8	100	0	3,9

Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), HeilbronnTab. II. 51 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), Heilbronn – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,00	0,00	0,00

Tab. II. 52 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), Heilbronn – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	21,9	42,7	20,7	31,9	16	84	-3,6
5	29,8	39,4	9,5	34,0	18	82	-1,5
8	32,2	38,2	6,0	34,7	20	80	-0,8
DIN EN 1990 LNV							
3	25,5	42,7	17,2	32,8	19	81	-2,7
5	31,0	39,5	8,5	34,5	23	77	-1,0
8	32,9	38,3	5,4	35,0	27	73	-0,5
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	29,6	37,3	7,8	32,8	3	97	-2,7
5	30,0	36,3	6,3	32,8	1	99	-2,7
8	31,4	36,3	4,8	33,8	1	99	-1,7
BAW TbW							
3	17,4	22,5	24,6	27,8	4	96	-7,7
5	26,1	37,3	11,2	31,3	2	98	-4,2
8	29,8	36,4	6,6	32,7	1	99	-2,8
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	31,5	35,5	4,0	33,4	0	100	-2,1
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	21,9	34,2	12,3	29,0	0	100	-6,5
5	29,8	36,3	6,5	32,6	1	99	-2,9
8	31,4	36,3	4,8	33,7	1	99	-1,8
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	21,9	32,4	10,5	28,6	0	100	-6,9
5	29,8	35,2	5,4	32,3	0	100	-3,2
8	31,5	35,5	4,0	33,4	0	100	-2,1
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	25,6	31,0	5,4	27,9	0	100	-7,6
5	27,8	32,5	4,7	29,9	0	100	-5,7
8	30,0	33,8	3,9	31,8	0	100	-3,7

Bauwerk 2

Tab. II. 53 Bauwerk 2 – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,66	0,71	0,90

Tab. II. 54 Bauwerk 2 – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	-37,9	43,7	81,6	10,7	27	73	-18,3
5	2,7	40,9	38,2	19,8	11	89	-9,2
8	15,5	39,2	23,7	22,7	9	91	-6,3
DIN EN 1990 LNV							
3	7,9	47,8	39,9	23,9	31	69	-5,1
5	18,2	41,0	22,9	27,1	36	64	-1,9
8	24,2	39,5	15,3	28,4	41	59	-0,7
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	29,4	61,9	32,5	39,6	100	0	10,5
5	31,7	50,3	18,6	38,3	100	0	9,3
8	32,3	47,4	15,1	36,4	100	0	7,4
BAW TbW							
3	1,7	24,9	38,5	15,0	19	81	-14,0
5	9,4	39,3	29,9	19,0	10	90	-10,0
8	17,0	37,2	20,3	21,6	3	97	-7,4
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	15,5	37,1	21,5	22,7	9	91	-6,3
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	-37,9	43,7	81,6	9,9	27	73	-19,1
5	2,7	38,4	35,7	19,7	11	89	-9,3
8	15,5	38,1	22,6	22,7	9	91	-6,3
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	12,3	43,7	31,5	30,0	81	19	1,0
5	22,3	36,9	14,6	28,8	40	60	-0,2
8	27,6	37,1	9,4	30,6	84	16	1,5
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	25,5	48,2	22,8	31,2	94	6	2,2
5	29,1	40,4	11,4	32,9	100	0	3,8
8	32,3	39,9	7,6	35,8	100	0	6,7

Bauwerk 3Tab. II. 55 Bauwerk 3 – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,14	0,03	0,00

Tab. II. 56 Bauwerk 3 – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	2,8	56,6	53,8	29,2	16	84	-10,8
5	23,8	55,4	31,5	35,7	20	80	-4,3
8	32,2	50,2	18,0	37,8	22	78	-2,2
DIN EN 1990 LNV							
3	19,8	56,6	36,9	34,0	20	80	-6,0
5	29,6	55,5	25,8	37,8	26	74	-2,2
8	35,0	50,6	15,7	39,2	32	68	-0,8
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	35,4	55,2	19,8	45,7	93	7	5,7
5	37,7	53,5	15,8	45,4	99	1	5,4
8	41,4	52,3	10,9	45,4	100	0	5,4
BAW TbW							
3	9,0	18,7	46,6	23,8	7	93	-16,2
5	20,7	53,2	32,4	30,2	5	95	-9,8
8	28,6	46,9	18,3	33,4	3	97	-6,6
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	32,2	49,0	16,8	37,8	22	78	-2,2
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	2,8	52,1	49,2	28,9	15	85	-11,1
5	23,8	53,5	29,7	35,7	20	80	-4,3
8	32,2	50,2	18,0	37,8	22	78	-2,2
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	15,5	45,4	29,9	30,8	15	85	-9,2
5	26,3	49,2	23,0	35,9	20	80	-4,1
8	32,2	49,0	16,8	37,8	22	78	-2,2
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	29,7	43,5	13,8	37,1	16	84	-2,9
5	33,5	45,4	11,9	39,7	44	56	-0,3
8	38,0	46,6	8,7	42,3	95	5	2,3

Bauwerk 4

Tab. II. 57 Bauwerk 4 – Anteil der Stichproben mit $v_x > 0,20$

n	[-]	3	5	8
Anteil mit $v_x > 0,20$	[-]	0,00	0,00	0,00

Tab. II. 58 Bauwerk 4 – Kenngrößen der Auswertung

n	MIN	MAX	Streu- breite	Mittelwert	Überschrei- tung	Unterschrei- tung	Mittlere Abweichung
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
DIN EN 1990 NV							
3	20,3	52,7	32,4	35,4	16	84	-5,9
5	32,0	51,6	19,6	38,8	19	81	-2,5
8	35,9	47,5	11,6	40,0	25	75	-1,2
DIN EN 1990 LNV							
3	26,5	52,7	26,2	37,0	18	82	-4,2
5	34,0	51,6	17,6	39,5	23	77	-1,7
8	37,0	47,5	10,6	40,5	31	69	-0,7
DIN EN 13791:2008 Ansatz B							
3	34,8	46,4	11,5	41,2	49	51	-0,1
5	36,0	46,1	10,0	41,2	48	52	-0,1
8	38,3	45,8	7,5	42,2	78	22	0,9
BAW TbW							
3	16,5	31,9	36,0	29,7	8	92	-11,5
5	27,4	51,0	23,6	34,6	4	96	-6,7
8	32,6	45,7	13,1	36,9	3	97	-4,4
E DIN EN 13791:2018-06							
3	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
8	35,9	43,5	7,6	39,7	17	83	-1,5
DIN EN 1990 NV mit $s_{x,min} = 3 \text{ N/mm}^2$							
3	20,3	43,3	23,0	34,2	7	93	-7,1
5	32,0	46,1	14,1	38,6	18	82	-2,7
8	35,9	45,6	9,7	40,0	24	76	-1,2
DIN EN 1990 NV mit $v_{x,min} = 0,08$ und $v_{x,max} = 0,20$							
3	20,3	39,0	18,7	33,1	0	100	-8,2
5	32,0	43,2	11,2	38,1	6	94	-3,2
8	35,9	43,5	7,6	39,7	17	83	-1,5
DIN EN 13791/A20:2017-02 (modifizierter Ansatz B)							
3	29,3	37,4	8,1	33,7	0	100	-7,5
5	32,3	39,8	7,5	36,1	0	100	-5,1
8	35,4	41,4	6,0	38,6	0	100	-2,7

Anhang III Ausreißertests

Anhang III.1 Reale Stichproben mit $n = 5$ zur Bewertung des Einflusses von Extremwerten auf die aus der Stichprobe abgeleiteten Kenngrößen

In den nachfolgenden Tabellen Tab. III. 1 und Tab. III. 2 sind die Einzelwerte der in Kapitel 6.2 zur Erstellung der Sensitivitätskurven sowie in den Kapiteln 6.4 und 6.5 zum Vergleich und zur Bewertung verschiedener Ausreißertests verwendeten realen Stichproben mit $n = 5$ (vgl. Tab. III. 1) sowie $n > 10$ (vgl. Tab. III. 2) dargestellt. Bei den Stichproben handelt es sich jeweils um Ergebnisse von Untersuchungen zur Bestimmung der In-situ-Betondruckfestigkeit durch Druckfestigkeitsprüfungen an aus dem Bauteil entnommenen Bohrkernen.

Tab. III. 1 Einzelwerte der realen Stichproben mit $n = 5$ in [N/mm²]

Prüfwert Nr.	1	2	3	4	5
Stichprobe 1	58,3	62,6	62,7	66,9	67,5
Stichprobe 2	32,4	36,9	38,2	39,7	40,4
Stichprobe 3	33,4	38,5	38,6	45,5	49,3
Stichprobe 4	19,5	23,0	25,9	26,0	26,4
Stichprobe 5	37,5	45,0	59,5	64,5	74,5
Stichprobe 6	16,0	17,1	18,2	18,2	19,7
Stichprobe 7	32,7	34,9	50,4	55,2	58,5
Stichprobe 8	52,5	54,6	54,6	55,2	63,5
Stichprobe 9	39,9	41,4	42,8	44,6	44,9
Stichprobe 10	67,7	72,5	95,4	95,4	96,8

Tab. III. 2 Einzelwerte der realen Stichproben mit $n > 10$ in [N/mm²]

Prüfwert Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
Stichprobe 1	48,4	48,8	53,0	53,4	53,8	54,6	57,1	57,9	58,3	58,4
	58,7	58,8	59,0	60,1	60,2	60,2	60,6	61,8	62,2	62,6
	62,7	63,0	63,2	63,2	64,1	64,2	64,5	64,8	65,2	65,3
	65,4	65,6	65,9	66,1	66,9	67,1	67,5	67,5	67,8	67,9
	68,1	68,1	69,3	69,5	69,5	69,9	70,6	70,6	70,7	71,5
	72,5	73,2	74,0	74,6	74,7	75,1	75,1	75,6	76,7	78,9
	80,5	86,1	87,3							
Stichprobe 2	32,2	32,4	33,4	33,7	33,7	33,9	34,8	36,9	37,4	38,2
	38,5	39,0	39,4	39,7	40,4	43,2	44,1	45,6	48,0	49,7
	50,1	52,4								
Stichprobe 3	24,5	31,0	32,8	33,4	38,5	38,6	38,6	38,7	38,8	41,7
	41,8	42,1	42,6	43,6	45,5	47,2	47,2	48,2	48,5	49,3
	49,5	49,5	49,6	50,2	51,1	51,4	51,9	52,7	56,5	
Stichprobe 4	11,2	14,9	17,2	18,4	18,6	19,5	20,5	20,8	21,0	22,1
	23,0	23,8	24,2	24,8	24,8	24,9	24,9	25,9	25,9	26,0
	26,4	27,5	27,6	27,7	28,1	28,3	29,2	29,3	29,5	29,6
	30,2									
Stichprobe 5	18,4	33,5	35,7	36,4	37,5	37,9	38,8	39,3	40,0	42,3
	44,7	45,0	48,3	51,3	51,8	52,5	52,9	53,0	59,5	64,5
	73,9	74,5								
Stichprobe 6	10,3	10,6	10,9	11,3	12,2	12,6	13,4	13,5	13,9	14,7
	14,8	15,2	15,3	15,4	15,7	16,0	16,9	16,9	17,1	17,2
	17,8	18,2	18,2	18,3	18,5	19,1	19,7	21,5	21,7	27,8
	28,3									
Stichprobe 7	19,3	32,7	34,9	38,9	39,0	42,5	50,4	50,7	52,1	55,0
	55,2	56,9	58,5	58,9	59,1	60,3	62,0	63,1	67,8	
Stichprobe 8	40,5	46,6	47,0	47,9	49,9	51,2	51,2	51,3	51,7	51,9
	52,0	52,5	54,0	54,2	54,6	54,6	54,8	55,2	55,3	56,1
	57,9	58,8	58,8	59,3	59,5	59,6	59,7	60,3	60,8	62,8
	62,9	63,4	63,5	64,1	65,6					
Stichprobe 9	34,3	37,0	37,0	38,2	38,9	39,9	39,9	41,4	42,8	43,7
	44,6	44,7	44,9	45,1	45,2	45,8	46,9	47,6	48,5	49,1
	49,3	49,6	49,6	50,3	51,4					
Stichprobe 10	48,2	59,4	61,7	63,5	66,9	67,7	68,2	69,7	70,5	70,6
	70,8	71,9	72,4	72,5	72,9	82,8	95,4	95,4	96,2	96,8

Anhang III.2 Fiktive Stichproben mit $n = 4$, $n = 7$ und $n = 10$ zur Bewertung ausgewählter Ausreißertests

In den nachfolgenden Tabellen Tab. III. 3 bis Tab. III. 6 sind die Einzelwerte der in den Abschnitten 6.4 und 6.5 zum Vergleich und zur Bewertung verschiedener Ausreißertests verwendeten fiktiven Stichproben dargestellt.

Tab. III. 3 Einzelwerte der fiktiven Stichproben zur Bewertung und zum Vergleich verschiedener Ausreißertests in [N/mm²]

Prüfwert Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$n = 4$ und großer Einzelwert										
Stichprobe 1	15,1	16,4	17,0	30,0						
Stichprobe 2	15,1	16,4	17,0	29,0						
Stichprobe 3	15,1	16,4	17,0	28,0						
Stichprobe 4	15,1	16,4	17,0	27,0						
Stichprobe 5	15,1	16,4	17,0	26,0						
Stichprobe 6	15,1	16,4	17,0	25,0						
Stichprobe 7	15,1	16,4	17,0	24,0						
Stichprobe 8	15,1	16,4	17,0	23,0						
Stichprobe 9	15,1	16,4	17,0	22,0						
Stichprobe 10	15,1	16,4	17,0	21,0						
Stichprobe 11	15,1	16,4	17,0	20,0						
Stichprobe 12	15,1	16,4	17,0	19,0						
Stichprobe 13	15,1	16,4	17,0	18,0						
Stichprobe 14	15,1	16,4	17,0	17,5						
$n = 4$ und kleiner Einzelwert										
Stichprobe 1	1,0	15,1	16,4	17,0						
Stichprobe 2	2,0	15,1	16,4	17,0						
Stichprobe 3	3,0	15,1	16,4	17,0						
Stichprobe 4	4,0	15,1	16,4	17,0						
Stichprobe 5	5,0	15,1	16,4	17,0						
Stichprobe 6	6,0	15,1	16,4	17,0						
Stichprobe 7	7,0	15,1	16,4	17,0						
Stichprobe 8	8,0	15,1	16,4	17,0						
Stichprobe 9	9,0	15,1	16,4	17,0						
Stichprobe 10	10,0	15,1	16,4	17,0						
Stichprobe 11	11,0	15,1	16,4	17,0						
Stichprobe 12	12,0	15,1	16,4	17,0						
Stichprobe 13	13,0	15,1	16,4	17,0						
Stichprobe 14	14,0	15,1	16,4	17,0						

Tab. III. 4 Einzelwerte der fiktiven Stichproben zur Bewertung und zum Vergleich verschiedener Ausreißertests in [N/mm²] (Fortsetzung)

Prüfwert Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n = 7 und großer Einzelwert										
Stichprobe 1	15,1	16,4	16,9	17,0	17,3	17,8	30,0			
Stichprobe 2	15,1	16,4	16,9	17,0	17,3	17,8	29,0			
Stichprobe 3	15,1	16,4	16,9	17,0	17,3	17,8	28,0			
Stichprobe 4	15,1	16,4	16,9	17,0	17,3	17,8	27,0			
Stichprobe 5	15,1	16,4	16,9	17,0	17,3	17,8	26,0			
Stichprobe 6	15,1	16,4	16,9	17,0	17,3	17,8	25,0			
Stichprobe 7	15,1	16,4	16,9	17,0	17,3	17,8	24,0			
Stichprobe 8	15,1	16,4	16,9	17,0	17,3	17,8	23,0			
Stichprobe 9	15,1	16,4	16,9	17,0	17,3	17,8	22,0			
Stichprobe 10	15,1	16,4	16,9	17,0	17,3	17,8	21,0			
Stichprobe 11	15,1	16,4	16,9	17,0	17,3	17,8	20,0			
Stichprobe 12	15,1	16,4	16,9	17,0	17,3	17,8	19,0			
Stichprobe 13	15,1	16,4	16,9	17,0	17,3	17,8	18,5			
Stichprobe 14	15,1	16,4	16,9	17,0	17,3	17,8	18,0			
n = 7 und kleiner Einzelwert										
Stichprobe 1	1,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2			
Stichprobe 2	2,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2			
Stichprobe 3	3,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2			
Stichprobe 4	4,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2			
Stichprobe 5	5,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2			
Stichprobe 6	6,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2			
Stichprobe 7	7,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2			
Stichprobe 8	8,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2			
Stichprobe 9	9,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2			
Stichprobe 10	10,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2			
Stichprobe 11	11,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2			
Stichprobe 12	12,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2			
Stichprobe 13	13,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2			
Stichprobe 14	14,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2			

Tab. III. 5 Einzelwerte der fiktiven Stichproben zur Bewertung und zum Vergleich verschiedener Ausreißertests in [N/mm²] (Fortsetzung)

Prüfwert Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n = 10 und großer Einzelwert										
Stichprobe 1	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	17,8	30,0
Stichprobe 2	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	17,8	29,0
Stichprobe 3	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	17,8	28,0
Stichprobe 4	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	17,8	27,0
Stichprobe 5	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	17,8	26,0
Stichprobe 6	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	17,8	25,0
Stichprobe 7	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	17,8	24,0
Stichprobe 8	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	17,8	23,0
Stichprobe 9	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	17,8	22,0
Stichprobe 10	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	17,8	21,0
Stichprobe 11	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	17,8	20,0
Stichprobe 12	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	17,8	19,0
Stichprobe 13	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	17,8	18,5
Stichprobe 14	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	17,8	18,0
n = 10 und kleiner Einzelwert										
Stichprobe 1	1,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 2	2,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 3	3,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 4	4,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 5	5,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 6	6,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 7	7,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 8	8,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 9	9,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 10	10,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 11	11,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 12	12,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 13	13,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 14	14,0	15,1	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1

Tab. III. 6 Einzelwerte der fiktiven Stichproben zur Bewertung und zum Vergleich verschiedener Ausreißertests in [N/mm²] (Fortsetzung)

Prüfwert Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n = 10 und zwei große Einzelwerte										
Stichprobe 1	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	32,0	33,0
Stichprobe 2	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	28,0	33,0
Stichprobe 3	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	23,0	33,0
Stichprobe 4	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	27,0	28,0
Stichprobe 5	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	23,0	28,0
Stichprobe 6	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	23,0	27,0
Stichprobe 7	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	23,0	26,0
Stichprobe 8	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	23,0	25,0
Stichprobe 9	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	23,0	24,0
Stichprobe 10	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	22,0	23,0
Stichprobe 11	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	21,0	22,0
Stichprobe 12	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	20,0	21,0
Stichprobe 13	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	19,0	20,0
Stichprobe 14	15,1	15,6	16,0	16,4	16,7	17,0	17,2	17,5	18,0	19,0
n = 10 und zwei kleine Einzelwerte										
Stichprobe 1	1,0	2,0	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 2	1,0	5,0	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 3	1,0	10,0	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 4	5,0	6,0	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 5	5,0	10,0	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 6	6,0	10,0	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 7	7,0	10,0	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 8	8,0	10,0	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 9	9,0	10,0	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 10	10,0	11,0	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 11	11,0	12,0	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 12	12,0	13,0	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 13	13,0	14,0	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1
Stichprobe 14	14,0	15,0	16,4	16,9	17,0	17,5	18,2	18,3	18,8	19,1

Anhang III.2 Eingabetexte Matlab zur Bewertung von Stichproben im Hinblick auf Ausreißer

Ausreißertest nach David-Hartley-Pearson

```
function[L_DHP, OutlierI] = DHPTest(L)
OutlierI = [];
N = length(L);
% Kritische Werte nach Hartung, 1993
zKritN = [4,5,6,7,8,9,10,12,15,20,30,40,50];
K = sum(zKritN<=N);
% Abfrage nach dem Index des kritischen Wertes, der
gewaehlt werden muss
% Achtung: Nur bis n = 50.
zKrit =
[2.43,2.75,3.01,3.22,3.4,3.55,3.69,3.91,4.17,4.49,4.89,5
.15,5.35];
z = zKrit(K);
s = std(L);
Q = range(L)/s;
% Aequivalent zu groesste-kleinste Beobachtung
[~,g] = max(abs(L-mean(L)));
% Finden des groessten Abstandes zum Mittelwert
Outlier = L(g);

% Pruefen auf kritische Werte
if Q > z
    ind = true;
    OutlierI = Outlier;
    L(g) = [];
else
    ind = false;
end
% Ausgabe in der Konsole
if ind
    disp(strcat('Der Wert: ', num2str(Outlier), ' wurde
zum Niveau \alpha als Ausreisser klassifiziert.));
end
if ~ind
    disp('Keine Ausreisser gefunden');
end
L_DHP = L;

end
```

Ausreißertest nach Grubbs

```
function[L, OutlierI] = GrubbsTest(L, alpha)
OutlierI = [];
% Mittelwert
Lm = mean(L);
% Standardabweichung
S = std(L);
% Teststatistik und Index
[G,g] = max(abs(L-Lm)./S);
Outlier = L(g);
% Kritischen Wert bestimmen
n = length(L);
t = tinv(1-alpha/(2*n),n-2);
% Inverse der t-Verteilung mit n-2 Freiheitsgraden
z = ((n-1)/sqrt(n)) * sqrt(t^2/(n-2+t^2));
% Teststatistik
% Testen
if G > z
    ind = true;
    OutlierI = Outlier;
    L(g) = [];
else
    ind = false;
end
% Ausgabe in der Konsole
if ind
    disp(strcat('Der Wert: ', num2str(Outlier), ' wurde
zum Niveau \alpha als Ausreißer klassifiziert.));
end
if ~ind
    disp('Keine Ausreisser gefunden');
end

end
```

Ausreißertest nach Dixon

```

function[L_Dixon, OutlierI] = DixonTest(L)
OutlierI = [];
N = length(L);
% Kritische Werte nach Dixon, 1953
zKritN =
[3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,25];
K = sum(zKritN<=N);
% Abfrage nach dem Index des kritischen Wertes, der
gewählt werden muss
% Achtung: Nur bis n = 50.
zKrit =
[0.941,0.765,0.642,0.56,0.507,0.554,0.512,0.477,0.576,0.
546,0.521,0.546,0.525,0.507,0.490,0.475,0.462,0.45,0.406
];
z = zKrit(K);
% Aufsteigende Sortierung
temp = sort(L);
if N < 8
% Fall 1
    ru = (temp(2)-temp(1)) /range(L);
    ro = (temp(N)-temp(N-1)) /range(L);
    r = max(ru,ro);
    ind = r==ru;
elseif N <=10
% Fall 2
    ru = (temp(2)-temp(1))/(temp(N-1)-temp(1));
    ro = (temp(N)-temp(N-1))/(temp(N)-temp(2));
    r = max(ru,ro);
    ind = r==ru;
elseif N <=13
% Fall 3
    ru = (temp(3)-temp(1))/(temp(N-1)-temp(1));
    ro = (temp(N)-temp(N-2))/(temp(N)-temp(2));
    r = max(ru,ro);
    ind = r==ru;
else
% Fall 4
    ru = (temp(3)-temp(1))/(temp(N-2)-temp(1));
    ro = (temp(N)-temp(N-2))/(temp(N)-temp(3));
    r = max(ru,ro);
    ind = r==ru;
end
% Anhand von ind festlegen, ob groesster oder kleinster
Wert potentieller Ausreisser ist
if ind ==1
    G = L==temp(1);
    g = 1:N;

```

```
        g = g(G);
end
if ind==0
    G = L==temp(N);
    g = 1:N;
    g = g(G);
end

Outlier = L(g);

% Pruefen auf kritische Werte
if r > z
    L(g) = [];
    OutlierI = Outlier;
    indOut = true;
else
    indOut = false;
end
% Ausgabe in der Konsole
if indOut
    disp(strcat('Der Wert: ', num2str(Outlier), ' wurde
zum Niveau \alpha als Ausreißer klassifiziert.'));
end
if ~indOut
    disp('Keine Ausreisser gefunden');
end
L_Dixon = L;

end
```

Ausreißertest nach BS 6089

```

function[L_BS, OutlierI] = BSTest(L,alpha)

N = length(L);
% Kritische Werte nach BS 6089
r = (tinv(1-alpha,N-2))*6/100*sqrt(1+1/(N-1));
% kleinsten Einzelwert aus der Stichprobe aussortieren!
Llocal = sort(L);
% Waehle in Vektor Llocal (sortiert aufsteigend) die
Eintraege 2 bis N
Lohne = Llocal(2:N);
% Mittelwert
Lm = mean(Lohne);
% Mindestwert
[Lkleinst,g] = min(L);
% Teststatistik
G = (Lm-Lkleinst)/Lm;
% Kleinster Wert von L; Index g
Outlier = Llocal(1);
% Pruefen auf kritische Werte

if G > r
    ind = true;
    OutlierI = Outlier;
    L(g) = [];
else
    ind = false;
    OutlierI = [];
end
% Ausgabe in der Konsole
if ind
    disp(strcat('Der Wert: ', num2str(Outlier), ' wurde
zum Niveau \alpha als Ausreisser klassifiziert.'));
end
if ~ind
    disp('Keine Ausreisser gefunden');
end
L_BS = L;

end

```

Medianbasierter Ausreißertest nach Kapitel 6.5

```
function[L_Median, OutlierI] = MedianTestWorkingCopy(L,
alpha, beta)
N = length(L);
% Breakdown-Point: 1/2
med = median(L);
% Breakdown-Point: beta
lower = quantile(L, beta);
upper = quantile(L, 1-beta);
s = std(L); % Classical Standard Deviation
srb = sqrt(robustcov(L)); % Robust Variance Estimate-std
needed->sqrt( )!
smad = MADev(L); % Median Absolute Deviation
L_local = L - med;
distance = exp(-1/N) * (upper-lower); % Abhängig von
der Stichprobengroesse
OutlierI = [];
% Liste von Booleschen Variablen
Klassifizierung = (abs(L_local)>= distance);
% Finden der groessten Abweichung
    if sum(Klassifizierung > 0)
        [G,g] = max(abs(L_local./smad));
        disp('MADev')
        disp(num2str(L(g)))
        disp(num2str(G))
        [G1,g1] = max(abs(L_local./srb));
        disp('S-Robust')
        disp(num2str(L(g1)))
        disp(num2str(G1))
        [G2,g2] = max(abs(L_local./s));
        disp('S-Standard')
        disp(num2str(L(g2)))
        disp(num2str(G2))
        Outlier = L(g);
        z = tinv(1-alpha/2,N-3) +
(trimmean(L,200*0.10,'floor')-med);
        disp(z)
        % Verschieben um den erwarteten Unterschied
zwischen Median und getrimmtem Erwartungswert
fuer das Konvergenzresultat
        % *100 due to percent
        % Pruefen auf kritische Werte
        if G > z
            ind = true;
            OutlierI = Outlier;
            L(g) = [];
        else
            ind = false;
        end
    end
end
```

```
% Ausgabe in der Konsole
if ind
    disp(strcat('Der Wert: ', num2str(Outlier),
' wurde zum Niveau:', num2str(alpha), ' als Ausreisser
klassifiziert.));
    if (N<6)
        disp(strcat('Kritische
Stichprobengroesse: ', num2str(N), '<6'))
    end
end
if ~ind
    disp('Keine Ausreisser statistisch
nachweisbar.');
```

```
    if (N<6)
        disp(strcat('Kritische
Stichprobengroesse: ', num2str(N), '<6'))
    end
    disp(strcat('Der Wert: ', num2str(Outlier),
' ist auffaellig.));
end
else
    disp('Keine Ausreisser gefunden');
```

```
    if (N<6)
        disp(strcat('Kritische
Stichprobengroesse: ', num2str(N), '<6'))
    end
end

L_Median = L;
end
```


Anhang IV Vergleich der Druckfestigkeit von Bauwerkbeton und genormten Probekörpern – Prüfergebnisse

Anhang IV.1 Klimadaten Kaiserslautern

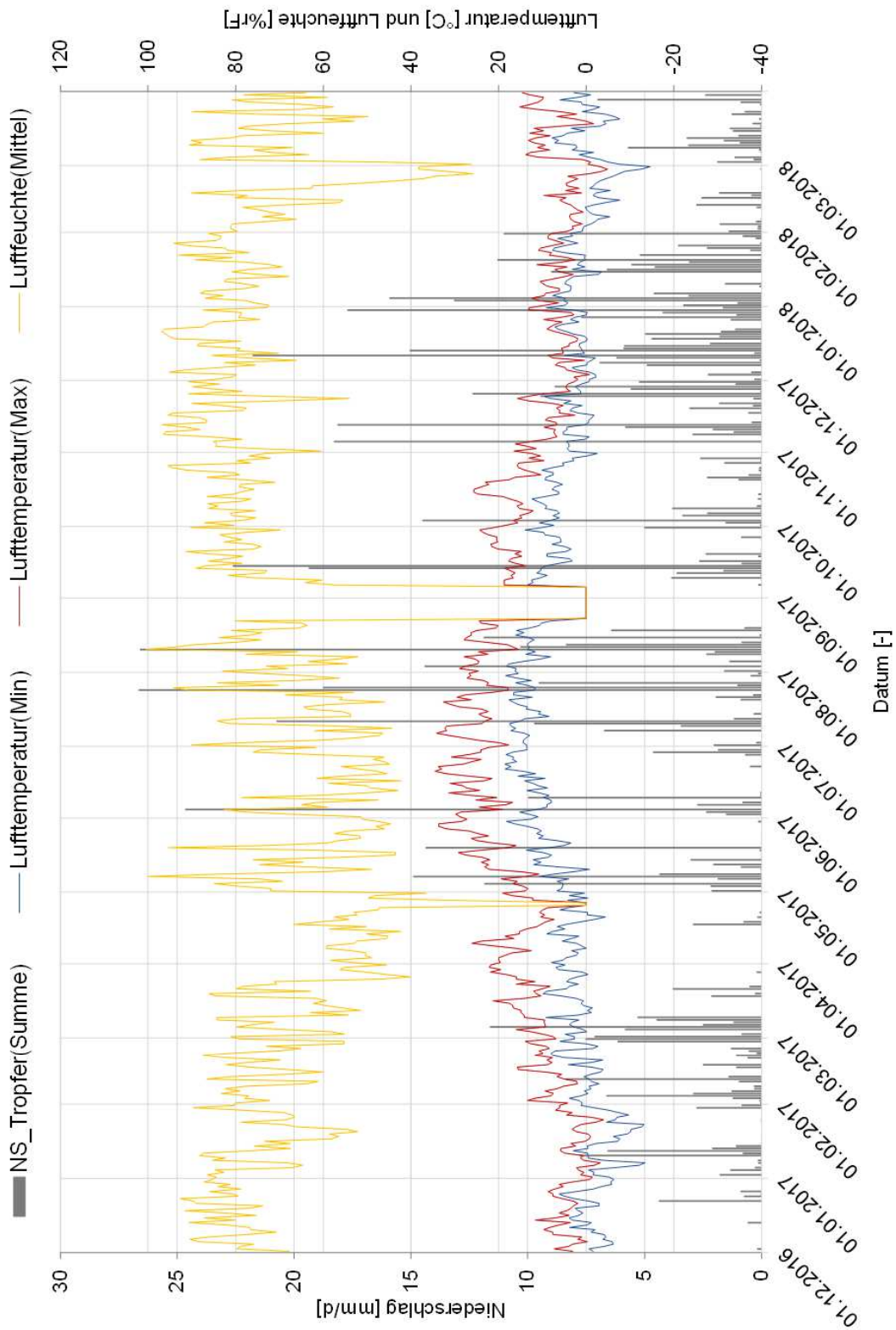


Abb. IV. 1 Klimadaten Kaiserslautern

Anhang IV.2 Betonmischung 1 – Einzelprüfwerte

Tab. IV. 1 Übersicht Druckfestigkeitsuntersuchung Betonmischung 1

Bezeichnung	Tab.	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	5 %-Quantil
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
Normzylinder - Wasserlagerung – Sollwert Prüfaller 28 d	IV.2	30,4	0,61	0,02	29,3
Bohrkerne aus Quader - Wasserlagerung – Sollwert Prüfaller 28 d	IV.3	32,4	0,78	0,02	30,9
Normzylinder – Lagerung im Labor – Sollwert Prüfaller 28 d	IV.4	28,3	1,02	0,04	26,5
Laborwand $d = 35$ cm – Bohrkerne senkrecht zur Betonierichtung – Sollwert Prüfaller 28 d	IV.5	29,7	1,20	0,04	27,7
Laborwand $d = 35$ cm – Bohrkerne parallel zur Betonierichtung – Sollwert Prüfaller 28 d	IV.6	32,3	1,59	0,05	29,4
Laborwand $d = 65$ cm – Bohrkerne senkrecht zur Betonierichtung – Sollwert Prüfaller 28 d	IV.7	27,6	1,68	0,06	24,7
Laborwand $d = 65$ cm – Bohrkerne parallel zur Betonierichtung – Sollwert Prüfaller 28 d	IV.8	29,0	1,90	0,07	25,4
Normzylinder – Lagerung im Freien – Sollwert Prüfaller 365 d	IV.9	38,0	2,61	0,07	33,4
Normzylinder –28 d Wasserlagerung und anschließend im Freien – Sollwert Prüfaller 365 d	IV.10	39,6	2,12	0,05	35,9
im Freien gelagerte Wand $d = 35$ cm – Bohrkerne senkrecht zur Betonierichtung – Sollwert Prüfaller 365 d	IV.11	37,5	2,20	0,06	33,6
im Freien gelagerte Wand $d = 35$ cm – Bohrkerne parallel zur Betonierichtung – Sollwert Prüf-alter 365 d	IV.12	37,4	1,90	0,05	34,1
im Freien gelagerte Wand $d = 65$ cm – Bohrkerne senkrecht zur Betonierichtung – Sollwert Prüfaller 365 d	IV.13	35,6	2,16	0,06	31,9
im Freien gelagerte Wand $d = 65$ cm – Bohrkerne parallel zur Betonierichtung – Sollwert Prüfaller 365 d	IV.14	34,3	2,04	0,06	30,8

Tab. IV. 2 Betonmischung 1 – Normzylinder - Wasserlagerung – Sollwert Prüfalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
Z-14	299,1	149,8	12,176	2310	520700	29,5
Z-9	297,2	150,0	12,110	2310	521400	29,5
Z-6	299,3	150,4	12,429	2340	539400	30,4
Z-5	295,3	150,1	12,089	2310	547900	31,0
Z-7	297,4	150,9	12,382	2330	542200	30,3
Z-3	297,5	150,6	12,285	2320	545600	30,6
R-2	297,0	151,0	12,332	2320	550000	30,7
Z-2	296,8	149,8	12,082	2310	541000	30,7
Z-14	298,3	150,1	12,186	2310	524800	29,7
R-4	299,5	150,8	12,440	2330	549600	30,8
R-15	295,5	151,0	12,211	2310	549600	30,7
R-13	298,8	150,4	12,485	2350	538000	30,3
Z-11	294,8	149,6	12,034	2320	520000	29,6
R-11	300,5	151,1	12,541	2330	561200	31,3
R-5	298,8	150,9	12,429	2330	559700	31,3

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Rütteltisch	Unter Wasser	30

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	0,61	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	30,4	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,02	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	29,3	[N/mm ²]

Tab. IV. 3 Betonmischung 1 – Bohrkern aus Quader - Wasserlagerung – Sollwert Prüfalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
B1-Q1	307,5	144,9	11,647	2300	546900	33,2
B1-Q2	306,6	144,8	11,615	2300	543700	33,0
B1-Q3	308,1	144,8	11,706	2310	541000	32,9
B1-Q4	306,9	144,8	11,608	2300	507000	30,8
B1-Q5	305,3	144,9	11,578	2300	526900	32,0
B1-Q6	308,1	144,7	11,633	2300	539500	32,8
B1-Q7	307,4	144,8	11,699	2310	552900	33,6
B1-Q8	307,2	145,0	11,625	2290	536100	32,5
B1-Q9	308,1	144,8	11,680	2300	520700	31,6
B1-Q10	309,1	144,7	11,714	2300	517400	31,5
B1-Q11	308,5	144,8	11,749	2310	528700	32,1
B1-Q12	307,9	144,8	11,686	2300	541500	32,9
B1-Q13	307,6	144,7	11,637	2300	533500	32,4
B1-Q14	306,1	144,9	11,616	2300	517000	31,4
B1-Q15	308,2	144,8	11,678	2300	541300	32,9

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Rütteltisch	Unter Wasser	36

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	0,78	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	32,4	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,02	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	30,9	[N/mm ²]

Tab. IV. 4 Betonmischung 1 – Normzylinder – Lagerung im Labor – Sollwert Prüffalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
Z-30	295,3	150,1	11,994	2300	536400	30,3
Z-25	295,8	151,1	12,104	2280	514100	28,7
Z-18	297,4	150,4	11,966	2260	485900	27,4
Z-36	295,3	149,8	11,846	2280	492600	27,9
Z-31	292,2	150,0	11,726	2270	515200	29,2
Z-19	295,0	149,8	11,753	2260	472000	26,8
Z-23	298,3	150,1	11,905	2260	482800	27,3
Z-16	292,9	149,6	11,707	2270	477200	27,1
Z-35	295,2	150,1	11,920	2280	520900	29,4
Z-32	296,4	149,9	11,891	2270	506300	28,7
Z-33	294,6	150,1	11,825	2270	509400	28,8
Z-22	295,1	149,7	11,791	2270	488700	27,8
Z-34	293,1	150,0	11,761	2270	518100	29,3
Z-21	295,2	149,5	11,774	2270	487500	27,8
Z-20	296,8	149,8	11,837	2260	484900	27,5

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüffalter [d]
Rütteltisch	Laborklima	30

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	1,02	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	28,3	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,04	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	26,5	[N/mm ²]

Tab. IV. 5 Betonmischung 1 – Laborwand $d = 35 \text{ cm}$ – Bohrkern senkrecht zur
Betonierichtung – Sollwert Prüfalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
A-1	303,1	144,8	11,533	2310	509100	30,9
A-2	301,2	144,6	11,398	2300	479100	29,2
A-3	293,3	144,6	11,332	2350	466900	28,4
A-4	300,6	144,8	11,437	2310	487700	29,6
A-5	302,9	144,7	11,583	2330	537400	32,7
C-1	298,7	144,7	11,353	2310	484400	29,5
C-2	300,2	144,6	11,338	2300	478400	29,1
C-3	301,6	144,8	11,431	2300	490200	29,8
C-4	300,4	144,8	11,483	2320	487500	29,6
C-5	300,1	144,7	11,478	2330	478100	29,1
B-1	300,1	144,7	11,418	2310	479300	29,1
B-2	293,3	144,8	11,309	2340	471500	28,6
B-3	303,4	144,7	11,493	2300	469400	28,5
B-4	303,1	144,9	11,537	2310	499600	30,3
B-5	299,5	144,6	11,380	2310	520300	31,7

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Innenrüttler	Laborklima	30

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	1,20	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	29,7	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,04	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	27,7	[N/mm ²]

Tab. IV. 6 Betonmischung 1 – Laborwand $d = 35$ cm – Bohrkern parallel zur Betonierichtung
– Sollwert Prüfalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
G-1	300,8	149,5	12,212	2310	567900	32,4
G-2	304,9	149,4	12,296	2300	578100	33,0
G-3	300,1	149,6	12,234	2320	576500	32,8
G-4	299,1	149,7	12,308	2340	624600	35,5
F-1	300,7	149,6	12,237	2320	573300	32,6
F-2	295,3	149,5	11,988	2310	562000	32,0
F-3	290,7	149,6	12,202	2390	580800	33,0
F-4	301,8	149,6	12,359	2330	585800	33,3
E-1	299,3	149,5	12,144	2310	540600	30,8
E-2	298,4	149,3	12,028	2300	516800	29,5
E-3	302,4	149,5	12,250	2310	527500	30,1
E-4	298,4	149,6	12,144	2320	565800	32,2

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Innenrüttler	Laborklima	36

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	12	[-]	Standardabweichung s_x	1,59	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	32,3	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,05	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,87	[-]	x_k	29,4	[N/mm ²]

Tab. IV. 7 Betonmischung 1 – Laborwand $d = 65 \text{ cm}$ – Bohrkern senkrecht zur
Betonierichtung – Sollwert Prüfalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
A-1.1	301,1	148,8	12,346	2360	505600	29,1
A-1.2	302,9	149,2	12,190	2300	504100	28,8
A-2.1	304,1	149,0	12,150	2290	474500	27,2
A-2.2	296,2	149,2	11,822	2280	490200	28,0
A-3.1	299,4	149,0	12,016	2300	480500	27,6
A-4.1	303,6	149,0	12,160	2300	487800	28,0
A-4.2	302,5	148,9	12,107	2300	489800	28,1
A-5.1	302,7	148,9	12,204	2320	546700	31,4
A-5.2	298,7	149,1	12,056	2310	535400	30,7
B-3.1	299,4	149,3	12,101	2310	500200	28,6
B-4.1	300,8	149,2	12,126	2310	479700	27,4
B-3.2	300,5	149,1	12,306	2350	465700	26,7
B-4.2	300,7	149,0	12,131	2310	480200	27,5
C-1.1	304,6	149,2	12,327	2310	474800	27,2
C-1.2	300,3	149,1	12,144	2320	400400	22,9
C-3.1	300,5	149,2	12,028	2290	455500	26,1
C-3.2	302,5	149,2	12,098	2290	453100	25,9
C-2.1	303,2	149,3	12,197	2300	466700	26,7
C-2.2	299,8	149,1	12,035	2300	481800	27,6
C-4.1	302,9	149,1	12,101	2290	450200	25,8
C-4.2	300,1	149,1	12,073	2300	473000	27,1
C5.1	299,9	149,2	12,025	2290	495000	28,3
C.5.2	298,1	149,0	12,020	2310	480900	27,6

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Innenrüttler	Laborklima	31

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	23	[-]	Standardabweichung s_x	1,68	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	27,6	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,06	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,75	[-]	x_k	24,7	[N/mm ²]

Tab. IV. 8 Betonmischung 1 – Laborwand $d = 65 \text{ cm}$ – Bohrkern parallel zur Betonierichtung
– Sollwert Prüfalalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
G-1	302,8	149,6	12,268	2300	548500	31,2
G-2	299,0	149,4	12,068	2300	532300	30,4
G-3	298,9	149,4	12,050	2300	510000	29,1
G-4	303,9	149,3	12,282	2310	422600	24,1
D-1	300,8	149,7	12,192	2300	531500	30,2
D-2	300,5	149,4	12,081	2290	495800	28,3
D-3	291,9	149,4	11,962	2340	498400	28,4
D-4	300,1	149,5	12,189	2310	539800	30,8
E-1	299,2	149,6	12,096	2300	516900	29,4
E-2	299,6	149,6	12,062	2290	486000	27,6
E-3	297,2	149,4	11,919	2290	490700	28,0
E-4	298,7	149,5	12,082	2300	526000	30,0

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalalter [d]
Innenrüttler	Laborklima	36

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	12	[-]	Standardabweichung s_x	1,90	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	29,0	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,07	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,87	[-]	x_k	25,4	[N/mm ²]

Tab. IV. 9 Betonmischung 1 – Normzylinder – Lagerung im Freien – Sollwert Prüfalter 365 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
Z-1	291,3	150,6	11,980	2310	703600	39,5
Z-2	299,0	151,4	12,380	2300	670900	37,3
Z-3	297,7	149,9	11,940	2270	771000	43,7
Z-4	294,6	151,7	12,452	2340	677600	37,5
Z-5	296,3	150,2	11,940	2270	682200	38,5
Z-6	296,4	151,4	12,260	2300	540900	30,0
Z-7	293,3	150,1	12,040	2320	721800	40,8
Z-8	293,4	150,0	11,980	2310	701900	39,7
Z-9	290,9	149,6	11,740	2300	649900	37,0
Z-10	299,1	150,1	12,420	2350	671900	38,0
Z-11	298,4	149,6	12,020	2290	679400	38,7
Z-12	291,8	149,7	11,900	2320	652000	37,0
Z-13	292,0	149,7	12,000	2330	695500	39,5
Z-14	296,2	150,0	11,960	2280	632500	35,8
Z-15	299,6	151,7	12,480	2300	703000	38,9
Z-16	297,0	151,4	12,232	2290	675600	37,5
Z-17	297,4	149,7	12,020	2300	683200	38,8
Z-18	299,8	151,0	12,440	2320	673000	37,6
Z-19	292,9	150,7	12,180	2330	652900	36,6

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Rütteltisch	Im Freien	373

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	19	[-]	Standardabweichung s_x	2,61	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	38,0	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,07	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,78	[-]	x_k	33,4	[N/mm ²]

Tab. IV. 10 Betonmischung 1 – Normzylinder –28 d Wasserlagerung und anschließend im Freien – Sollwert Prüfalter 365 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
Z-1	296,7	149,9	12,060	2300	705800	40,0
Z-2	296,9	149,8	12,100	2310	703500	39,9
Z-3	294,9	149,7	12,040	2320	668900	38,0
Z-4	296,7	149,8	12,100	2310	685000	38,9
Z-5	296,4	152,1	12,300	2280	662100	36,4
Z-6	297,6	150,5	12,340	2330	678700	38,2
Z-7	297,7	149,9	12,120	2310	644000	36,5
Z-8	294,6	151,2	12,240	2310	744800	41,5
Z-9	297,1	149,8	12,100	2310	646200	36,7
Z-10	299,7	150,6	12,440	2330	753600	42,3
Z-11	295,6	149,6	12,020	2310	732100	41,7
Z-12	297,3	151,3	12,320	2300	764200	42,5
Z-13	298,9	151,3	12,400	2310	746000	41,5
Z-14	294,8	149,9	12,060	2320	724200	41,0
Z-15	294,2	149,7	12,020	2320	696200	39,6

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Innenrüttler	28 d unter Wasser; anschließend im Freien	373

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	2,12	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	39,6	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,05	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	35,9	[N/mm ²]

Tab. IV. 11 Betonmischung 1 – im Freien gelagerte Wand $d = 35 \text{ cm}$ – Bohrkern senkrecht zur Betonierichtung – Sollwert Prüfalter 365 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
W2 A-1	301,9	153,0	12,883	2320	724600	39,4
W2 A-2	301,3	153,0	12,792	2310	694500	37,8
W2 A-3	304,1	144,7	11,588	2320	610500	37,1
W2 A-4	301,4	144,7	11,549	2330	648100	39,4
W2 A-5	304,5	153,0	13,060	2330	778700	42,4
W2 B-1	304,9	153,0	12,940	2310	663100	36,1
W2 B-2	303,7	144,8	11,480	2300	561900	34,1
W2 B-3	302,5	144,8	11,460	2300	557700	33,9
W2 B-4	301,0	144,8	11,520	2320	615700	37,4
W2 C-1	298,8	144,7	11,400	2320	619300	37,7
W2 C-2	302,5	144,7	11,480	2310	589400	35,8
W2 C-3	302,4	144,7	11,500	2310	605500	36,8
W2 C-4	299,7	144,8	11,480	2330	624400	37,9
W2 C-5	301,3	144,7	11,540	2330	639700	38,9

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Innenrüttler	Im Freien	375

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	14	[-]	Standardabweichung s_x	2,20	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	37,5	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,06	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,83	[-]	x_k	33,6	[N/mm ²]

Tab. IV. 12 Betonmischung 1 – im Freien gelagerte Wand $d = 35 \text{ cm}$ – Bohrkern parallel zur Betonierichtung – Sollwert Prüfalter 365 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
W2 D-1	288,6	144,6	11,720	2470	573200	34,9
W2 D-2	296,2	144,7	12,000	2460	622500	37,9
W2 D-3	291,4	144,6	11,840	2470	637800	38,8
W2 D-4	292,6	149,7	12,020	2330	658800	37,4
W2 D-5	291,0	149,7	11,980	2340	697600	39,6
W2 E-1	294,6	149,5	12,020	2320	659800	37,6
W2 E-2	289,3	149,6	11,780	2320	628000	35,7
W2 E-3	291,6	149,5	11,880	2320	637700	36,3
W2 E-4	293,9	149,7	12,080	2340	604000	34,3
W2 E-5	290,4	149,7	11,940	2340	665500	37,8
W2 G-1	289,0	149,4	11,800	2330	671800	38,3
W2 G-2	294,6	149,4	11,960	2320	630500	36,0
W2 G-3	291,7	149,7	11,900	2320	659900	37,5
W2 G-4	291,9	149,6	12,000	2340	646900	36,8
W2 G-5	292,3	149,6	12,000	2340	736600	41,9

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Innenrüttler	Im Freien	375

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	1,90	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	37,4	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,05	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	34,1	[N/mm ²]

Tab. IV. 13 Betonmischung 1 – im Freien gelagerte Wand $d = 65 \text{ cm}$ – Bohrkern senkrecht zur Betonierichtung – Sollwert Prüfalter 365 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
W1 A-1-1	304,5	149,6	12,420	2320	650200	37,0
W1 A-1-2	306,6	149,6	12,380	2300	644100	36,6
W1 A-2-1	304,1	149,6	12,400	2320	560800	31,9
W1 A-2-2	305,0	149,6	12,320	2300	628600	35,8
W1 A-3-1	304,0	149,7	12,360	2310	653000	37,1
W1 A-3-2	304,5	149,6	12,340	2310	616700	35,1
W1 A-4-1	303,2	149,6	12,280	2300	649400	36,9
W1 A-4-2	301,0	149,6	12,240	2310	628200	35,7
W1 A-5-1	303,1	149,1	12,320	2330	719900	41,2
W1 A-5-2	304,7	149,0	12,360	2330	676500	38,8
W1 B-2-1	303,1	149,6	12,260	2300	631700	35,9
W1 B-2-2	304,3	149,7	12,400	2320	621400	35,3
W1 B-3-1	294,6	149,7	12,920	2490	626500	35,6
W1 B-3-2	301,8	149,7	12,240	2300	555500	31,6
W1 B-4-1	304,0	149,5	12,320	2310	622000	35,4
W1 B-4-2	305,0	149,7	12,380	2310	596900	33,9
W1 B-5-1	304,0	149,1	12,280	2310	646800	37,0
W1 B-5-2	303,7	149,0	12,200	2300	615900	35,3
W1 C-1-1	302,6	149,6	12,280	2310	558700	31,8
W1 C-1-2	301,4	149,7	12,340	2330	651100	37,0
W1 C-2-1	301,4	149,6	12,220	2310	639200	36,4
W1 C-2-2	303,4	149,6	12,340	2310	556100	31,6
W1 C-3-1	300,3	149,6	12,200	2310	621800	35,4
W1 C-4-1	301,4	149,6	12,240	2310	621100	35,3
W1 C-4-2	302,6	149,7	12,260	2300	607600	34,5
W1 C-5-1	303,1	149,5	12,340	2320	647500	36,9
W1 C-5-2	303,1	149,7	12,320	2310	612600	34,8

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Innenrüttler	Im Freien	374

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	27	[-]	Standardabweichung s_x	2,16	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	35,6	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,06	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,74	[-]	x_k	31,9	[N/mm ²]

Tab. IV. 14 Betonmischung 1 – im Freien gelagerte Wand $d = 65 \text{ cm}$ – Bohrkern parallel zur Betonierichtung – Sollwert Prüfalter 365 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
W1 D-1	292,3	149,6	12,100	2360	588000	33,5
W1 D-2	290,7	149,7	11,740	2290	572200	32,5
W1 D-3	288,3	149,6	11,620	2290	571700	32,5
W1 D-4	288,9	149,6	11,720	2310	642400	36,5
W1 D-5	294,7	149,6	12,000	2320	647200	36,8
W1 E-1	292,8	149,6	11,880	2310	589800	33,6
W1 E-2	292,2	149,5	11,820	2300	573700	32,7
W1 E-3	287,2	149,6	11,640	2310	547000	31,1
W1 E-4	293,7	149,6	11,900	2310	616600	35,1
W1 E-5	292,6	149,7	11,920	2310	603600	34,3
W1 G-1	288,6	149,6	11,800	2330	580500	33,0
W1 G-2	295,4	149,4	12,040	2330	633700	36,1
W1 G-3	289,7	149,2	11,720	2310	585800	33,5
W1 G-4	289,8	149,7	11,820	2320	682200	38,8
W1 G-5	292,1	149,7	11,860	2310	609100	34,6

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Innenrüttler	Im Freien	374

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	2,04	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	34,3	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,06	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	30,8	[N/mm ²]

Anhang IV.3 Betonmischung 2 – Einzelprüfwerte

Tab. IV. 15 Übersicht Druckfestigkeitsuntersuchung Betonmischung 2

Bezeichnung	Tab.	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	5 %-Quantil
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
Normzylinder - Wasserlagerung – Sollwert Prüfalter 28 d	IV.16	23,3	1,01	0,04	21,5
Bohrkerne aus Quader - Wasserlagerung – Sollwert Prüfalter 28 d	IV.17	22,5	0,30	0,01	22,0
Normzylinder – Lagerung im Labor – Sollwert Prüfalter 28 d	IV.18	20,7	0,97	0,05	19,0
Laborwand $d = 35$ cm – Bohrkerne senkrecht zur Betonierrichtung – Sollwert Prüfalter 28 d	IV.19	26,1	0,81	0,03	24,6
Laborwand $d = 35$ cm – Bohrkerne parallel zur Betonierrichtung – Sollwert Prüfalter 28 d	IV.20	26,7	1,00	0,04	24,9

Tab. IV. 16 Betonmischung 2 – Normzylinder - Wasserlagerung – Sollwert Prüfalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
Z-1	290,5	149,9	11,842	2310	408700	23,2
Z-2	294,5	150,0	11,984	2300	405300	22,9
Z-3	291,5	150,2	11,877	2300	422500	23,8
Z-4	292,0	149,9	11,882	2310	409600	23,2
Z-5	294,9	150,0	11,940	2290	397600	22,5
Z-6	295,0	149,8	11,884	2290	401300	22,8
Z-7	290,6	150,2	11,790	2290	364000	20,5
Z-8	293,7	149,8	11,926	2300	434000	24,6
Z-9	292,1	150,6	11,883	2280	417900	23,5
Z-10	291,8	149,7	11,896	2320	434700	24,7
Z-11	298,6	150,0	11,794	2240	425200	24,1
Z-12	289,8	150,2	11,749	2290	411200	23,2
Z-13	296,1	149,9	12,073	2310	413100	23,4
Z-14	292,7	150,1	11,931	2300	430300	24,3
Z-15	292,5	149,7	11,880	2310	413600	23,5

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Rütteltisch	Unter Wasser	35

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	1,01	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	23,3	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,04	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	21,5	[N/mm ²]

Tab. IV. 17 Betonmischung 2 – Bohrkern aus Quader - Wasserlagerung – Sollwert Prüfalter
28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
B2-Q1	301,4	144,9	11,414	2300	369000	22,4
B2-Q2	292,7	144,9	11,277	2340	373000	22,6
B2-Q3	299,1	144,8	11,501	2340	364000	22,1
B2-Q4	301,2	145,0	11,323	2280	373300	22,6
B2-Q5	301,3	144,9	11,332	2280	377300	22,9
B2-Q6	303,0	145,0	11,443	2290	375200	22,7
B2-Q7	302,5	145,1	11,357	2270	368200	22,3
B2-Q8	297,0	144,9	11,164	2280	366100	22,2
B2-Q9	297,8	144,9	11,204	2280	371100	22,5
B2-Q10	301,5	144,8	11,309	2280	371500	22,6
B2-Q11	302,1	144,9	11,421	2290	376700	22,8
B2-Q12	300,6	144,8	11,366	2300	370800	22,5
B2-Q13	300,3	145,0	11,332	2290	373200	22,6
B2-Q14	302,5	144,9	11,436	2290	365300	22,2
B2-Q15	302,9	145,0	11,496	2300	382900	23,2

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Rütteltisch	Unter Wasser	36

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	0,30	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	22,5	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,01	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	22,0	[N/mm ²]

Tab. IV. 18 Betonmischung 2 – Normzylinder – Lagerung im Labor – Sollwert Prüfalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
Z-16	292,5	149,8	11,571	2240	335500	19,0
Z-17	290,9	149,7	11,656	2280	345100	19,6
Z-18	293,7	149,6	11,632	2250	355100	20,2
Z-19	292,0	149,9	11,593	2250	355100	20,1
Z-20	294,5	150,0	11,757	2260	359900	20,4
Z-21	293,1	150,2	11,719	2260	356200	20,1
Z-22	291,5	149,7	11,551	2250	353200	20,1
Z-23	293,5	149,7	11,595	2240	355400	20,2
Z-24	293,2	149,9	11,623	2250	358700	20,3
Z-25	292,1	150,0	11,660	2260	399300	22,6
Z-26	297,4	150,0	11,777	2240	381600	21,6
Z-27	294,4	150,0	11,785	2270	384900	21,8
Z-28	295,0	150,3	11,827	2260	382600	21,6
Z-29	291,1	150,2	11,593	2250	382600	21,6
Z-30	292,7	149,9	11,629	2250	376100	21,3

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Rütteltisch	Im Freien	37

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	0,97	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	20,7	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,05	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	19,0	[N/mm ²]

* falsche Lagerung; Soll: im Labor; Ist: im Freien

Tab. IV. 19 Betonmischung 2 – Laborwand $d = 35$ cm – Bohrkern senkrecht zur
Betonierichtung – Sollwert Prüfalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
A-1	302,4	144,9	11,554	2320	456700	27,7
A-2	303,3	144,9	11,528	2300	438100	26,6
A-3	303,4	145,0	11,532	2300	436300	26,4
A-4	304,1	144,8	11,507	2300	446300	27,1
A-5	295,3	145,0	11,504	2360	417400	25,3
C-1	300,7	144,8	11,479	2320	423100	25,7
C-2	302,5	144,8	11,515	2310	406200	24,7
C-3	303,4	144,9	11,527	2300	418500	25,4
C-4	301,3	144,8	11,483	2310	421200	25,6
C-5	305,3	145,0	11,671	2320	432000	26,2
B-1	301,4	144,9	11,485	2310	434500	26,3
B-2	300,4	144,8	11,404	2310	414800	25,2
B-3	302,4	144,6	11,481	2310	423500	25,8
B-4	304,6	145,0	11,657	2320	441900	26,8
B-5	305,0	144,9	11,624	2310	437500	26,5

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Innenrüttler	Laborklima	35

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	0,81	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	26,1	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,03	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	24,6	[N/mm ²]

Tab. IV. 20 Betonmischung 2 – Laborwand $d = 35$ cm – Bohrkern parallel zur Betonierichtung
– Sollwert Prüfalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
E-1	290,8	149,6	11,830	2310	468500	26,7
E-2	283,8	149,7	11,584	2320	450500	25,6
E-3	281,6	149,7	11,449	2310	457300	26,0
E-4	284,6	149,6	11,558	2310	442700	25,2
E-5	291,5	149,7	11,885	2320	474700	27,0
D-1	285,0	149,8	11,550	2300	481000	27,3
D-2	289,8	149,7	11,749	2300	461300	26,2
D-3	289,3	149,7	11,779	2310	436100	24,8
D-4	288,4	149,6	11,811	2330	481200	27,4
D-5	294,8	149,7	12,018	2320	462200	26,3
G-1	284,2	149,7	11,575	2310	473800	26,9
G-2	290,8	149,6	11,862	2320	488400	27,8
G-3	285,0	149,5	11,588	2320	477500	27,2
G-4	291,4	149,6	11,892	2320	500100	28,5
G-5	291,3	149,6	11,892	2320	482000	27,4

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Innenrüttler	Laborklima	37

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	1,00	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	26,7	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,04	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	24,9	[N/mm ²]

Anhang IV.4 Betonmischung 3 – Einzelprüfwerte

Tab. IV. 21 Übersicht Druckfestigkeitsuntersuchung Betonmischung 3

Bezeichnung	Tab.	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	5 %-Quantil
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
Normzylinder - Wasserlagerung – Sollwert Prüfalter 28 d	IV.22	32,4	0,41	0,01	31,6
Bohrkerne aus Quader - Wasserlagerung – Sollwert Prüfalter 28 d	IV.23	30,5	0,82	0,03	29,1
Normzylinder – Lagerung im Labor – Sollwert Prüfalter 28 d	IV.24	33,1	0,72	0,02	31,8
Laborwand $d = 35$ cm – Bohrkerne senkrecht zur Betonierrichtung – Sollwert Prüfalter 28 d	IV.25	33,6	1,93	0,06	30,0
Laborwand $d = 35$ cm – Bohrkerne parallel zur Betonierrichtung – Sollwert Prüfalter 28 d	IV.26	34,5	1,61	0,05	31,6

Tab. IV. 22 Betonmischung 3 – Normzylinder - Wasserlagerung – Sollwert Prüfalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
Z-1	296,2	149,8	11,882	2280	566800	32,2
Z-2	293,1	150,0	11,773	2270	582800	33,0
Z-3	296,1	150,0	11,995	2290	564300	31,9
Z-4	295,8	150,1	11,955	2280	558200	31,5
Z-5	293,8	150,1	11,877	2280	567700	32,1
Z-6	293,0	149,9	11,717	2270	575300	32,6
Z-7	294,1	149,8	11,824	2280	581600	33,0
Z-8	294,9	149,8	11,844	2280	577200	32,8
Z-9	290,1	150,1	11,657	2270	575700	32,5
Z-10	294,9	149,9	11,879	2280	570800	32,3
Z-11	289,6	150,1	11,668	2280	569100	32,2
Z-12	293,7	150,0	11,744	2260	577300	32,7
Z-13	293,4	150,0	11,760	2270	572100	32,4
Z-14	296,9	150,5	11,960	2260	567100	31,9
Z-15	296,1	150,1	11,807	2250	573800	32,4

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Rütteltisch	Unter Wasser	36

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	0,41	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	32,4	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,01	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	31,6	[N/mm ²]

Tab. IV. 23 Betonmischung 3 – Bohrkern aus Quader - Wasserlagerung – Sollwert Prüfalter
28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
B3-Q1	306,1	153,0	12,677	2250	562100	30,6
B3-Q2	307,3	152,9	12,671	2250	546000	29,7
B3-Q3	302,5	153,0	12,762	2290	558900	30,4
B3-Q4	310,1	153,1	12,692	2220	546200	29,7
B3-Q5	306,6	153,1	12,673	2250	585600	31,8
B3-Q6	308,4	153,0	12,731	2250	549600	29,9
B3-Q7	308,3	152,9	12,732	2250	545600	29,7
B3-Q8	304,3	153,0	12,557	2240	576500	31,4
B3-Q9	305,0	152,9	12,701	2270	575200	31,3
B3-Q10	304,3	152,9	12,605	2260	562200	30,6
B3-Q11	305,5	153,0	12,633	2250	591700	32,2
B3-Q12	305,7	152,9	12,676	2260	555000	30,2
B3-Q13	307,3	152,8	12,687	2250	543600	29,6
B3-Q14	304,1	153,0	12,640	2260	550200	29,9
B3-Q15	304,6	153,0	12,662	2260	564500	30,7

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Rütteltisch	Unter Wasser	36

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	0,82	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	30,5	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,03	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	29,1	[N/mm ²]

Tab. IV. 24 Betonmischung 3 – Normzylinder – Lagerung im Labor – Sollwert Prüfalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
Z-16	295,2	149,8	11,617	2230	570700	32,4
Z-17	293,2	149,8	11,486	2220	585600	33,2
Z-18	294,1	149,7	11,521	2230	564300	32,1
Z-19	297,1	149,9	11,640	2220	585800	33,2
Z-20	292,3	149,8	11,475	2230	582400	33,0
Z-21	296,0	149,8	11,613	2230	570600	32,4
Z-22	295,5	150,0	11,583	2220	573400	32,4
Z-23	288,0	149,7	11,376	2240	564700	32,1
Z-24	296,0	150,0	11,631	2220	600100	34,0
Z-25	295,6	149,9	11,560	2220	585400	33,2
Z-26	295,1	149,9	11,621	2230	604300	34,2
Z-27	295,3	149,8	11,576	2220	583100	33,1
Z-28	294,9	149,9	11,615	2230	606200	34,3
Z-29	293,3	149,6	11,460	2220	586300	33,4
Z-30	296,4	149,8	11,613	2220	588100	33,4

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Rütteltisch	Laborklima	35

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	0,72	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	33,1	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,02	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	31,8	[N/mm ²]

Tab. IV. 25 Betonmischung 3 – Laborwand $d = 35$ cm – Bohrkern senkrecht zur
 Betonierichtung – Sollwert Prüfalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
C-1	301,5	152,9	12,856	2320	654800	35,7
C-2	302,9	153,0	12,628	2270	635700	34,6
C-3	299,8	152,8	12,544	2280	513300	28,0
C-4	304,2	152,9	12,794	2290	591300	32,2
C-5	300,0	153,0	12,659	2300	620000	33,7
B-1	292,6	145,0	11,086	2290	539000	32,6
B-2	300,8	144,9	11,259	2270	542400	32,9
B-3	301,1	144,9	11,258	2270	546000	33,1
B-4	302,5	152,9	12,700	2290	631500	34,4
B-5	303,3	152,8	12,772	2300	599100	32,7
A-1	299,2	144,8	11,238	2280	560400	34,0
A-2	302,0	144,9	11,317	2270	558400	33,9
A-3	299,8	145,0	11,258	2270	563500	34,1
A-4	301,8	144,9	11,309	2270	596100	36,1
A-5	303,9	144,9	11,500	2290	585300	35,5

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Innenrüttler	Laborklima	35

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	1,93	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	33,6	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,06	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	30,0	[N/mm ²]

Tab. IV. 26 Betonmischung 3 – Laborwand $d = 35$ cm – Bohrkern parallel zur Betonierichtung
– Sollwert Prüfalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
D-1	290,4	149,7	11,643	2280	590700	33,6
D-2	292,4	149,8	11,708	2270	580900	33,0
D-3	288,3	149,7	11,592	2280	595500	33,8
D-4	287,2	149,7	11,627	2300	608100	34,5
D-5	286,3	149,6	11,573	2300	613000	34,9
E-1	289,0	149,6	11,609	2290	614000	34,9
E-2	296,2	149,8	11,917	2280	594200	33,7
E-3	288,4	149,6	11,643	2300	614300	34,9
E-4	282,7	149,6	11,537	2320	665400	37,9
E-5	283,6	149,6	11,499	2310	628000	35,7
G-1	288,7	149,7	11,467	2260	607700	34,5
G-2	292,5	149,6	11,629	2260	543800	30,9
G-3	288,3	149,7	11,528	2270	589800	33,5
G-4	286,3	149,5	11,600	2310	645600	36,8
G-5	288,8	149,7	11,685	2300	607400	34,5

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Innenrüttler	Laborklima	37

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	1,61	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	34,5	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,05	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	31,6	[N/mm ²]

Anhang IV.5 Betonmischung 4 – Einzelprüfwerte

Tab. IV. 27 Übersicht Druckfestigkeitsuntersuchung Betonmischung 4

Bezeichnung	Tab.	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	5 %-Quantil
[-]	[-]	[N/mm²]	[N/mm²]	[-]	[N/mm²]
Normzylinder - Wasserlagerung – Sollwert Prüfalter 28 d	IV.28	34,2	0,44	0,01	33,4
Bohrkerne aus Quader - Wasserlagerung – Sollwert Prüfalter 28 d	IV.29	35,7	1,35	0,04	33,3
Normzylinder – Lagerung im Labor – Sollwert Prüfalter 28 d	IV.30	30,1	1,13	0,04	28,1
Laborwand $d = 35$ cm – Bohrkerne senkrecht zur Betonierrichtung – Sollwert Prüfalter 28 d	IV.31	34,8	1,84	0,05	31,6
Laborwand $d = 35$ cm – Bohrkerne parallel zur Betonierrichtung – Sollwert Prüfalter 28 d	IV.32	38,9	1,55	0,04	36,0

Tab. IV. 28 Betonmischung 4 – Normzylinder - Wasserlagerung – Sollwert Prüfalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
Z-1	293,4	150,0	12,181	2350	590300	33,4
Z-2	293,0	150,1	12,134	2340	617900	34,9
Z-3	294,2	149,9	12,192	2350	606300	34,4
Z-4	295,5	149,7	12,197	2350	597100	33,9
Z-5	291,8	149,9	12,094	2350	613400	34,8
Z-6	292,0	150,0	12,145	2350	614300	34,8
Z-7	293,0	150,0	12,141	2340	602300	34,1
Z-8	293,7	149,9	12,200	2350	592400	33,6
Z-9	288,1	149,9	11,947	2350	606400	34,4
Z-10	293,8	150,2	12,222	2350	604300	34,1
Z-11	290,8	149,6	11,987	2350	609700	34,7
Z-12	293,3	149,9	12,132	2340	598200	33,9
Z-13	293,1	149,7	12,109	2350	600300	34,1
Z-14	292,8	149,7	12,122	2350	597200	33,9
Z-15	293,0	149,7	12,082	2340	603200	34,3

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Rütteltisch	Unter Wasser	45

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	0,44	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	34,2	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,01	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	33,4	[N/mm ²]

Tab. IV. 29 Betonmischung 4 – Bohrkern aus Quader - Wasserlagerung – Sollwert Prüfalter
28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
B5-Q1	305,1	153,0	13,099	2340	656400	35,7
B5-Q2	301,7	153,0	12,933	2330	658200	35,8
B5-Q3	302,5	153,0	13,041	2340	644900	35,1
B5-Q4	302,7	153,0	13,029	2340	644700	35,1
B5-Q5	305,7	153,1	13,155	2340	639900	34,8
B5-Q6	307,0	152,9	13,234	2350	636800	34,7
B5-Q7	303,3	153,1	13,080	2340	667100	36,2
B5-Q8	305,7	153,0	13,126	2340	671100	36,5
B5-Q9	303,1	153,0	13,035	2340	684100	37,2
B5-Q10	303,5	153,0	13,074	2340	681800	37,1
B5-Q11	302,8	153,0	13,045	2340	653100	35,5
B5-Q12	303,4	153,0	13,043	2340	631000	34,3
B5-Q13	305,6	153,0	13,178	2350	696700	37,9
B5-Q14	303,5	153,0	13,000	2330	686100	37,3
B5-Q15	305,6	152,9	13,149	2340	602700	32,8

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Rütteltisch	Unter Wasser	46

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	1,35	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	35,7	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,04	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	33,3	[N/mm ²]

Tab. IV. 30 Betonmischung 4 – Normzylinder – Lagerung im Labor – Sollwert Prüffalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
Z-16	299,2	149,8	11,750	2230	516100	29,3
Z-17	298,1	149,9	11,672	2220	516500	29,3
Z-18	298,5	149,5	11,722	2240	508800	29,0
Z-19	291,3	149,7	11,670	2280	519700	29,5
Z-20	294,4	150,0	11,698	2250	523100	29,6
Z-21	295,3	149,8	11,856	2280	544500	30,9
Z-22	296,4	149,6	11,810	2270	518000	29,5
Z-23	294,5	149,7	11,666	2250	527200	30,0
Z-24	293,0	149,7	11,692	2270	534000	30,3
Z-25	294,2	150,2	11,852	2270	547300	30,9
Z-26	292,7	150,0	11,844	2290	581500	32,9
Z-27	295,2	150,0	11,894	2280	549200	31,1
Z-28	294,0	149,4	11,846	2300	546100	31,2
Z-29	289,2	150,6	11,690	2270	505600	28,4
Z-30	290,0	150,0	11,720	2290	528400	29,9

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüffalter [d]
Rütteltisch	Laborklima	43

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	1,13	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	30,1	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,04	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	28,1	[N/mm ²]

Tab. IV. 31 Betonmischung 4 – Laborwand $d = 35$ cm – Bohrkern senkrecht zur
Betonierichtung – Sollwert Prüfalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
A-1	300,5	153,0	12,870	2330	604600	32,9
A-2	298,5	153,2	12,803	2330	640400	34,7
A-3	299,5	153,3	12,785	2310	595600	32,3
A-4	297,0	153,1	12,804	2340	716500	38,9
A-5	300,1	153,2	12,882	2330	622500	33,8
B-1	302,8	153,1	12,940	2320	622600	33,8
B-2	299,6	153,2	12,796	2320	637300	34,6
B-3	302,7	153,0	12,978	2330	630000	34,3
B-4	303,1	153,2	12,984	2320	699400	37,9
B-5	300,1	153,1	12,893	2330	633300	34,4
C-1	302,1	153,2	12,953	2330	608600	33,0
C-2	300,3	154,2	12,845	2290	646100	34,6
C-3	300,7	153,2	12,826	2310	637000	34,6
C-4	300,7	153,2	12,893	2330	680900	36,9
C-5	300,7	153,0	12,896	2330	638400	34,7

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Innenrüttler	Laborklima	43

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	1,84	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	34,8	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,05	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	31,6	[N/mm ²]

Tab. IV. 32 Betonmischung 4 – Laborwand $d = 35$ cm – Bohrkern parallel zur Betonierichtung
– Sollwert Prüfalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
D-1	290,4	149,5	11,921	2340	683100	38,9
D-2	285,5	149,7	11,748	2340	689200	39,2
D-3	288,7	149,7	11,578	2280	661600	37,6
D-4	297,9	149,6	12,275	2340	671400	38,2
D-5	297,1	149,5	12,183	2340	602000	34,3
E-1	290,9	149,5	11,920	2330	692400	39,4
E-2	291,1	149,6	11,952	2340	694500	39,5
E-3	289,9	149,6	11,853	2330	692600	39,4
E-4	291,3	149,7	11,986	2340	708000	40,2
E-5	297,4	149,7	12,218	2330	691300	39,3
G-1	291,5	149,5	11,924	2330	675000	38,5
G-2	288,9	149,7	11,838	2330	695300	39,5
G-3 *						
G-4	290,4	149,8	11,922	2330	716500	40,7
G-5	291,8	149,6	11,939	2330	704700	40,1

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Innenrüttler	Laborklima	49

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	14	[-]	Standardabweichung s_x	1,55	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	38,9	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,04	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,83	[-]	x_k	36,0	[N/mm ²]

* Oberfläche nicht sachgerecht vorbereitet → Prüfwert nicht verwertbar

Anhang IV.6 Betonmischung 5 – Einzelprüfwerte

Tab. IV. 33 Übersicht Druckfestigkeitsuntersuchung Betonmischung 5

Bezeichnung	Tab.	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	5 %-Quantil
[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
Normzylinder - Wasserlagerung – Sollwert Prüfalter 28 d	IV.34	29,3	0,94	0,03	27,7
Bohrkerne aus Quader - Wasserlagerung – Sollwert Prüfalter 28 d	IV.35	28,2	1,03	0,04	26,3
Normzylinder – Lagerung im Labor – Sollwert Prüfalter 28 d	IV.36	26,4	0,91	0,03	24,8
Laborwand $d = 35$ cm – Bohrkerne senkrecht zur Betonierrichtung – Sollwert Prüfalter 28 d	IV.37	30,7	1,02	0,03	28,9
Laborwand $d = 35$ cm – Bohrkerne parallel zur Betonierrichtung – Sollwert Prüfalter 28 d	IV.38	28,3	1,94	0,07	24,9

Tab. IV. 34 Betonmischung 5 – Normzylinder - Wasserlagerung – Sollwert Prüfalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
Z-1	294,4	149,9	12,210	2350	515300	29,2
Z-2	293,6	149,7	12,187	2360	495500	28,2
Z-3	291,6	149,8	12,066	2350	513300	29,1
Z-4	290,1	150,0	12,038	2350	506700	28,7
Z-5	295,1	149,9	12,239	2350	503300	28,5
Z-6	294,8	149,9	12,137	2330	513200	29,1
Z-7	296,4	149,8	12,318	2360	487000	27,6
Z-8	295,4	150,0	12,208	2340	516600	29,2
Z-9	296,0	149,7	12,271	2360	503200	28,6
Z-10	293,4	150,2	12,198	2350	529100	29,9
Z-11	295,6	150,1	12,202	2330	547300	30,9
Z-12	295,4	150,2	12,207	2330	541600	30,6
Z-13	294,5	150,1	12,150	2330	529000	29,9
Z-14	295,4	150,1	12,182	2330	537100	30,4
Z-15	294,9	150,2	12,144	2320	533700	30,1

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Rütteltisch	Unter Wasser	36

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	0,94	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	29,3	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,03	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	27,7	[N/mm ²]

Tab. IV. 35 Betonmischung 5 – Bohrkern aus Quader - Wasserlagerung – Sollwert Prüfalter
28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
B4-Q1	310,0	153,1	13,239	2320	544700	29,6
B4-Q2	307,6	153,1	13,259	2340	543600	29,5
B4-Q3	308,7	153,1	13,298	2340	534400	29,0
B4-Q4	306,4	153,1	13,130	2330	524500	28,5
B4-Q5	310,6	153,2	13,307	2320	498700	27,1
B4-Q6	308,9	152,9	13,168	2320	526500	28,7
B4-Q7	306,7	153,1	13,079	2320	502000	27,3
B4-Q8	305,8	153,2	13,186	2340	499700	27,1
B4-Q9	306,0	153,1	13,070	2320	543600	29,5
B4-Q10	304,9	153,1	13,105	2330	496600	27,0
B4-Q11	306,6	153,0	13,132	2330	489500	26,6
B4-Q12	307,6	152,9	13,171	2330	526200	28,7
B4-Q13	310,9	153,2	13,284	2320	510300	27,7
B4-Q14	305,0	153,3	13,118	2330	530400	28,7
B4-Q15	305,5	152,9	13,155	2350	508600	27,7

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Rütteltisch	Unter Wasser	34

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	1,03	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	28,2	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,04	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	26,3	[N/mm ²]

Tab. IV. 36 Betonmischung 5 – Normzylinder – Lagerung im Labor – Sollwert Prüfalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
Z-16	291,1	150,2	11,805	2290	494300	27,9
Z-17	294,6	149,7	11,953	2310	472100	26,8
Z-18	290,0	149,8	11,892	2330	485200	27,5
Z-19	287,8	149,7	11,703	2310	464000	26,4
Z-20	295,5	149,7	12,042	2320	461700	26,2
Z-21	291,5	149,9	11,837	2300	470200	26,6
Z-22	291,1	149,7	11,942	2330	463900	26,4
Z-23	289,0	149,7	11,895	2340	469100	26,7
Z-24	293,0	150,1	11,926	2300	436000	24,6
Z-25	280,5	149,7	11,501	2330	477900	27,2
Z-26	286,7	149,7	11,656	2310	439300	25,0
Z-27	288,1	149,7	11,755	2320	468100	26,6
Z-28	296,0	149,8	12,094	2320	465300	26,4
Z-29	290,9	149,9	11,881	2310	444800	25,2
Z-30	295,1	149,8	12,025	2310	479900	27,2

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Rütteltisch	Laborklima	35

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	0,91	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	26,4	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,03	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	24,8	[N/mm ²]

Tab. IV. 37 Betonmischung 5 – Laborwand $d = 35 \text{ cm}$ – Bohrkern senkrecht zur
 Betonierrichtung – Sollwert Prüfalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
A-1	300,0	153,1	11,769	2130	539300	29,3
A-2	301,2	153,1	12,930	2330	582700	31,7
A-3	305,4	153,1	13,124	2330	545600	29,6
A-4	303,2	153,1	13,106	2350	553300	30,1
A-5	301,7	153,1	13,084	2360	551700	30,0
B-1	299,2	153,1	12,740	2310	555300	30,2
B-2	301,4	153,1	12,969	2340	593000	32,2
B-3	301,7	153,1	12,934	2330	575700	31,3
B-4	298,8	153,1	12,962	2360	561200	30,5
B-5	303,9	153,0	13,130	2350	530900	28,9
C-1	304,7	153,1	12,950	2310	580700	31,5
C-2	300,6	153,3	12,875	2320	580900	31,5
C-3	302,5	153,4	13,012	2330	570300	30,9
C-4	298,2	153,2	12,976	2360	581200	31,5
C-5	301,7	153,3	13,091	2350	586900	31,8

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Innenrüttler	Laborklima	47

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung s_x	1,02	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	30,7	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,03	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,82	[-]	x_k	28,9	[N/mm ²]

Tab. IV. 38 Betonmischung 5 – Laborwand $d = 35 \text{ cm}$ – Bohrkern parallel zur Betonierichtung
– Sollwert Prüfalter 28 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	Bruchlast	Druckfestigkeit
	h_m	d_m	m	D	F	f_{ci}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N]	[N/mm ²]
G-1	291,4	149,6	11,882	2320	577100	32,8
G-2	287,7	149,7	11,783	2330	472700	26,9
G-3	293,5	149,7	11,992	2320	486500	27,6
G-4	291,3	149,6	12,066	2360	515300	29,3
G-5	299,4	149,8	12,172	2310	513200	29,1
D-1	287,2	149,7	11,716	2320	509100	28,9
D-2	288,5	149,6	11,805	2330	454200	25,8
D-3	292,0	149,7	11,976	2330	514800	29,2
D-4	289,4	149,6	12,022	2360	485400	27,6
D-5 *						
E-1 *						
E-2	289,7	149,6	11,841	2330	518000	29,5
E-3	286,2	149,8	11,774	2330	485000	27,5
E-4	292,1	150,0	12,113	2350	454400	25,7
E-5 *						

Verdichtung	Lagerung	Ist-Prüfalter [d]
Innenrüttler	Laborklima	47

Druckfestigkeit: Parameter der Stichprobe					
Stichprobenumfang n	12	[-]	Standardabweichung s_x	1,94	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x}	28,3	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x	0,07	[-]
Druckfestigkeit: 5 %-Quantil – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12					
k_n	1,87	[-]	x_k	24,9	[N/mm ²]

* Oberfläche nicht sachgerecht vorbereitet → Prüfwert nicht verwertbar

Anhang IV.7 E-Modul-Prüfung – Betonmischung 1 im Alter von 365 Tagen

Tab. IV. 39 Betonmischung 1 – E-Modul-Prüfung – Sollwert Prüfalter 365 d - Einzelprüfwerte

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	σ_o	σ_u	ϵ_o	ϵ_u	E-Modul	
	h_m	d_m	m	D					$E_{C,i}$	E_{Cm}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N/mm ²]		[‰]		[N/mm ²]	
Zylinder / 365 d im Freien										
Z15	299,6	151,7	12,484	2310	12,7	0,8	-0,05	-	27000	30400
Z16	297,0	151,4	12,313	2300	12,7	0,8	-0,03	-	39600	
Z17	297,4	149,7	12,010	2290	12,7	0,8	-0,04	-	31300	
Z18	299,8	151,0	12,433	2320	12,7	0,8	-0,05	-	27000	
Z19	292,9	150,7	12,189	2330	12,7	0,8	-0,05	-	27100	
Zylinder / 28 d Wasser + 337 d im Freien										
Z11	295,6	149,6	12,022	2310	12,9	0,9	-0,04		30200	31160
Z12	297,3	151,3	12,311	2300	12,9	0,9	-0,04		29100	
Z13	294,8	149,9	12,396	2380	13,1	0,9	-0,03		36900	
Z14	294,8	149,9	12,054	2320	12,9	0,8	-0,04		30500	
Z15	294,2	149,7	12,027	2320	12,9	0,8	-0,04		29100	
Wand dünn / 365 d im Freien / senkrecht										
B2	303,7	144,8	11,486	2300	12,2	1,0	-0,04		30300	29780
B3	302,5	144,8	11,468	2300	12,2	1,0	-0,04		32100	
C2	302,5	144,7	11,476	2310	12,8	1,0	-0,04		28500	
C3	302,4	144,7	11,493	2310	12,8	1,0	-0,04		28900	
C4	299,7	144,8	11,477	2330	12,8	0,9	-0,04		29100	
Wand dünn / 365 d im Freien / parallel										
D2	296,2	144,7	12,005	2460	12,4	0,9	-0,03		36800	31080
D3	291,4	144,6	11,838	2470	12,4	0,9	-0,04		29900	
D4	292,6	149,7	12,017	2330	12,4	0,9	-0,04		30400	
E2	289,3	149,6	11,781	2320	12,2	0,9	-0,04		30000	
E3	291,6	149,5	11,882	2320	12,2	0,9	-0,04		28300	

Tab. IV. 40 Fortsetzung Tab. IV.39

Bezeichnung	Höhe	Durchmesser	Masse	Rohdichte	σ_o	σ_u	ϵ_o	ϵ_u	E-Modul	
	h_m	d_m	m	D					$E_{C,i}$	E_{Cm}
	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[N/mm ²]		[‰]		[N/mm ²]	
Wand dick / 365 d im Freien / senkrecht										
B3-1	294,6	149,7	11,927	2300	11,8	0,9	-0,04		28500	28166
B3-2	301,8	149,7	12,246	2310	11,8	0,9	-0,04		29800	
B4-1	304,0	149,5	12,327	2310	11,8	0,9	-0,04		27200	
C2-2	303,4	149,6	12,335	2310	11,7	0,9	-0,04		27100	
C3-1	300,3	149,6	12,200	2310	11,7	0,9	-0,04		30000	
C3-2	305,4	149,6	13,372	2490	11,7	0,9	-0,04		26400	
Wand dick / 365 d im Freien / parallel										
D2	290,7	149,7	11,743	2300	11,9	0,9	-0,04		31900	27850
D3	288,3	149,6	11,628	2290	11,9	0,9	-0,05		24900	
E2	292,2	149,5	11,829	2310	11,4	0,9	-0,04		27700	
E3	287,2	149,6	11,631	2300	11,4	0,9	-0,04		26900	

Anhang IV.8 Untersuchungen von Petersons

Tab. IV. 41 Korrelation zwischen In-situ-Betondruckfestigkeit und Druckfestigkeit von Laborprobekörpern bzw. Zielfestigkeit – Datensammlung nach Petersons 1964

Nr	Würfeldruckfestigkeit		In-situ-Betondruckfestigkeit			Umrechnungs-faktor ²	$\frac{\sigma_{structure,cube,28}}{\sigma_{cube}}$	$\frac{\sigma_{structure,cube,28}}{K}$
	Zielwert K^1	Ist-Wert σ_{cube}^1	Mittelwert $\sigma_{structure}$	Standard-abweichung	Prüf-alter			
	[kp/cm ²]	[kp/cm ²]	[kp/cm ²]	[-]	[Tage]			
Platten								
1	250	137	186		62	1,12	1,21	0,67
2	250		217		52	1,1		0,79
3	250		202		52	1,11		0,73
4	250	201	387		104	1,16	1,64	1,33
5	250	182	324		126	1,18	1,51	1,1
6	250		270	28	129	1,12		0,97
7	250		327	8	100	1,11		1,18
8	250		267	19	67	1,11		0,96
9	250	216	329		105	1,12	1,36	1,18
10	250		364		1100	1,17		1,24
11	250		394		165	1,37		1,15
12	250		233		87	1,16		0,8
13	250		274		165	1,18		0,93
14	250	175	183	10	49	1,09	0,96	0,67
15	250		277		62	1,08		1,02
16	250		324	11	5475	1,05		1,24
17	250		301	36	5475	1,21		1
18	250		207	11	55	1,11		0,75
19	250		277	3	78	1,13		0,98
20	250		217	28	85	1,13		0,77
21	250		356	9	70	1,09		1,29
22	250		184		83	1,15		0,64
23	250		173	13	67	1,12		0,62
24	250		260	22	9	1,14		0,91
25	250	168	178		180	1,16	0,91	0,62
26	250	78	100		33	1,06	1,21	

Tab. IV. 42 Fortsetzung Tab. IV.41

Nr	Würfeldruckfestigkeit		In-situ-Betondruckfestigkeit			Umrechnungs- faktor ²	$\frac{\sigma_{structure,cube,28}}{\sigma_{cube}}$	$\frac{\sigma_{structure,cube,28}}{K}$
	Zielwert K^1	Ist-Wert σ_{cube}^1	Mittelwert $\sigma_{structure}$	Standard- abweichung	Prüf- alter			
	[kp/cm ²]	[kp/cm ²]	[kp/cm ²]	[-]	[Tage]			
Platten								
27	250	232	224		93	1,12	0,86	0,8
28	250		212	80	7300	1,21		0,7
29	280		203	14	4015	1,21		0,6
30	300	210	361	11	147	1,13	1,52	1,06
31	300	284	249	56	43	1,05	0,84	0,79
32	300	318	331		23	0,96	1,08	1,15
33	350		497		135	1,13		1,25
34	350	389	440	11	195	1,19	0,95	1,06
35	350	266	176	9	67	1,08	0,63	
Wände								
36	200		266		100	1,26		1,06
37	250		287		59	1,07		1,07
38	250		287		60	1,07		1,07
39	250	180	266		76	1,09	1,35	0,98
40	250		256	32	67	1,13		0,91
41	250		183	17	26	1,04		0,7
42	250		191	11	32	1,07		0,72
43	250		355		150	1,19		1,19
44	250		195		26	1,04		0,75
45	250	215	292	21	86	1,14	1,19	1,02
46	250		495		315	1,21		1,63
47	250	238	238		28	1,05	0,95	0,91
48	250		246		33	1,06		0,93
49	300	428	254		365	0,93	0,65	0,91
50	300		350	12	109	1,14		1,02
51	300		215		26	0,84		0,85
52	300	426	296		85	1,12	0,65	0,88

Tab. IV. 43 Fortsetzung Tab. IV.41

Nr	Würfeldruckfestigkeit		In-situ-Betondruckfestigkeit			Umrechnungs- faktor ²	$\frac{\sigma_{structure,cube,28}}{\sigma_{cube}}$	$\frac{\sigma_{structure,cube,28}}{K}$
	Zielwert K^1	Ist-Wert σ_{cube}^1	Mittelwert $\sigma_{structure}$	Standard- abweichung	Prüf- alter			
	[kp/cm ²]	[kp/cm ²]	[kp/cm ²]	[-]	[Tage]			
Wände								
53	300	299	272		90	1,09	0,84	0,83
54	300		438	29	75	1,13		1,29
55	300		514	80	75	1,13		1,51
56	300	285	450		240	1,28	1,23	1,17
57	300	278	382		176	1,13	1,21	1,13
58	350	253	311	36	103	0,94	1,31	0,95
59	350		537	91	365	1,06		1,44
60	350		468	16	123	1,17		1,14
61	-	180	148	17	34	1,03	0,8	
Stützen								
62	250		249	31	83	1,16		0,86
63	275	373	268		3650	0,98	0,74	1
64	275	413	332		3650	0,98	0,84	1,25
65	350	394	363		30	1,06	0,87	0,98
66	400		526		365	1,15		1,15
67	400	450	415		1278	0,98	0,94	1,06
68	400		427		150	1,19		0,9
69	400		444		114	1,14		0,98
70	400		442		99	1,14		0,97
71	400	410	558	8	30	1,03	1,32	1,35
72	500		480		53	1,07		0,9
73	-	503	445		100	0,93	0,95	
74	-	283	203	44	657	0,93	0,76	
75	-	329	243	27	657	0,93	0,83	
76	-	630	543	70	30	0,99	0,86	
Fundamente								
77	150		222		110	1,11		1,33
78	200		151		15	0,91		0,83

Tab. IV. 44 Fortsetzung Tab. IV.41

Nr	Würfeldruckfestigkeit		In-situ-Betondruckfestigkeit			Umrechnungs- faktor ²	$\frac{\sigma_{structure,cube,28}}{\sigma_{cube}}$	$\frac{\sigma_{structure,cube,28}}{K}$
	Zielwert K^1	Ist-Wert σ_{cube}^1	Mittelwert $\sigma_{structure}$	Standard- abweichung	Prüf- alter			
	[kp/cm ²]	[kp/cm ²]	[kp/cm ²]	[-]	[Tage]			
Fundamente								
79	200		225		20	0,75		1,5
80	250	264	206		55	1,11	0,7	0,74
81	250		273		99	1,15		0,95
82	250		284		402	1,15		0,99
83	250		228		402	1,15		0,79
84	300	430	351		876	1,02	0,8	1,15
85	300	429	359		912,5	0,98	0,86	1,22
86	300		406		767	1,08		1,26
87	300	386	328	31	270	0,96	0,92	1,14
88	300	197	195	19	90	0,94	0,93	0,61
89	300		390	11	548	1,15		1,13
90	300	251	294		96	0,87	1,34	1,12
91	300		369	84	8030	1,04		1,18
92	350	242	263	14	32	0,92	1,18	0,82
93	-	503	445	35	101	0,91	0,97	
94	-	405	256		105	0,91	0,7	
95	-	396	276		1095	0,98	0,7	
96	-	317	297	29	160	1,02	0,92	
Balken								
97	320		391		5110	1,21		1,01
98	-	531	542		150	1,12	0,91	
99	-	292	248		12045	0,93	0,91	
100	-	459	423	6	10220	0,97	0,95	
Fertigteile								
101	250		160		18	0,57		0,74
102	350		228		7	1,05		0,62
103	550	657	454	44		0,99	0,69	0,83
104	-	872	826	19	28	1,05	0,9	

Tab. IV. 45 Fortsetzung Tab. IV.41

Nr	Würfeldruckfestigkeit		In-situ-Betondruckfestigkeit			Umrechnungs- faktor ²	$\frac{\sigma_{structure, cube, 28}}{\sigma_{cube}}$	$\frac{\sigma_{structure, cube, 28}}{K}$
	Zielwert K^1	Ist-Wert σ_{cube}^1	Mittelwert $\sigma_{structure}$	Standard- abweichung	Prüf- alter			
	[kp/cm ²]	[kp/cm ²]	[kp/cm ²]	[-]	[Tage]			
Dammbauwerke								
105	-	588	518	59	475	0,94	0,94	
106	-	175	350		61	1,4	1,43	
107	-	259	306	41	438	1,02	1,16	
108	-	301	395		438	1,2	1,1	
109	-	465	425	69	80	0,96	0,95	
110	-	300	381		90	0,95	1,34	
Betonböden								
111	250		247	20	60	1,24		0,8
112	300		250	40	135	1,28		0,65

¹ Mittelwert

² Umrechnungsfaktor zur Anpassung der an aus dem Bauwerk/-teil entnommenen Proben bestimmten Druckfestigkeit $\sigma_{structure}$ auf die Druckfestigkeit des Laborwürfels mit einer Kantenlänge von 200 mm im Alter von 28 d $\sigma_{structure, cube, 28}$

Anhang IV.9 Untersuchungen von Bloem

Tab. IV. 46 Korrelation zwischen In-situ-Betondruckfestigkeit und Druckfestigkeit von Laborprobekörpern – Untersuchungen nach Bloem 1968

		Druckfestigkeit in psi												
		Normzylinder 15 x 30 cm					Bohrkerne 10 x 15 cm				Push-out-Zylinder 10 x 15 cm			
Alter	Lagerung	Platte: gute Nachbehandlung		Platte: schlechte Nachbehandlung		Platte: gute Nachbehandlung		Platte: schlechte Nachbehandlung		Platte: gute Nachbehandlung		Platte: schlechte Nachbehandlung		
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	trocken	nass	trocken	nass	trocken	nass	trocken	nass
[Tage]		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	trocken	nass	trocken	nass	trocken	nass	trocken	nass
Mischung 1: Schnell erhärtender Zement, Beispiel I														
1		2390	2380	-	2060	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3		3810	3510	-	3170	3790	3160	3250	2510	2850	3360	3710	2720	3280
7		4670	3990	4170	3880	3810	3710	3510	3010	2750	3820	3770	3400	3410
28		5490	4900	4510	4620	4230	4320	3640	3630	3050	4690	4160	3880	3760
91		6170	5490	4840	5050	4290	4470	4130	3620	2840	4800	4440	3860	3590
364		6165	5650	4185	5055	-	4725	3500	3730	2540	5090	4270	4500	3590
Mischung 2: Langsam erhärtender Zement														
1		890	930	1550	850	1600	-	-	-	-	970	1390	790	1340
3		1610	1610	1970	1470	1890	1470	1700	1300	1600	1570	1750	1300	1610
7		2310	2290	2380	2140	2260	2100	2290	1720	1830	2210	2310	1800	1930
28		3730	3460	3360	3010	2820	3190	3040	2450	2110	3170	3210	2520	2230
91		4560	3930	3450	3230	2750	3780	3370	2420	2160	3900	3420	2430	2270
364		5030	3980	3035	3225	2450	3640	3025	2200	1890	4220	3450	2690	2075
Mischung 3: Schnell erhärtender Zement, Beispiel II														
1		1980	1950	3110	1730	3090	1880	2770	1500	2530	2290	2980	1710	2800
3		3065	3040	3290	2840	3210	2750	2910	2490	2470	3070	3110	2620	2890
7		3630	3550	3380	3330	3260	2940	3020	2540	2390	3420	3280	2990	2950
28		4150	3900	3680	3910	3410	3420	3060	2880	2580	3720	3340	3290	2990
91		4355	4185	3625	3915	3110	3550	3180	3100	2630	4000	3540	3460	3000
364		4370	4410	3260	3880	2915	4115	2850	3145	2325	4490	3390	3735	2900

Legende zu Tab. IV.46:

- Druckfestigkeit in psi: Zur Umrechnung in N/mm² mit 0,00703 multiplizieren (Annahme: $g = 10 \text{ m/s}^2$);
- jeder Eintrag entspricht dem Mittelwert aus jeweils drei Proben;
- Alter von nass gelagerten Proben zwei Tage höher als der angegebene Wert;
- Definition der Lagerung:
 - (1) feuchte Lagerung nach Norm;
 - (2) Lagerung unter gleichen Bedingungen wie die gut nachbehandelten Platten;
 - (3) Wasserlagerung für zwei Tage im Anschluss an Lagerung nach (2);
 - (4) Lagerung unter gleichen Bedingungen wie die schlecht nachbehandelten Platten;
 - (5) Wasserlagerung für zwei Tage im Anschluss an Lagerung nach (4).

Anhang V Dauerstandeffekte – Prüfergebnisse

Anhang V.1 Datenbank Kurzzeitdruckfestigkeiten

In den nachfolgenden Tabellen Tab. V. 1 bis Tab. V. 14 sind die Ergebnisse der Untersuchungen der Kurzzeitdruckfestigkeit nach *DIN EN 12390-3:2009-07* an bestehenden Massivbauwerken durch Bohrkernentnahmen dargestellt. Die Untersuchungen erfolgten im MPA der Technischen Universität Kaiserslautern (TUK).

Die angegebenen Druckfestigkeiten entsprechen jeweils der am Bohrkern mit der angegebenen Geometrie und Lagerung geprüften Betondruckfestigkeit. Eine Umrechnung auf eine entsprechende Zylinderdruckfestigkeit ist nicht erfolgt. Die Entnahmerichtung der Bohrkernne ist in Bezug auf die Betonierrichtung (senkrecht/parallel) angegeben. Der angegebene Größtkorndurchmesser wurde jeweils visuell an der Bohrkernoberfläche abgeschätzt.

Eine eventuell am Bauwerk feststellbare karbonatisierte Schicht wurde im Rahmen der Vorbereitung der Bohrkernne für die Prüfung der Betondruckfestigkeit durch Nassschneiden und Schleifen abgetrennt. Die ggf. angegebene Karbonatisierungstiefe beschreibt dabei die direkt am Bauwerk /-teil festgestellte Karbonatisierungstiefe.

Zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit am Bohrkern wurde eine logarithmische Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* verwendet.

Legende Tab. V. 1 bis Tab. V. 14:

- a) Gleichung (2.8)
- b) Gleichung (2.1)
- c) Gleichung (2.9)
- d) Gleichung (3.12)
- e) Gleichung (3.13)
- f) Gleichung (2.9)
- g) Tab. 3.4 / Gleichung (3.14)
- h) Gleichung (3.11)
- 1) Bewehrung quer zur Bohrkernlängsachse (sofern vorhanden)
- 2) trocken: am Bauwerk vorliegender Feuchtezustand; nass: wassergesättigt nach *DIN EN 12504-1:2009-07* (mind. 48 h in Wasser gelagert)

Tab. V. 1 Stützen TU Kaiserslautern (TUK), Kaiserslautern – Kurzzeitdruckfestigkeit

Stützen TU Kaiserslautern (TUK), Kaiserslautern *						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	C16/20	[-]				
Größtkorndurchmesser	16	[mm]				
Art Zuschlag	Rundkorn	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]				
Lagerung	trocken	[-]				
Baujahr	2017	[-]				
Prüfdatum	2017	[-]				
Alter	-	[Jahre]				
Art der Vorbelastung	Zentr. Druck					
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
27,1	35,2					
28,3	39,4					
28,8	43,0					
30,1						
31,1						
33,4						
34,9						
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	10	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	5,11	[N/mm ²]	
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	33,1	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,15	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert μ_y ^{d)}	3,49	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,04	[-]	
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,15	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck,is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
k_n ^{g)}	1,92	[-]	$f_{ck,is}$ ^{h)}	24,6	[N/mm ²]	

Tab. V. 2 Stützen TU Kaiserslautern (TUK), Kaiserslautern – Kurzzeitdruckfestigkeit:
Einzelprüfwerte

Stützen TU Kaiserslautern (TUK), Kaiserslautern *						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
1_1-1	99,0	103,3		1,796	-	256900
1_2-1	99,7	100,7		1,758	-	307300
1_3-1	99,0	101,5		1,778	-	208400
1_4-1	99,0	102,0		1,791	-	270600
1_5-1	99,0	100,0		1,749	-	330700
2_1-1	99,7	102,0		1,798	-	224500
2_2-1	99,7	99,7		1,740	-	235100
2_3-1	99,5	100,7		1,771	-	241700
2_4-1	99,5	102,0		1,792	-	271200
2_5-1	99,3	102,0		1,784	-	219200

* Gesondert hergestellte stützenartige Bauteile mit quadratischem Querschnitt (Kantenlänge 25 cm/Höhe 110 cm). Vorbelastung durch eine zentrische Druckkraft von 350 kN über eine Dauer von 24 h.

Tab. V. 3 Wand Technische Werke Ludwigshafen, Ludwigshafen – Kurzzeitdruckfestigkeit

Wand Technische Werke Ludwigshafen, Ludwigshafen									
Betondruckfestigkeit									
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]							
Größtkorndurchmesser	16	[mm]							
Art Zuschlag	Rundkorn	[-]							
Karbonatisierung	10	[-]							
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]							
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]							
Entnahmerichtung	parallel	[-]							
Lagerung	nass	[-]							
Baujahr	unbekannt	[-]							
Prüfdatum	2017	[-]							
Alter	unbekannt	[Jahre]							
Art der Vorbelastung	Zentr. Druck								
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07									
26,3	40,1	46,8	55,4						
29,6	40,8	48,0							
30,8	41,6	48,9							
31,5	41,7	50,8							
33,2	42,6	51,6							
33,7	45,8	53,0							
34,8	45,9	54,3							
Parameter der Stichprobe									
Stichprobenumfang n	22	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	8,72	[N/mm ²]				
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	42,1	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,21	[-]				
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12									
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,72	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,06	[-]				
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,22	[-]							
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12									
$k_n^{g)}$	1,76	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	28,1	[N/mm ²]				

Tab. V. 4 Wand Technische Werke Ludwigshafen, Ludwigshafen – Kurzzeitdruckfestigkeit:
Einzelprüfwerte

Wand Technische Werke Ludwigshafen, Ludwigshafen						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast F
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
WA 2	98,1	102,0		-	1,808	263000
WA 3	98,3	104,4		-	1,865	224800
WA 4	98,4	102,9		-	1,830	234100
WA 5	98,7	102,0		-	1,844	350500
WA 6	98,4	102,0		-	1,838	316500
WA 7	98,6	101,9		-	1,839	311500
WA 8	98,5	104,9		-	1,897	240300
WB 1	98,9	101,9		-	1,850	359800
WB 2	98,6	102,5		-	1,866	366600
WB 3	98,7	101,6		-	1,870	415400
WB 4	98,8	104,2		-	1,891	254400
WB 7	98,7	104,9		-	1,886	257800
WB 9	98,8	102,8		-	1,858	351800
WC 2	98,6	101,7		-	1,855	393900
WC 3	98,6	103,8		-	1,901	404600
WC 5	98,8	103,3		-	1,864	319700
WC 8	98,7	104,0		-	1,909	373800
WC 10	98,8	103,0		-	1,870	307600
WD 1	98,9	104,7		-	1,913	327500
WD7	99,4	104,1		-	1,900	204100
WD 8	99,5	104,9		-	1,946	394700
WD 9	99,4	102,2		-	1,893	430200

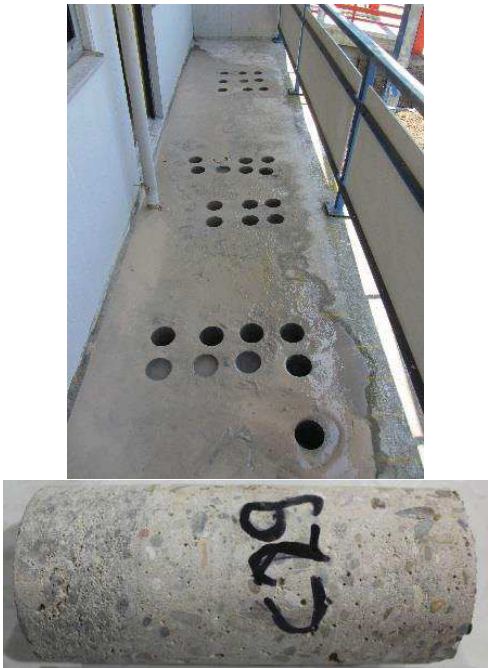
Tab. V. 5 Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt – Kurzzeitdruckfestigkeit

Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt						
Betondruckfestigkeit			 			
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	16	[mm]				
Art Zuschlag	Rundkorn	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]				
Lagerung	trocken	[-]				
Baujahr	unbekannt	[-]				
Prüfdatum	2018	[-]				
Alter	-	[Jahre]				
Art der Vorbelastung	Zentr. Druck					
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
21,2	33,5	45,8				
24,0	34,9					
29,3	35,1					
29,5	35,3					
31,0	37,0					
31,7	37,9					
32,1	38,8					
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	15	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	6,00	[N/mm ²]	
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	33,1	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,18	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,48	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,05	[-]	
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,19	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,82	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	23,1	[N/mm ²]	

Tab. V. 6 Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt – Kurzzeitdruckfestigkeit:
Einzelprüfwerte

Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
A3	99,4	100,2		1,765	-	260200
A4	99,5	100,2		1,748	-	165000
A8	99,7	99,3		1,743	-	250400
A9	99,5	101,3		1,766	-	271400
A11	99,7	101,0		1,734	-	187200
B1	99,7	101,0		1,748	-	247300
B2	99,7	100,0		1,760	-	228400
B6	99,7	99,7		1,743	-	275900
B8	99,7	100,0		1,741	-	274200
B10	99,6	101,5		1,788	-	241700
C1	99,6	100,1		1,785	-	288300
C2	99,6	100,3		1,774	-	302600
C3	99,7	98,3		1,732	-	230600
C6	99,6	99,6		1,741	-	295100
C7	99,6	100,3		1,770	-	356600

Tab. V. 7 Balkonplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt – Kurzzeitdruckfestigkeit

Balkonplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	16	[mm]				
Art Zuschlag	rund	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	parallel	[-]				
Lagerung	trocken	[-]				
Baujahr	unbekannt	[-]				
Prüfdatum	2018	[-]				
Alter	-	[Jahre]				
Art der Vorbelastung	Biegung					
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
39,0	45,8					
39,3	46,7					
40,0	48,2					
42,3	53,3					
42,6	53,8					
42,7	57,0					
42,9	61,5					
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	14	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	7,05	[N/mm ²]	
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	46,8	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,15	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,84	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,04	[-]	
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,14	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
$k_n^{g)}$	1,83	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	35,5	[N/mm ²]	

Tab. V. 8 Balkonplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt – Kurzzeitdruckfestigkeit:
Einzelprüfwerte

Balkonplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
C15-B	99,8	99,8		1,777	-	333600
C16-B	99,8	99,6		1,765	-	307600
C18-B	99,7	99,5		1,766	-	333600
C19-B	99,7	99,4		1,797	-	444900
C22-B	99,8	100,0		1,753	-	335300
C23-B	99,8	100,0		1,793	-	377200
C24-B	99,8	99,3		1,758	-	312700
C25-B	99,7	99,4		1,764	-	357500
C26-B	99,8	99,2		1,804	-	480900
C27-B	99,8	100,0		1,787	-	365000
C28-B	99,8	100,5		1,778	-	331100
C29-B	99,8	100,0		1,763	-	304900
C30-B	99,8	100,7		1,811	-	420900
C31-B	99,7	101,0		1,799	-	416200

Tab. V. 9 Deckenplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt – Kurzzeitdruckfestigkeit

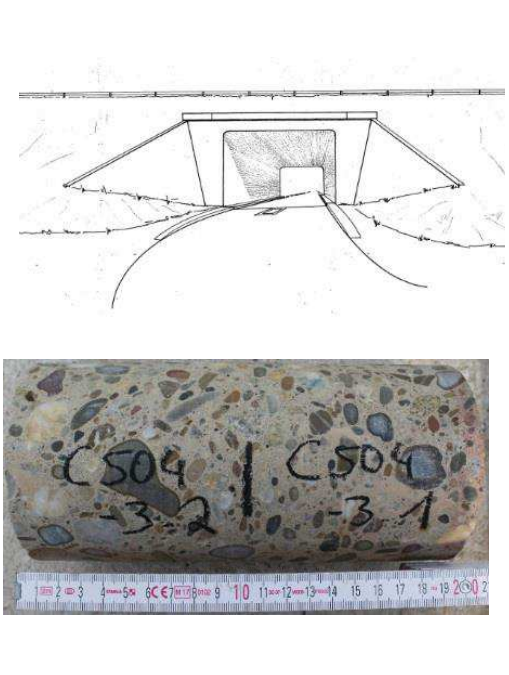
Deckenplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-					
Größtkorndurchmesser	16					
Art Zuschlag	Rundkorn					
Karbonatisierung	nein					
Bohrkerndurchmesser	100					
Bohrkernschlankheit	100/100					
Entnahmerichtung	parallel					
Lagerung	trocken					
Baujahr	unbekannt					
Prüfdatum	2018					
Alter	-					[Jahre]
Art der Vorbelastung	Biegung					
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
31,5	40,8	45,7				
32,0	41,7	46,2				
32,1	42,5	46,3				
33,5	42,8	46,6				
34,0	43,6	49,2				
35,2	43,9					
37,3	45,6					
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	19			Standardabweichung s_x ^{a)}	5,86	[N/mm ²]
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	40,6			Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,14	[-]
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert μ_y ^{d)}	3,69			Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,04	[-]
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,15					
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
k_n ^{g)}	1,78			$f_{ck, is}$ ^{h)}	30,7	[N/mm ²]



Tab. V. 10 Deckenplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt – Kurzzeitdruckfestigkeit:
Einzelprüfwerte

Deckenplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast F
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
1	99,8	98,7		1,735	-	265800
2	99,8	100,0		1,740	-	291500
3	99,8	100,0		1,782	-	332600
7	99,8	100,0		1,760	-	385000
8	99,8	100,9		1,787	-	334800
9	99,8	100,0		1,777	-	343600
10	99,8	101,3		1,786	-	325900
11	99,8	100,2		1,758	-	341000
12	99,8	101,7		1,808	-	361700
13	99,7	99,8		1,778	-	361100
14	99,7	101,1		1,791	-	318600
15	99,8	99,8		1,751	-	275400
16	99,8	101,2		1,782	-	364800
17	99,6	99,9		1,755	-	356300
18	99,7	99,0		1,745	-	355700
28	99,7	101,0		1,713	-	261600
29	99,8	98,3		1,679	-	250800
30	99,8	100,7		1,737	-	250600
31	99,7	100,7		1,726	-	245800

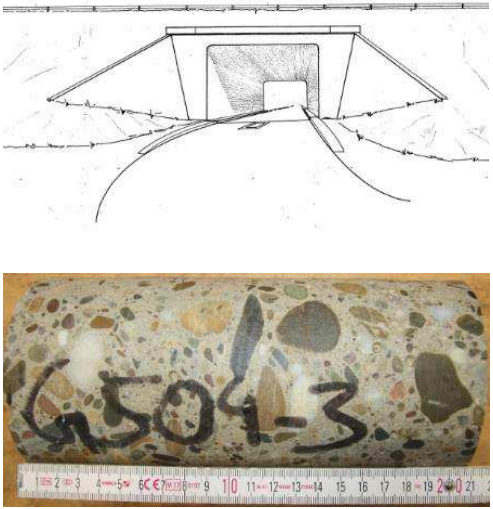
Tab. V. 11 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Heilbronn –
Kurzzeitdruckfestigkeit

Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Heilbronn						
Betondruckfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	B300	[-]				
Größtkorndurchmesser	32	[mm]				
Art Zuschlag	Rundkorn	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkerenschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]				
Lagerung	nass	[-]				
Baujahr	1965-67	[-]				
Prüfdatum	2018	[-]				
Alter	51	[Jahre]				
Art der Vorbelastung	Druck (Biegung)					
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07						
26,3	42,6					
27,1						
32,3						
33,4						
36,0						
37,5						
39,1						
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	8	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	5,69	[N/mm ²]	
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	34,3	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,17	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert μ_y ^{d)}	3,52	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,05	[-]	
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,17	[-]				
5 %-Quantilwert $f_{ck,is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
k_n ^{g)}	2,01	[-]	$f_{ck,is}$ ^{h)}	24,0	[N/mm ²]	

Tab. V. 12 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Heilbronn –
 Kurzzeitdruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Heilbronn						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-3:2009-07</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
A1.1	A1.1	A1.1		-	1,683	300900
A2.1	A2.1	A2.1		-	1,835	288900
B4.1	B4.1	B4.1		-	1,864	329500
B6.1	B6.1	B6.1		-	1,868	209500
C2.1	C2.1	C2.1		-	1,871	202900
C5.1	C5.1	C5.1		-	1,917	249400
D1.1	D1.1	D1.1		-	1,782	278700
D1.2	D1.2	D1.2		-	1,777	258100

Tab. V. 13 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), Heilbronn –
Kurzzeitdruckfestigkeit

Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), Heilbronn										
Betondruckfestigkeit										
Güte-/Festigkeitsklasse	B300	[-]								
Größtkorndurchmesser	32	[mm]								
Art Zuschlag	Rundkorn	[-]								
Karbonatisierung	nein	[-]								
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]								
Bohrkerenschlankheit	100/100	[mm]								
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]								
Lagerung	nass	[-]								
Baujahr	1965-67	[-]								
Prüfdatum	2018	[-]								
Alter	51	[Jahre]								
Art der Vorbelastung	Druck (Biegung)									
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm² nach DIN EN 12390-3:2009-07										
35,9	38,7									
37,3	40,5									
37,5	40,6									
38,0	40,9									
38,0	43,4									
38,3										
38,6										
Parameter der Stichprobe										
Stichprobenumfang n	12	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	2,04	[N/mm ²]					
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	39,0	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,05	[-]					
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	3,66	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,01	[-]					
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,05	[-]								
5 %-Quantilwert $f_{ck, is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
$k_n^{g)}$	1,87	[-]	$f_{ck, is}^{h)}$	35,4	[N/mm ²]					

Tab. V. 14 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), Heilbronn –
 Kurzzeitdruckfestigkeit: Einzelprüfwerte

Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), Heilbronn						
Bohrkerndruckfestigkeit f_{ci} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-3:2009-07</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
E3	99,6	101,2		-	2,003	296100
E4	99,8	111,3		-	2,067	319800
F1-2	99,7	99,9		-	1,780	316900
F2-1	99,8	109,2		-	1,959	292000
F3-1	99,8	109,2		-	1,812	317100
G1	99,2	103,1		-	1,838	298500
G5-1	99,1	100,1		-	1,779	335100
G6	99,2	102,2		-	1,822	293600
H1	99,2	111,2		-	2,007	277400
H2	99,2	112,5		-	2,009	299000
H4	99,2	101,9		-	1,818	296100
H5	99,2	109,2		-	1,954	289900

Anhang V.2 Dauerstandversuche

In den Abbildungen Abb. V. 1 Abb. V. 7 und Tabellen Tab. V. 15 bis Tab. V. 21 sind die wesentlichen Ergebnisse der durchgeführten Dauerstandversuche zusammenfassend dargestellt. Zur Erläuterung werden die folgenden Fußnoten verwendet:

- 1) Mittelwert der im Kurzzeitversuch nach *DIN EN 12390-3:2009-07* an Bohrkernen ($d = h = 100$ mm) ermittelten Versagenslast oder bei Zerteilung eines Bohrkerns in zwei Probekörper ggf. der Einzelwert der Versagenslast des jeweils zugehörigen Bohrkernteils (siehe Anhang V.1).
- 2) Bezogen auf die im Kurzzeitversuch ermittelte Versagenslast.
- 3) Entspricht der mittleren, tatsächlich erreichten dauerhaft aufgebrauchten Last.
- 4) Entspricht der im Anschluss an den Dauerstandversuch im Kurzzeitversuch nach *DIN EN 12390-3:2009-07* geprüften Versagenslast.
- 5) Versagensarten:
KZV: Kurzzeitversagen vor Erreichen des geplanten Belastungsniveaus;
DV: Dauerstandversagen;
kV: kein Versagen während des Dauerstandversuchs.
- 6) Entspricht dem geplanten Wert. Der Wert kann aufgrund der Streuung der Kurzzeitdruckfestigkeit abweichen.
- 7) Entspricht der mittleren, tatsächlich dauerhaft aufgebrauchten Last dividiert durch die im Anschluss an den Dauerstandversuch geprüfte Kurzzeitfestigkeit *DIN EN 12390-3:2009-07*.
- 8) Unter Annahme einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von 0,6 MPa/s nach *DIN EN 12390-3:2009-07*.

Stützen TU Kaiserslautern (TUK)

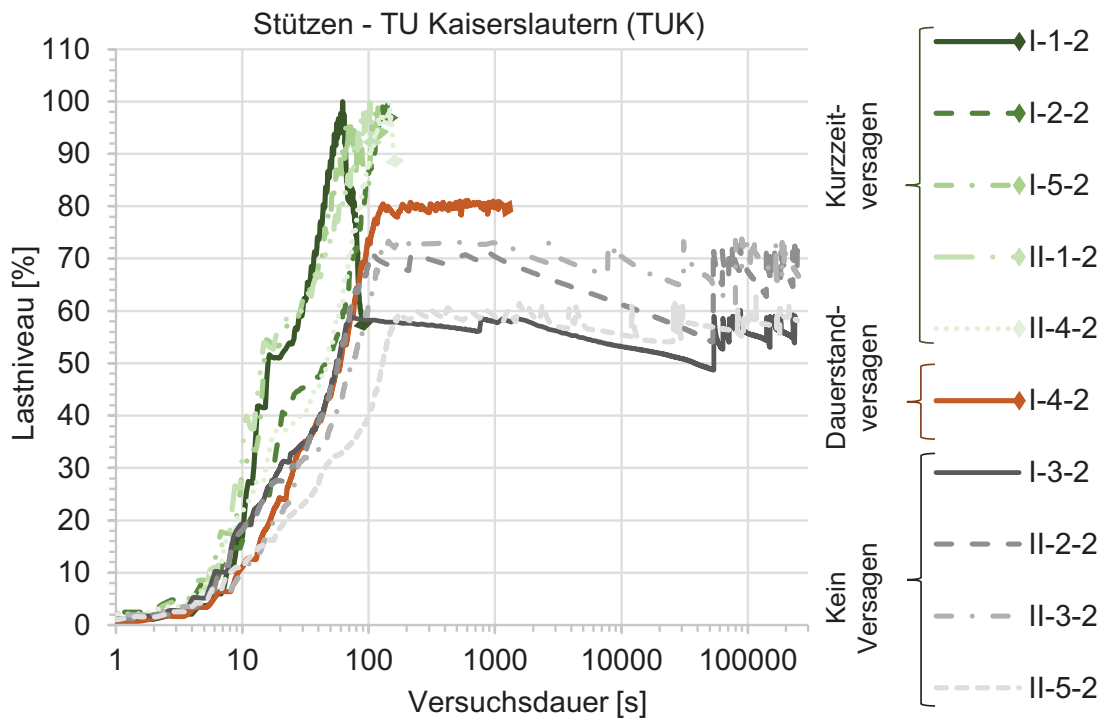


Abb. V. 1 Stützen TU Kaiserslautern (TUK), Belastungsverläufe

Wand Technische Werke Ludwigshafen

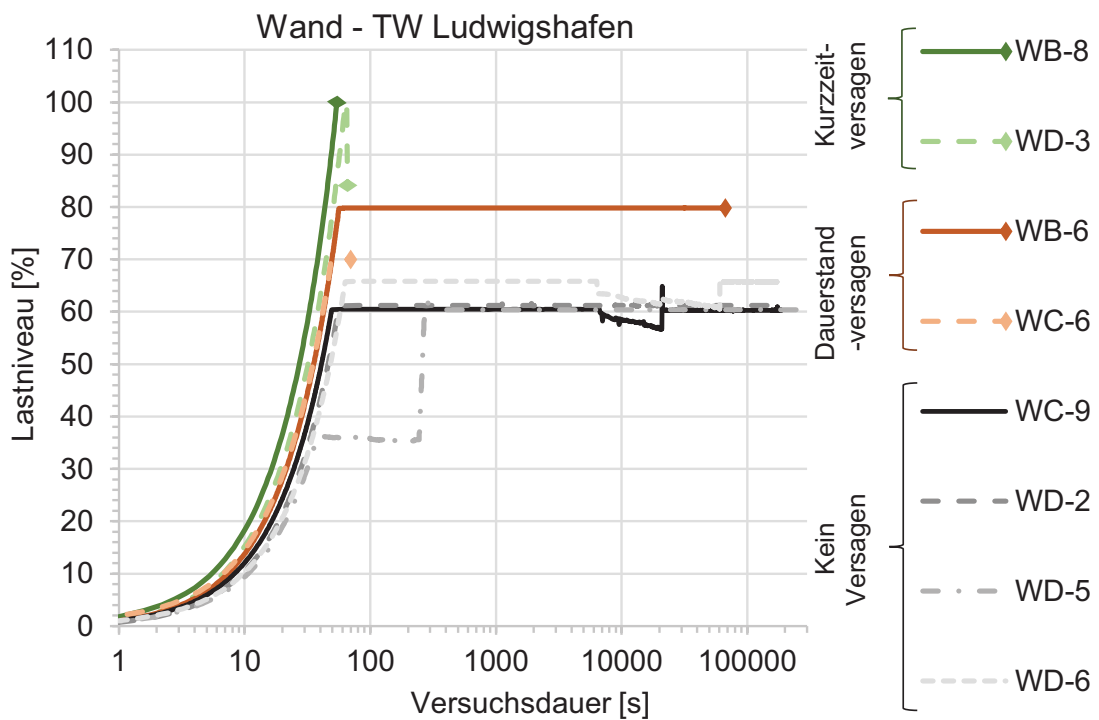


Abb. V. 2 Wand Technische Werke Ludwigshafen, Belastungsverläufe

Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt

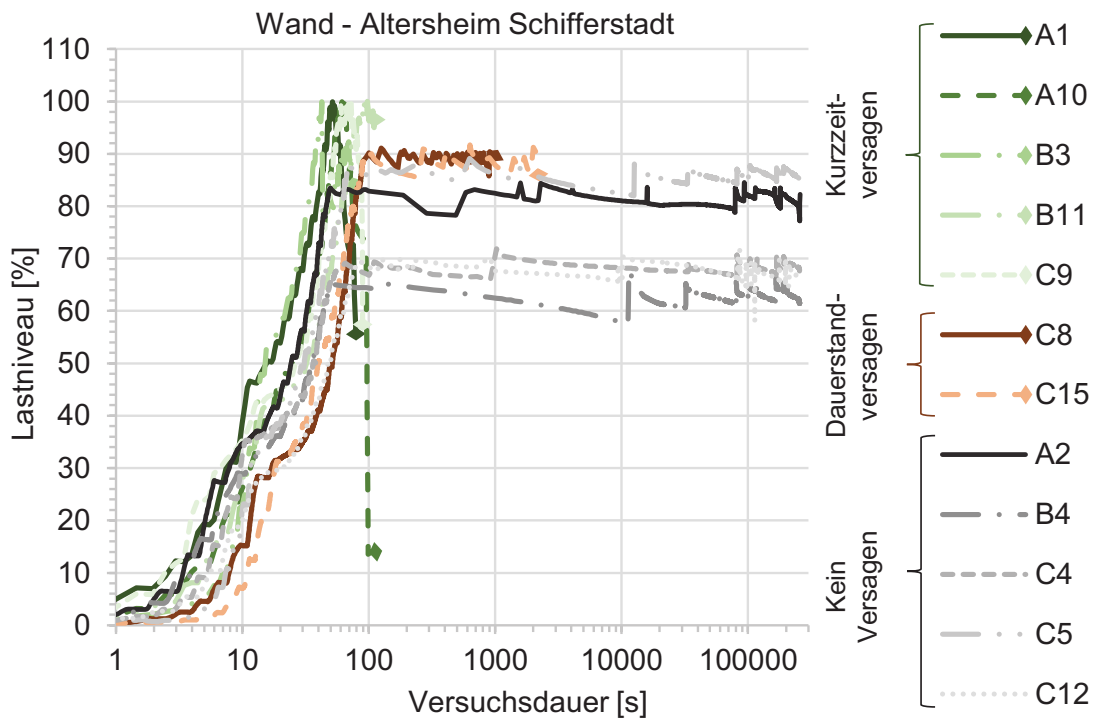


Abb. V. 3 Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, Belastungsverläufe

Balkonplatte Altersheim Schifferstadt

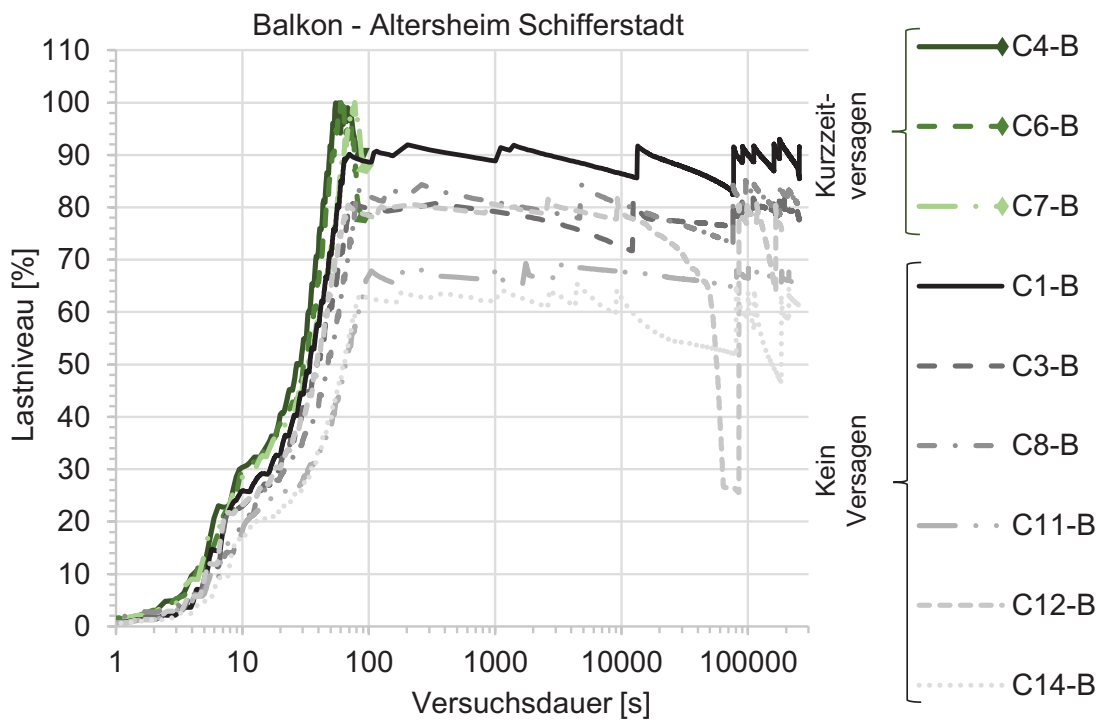


Abb. V. 4 Balkonplatte Altersheim Schifferstadt, Belastungsverläufe

Deckenplatte Altersheim Schifferstadt

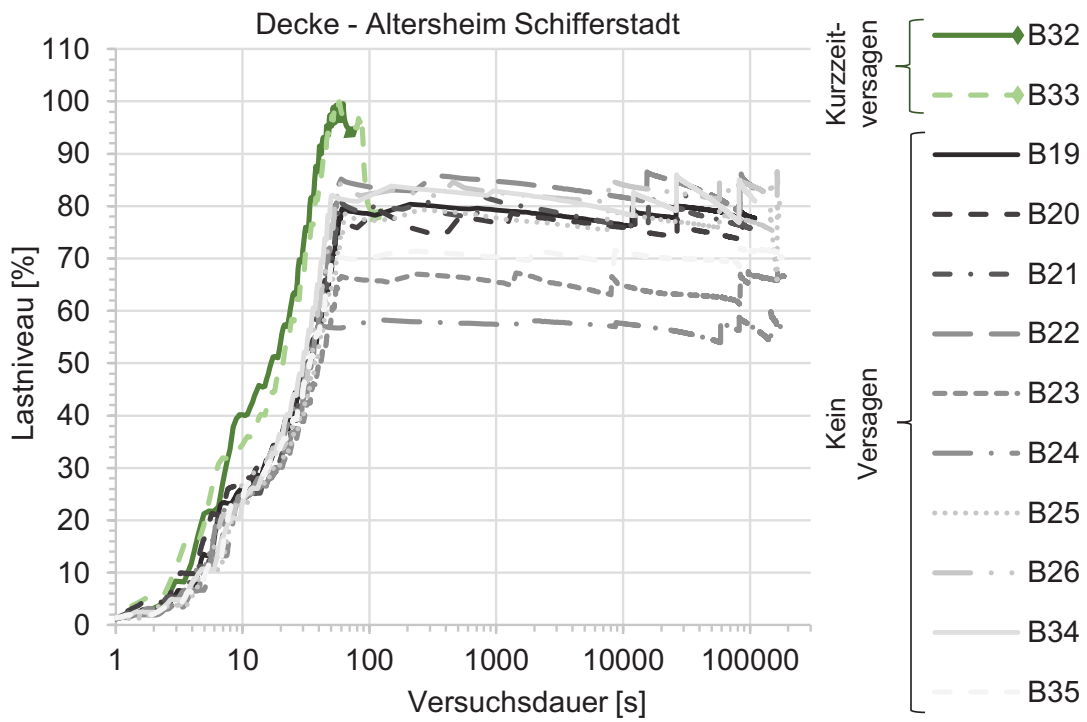


Abb. V. 5 Deckenplatte Altersheim Schifferstadt, Belastungsverläufe

Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D)

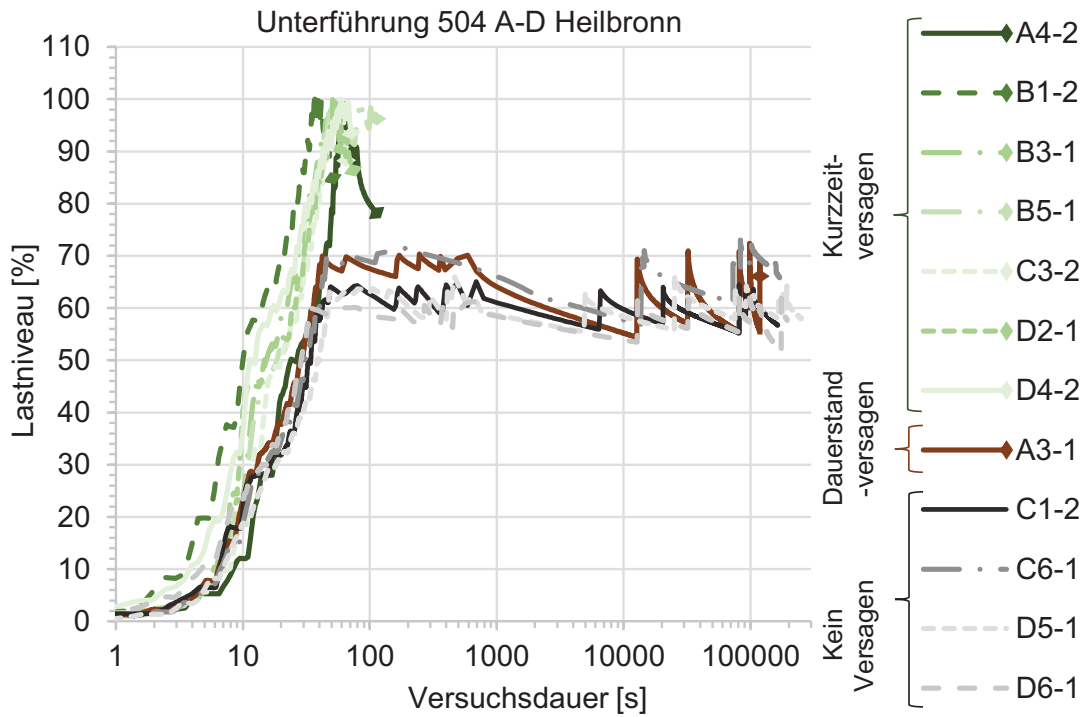


Abb. V. 6 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Belastungsverläufe

Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H)

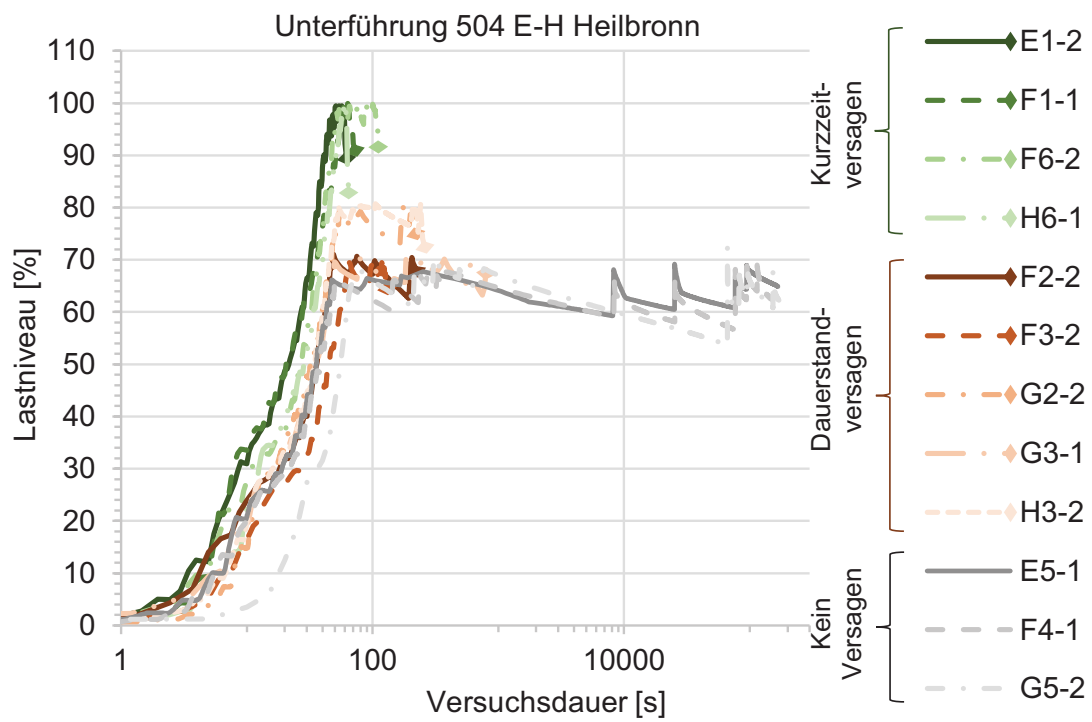


Abb. V. 7 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), Belastungsverläufe

Tab. V. 15 Stützen TU Kaiserslautern (TUK), Kaiserslautern – Dauerstandsversuche

Probekörper	[-]	I-1-2	I-2-2	I-3-2	I-4-2	I-5-2	II-1-2	II-2-2	II-3-2	II-4-2	II-5-2		
Versagenslast Kurzzeitfestigkeit ¹⁾	[kN]	256,9	307,3	208,4	256,6	330,7	224,5	235,1	256,6	256,6	219,2		
geplantes Belastungsniveau ²⁾	[%]	90	70	70	80	90	90	80	80	90	70		
geplantes Belastungsniveau	[kN]	231,2	215,1	145,9	205,3	297,6	202,1	188,1	205,3	230,9	153,4		
tatsächliche Versagenslast	[kN]	163,9	188,4	254,4 ₄₎	205,2 ₃₎	148,8	143,2	266,3 ₄₎	283,7 ₄₎	221,4	257,4 ₄₎		
Versagensart ⁵⁾	[-]	KZV	KZV	kV	DV	KZV	KZV	kV	kV	KZV	kV		
mittlere, tatsächlich dauerhaft aufgebrachte Last	[kN]	-	-	140,1	205,2	-	-	174,9	203,1	-	147,9		
tatsächliches Belastungsniveau	[%]	-	-	55 ⁷⁾	80 ⁶⁾	-	-	66 ⁷⁾	72 ⁷⁾	-	57 ⁷⁾		
Versuchsdauer gesamt	[h:m in:s]	00:01 :31	00:02 :24	65:44 :02	00:20 :53	00:02 :02	00:01 :47	68:58 :00	70:17 :28	00:02 :42	69:07 :35		
Dauer bis zum Erreichen des geplanten Belastungsniveaus													
Soll ⁸⁾	[s]	49	46	31	44	63	43	40	44	49	33		
Ist	[s]	-	-	69	129	-	-	108	126	-	174		
bei Dauerstandsversagen: Dauer bis zum Versagen nach Erreichen des Belastungsniveaus													
	[h:m in:s]	-	-	-	00:18 :44	-	-	-	-	-	-		

Probekörper	[-]	WB-6	WB-8	WC-6	WC-9	WD-2	WD-3	WD-5	WD-6				
Versagenslast Kurzzeitfestigkeit ¹⁾	[kN]	330,8	330,8	330,8	330,8	330,8	330,8	330,8	330,8				
geplantes Belastungsniveau ²⁾	[%]	80	80	70	70	80	90	90	90				
geplantes Belastungsniveau	[kN]	264,6	264,6	231,6	231,6	264,6	297,7	297,7	297,7				
tatsächliche Versagenslast	[kN]	263,9 ₃₎	255,6	231,3 ₃₎	382,9 ₄₎	431,3 ₄₎	295,9	488,9 ₄₎	451,0 ₄₎				
Versagensart ⁵⁾	[-]	DV	KZV	DV	kV	kV	KZV	kV	kV				
mittlere, tatsächlich dauerhaft aufgebrachte Last	[kN]	263,9	-	231,3	230,2	263,9	-	295,3	290,7				
tatsächliches Belastungsniveau	[%]	80 ⁶⁾	-	80 ⁶⁾	60 ⁷⁾	61 ⁷⁾	-	60 ⁷⁾	64 ⁷⁾				
Versuchsdauer gesamt	[h:m in:s]	18:35 :31	00:00 :54	00:01 :10	52:05 :59	53:15 :52	00:01 :06	69:37 :15	48:33 :59				
Dauer bis zum Erreichen des geplanten Belastungsniveaus													
Soll ⁸⁾	[s]	56	56	49	49	56	63	63	63				
Ist	[s]	58	-	49	50	58	-	270	63				
bei Dauerstandsversagen: Dauer bis zum Versagen nach Erreichen des Belastungsniveaus													
	[h:m in:s]	18:34 :33	-	00:00 :21	-	-	-	-	-				

Tab. V. 17 Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt – Dauerstandsversuche

Probekörper	[-]	A1	A2	A10	B3	B4	B11	C4	C5	C8	C9	C12	C15
Versagenslast Kurzzeitfestigkeit ¹⁾	[kN]	259,8	259,8	259,8	259,8	259,8	259,8	259,8	259,8	259,8	259,8	259,8	259,8
geplantes Belastungsniveau ²⁾	[%]	70	80	80	80	70	90	70	70	90	90	80	90
geplantes Belastungsniveau	[kN]	181,9	207,8	207,8	207,8	181,9	233,8	181,9	181,9	233,8	233,8	207,8	233,8
tatsächliche Versagenslast	[kN]	170,0	249,6 ₄₎	194,1	129,1	280,2 ₄₎	204,8	262,4 ₄₎	209,4 ₄₎	231,5 ₃₎	189,1	297,9 ₄₎	229,2 ₃₎
Versagensart ⁵⁾	[-]	KZV	kV	KZV	KZV	kV	KZV	kV	kV	DV	KZV	kV	DV
mittlere, tatsächlich dauerhaft aufgebrachte Last	[kN]	-	202,8	-	-	176,0	-	179,0	179,8	231,5	-	199,3	229,2
tatsächliches Belastungsniveau	[%]	-	81 ⁷⁾	-	-	63 ⁷⁾	-	68 ⁷⁾	86 ⁷⁾	90 ⁶⁾	-	67 ⁷⁾	90 ⁶⁾
Versuchsdauer gesamt	[h:m in:s]	00:01 :19	71:31 :24	00:01 :53	00:01 :16	71:12 :03	00:01 :53	71:13 :39	71:07 :06	00:16 :35	00:01 :29	70:48 :21	00:36 :41
Dauer bis zum Erreichen des geplanten Belastungsniveaus													
Soll ⁸⁾	[s]	39	44	44	44	39	50	39	39	50	50	44	50
Ist	[s]	-	49	-	-	48	-	110	100	120	-	85	95
bei Dauerstandsversagen: Dauer bis zum Versagen nach Erreichen des Belastungsniveaus													
	[h:m in:s]	-	-	-	-	-	-	-	-	00:14 :34	-	-	00:35 :05

Probekörper	[-]	C1-B	C3-B	C4-B	C6-B	C7-B	C8-B	C11-B	C12-B	C14-B			
Versagenslast Kurzzeitfestigkeit ¹⁾	[kN]	367,4	367,4	367,4	367,4	367,4	367,4	367,4	367,4	367,4			
geplantes Belastungsniveau ²⁾	[%]	80	80	90	80	90	70	70	90	70			
geplantes Belastungsniveau	[kN]	293,9	293,9	330,7	293,9	330,7	257,2	257,2	330,7	257,2			
tatsächliche Versagenslast	[kN]	323,1 ₄₎	363,6 ₄₎	281,3	261,2	317,1	306,1 ₄₎	377,6 ₄₎	412,3 ₄₎	405,4 ₄₎			
Versagensart ⁵⁾	[-]	kV	kV	KZV	KZV	KZV	kV	kV	kV	kV			
mittlere, tatsächlich dauerhaft aufgebrachte Last	[kN]	286,6	285,8	-	-	-	245,7	250,6	277,5	229,5			
tatsächliches Belastungsniveau	[%]	89 ⁷⁾	79 ⁷⁾	-	-	-	80 ⁷⁾	66 ⁷⁾	67 ⁷⁾	57 ⁷⁾			
Versuchsdauer gesamt	[h:m in:s]	70:48 :21	70:33 :52	00:01 :27	00:01 :30	00:01 :33	70:59 :20	71:02 :29	52:45 :21	70:46 :27			
Dauer bis zum Erreichen des geplanten Belastungsniveaus													
Soll ⁸⁾	[s]	62	62	70	62	70	55	55	70	55			
Ist	[s]	70	75	-	-	-	85	105	69	85			
bei Dauerstandsversagen: Dauer bis zum Versagen nach Erreichen des Belastungsniveaus													
	[h:m in:s]	-	-	-	-	-	-	-	-	-			

Tab. V. 19 Deckenplatte Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt – Dauerstandsversuche

Probekörper	[-]	B19	B20	B21	B22	B23	B24	B25	B26	B32	B33	B34	B35
Versagenslast Kurzzeitfestigkeit ¹⁾	[kN]	318,7	318,7	318,7	318,7	318,7	318,7	318,7	318,7	318,7	318,7	318,7	318,7
geplantes Belastungsniveau ²⁾	[%]	90	80	90	90	70	70	80	80	70	80	90	70
geplantes Belastungsniveau	[kN]	286,8	255,0	286,8	286,8	223,1	223,1	255,0	255,0	223,1	255,0	286,8	223,1
tatsächliche Versagenslast	[kN]	362,3 ₄₎	330,1 ₄₎	358,8 ₄₎	341,7 ₄₎	335,2 ₄₎	389,4 ₄₎	324,3 ₄₎	301,0 ₄₎	215,3	254,2	349,9 ₄₎	317,2 ₄₎
Versagensart ⁵⁾	[-]	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	KZV	KZV	kV	kV
mittlere, tatsächlich dauerhaft aufgebrachte Last	[kN]	284,5	248,1	278,5	283,0	217,5	220,1	248,0	249,5	-	-	283,9	223,9
tatsächliches Belastungsniveau	[%]	79 ⁷⁾	75 ⁷⁾	78 ⁷⁾	83 ⁷⁾	65 ⁷⁾	57 ⁷⁾	76 ⁷⁾	83 ⁷⁾	-	-	81 ⁷⁾	71 ⁷⁾
Versuchsdauer gesamt	[h:m in:s]	30:25 :09	30:25 :15	31:04 :43	31:03 :46	52:33 :55	48:33 :32	48:15 :51	48:12 :36	00:01 :11	00:01 :53	30:24 :08	52:35 :35
Dauer bis zum Erreichen des geplanten Belastungsniveaus													
Soll ⁸⁾	[s]	61	54	61	61	47	47	54	54	47	54	61	47
Ist	[s]	61	54	57	57	60	40	65	58	-	-	51	55
bei Dauerstandsversagen: Dauer bis zum Versagen nach Erreichen des Belastungsniveaus													
	[h:m in:s]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Probekörper	[-]	A3-1	A4-2	B1-2	B3-1	B5-1	C1-2	C3-2	C6-1	D2-1	D4-2	D5-1	D6-1
Versagenslast Kurzzeitfestigkeit ¹⁾	[kN]	264,7	264,7	264,7	264,7	264,7	264,7	264,7	264,7	264,7	264,7	264,7	264,7
geplantes Belastungsniveau ²⁾	[%]	70	90	70	80	70	80	80	80	80	80	70	70
geplantes Belastungsniveau	[kN]	185,3	238,2	185,3	211,8	185,3	211,8	211,8	211,8	211,8	211,8	185,3	185,3
tatsächliche Versagenslast	[kN]	159,1 ₃₎	159,1	148,1	192,1	187,8	329,1 ₄₎	173,9	301,6 ₄₎	162,6	151,5	293,3 ₄₎	309,0 ₄₎
Versagensart ⁵⁾	[-]	DV	KZV	KZV	KZV	KZV	kV	KZV	kV	KZV	KZV	kV	kV
mittlere, tatsächlich dauerhaft aufgebrachte Last	[kN]	159,1	-	-	-	-	193,2	-	199,4	-	-	175,3	175,9
tatsächliches Belastungsniveau	[%]	70 ⁶⁾	-	-	-	-	59 ⁷⁾	-	66 ⁷⁾	-	-	60 ⁷⁾	57 ⁷⁾
Versuchsdauer gesamt	[h:m in:s]	32:54 :51	00:01 :54	00:00 :51	00:00 :58	00:01 :53	45:33 :06	00:01 :05	47:03 :04	00:01 :14	00:01 :11	69:44 :25	54:07 :42
Dauer bis zum Erreichen des geplanten Belastungsniveaus													
Soll ⁸⁾	[s]	39	51	39	45	39	45	45	45	45	45	39	39
Ist	[s]	42	-	-	-	-	49	-	46	-	-	48	34
bei Dauerstandsversagen: Dauer bis zum Versagen nach Erreichen des Belastungsniveaus													
	[h:m in:s]	32:54 :09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. V. 20 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Heilbronn – Dauerstandsvers.

Anhang V: Dauerstandseffekte – Prüfergebnisse

Tab. V. 21 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), Heilbronn – Dauerstandsvers.

Probekörper	[-]	E1-2	E5-1	F1-1	F2-2	F3-2	F4-1	F6-2	G2-2	G3-1	G5-2	H3-2	H6-1
Versagenslast Kurzzeitfestigkeit ¹⁾	[kN]	302,6	302,6	302,6	302,6	302,6	302,6	302,6	302,6	302,6	302,6	302,6	302,6
geplantes Belastungsniveau ²⁾	[%]	80	80	90	70	70	70	90	80	70	70	80	90
geplantes Belastungsniveau	[kN]	242,1	242,1	272,3	211,8	211,8	211,8	272,3	242,1	211,8	211,8	242,1	272,3
tatsächliche Versagenslast	[kN]	240,3	365,8 ₄₎	271,9	203,4 ₃₎	203,7 ₃₎	318,6 ₄₎	274,3	231,3 ₃₎	203,5 ₃₎	311,6 ₄₎	238,0 ₃₎	257,0
Versagensart ⁵⁾	[-]	KZV	kV	KZV	DV	DV	kV	KZV	DV	DV	kV	DV	KZV
mittlere, tatsächlich dauerhaft aufgebrachte Last	[kN]	-	234,8	-	203,4	203,7	197,3	-	231,3	203,5	190,0	238,0	-
tatsächliches Belastungsniveau	[%]	-	64 ⁷⁾	-	70 ⁶⁾	70 ⁶⁾	62 ⁷⁾	-	80 ⁶⁾	70 ⁶⁾	61 ⁷⁾	80 ⁶⁾	-
Versuchsdauer gesamt	[h:m in:s]	00:01 :02	46:39 :11	00:01 :13	00:21 :01	00:02 :10	41:07 :47	00:01 :50	00:03 :40	00:13 :18	47:12 :47	00:04 :20	00:01 :04
Dauer bis zum Erreichen des geplanten Belastungsniveaus													
Soll ⁸⁾	[s]	51	51	58	45	45	45	58	51	45	45	51	58
Ist	[s]	-	48	-	50	65	50	-	55	77	70	53	-
bei Dauerstandsversagen: Dauer bis zum Versagen nach Erreichen des Belastungsniveaus													
	[h:m in:s]	-	-	-	00:20 :11	00:01 :05	-	-	00:02 :45	00:12 :01	47:11 :37	00:03 :27	-

Anhang VI – Datenbank Bauwerksuntersuchungen zur Betonzugfestigkeit und zum E-Modul

Anhang VI.1 – Datenbank Bauwerksuntersuchungen zur Betonzugfestigkeit

In den nachfolgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Zugfestigkeitsuntersuchungen an bestehenden Massivbauwerken durch Bohrkernentnahmen dargestellt. Die zentrische Zugfestigkeit wurde dabei aufgrund der geringeren Fehleranfälligkeit durch experimentelle Bestimmung der Spaltzugfestigkeit nach *DIN EN 12390-6:2010-09* und anschließende Umrechnung gemäß Gleichung (9.9) ermittelt.

Die Untersuchungen der Betonzugfestigkeiten erfolgten bei selbst durchgeführter Bohrkernentnahme im Materialprüfamt (MPA) der Technischen Universität Kaiserslautern.

Die angegebenen Zugfestigkeiten entsprechen jeweils der am Bohrkern mit der angegebenen Geometrie und Lagerung geprüften Betonzugfestigkeit.

Die Entnahmerichtung der Bohrkernkerne ist in Bezug auf die Betonierrichtung (senkrecht/parallel) angegeben. Der angegebene Größtkorndurchmesser wurde jeweils visuell an der Bohrkernoberfläche abgeschätzt.

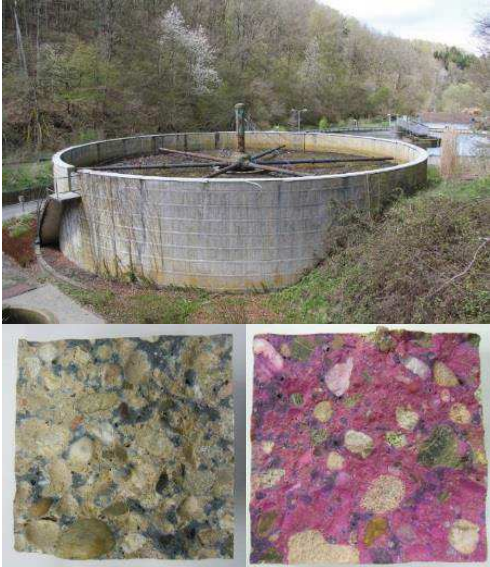
Eine eventuell am Bauwerk feststellbare karbonatisierte Schicht wurde im Rahmen der Vorbereitung der Bohrkernkerne für die Prüfung der Betondruckfestigkeit abgetrennt. Die ggf. angegebene Karbonatisierungstiefe beschreibt dabei die direkt am Bauwerk /-teil festgestellte Karbonatisierungstiefe.

Zur Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betonzugfestigkeit wurde aufgrund des jeweils großen Stichprobenumfangs eine logarithmische Normalverteilung nach *DIN EN 1990:2010-12* verwendet.

Legende Tab. VI. 1 bis Tab. VI. 20:

- a) Gleichung (2.8)
- b) Gleichung (2.1)
- c) Gleichung (2.9)
- d) Gleichung (3.12)
- e) Gleichung (3.13)
- f) Gleichung (2.9)
- g) Tab. 3.4 / Gleichung (3.14)
- h) Gleichung (3.11)
- 1) Bewehrung quer zur Bohrkernlängsachse (sofern vorhanden)
- 2) trocken: am Bauwerk vorliegender Feuchtezustand; nass: wassergesättigt nach *DIN EN 12504-1:2009-07* (mind. 48 h in Wasser gelagert)

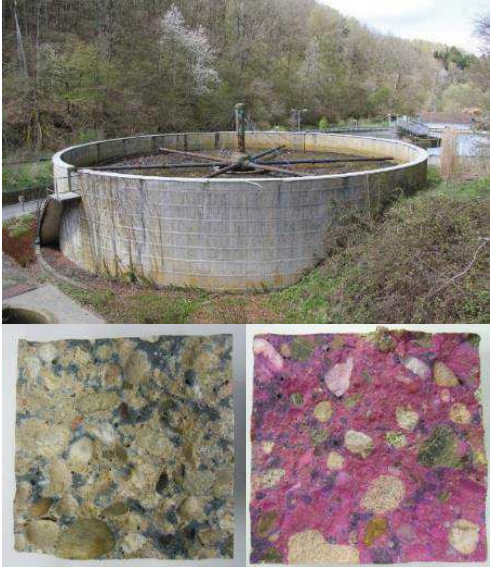
Tab. VI. 1 Tropfkörper Kläranlage Blümeltal I, Pirmasens – Betonzugfestigkeit

Tropfkörper Kläranlage Blümeltal I, Pirmasens <i>Thiele u. Weber 2016</i>										
Betonspaltzugfestigkeit										
Güte-/Festigkeitsklasse	B225	[-]								
Größtkorndurchmesser	16	[mm]								
Art Zuschlag	rund	[-]								
Karbonatisierung	nein	[-]								
Bohrkerndurchmesser	113	[mm]								
Bohrkernschlankheit	113/113	[mm]								
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]								
Lagerung	trocken	[-]								
Baujahr	1970	[-]								
Prüfdatum	2013	[-]								
Alter	43	[Jahre]								
Bohrkernspaltzugfestigkeit $f_{ct,sp,i}$ in N/mm² nach DIN EN 12390-6:2010-09										
3,2	4,3	4,9					5,6			
3,3	4,5	5,0	5,7							
3,7	4,6	5,1								
4,0	4,6	5,2								
4,0	4,6	5,3								
4,1	4,7	5,3								
4,1	4,7	5,3								
4,1	4,8	5,4								
4,1	4,8	5,5								
Parameter der Stichprobe										
Stichprobenumfang n	29	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	0,66	[N/mm ²]					
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	4,6	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,14	[-]					
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
Mittelwert μ_y ^{d)}	1,52	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,10	[-]					
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,15	[-]								
5 %- und 95 %-Quantilwert $f_{ct,sp,is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
k_n ^{g)}	1,73	[-]	$f_{ct,sp,is,0,05}$ ^{h)}	3,5	[N/mm ²]					
			$f_{ct,sp,is,0,95}$ ^{h)}	5,9	[N/mm ²]					

Tab. VI. 2 Tropfkörper Kläranlage Blümeltal I, Pirmasens – Betonzugfestigkeit: Einzelprüfwerte

Tropfkörper Kläranlage Blümeltal I, Pirmasens <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Bohrkernspaltzugfestigkeit f_{cti} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-6:2010-09</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
A 1-2	113,0	115,6		2,727	-	107900
A 2-2	113,2	115,0		2,701	-	75600
A 3-2	113,0	115,1		2,711	-	84000
A 4-1	113,1	116,7	zuvor E-Modul	2,713	-	65600
A 5-1	113,0	110,6		2,574	-	94400
A 6-1	113,0	116,8		2,721	-	83200
B 1-2	113,1	115,9	zuvor E-Modul	2,716	-	81400
B 2-2	113,2	111,6		2,615	-	101000
B 3-2	113,1	115,6		2,699	-	91400
B 5-1	113,2	115,7		2,694	-	84800
B 6-1	113,0	115,8	zuvor E-Modul	2,693	-	93400
C 1-2	113,0	110,4		2,597	-	82900
C 2-2	113,1	115,8		2,744	-	102700
C 3-2	113,1	115,5		2,699	-	99800
C 4-1	113,0	117,2		2,733	-	84500
C 5-1	113,0	116,8		2,720	-	96100
C 6-1	113,1	116,4		2,705	-	68700
D 1-2	113,0	116,5		2,745	-	114500
D 2-2	113,0	116,4		2,746	-	106800
D 3-2	113,2	115,8	zuvor E-Modul	2,736	-	113400
D 4-1	113,1	110,5		2,593	-	89000
D 5-1	113,2	118,3	zuvor E-Modul	2,744	-	98800
K 1-2	113,2	113,4		2,686	-	105700
K 2-2	113,1	112,7		2,676	-	95500
K 3-2	113,2	114,3		2,725	-	82600
K 4-1	113,3	114,7		2,697	-	108500
K 5-1	113,3	114,3		2,719	-	109700
K 6-1	113,3	114,4		-	-	114800
K 7-1	113,2	117,8		2,759	-	95900

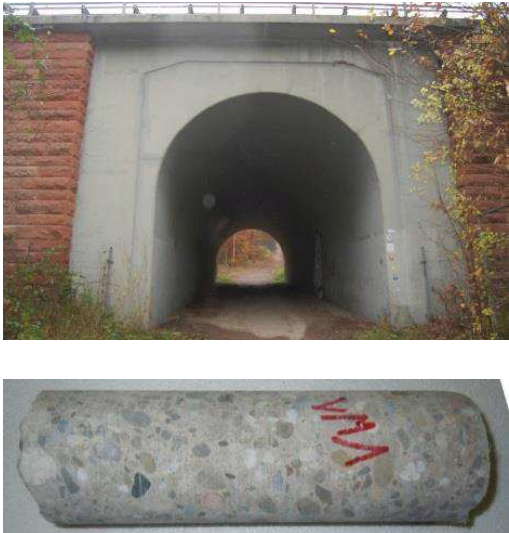
Tab. VI. 3 Tropfkörper Kläranlage Blümeltal II, Pirmasens – Betonzugfestigkeit

Tropfkörper Kläranlage Blümeltal II, Pirmasens <i>Thiele u. Weber 2016</i>										
Betonspaltzugfestigkeit										
Güte-/Festigkeitsklasse	B225	[-]								
Größtkorndurchmesser	16	[mm]								
Art Zuschlag	rund	[-]								
Karbonatisierung	nein	[-]								
Bohrkerndurchmesser	113	[mm]								
Bohrkernschlankheit	113/113	[mm]								
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]								
Lagerung	trocken	[-]								
Baujahr	1970	[-]								
Prüfdatum	2013	[-]								
Alter	43	[Jahre]								
Bohrkernspaltzugfestigkeit $f_{ct,sp,i}$ in N/mm² nach DIN EN 12390-6:2010-09										
2,8	4,1	4,7								
3,1	4,2	4,8								
3,1	4,2	4,9								
3,2	4,3	5,1								
3,4	4,3	5,2								
3,6	4,3	5,2								
3,8	4,4	5,3								
4,0	4,4	5,6								
4,1	4,5									
Parameter der Stichprobe										
Stichprobenumfang n	26	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	0,75	[N/mm ²]					
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	4,2	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,18	[-]					
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
Mittelwert μ_y ^{d)}	1,43	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,13	[-]					
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,19	[-]								
5 %- und 95 %-Quantilwert $f_{ct,sp,is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
k_n ^{g)}	1,74	[-]	$f_{ct,sp,is,0,05}$ ^{h)}	3,0	[N/mm ²]					
			$f_{ct,sp,is,0,95}$ ^{h)}	5,8	[N/mm ²]					

Tab. VI. 4 Tropfkörper Kläranlage Blüemetal II, Pirmasens – Betonzugfestigkeit:
Einzelprüfwerte

Tropfkörper Kläranlage Blüemetal II, Pirmasens <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Bohrkernspaltzugfestigkeit f_{cti} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-6:2010-09</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
E 1-2	113,0	112,7		2,614	-	80600
E 2-2	113,4	116,3		2,703	-	108000
E 3-2	113,2	117,2		2,725	-	105500
E 5-1	113,0	116,3		2,709	-	64400
E 6-1	113,2	116,7		2,696	-	66700
E 7-1	113,1	116,6	zuvor E-Modul	2,720	-	63000
F 1-2	113,1	111,4		2,591	-	85200
F 2-2	113,0	116,8		2,697	-	69100
F 3-2	113,2	117,1		2,736	-	86800
F 5-1	113,2	115,8		2,714	-	92600
F 6-1	113,1	116,3		2,715	-	83300
G 1-2	113,3	116,9		2,716	-	56800
G 2-2	113,0	115,0		2,673	-	77100
G 3-2	113,1	115,6		2,703	-	90100
G 4-1	113,3	115,7		2,691	-	86500
G 5-1	113,3	116,8		2,709	-	75000
H 1-2	113,1	116,7		2,695	-	100000
H 2-2	113,3	114,9		2,672	-	100300
H 3-2	113,2	108,1	zuvor E-Modul	2,496	-	107400
H 4-1	113,1	115,6		2,652	-	89700
H 5-1	113,1	116,0		2,655	-	88600
H 6-1	113,2	114,7		2,666	-	86600
H 7-1	113,3	116,1		2,704	-	81500
I 1-2	113,3	114,4		2,679	-	95500
I 2-2	113,4	113,6		2,686	-	107300
I 3-2	113,4	114,5		2,691	-	106000

Tab. VI. 5 Autobahnunterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern – Betonzugfestigkeit

Autobahnunterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern <i>Thiele u. Weber 2016</i>										
Betonspaltzugfestigkeit										
Güte-/Festigkeitsklasse	B225	[-]								
Größtkorndurchmesser	16	[mm]								
Art Zuschlag	rund	[-]								
Karbonatisierung	nein	[-]								
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]								
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]								
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]								
Lagerung	nass	[-]								
Baujahr	1957	[-]								
Prüfdatum	2014	[-]								
Alter	57	[Jahre]								
Bohrkernspaltzugfestigkeit $f_{ct,sp,i}$ in N/mm² nach DIN EN 12390-6:2010-09										
1,5	3,4	3,8								
2,5	3,4	3,9								
2,7	3,5	3,9								
2,7	3,5	4,4								
2,8	3,6									
3,1	3,6									
3,1	3,6									
3,2	3,6									
3,3	3,6									
Parameter der Stichprobe										
Stichprobenumfang n	22	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	0,60	[N/mm ²]					
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	3,3	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,18	[-]					
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
Mittelwert μ_y ^{d)}	1,17	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,19	[-]					
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,22	[-]								
5 %- und 95 %-Quantilwert $f_{ct,sp,is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
k_n ^{g)}	1,76	[-]	$f_{ct,sp,is,0,05}$ ^{h)}	2,2	[N/mm ²]					
			$f_{ct,sp,is,0,95}$ ^{h)}	4,7	[N/mm ²]					

Tab. VI. 6 Autobahnunterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern – Betonzugfestigkeit:
Einzelprüfwerte

Autobahnunterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Bohrkernspaltzugfestigkeit f_{cti} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-6:2010-09</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
D 1-2 Z	99,1	100,7	zuvor E-Modul	-	1,825	55400
D 2-2 Z	99,0	101,7		-	1,838	48300
D 3-2 Z	98,9	104,0		-	1,872	55200
D 4-1 Z	98,7	102,4		-	1,838	56200
D 5-1 Z	98,3	101,3		-	1,842	54900
E 2-2 Z	98,5	102,0		-	1,84	51700
E 3-2 Z	98,4	100,7		-	1,815	23700
E 4-1 Z	98,5	102,4		-	1,828	60700
E 5-1 Z	98,5	102,8		-	1,835	49700
E 6-1 Z	98,5	101,0		-	1,836	38200
F 1-2 Z	98,5	106,1	zuvor E-Modul	-	1,889	71200
F 4-1 Z	98,4	101,6		-	1,84	56900
F 5-1 Z	98,4	102,6		-	1,821	60700
F 6-1 Z	98,3	101,5		-	1,797	43300
G 4-1 Z	98,6	102,5		-	1,804	57400
G 5-1 Z	98,5	103,5		-	1,806	57900
G 6-1 Z	98,3	104,0	unnormaler Bruch	-	1,817	53500
H 2-2 Z	99,5	102,2		-	1,886	60300
H 3-2 Z	99,5	102,0		-	1,883	50500
H 4-1 Z	99,4	104,0		-	1,899	42700
H 5-1 Z	99,7	101,4		-	1,875	42100
H 6-1 Z	99,6	102,0		-	1,869	55700

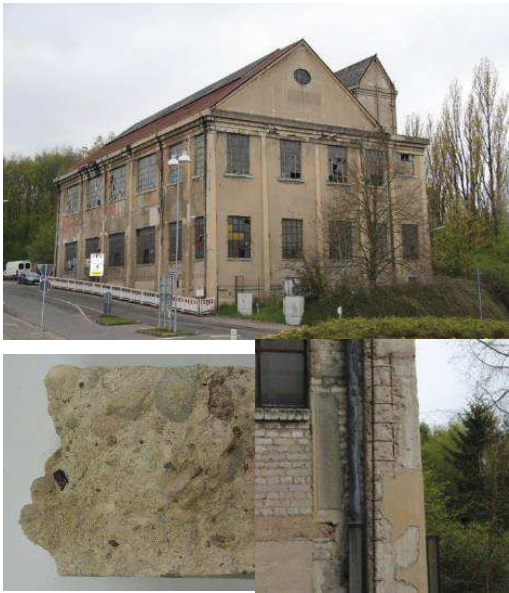
Tab. VI. 7 Autobahnunterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern – Betonzugfestigkeit

Autobahnunterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern Thiele u. Weber 2016										
Betonspaltzugfestigkeit										
Güte-/Festigkeitsklasse	B225	[-]								
Größtkorndurchmesser	16	[mm]								
Art Zuschlag	rund	[-]								
Karbonatisierung	nein	[-]								
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]								
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]								
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]								
Lagerung	nass	[-]								
Baujahr	1957	[-]								
Prüfdatum	2014	[-]								
Alter	57	[Jahre]								
Bohrkernspaltzugfestigkeit $f_{ct,sp,i}$ in N/mm ² nach DIN EN 12390-6:2010-09										
2,1	3,6	4,0					5,3			
2,3	3,6	4,0								
2,9	3,6	4,1								
2,9	3,7	4,3								
3,2	3,7	4,3								
3,4	3,7	4,4								
3,5	3,9	4,6								
3,5	3,9	4,6								
3,5	3,9	4,9								
Parameter der Stichprobe										
Stichprobenumfang n	28	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	0,71	[N/mm ²]					
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	3,7	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,19	[-]					
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
Mittelwert μ_y ^{d)}	1,30	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,16	[-]					
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,21	[-]								
5 %-Quantilwert $f_{ck,is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
k_n ^{g)}	1,73	[-]	$f_{ct,sp,is,0,05}$ ^{h)}	2,6	[N/mm ²]					
			$f_{ct,sp,is,0,95}$ ^{h)}	5,2	[N/mm ²]					

Tab. VI. 8 Autobahnunterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern – Betonzugfestigkeit:
Einzelprüfwerte

Autobahnunterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Bohrkernspaltzugfestigkeit f_{cti} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-6:2010-09</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast <i>F</i>
				trocken	nass	
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
A 1-2 Z	98,7	100,4	zuvor E-Modul	-	1,821	63900
A 2-2 Z	98,5	100,7		-	1,825	57900
A 3-2 Z	98,5	101,5		-	1,821	53400
A 4-1 Z	98,9	101,4		-	1,829	55700
A 5-1 Z	98,4	100,6		-	1,822	60900
A 6-1 Z	98,5	102,0		-	1,822	62500
A 7-1 Z	98,5	101,0		-	1,819	35900
B 1-2 Z	98,9	94,1	zuvor E-Modul	-	1,718	62100
B 3-2 Z	99,0	101,0		-	1,832	54600
B 4-1 Z	99,0	101,9		-	1,855	72400
B 5-1 Z	99,0	102,0		-	1,877	45200
B 6-1 Z	99,0	101,0		-	1,85	56200
C 1-2 Z	98,8	98,5	zuvor E-Modul	-	1,773	74000
C 2-2 Z	98,7	101,8		-	1,844	56700
C 3-2 Z	98,8	100,0		-	1,819	43900
C 5-1 Z	98,7	101,3		-	1,831	60800
C 6-1 Z	98,8	102,5		-	1,856	84200
I 1-2 Z	99,4	97,6	zuvor E-Modul	-	1,776	53700
I 2-2 Z	99,6	102,4		-	1,874	63300
I 3-2 Z	99,7	102,3		-	1,872	58600
I 4-1 Z	99,6	101,6		-	1,883	73500
I 5-1 Z	99,6	102,0		-	1,875	67500
I 6-1 Z	99,6	101,9		-	1,864	54900
K 2-2 Z	98,5	101,0		-	1,811	32400
K 3-2 Z	98,6	103,0		-	1,873	50700
K 4-1 Z	98,6	101,3		-	1,844	58200
K 5-1 Z	98,6	101,7		-	1,859	61300
K 6-1 Z	98,7	102,6		-	1,846	68900


Tab. VI. 9 Umspannwerk, Sulzbach – Betonzugfestigkeit

Umspannwerk, Sulzbach <i>Thiele u. Weber 2016</i>										
Betonspaltzugfestigkeit										
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]								
Größtkorndurchmesser	16	[mm]								
Art Zuschlag	rund	[-]								
Karbonatisierung	nein	[-]								
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]								
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]								
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]								
Lagerung	trocken	[-]								
Baujahr	1925	[-]								
Prüfdatum	2013	[-]								
Alter	88	[Jahre]								
Bohrkernspaltzugfestigkeit $f_{ct,sp,i}$ in N/mm² nach DIN EN 12390-6:2010-09										
1,5	2,1	2,5								
1,9	2,2	2,5								
1,9	2,2	2,6								
1,9	2,3	2,6								
2,0	2,4	2,6								
2,0	2,4	2,7								
2,0	2,5	2,8								
2,1	2,5	3,0								
2,1	2,5	3,0								
Parameter der Stichprobe										
Stichprobenumfang n	27	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	0,36	[N/mm ²]					
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	2,3	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,16	[-]					
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
Mittelwert μ_y ^{d)}	0,82	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,19	[-]					
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,16	[-]								
5 %- und 95 %-Quantilwert $f_{ct,sp,is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
k_n ^{g)}	1,74	[-]	$f_{ct,sp,is,0,05}$ ^{h)}	1,7	[N/mm ²]					
			$f_{ct,sp,is,0,95}$ ^{h)}	3,0	[N/mm ²]					

Tab. VI. 10 Umspannwerk, Sulzbach – Betonzugfestigkeit: Einzelprüfwerte

Umspannwerk, Sulzbach <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Bohrkernspaltzugfestigkeit f_{cti} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-6:2010-09</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
1,1	99,6	101,1		1,803	-	43600
1,3	99,7	101,1		1,594	-	43100
1,4	99,6	101,3		1,640	-	29900
2,1	99,9	101,8		1,802	-	39500
2,2	100,0	101,7		1,860	-	47800
2,3	99,9	102,4		1,805	-	48400
2,4	100,0	100,4		1,748	-	38800
2,5	100,3	100,2		1,723	-	31300
2,6	99,6	100,8	Auskerbung an Probenunterseite	1,736	-	39900
3,1	99,8	100,1		1,673	-	35800
3,2	99,6	100,2		1,719	-	32000
3,3	99,7	101,5	Auskerbung an Probenoberseite	1,760	-	30700
3,4	99,7	101,8		1,677	-	30100
3,5	99,6	99,8		1,656	-	38200
4,1	99,8	101,0		1,763	-	37700
4,2	99,9	100,6		1,719	-	40300
4,4	99,8	99,9		1,697	-	38700
4,5	99,8	101,6	Ausschalung Kieskorn	1,721	-	34900
5,1	99,7	101,2		1,713	-	29700
5,2	99,7	103,1		1,803	-	39800
5,3	99,7	102,8		1,733	-	35700
6,2	99,8	101,4		1,788	-	38400
6,4	99,8	100,0		1,727	-	39700
6,5	99,7	101,1		1,797	-	32100
6,6	99,7	100,4		1,768	-	23900
7,2	99,9	100,2		1,761	-	31200
7,4	99,4	101,3		1,776	-	32600


Tab. VI. 11 Bodenplatte ACO, Kaiserslautern – Betonzugfestigkeit

Bodenplatte ACO, Kaiserslautern Thiele u. Weber 2016						
Betonspaltzugfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	16	[mm]				
Art Zuschlag	gebrochen	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	parallel	[-]				
Lagerung	nass	[-]				
Baujahr	unbekannt	[-]				
Prüfdatum	2015	[-]				
Alter	-	[Jahre]				
Bohrkernspaltzugfestigkeit $f_{ct,sp,i}$ in N/mm² nach DIN EN 12390-6:2010-09						
3,0	4,1	4,5				
3,7	4,1	4,5				
3,8	4,2					
3,8	4,2					
3,8	4,2					
3,9	4,2					
3,9	4,3					
4,0	4,4					
4,0	4,4					
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	20	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	0,35	[N/mm ²]	
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	4,0	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,09	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert μ_y ^{d)}	1,39	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,07	[-]	
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,09	[-]				
5 %- und 95 %-Quantilwert $f_{ct,sp,is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
k_n ^{g)}	1,77	[-]	$f_{ct,sp,is,0,05}$ ^{h)}	3,4	[N/mm ²]	
			$f_{ct,sp,is,0,95}$ ^{h)}	4,7	[N/mm ²]	

Tab. VI. 12 Bodenplatte ACO, Kaiserslautern – Betonzugfestigkeit: Einzelprüfwerte

Bodenplatte ACO, Kaiserslautern Thiele u. Weber 2016						
Bohrkernspaltzugfestigkeit f_{cti} in N/mm² nach DIN EN 12390-6:2010-09						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
A3	99,6	99,6		-	1,755	66200
A4	99,5	97,7		-	1,683	57300
A7	99,6	102,4		-	1,775	65800
B1	99,7	102,6		-	1,800	70200
B3	99,6	101,9		-	1,795	66600
B5	99,6	96,4		-	1,706	67900
B6	99,7	97,5		-	1,705	57300
C1	99,6	89,5		-	1,575	62200
C2	99,6	89,5		-	1,554	41600
C3	99,6	94,1		-	1,655	54600
C7	99,6	102,1		-	1,774	62800
D3	99,7	93,6		-	1,652	55900
D4	99,5	87,6		-	1,548	57000
D5	99,7	94,9		-	1,669	64700
D8	99,6	100,8		-	1,800	66000
D9	99,8	100,7		-	1,775	63200
E1	99,7	100,1		-	1,762	60000
E2	99,6	101,0		-	1,768	66400
E6	99,5	99,0		-	1,728	63400
E7	99,6	100,3		-	1,764	60400

Tab. VI. 13 Stützwand Ohmbach Abschnitt I, Pirmasens – Betonzugfestigkeit

Stützwand Ohmbach Abschnitt I, Pirmasens <i>Thiele u. Weber 2016</i>									
Betonspaltzugfestigkeit									
Güte-/Festigkeitsklasse	-		[-]						
Größtkorndurchmesser	16		[mm]						
Art Zuschlag	rund		[-]						
Karbonatisierung	nein		[-]						
Bohrkerndurchmesser	113		[mm]						
Bohrkernschlankheit	113/113		[mm]						
Entnahmerichtung	senkrecht		[-]						
Lagerung	nass		[-]						
Baujahr	1983		[-]						
Prüfdatum	2012		[-]						
Alter	29		[Jahre]						
Bohrkernspaltzugfestigkeit $f_{ct,sp,i}$ in N/mm² nach DIN EN 12390-6:2010-09									
3,5	3,9	4,2	4,6						
3,6	4,0	4,2	4,6						
3,6	4,0	4,2	4,6						
3,6	4,1	4,2	4,7						
3,7	4,1	4,4	4,7						
3,7	4,1	4,4	4,8						
3,8	4,1	4,5	4,9						
3,9	4,1	4,5	5,4						
3,9	4,1	4,5							
Parameter der Stichprobe									
Stichprobenumfang n	35	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	0,43	[N/mm ²]				
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	4,2	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,10	[-]				
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12									
Mittelwert μ_y ^{d)}	1,43	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,07	[-]				
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,10	[-]							
5 %- und 95 %-Quantilwert $f_{ct,sp,is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12									
k_n ^{g)}	1,71	[-]	$f_{ct,sp,is,0,05}$ ^{h)}	3,5	[N/mm ²]				
			$f_{ct,sp,is,0,95}$ ^{h)}	4,9	[N/mm ²]				

Tab. VI. 14 Stützwand Ohmbach Abschnitt I, Pirmasens – Betonzugfestigkeit: Einzelprüfwerte

Stützwand Ohmbach Abschnitt I, Pirmasens <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Bohrkernspaltzugfestigkeit f_{cti} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-6:2010-09</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
SZ-A1	113,5	112,7		2,614	2,631	87120
SZ-A2	113,8	113,0		2,615	2,633	93180
SZ-A3	113,8	113,5		2,673	2,688	80120
SZ-A4	113,8	114,0		2,656	2,679	76220
SZ-A5	113,8	115,9		2,698	2,714	94750
SZ-B1	113,5	113,5		2,620	2,641	82460
SZ-B2	113,5	114,4		2,650	2,672	73100
SZ-B3	113,5	114,6		2,664	2,677	94900
SZ-B4	113,5	113,9		2,641	2,659	91680
SZ-B5	113,4	113,5		2,614	2,634	78760
SZ-C1	113,5	114,9		2,640	2,673	73230
SZ-C2	113,5	114,4		2,667	2,683	91690
SZ-C3	113,3	113,0		2,579	2,612	71350
SZ-C4	113,5	113,2		2,594	2,627	71040
SZ-C5	113,6	114,7		2,667	2,684	85940
SZ-D1	113,3	114,0		2,630	2,645	99010
SZ-D2	113,5	112,0		2,570	2,594	73080
SZ-D3	113,4	113,0		2,560	2,616	78300
SZ-D4	113,4	114,9		2,650	2,663	84880
SZ-D5	113,5	113,6		2,604	2,62	82030
SZ-E1	113,3	113,4		2,620	2,641	92840
SZ-E2	113,5	113,0		2,635	2,65	89650
SZ-E3	113,6	114,1		2,672	2,697	74810
SZ-E4	113,3	114,4		2,638	2,663	83360
SZ-E5	113,6	114,4		2,661	2,674	95760
SZ-F1	113,4	113,8		2,662	2,675	87840
SZ-F2	113,4	112,9		2,649	2,663	95740
SZ-F3	113,3	113,0		2,647	2,659	107800
SZ-F4	113,4	113,8		2,635	2,659	79280
SZ-F5	113,6	113,3		2,628	2,652	80270
SZ-M1	113,0	113,3		2,624	2,65	82180
SZ-M2	113,3	115,0		2,667	2,694	84760
SZ-M3	113,4	114,2		2,651	2,665	83810
SZ-M4	113,3	110,6		2,557	2,572	80500
SZ-M5	113,0	113,7		2,620	2,643	83850


Tab. VI. 15 Stützwand Ohmbach Abschnitt II, Pirmasens – Betonzugfestigkeit

Stützwand Ohmbach Abschnitt II, Pirmasens <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Betonspaltzugfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	16	[mm]				
Art Zuschlag	rund	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	113	[mm]				
Bohrkernschlankheit	113/113	[mm]				
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]				
Lagerung	nass	[-]				
Baujahr	1983	[-]				
Prüfdatum	2012	[-]				
Alter	29	[Jahre]				
Bohrkernspaltzugfestigkeit $f_{ct,sp,i}$ in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-6:2010-09</i>						
2,6	3,4	4,2				
2,7	3,5	4,3				
2,8	3,7	4,3				
2,8	3,7	4,3				
3,1	3,7	4,7				
3,1	3,7	4,9				
3,1	3,7					
3,3	3,8					
3,3	4,0					
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	24	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	0,62	[N/mm ²]	
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	3,6	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,17	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach <i>DIN EN 1990:2010-12</i>						
Mittelwert μ_y ^{d)}	1,26	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,14	[-]	
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,17	[-]				
5 %- und 95 %-Quantilwert $f_{ct,sp,is}$ – logarithmische Normalverteilung nach <i>DIN EN 1990:2010-12</i>						
k_n ^{g)}	1,75	[-]	$f_{ct,sp,is,0,05}$ ^{h)}	2,6	[N/mm ²]	
			$f_{ct,sp,is,0,95}$ ^{h)}	4,8	[N/mm ²]	

Tab. VI. 16 Stützwand Ohmbach Abschnitt II, Pirmasens – Betonzugfestigkeit: Einzelprüfwerte

Stützwand Ohmbach Abschnitt II, Pirmasens <i>Thiele u. Weber 2016</i>						
Bohrkernspaltzugfestigkeit f_{cti} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-6:2010-09</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
SZ-G1	113,9	112,9		2,638	2,658	77100
SZ-G2	113,2	113,6		2,588	2,617	56380
SZ-G3	114,0	112,7		2,608	2,633	73730
SZ-G4	113,9	113,6		2,631	2,664	55270
SZ-G5	113,8	111,7		2,611	2,633	73760
SZ-H1	113,4	112,9		2,603	2,62	73460
SZ-H2	113,6	112,6		2,606	2,626	85850
SZ-H3	113,3	115,1		2,634	2,67	62490
SZ-H4	113,2	110,8		2,524	2,557	72180
SZ-H5	113,3	113,0		2,624	2,642	69980
SZ-J1	113,0	112,6		2,583	2,609	73050
SZ-J2	113,3	115,0		2,656	2,677	80680
SZ-J3	113,4	112,2		2,580	2,606	51710
SZ-J4	113,3	114,4		2,666	2,683	86090
SZ-J5	113,3	113,8		2,630	2,65	85320
SZ-K1	113,4	112,0		2,624	2,646	65070
SZ-K2	113,4	112,1		2,540	2,597	61000
SZ-K3	113,4	113,0		2,620	2,636	94200
SZ-K4	113,4	113,8		2,605	2,639	68700
SZ-K5	113,4	113,0		2,695	2,716	61890
SZ-L1	113,2	112,4		2,557	2,693	64570
SZ-L2	113,3	110,6		2,527	2,553	55230
SZ-L3	113,6	112,0		2,599	2,618	85640
SZ-L4	113,3	110,0		2,575	2,59	95410


Tab. VI. 17 Weserbrücke, Hannoversch Münden – Betonzugfestigkeit

Weserbrücke, Hannoversch Münden Thiele u. Weber 2016						
Betonspaltzugfestigkeit						
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]				
Größtkorndurchmesser	-	[mm]				
Art Zuschlag	-	[-]				
Karbonatisierung	nein	[-]				
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]				
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]				
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]				
Lagerung	trocken	[-]				
Baujahr	1960	[-]				
Prüfdatum	2013	[-]				
Alter	53	[Jahre]				
Bohrkernspaltzugfestigkeit $f_{ct,sp,i}$ in N/mm² nach DIN EN 12390-6:2010-09						
3,5	4,9					
3,5						
3,5						
3,9						
4,0						
4,1						
4,3						
4,4						
4,5						
Parameter der Stichprobe						
Stichprobenumfang n	10	[-]	Standardabweichung s_x ^{a)}	0,46	[N/mm ²]	
Mittelwert \bar{x} ^{b)}	4,1	[N/mm ²]	Variationskoeffizient v_x ^{c)}	0,11	[-]	
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
Mittelwert μ_y ^{d)}	1,39	[-]	Variationskoeffizient v_y ^{f)}	0,08	[-]	
Standardabweichung σ_y ^{e)}	0,11	[-]				
5 %- und 95 %-Quantilwert $f_{ct,sp,is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12						
k_n ^{g)}	1,92	[-]	$f_{ct,sp,is,0,05}$ ^{h))}	3,2	[N/mm ²]	
			$f_{ct,sp,is,0,95}$ ^{h)}	5,0	[N/mm ²]	

Tab. VI. 18 Weserbrücke, Hannoversch Münden – Betonzugfestigkeit: Einzelprüfwerte

Weserbrücke, Hannoversch Münden Thiele u. Weber 2016						
Bohrkernspaltzugfestigkeit f_{cti} in N/mm² nach DIN EN 12390-6:2010-09						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
12-70	94,0	202,0		3,227	-	116000
14-70	94,0	200,6		3,211	-	143000
17-70	94,5	188,9		3,200	-	112000
18-70	94,7	201,4		3,226	-	105000
21-70	93,9	202,5	Masse falsch		-	131000
23-70	94,5	201,4		3,276	-	104000
6-70	94,6	203,0	10er/nicht in Bruchzone	3,285	-	130000
8-70	94,3	200,5		3,295	-	104000
11-70	94,5	187,7		3,235	-	124000
25-70	93,8	176,3		2,894	-	106000

Tab. VI. 19 Lautertalbrücke Widerlager, Kaiserslautern – Betonzugfestigkeit

Lautertalbrücke Widerlager, Kaiserslautern										
Betonspaltzugfestigkeit										
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]								
Größtkorndurchmesser	32	[mm]								
Art Zuschlag	rund	[-]								
Karbonatisierung	nein	[-]								
Bohrkerndurchmesser	100	[mm]								
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]								
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]								
Lagerung	nass	[-]								
Baujahr	1936	[-]								
Prüfdatum	2016	[-]								
Alter	80	[Jahre]								
Bohrkernspaltzugfestigkeit $f_{ct,sp,i}$ in N/mm² nach DIN EN 12390-6:2010-09										
3,9	4,6	5,0								
4,0	4,7	5,1								
4,0	4,7	5,2								
4,0	4,7	5,5								
4,3	4,8	5,8								
4,4	4,8	6,0								
4,5	4,8									
4,5	5,0									
4,6	5,0									
Parameter der Stichprobe										
Stichprobenumfang n	24	[-]	Standardabweichung $s_x^{a)}$	0,54	[N/mm ²]					
Mittelwert $\bar{x}^{b)}$	4,7	[N/mm ²]	Variationskoeffizient $v_x^{c)}$	0,11	[-]					
Parameter der Grundgesamtheit – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
Mittelwert $\mu_y^{d)}$	1,54	[-]	Variationskoeffizient $v_y^{f)}$	0,07	[-]					
Standardabweichung $\sigma_y^{e)}$	0,11	[-]								
5 %- und 95 %-Quantilwert $f_{ct,sp,is}$ – logarithmische Normalverteilung nach DIN EN 1990:2010-12										
$k_n^{g)}$	1,75	[-]	$f_{ct,sp,is,0,05}^{h)}$	3,8	[N/mm ²]					
			$f_{ct,sp,is,0,95}^{h)}$	5,7	[N/mm ²]					

Tab. VI. 20 Lautertalbrücke Widerlager, Kaiserslautern – Betonzugfestigkeit: Einzelprüfwerte

Lautertalbrücke Widerlager, Kaiserslautern						
Bohrkernspaltzugfestigkeit f_{cti} in N/mm ² nach <i>DIN EN 12390-6:2010-09</i>						
Einzelprüfwerte						
Bezeichnung	ϕ_m	h_m	Bemerkung	Masse ²⁾		Bruchlast
				trocken	nass	F
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[kg]	[N]
W-A-1-1	100	95,6		-	1,824	68670
W-A-2-2	100	101,7		-	1,857	79620
W-A-3-1	99,8	100,5		-	1,889	93850
W-A-4-2	99,7	100,5		-	1,836	85580
W-A-5	100,0	97,7		-	1,794	78700
W-A-6-1	100,0	100,2		-	1,835	78770
W-A-7-1	100,0	99,7		-	1,841	74190
W-A-8-1	100,0	102,4		-	1,893	68250
W-A-9-2	99,9	100,6		-	1,856	75300
W-A-10-1	99,9	100,5		-	1,884	73980
W-A-13-2	100,1	100,0		-	1,886	73700
W-A-16-2	100,0	101,8		-	1,893	91680
W-B-1-2	100,0	99,5		-	1,859	70470
W-B-2-1	100,0	100,8		-	1,876	73440
W-B-3-2	100,1	100,5		-	1,844	68620
W-B-4-2	100,0	100,5		-	1,838	62050
W-B-5	100,0	98,8		-	1,818	71600
W-B-6-2	100,0	101,0		-	1,862	80460
W-B-7	100,1	96,6		-	1,793	67800
W-B-8-1	100,1	99,9		-	1,842	75560
W-B-11-1	100,1	99,1		-	1,844	77080
W-B-12	100,1	95,5		-	1,789	58000
W-B-14-2	100,0	100,7		-	1,878	62140
W-B-15-2	100,0	100,6		-	1,871	62240

In den nachfolgenden Tabellen Tab. VI. 21 bis Tab. VI. 25 sind die Kenndaten der durch eine Anfrage und Recherche ermittelten Zug- und zugehörigen Druckfestigkeitsuntersuchungen an bestehenden Massivbauwerken durch Bohrkernentnahmen dargestellt. Die Daten wurden im Rahmen von *Meiswinkel 2012* ermittelt. Ein Schwerpunkt liegt auf der Betrachtung von Untersuchungsergebnissen an bestehenden Wasserbauwerken, welche von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) zur Verfügung gestellt wurden. Es werden jeweils die folgenden Kenngrößen angegeben:

n_{DF}	Stichprobenumfang zur Druckfestigkeitsuntersuchung
$f_{cm, is, BK}$	arithmetisches Mittel der an trocken gelagerten Bohrkernen mit $\lambda = h/d = 1,0$ geprüften Betondruckfestigkeiten
$s_{x, DF}$	empirische Standardabweichung der an trocken gelagerten Bohrkernen mit $\lambda = h/d = 1,0$ geprüften Betondruckfestigkeiten
$V_{x, DF}$	empirischer Variationskoeffizient der an trocken gelagerten Bohrkernen mit $\lambda = h/d = 1,0$ geprüften Betondruckfestigkeiten
$f_{ck, is, BK}$	charakteristische In-situ-Betondruckfestigkeit (5 %-Quantil) der an trocken gelagerten Bohrkernen mit $\lambda = h/d = 1,0$ geprüften Betondruckfestigkeiten, bestimmt mit einer logarithmischen Normalverteilung nach <i>DIN EN 1990:2010-12</i>
$f_{ck, is, cyl}$	charakteristische In-situ-Betondruckfestigkeit (5 %-Quantil), angepasst mit den in Kapitel 3.4.2 genannten Umrechnungsfaktoren auf den nassgelagerten Normzylinder mit $\lambda = h/d = 2,0$
n_{SZ}	Stichprobenumfang zur Untersuchung der Spaltzugfestigkeit
$f_{ct, sp, m, is}$	arithmetisches Mittel der an nass gelagerten Bohrkernen mit $\lambda = h/d = 1,0$ geprüften Spaltzugfestigkeit
$f_{ctm, is}$	arithmetisches Mittel der zentrischen Zugfestigkeit, berechnet aus der Spaltzugfestigkeit mit dem in Gleichung 9.9 genannten Zusammenhang
$s_{x, SZF}$	empirische Standardabweichung der an nass gelagerten Bohrkernen mit $\lambda = h/d = 1,0$ geprüften Spaltzugfestigkeiten
$V_{x, SZF}$	empirischer Variationskoeffizient der an nass gelagerten Bohrkernen mit $\lambda = h/d = 1,0$ geprüften Spaltzugfestigkeiten
$f_{ctk, is; 0,05}$	aus dem mit einer LNV nach <i>DIN EN 1990:2010-12</i> bestimmten 5 %-Quantil der In-situ-Spaltzugfestigkeit mit dem in Gleichung (9.9) genannten Zusammenhang abgeleiteter 5 %-Quantilwert der zentrischen In-situ-Zugfestigkeit
$f_{ctk, is; 0,95}$	aus dem mit einer LNV nach <i>DIN EN 1990:2010-12</i> bestimmten 95 %-Quantil der In-situ-Spaltzugfestigkeit mit dem in Gleichung (9.9) genannten Zusammenhang abgeleiteter 95 %-Quantilwert der zentrischen In-situ-Zugfestigkeit

Legende zu den Tabellen

- a) gibt an, ob nach der Vorbereitung der Probekörper durch Nassschneiden und Schleifen noch Teile des Probekörpers karbonatisiert waren

Tab. VI. 21 Kenndaten der durch eine Anfrage und Recherche ermittelten Zug- und Druckfestigkeitsuntersuchungen an bestehenden Massivbauwerken – Teil I

		Lautertalbrücke A6 - aktuell - Pfeiler A	Lautertalbrücke A6 - aktuell Pfeiler B	Lautertalbrücke A6 - aktuell Pfeiler C	Lautertalbrücke A6 - aktuell - Pfeiler D	Lautertalbrücke A6 - aktuell - Pfeiler E	Lautertalbrücke A6 - aktuell - Pfeiler F
Allgemeine Kenndaten							
Baujahr	[-]	1936	1936	1936	1936	1936	1936
Prüfdatum	[-]	2012	2012	2012	2012	2012	2012
Alter	[Jahre]	77	77	77	77	77	77
Karbonatisierung ^{a)}	[-]	ja	ja	ja	ja	ja	ja
In-situ-Druckfestigkeit							
n_{DF}	[-]	8	5	13	14	8	4
$f_{cm, is, BK}$	[N/mm ²]	43,2	40,8	24,5	41,2	34,5	39,7
$S_{x, DF}$	[N/mm ²]	7,80	25,95	12,21	13,38	8,57	23,81
$V_{x, DF}$	[-]	0,18	0,64	0,50	0,32	0,25	0,60
$f_{ck, is, BK}$	[N/mm ²]	29,5	8,5	7,7	20,5	20,4	5,9
$f_{ck, is, cyl}$	[N/mm ²]	24,2	7,0	6,3	16,8	16,7	4,8
In-situ-Zugfestigkeit							
n_{SZ}	[-]	10	6	15	18	9	3
$f_{ct, sp, m, is}$	[N/mm ²]	3,0	1,1	1,8	2,3	2,4	4,1
$f_{ctm, is}$	[N/mm ²]	2,7	1,0	1,6	2,0	2,2	3,7
$S_{x, SZF}$	[N/mm ²]	0,49	0,35	0,67	0,79	0,43	0,36
$V_{x, SZF}$	[-]	0,16	0,32	0,37	0,35	0,18	0,09
$f_{ctk, is; 0,05}$	[N/mm ²]	2,0	0,5	0,8	1,0	1,5	2,7
$f_{ctk, is; 0,95}$	[N/mm ²]	3,7	1,8	3,0	3,7	3,0	5,0

Tab. VI. 22 Kenndaten der durch eine Anfrage und Recherche ermittelten Zug- und Druckfestigkeitsuntersuchungen an bestehenden Massivbauwerken – Teil II

		Schleuse Eibach	Schleuse Nürnberg	Schleuse Kriegenbrunn	1. Schleuse Zeltlingen	Schleuse Hausen	Schleuse Erlangen
Allgemeine Kenndaten							
Baujahr	[-]	1984	1978	1977	1975	1975	1975
Prüfdatum	[-]	-	-	-	-	-	-
Alter	[Jahre]	28	34	35	37	37	37
Karbonatisierung ^{a)}	[-]	-	-	-	-	-	-
In-situ-Druckfestigkeit							
n_{DF}	[-]	29	18	17	44	17	45
$f_{cm, is, BK}$	[N/mm ²]	46,1	56,8	35,8	51,1	36,5	47,5
$s_{x, DF}$	[N/mm ²]	5,40	8,60	7,30	7,90	7,04	4,60
$v_{x, DF}$	[-]	0,12	0,15	0,20	0,15	0,19	0,10
$f_{ck, is, BK}$	[N/mm ²]	37,4	42,9	24,4	38,8	25,4	40,0
$f_{ck, is, cyl}$	[N/mm ²]	28,2	32,4	18,4	29,2	19,2	30,2
In-situ-Zugfestigkeit							
n_{SZ}	[-]	29	18	16	44	17	35
$f_{ct, sp, m, is}$	[N/mm ²]	4,3	4,4	3,0	2,5	2,6	3,2
$f_{ctm, is}$	[N/mm ²]	3,9	3,9	2,7	2,3	2,3	2,9
$s_{x, SZF}$	[N/mm ²]	0,60	0,78	0,49	0,54	0,74	0,50
$v_{x, SZF}$	[-]	0,13	0,18	0,17	0,22	0,28	0,16
$f_{ctk, is; 0,05}$	[N/mm ²]	3,1	2,8	1,9	1,5	1,4	2,2
$f_{ctk, is; 0,95}$	[N/mm ²]	4,8	5,3	3,5	3,2	3,7	3,7

Tab. VI. 23 Kenndaten der durch eine Anfrage und Recherche ermittelten Zug- und Druckfestigkeitsuntersuchungen an bestehenden Massivbauwerken – Teil III

		Schleuse Bamberg 2004	Schleuse Strullendorf	Schleuse Wipfeld	Schleuse Guttenbach Mittelmauer	Schleuse Guttenbach Landseitige Kammerwand	2. Schleuse Schwabenheim
Allgemeine Kenndaten							
Baujahr	[-]	1974	1973	1964	1964	1964	1963
Prüfdatum	[-]	-	-	-	-	-	-
Alter	[Jahre]	38	39	48	48	48	49
Karbonatisierung ^{a)}	[-]	-	-	-	-	-	-
In-situ-Druckfestigkeit							
n_{DF}	[-]	17	38	20	25	30	28
$f_{cm, is, BK}$	[N/mm ²]	51,7	46,3	33,9	28,0	53,2	53,1
$s_{x, DF}$	[N/mm ²]	6,30	4,23	5,20	4,21	8,20	8,40
$v_{x, DF}$	[-]	0,12	0,09	0,15	0,15	0,15	0,16
$f_{ck, is, BK}$	[N/mm ²]	41,2	39,4	25,6	21,3	40,3	40,0
$f_{ck, is, cyl}$	[N/mm ²]	31,1	29,7	19,3	16,1	30,4	30,1
In-situ-Zugfestigkeit							
n_{SZ}	[-]	18	35	20	37	46	21
$f_{ct, sp, m, is}$	[N/mm ²]	4,5	3,5	2,0	2,0	4,1	2,7
$f_{ctm, is}$	[N/mm ²]	4,0	3,2	1,8	1,8	3,7	2,5
$s_{x, SZF}$	[N/mm ²]	0,49	0,51	0,47	0,35	-	0,69
$v_{x, SZF}$	[-]	0,11	0,15	0,23	0,17	-	0,25
$f_{ctk, is; 0,05}$	[N/mm ²]	3,3	2,4	1,2	1,3	-	1,5
$f_{ctk, is; 0,95}$	[N/mm ²]	4,9	4,0	2,7	2,4	-	3,7

Tab. VI. 24 Kenndaten der durch eine Anfrage und Recherche ermittelten Zug- und Druckfestigkeitsuntersuchungen an bestehenden Massivbauwerken – Teil IV

		Wehranlage Untertürkheim Wehrfeiler 1, Materialbereich 1	Wehranlage Untertürkheim, Wehrfeiler 5	Havel Größtkorn 32 mm	Schleuse Obernau	Schleuse Neckarsteinach Schleusenkammerwand Betonsorte IV	"Doppelschleuse Kachlet
Allgemeine Kenndaten							
Baujahr	[-]	1952	1952	1952	1941	1939	1932
Prüfdatum	[-]	-	-	-	-	-	-
Alter	[Jahre]	60	60	60	71	73	80
Karbonatisierung ^{a)}	[-]	-	-	-	-	-	-
In-situ-Druckfestigkeit							
n_{DF}	[-]	19	21	45	25	17	43
$f_{cm, is, BK}$	[N/mm ²]	41,0	40,0	44,6	29,9	32,5	16,4
$s_{x, DF}$	[N/mm ²]	6,10	13,90	7,20	10,20	7,64	8,69
$v_{x, DF}$	[-]	0,15	0,35	0,16	0,34	0,24	0,53
$f_{ck, is, BK}$	[N/mm ²]	31,4	20,8	33,4	15,9	20,8	6,2
$f_{ck, is, cyl}$	[N/mm ²]	23,7	15,7	25,2	12,0	15,7	4,6
In-situ-Zugfestigkeit							
n_{SZ}	[-]	10	10	22	16	26	41
$f_{ct, sp, m, is}$	[N/mm ²]	2,4	2,3	2,9	1,8	2,9	1,2
$f_{ctm, is}$	[N/mm ²]	2,1	2,0	2,6	1,6	2,6	1,1
$s_{x, SZF}$	[N/mm ²]	0,60	0,47	0,47	0,78	0,57	0,63
$v_{x, SZF}$	[-]	0,26	0,21	0,16	0,43	0,19	0,51
$f_{ctk, is; 0,05}$	[N/mm ²]	1,3	1,3	2,0	0,7	1,9	0,4
$f_{ctk, is; 0,95}$	[N/mm ²]	3,3	3,0	3,5	3,2	3,6	2,3

Tab. VI. 25 Kenndaten der durch eine Anfrage und Recherche ermittelten Zug- und Druckfestigkeitsuntersuchungen an bestehenden Massivbauwerken – Teil V

		"Doppelschleuse Kachlet Nordkammer"	Wehranlage Duisburg VP1+VP2	Wehranlage Duisburg VP4+VP5	Neue Schleuse Brunsbüttel Betonsorte III	Wehr Neckarsulm LIII/RIII	Schleusengruppe Kiel-Holtenu "Große Schleuse"
Allgemeine Kenndaten							
Baujahr	[-]	1932	1930	1930	1929	1929	1916
Prüfdatum	[-]	-	-	-	-	-	-
Alter	[Jahre]	80	82	82	83	83	96
Karbonatisierung ^{a)}	[-]	-	-	-	-	-	-
In-situ-Druckfestigkeit							
n_{DF}	[-]	39	22	15	100	14	11
$f_{cm, is, BK}$	[N/mm ²]	21,3	35,8	52,9	21,2	56,3	18,0
$S_{x, DF}$	[N/mm ²]	11,31	12,37	9,67	9,00	14,24	-
$V_{x, DF}$	[-]	0,53	0,35	0,18	0,42	0,25	-
$f_{ck, is, BK}$	[N/mm ²]	8,0	18,7	37,4	9,9	34,6	18,2
$f_{ck, is, cyl}$	[N/mm ²]	6,0	14,1	28,2	7,5	26,1	13,7
In-situ-Zugfestigkeit							
n_{SZ}	[-]	35	24	15	97	14	10
$f_{ct, sp, m, is}$	[N/mm ²]	1,6	2,6	3,3	1,1	3,9	1,5
$f_{ctm, is}$	[N/mm ²]	1,5	2,4	3,0	0,9	3,5	1,4
$S_{x, SZF}$	[N/mm ²]	0,86	0,61	0,52	0,47	-	-
$V_{x, SZF}$	[-]	0,53	0,23	0,16	0,45	-	-
$f_{ctk, is; 0,05}$	[N/mm ²]	0,6	1,5	2,2	0,4	-	-
$f_{ctk, is; 0,95}$	[N/mm ²]	3,0	3,4	3,9	1,8	-	-

Anhang VI.2 – Datenbank Bauwerksuntersuchungen zum E-Modul

In den nachfolgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Elastizitätsmoduluntersuchungen an bestehenden Massivbauwerken durch Bohrkernentnahmen nach *DIN EN 12390-13:2014-06* dargestellt.

Die Untersuchungen des Elastizitätsmoduls erfolgten bei selbst durchgeführter Bohrkernentnahme im MPA der Technischen Universität Kaiserslautern.

Der angegebene Elastizitätsmodul entspricht jeweils dem am Bohrkern mit der angegebenen Geometrie und Lagerung geprüften Elastizitätsmodul, beschrieben durch den Sekantenmodul.

Vor dem Jahr 2014 durchgeführte Untersuchungen des Elastizitätsmoduls erfolgten nach *DIN 1048-5:1991-06*, die den Elastizitätsmodul des Betons ebenfalls über den Sekantenmodul beschreibt.

Die Entnahmerichtung der Bohrkern ist in Bezug auf die Betonierichtung (senkrecht/parallel) angegeben. Der angegebene Größtkorndurchmesser wurde jeweils visuell an der Bohrkernoberfläche abgeschätzt.

Eine eventuell am Bauwerk feststellbare karbonatisierte Schicht wurde im Rahmen der Vorbereitung der Bohrkern für die Prüfung des Elastizitätsmoduls abgetrennt.

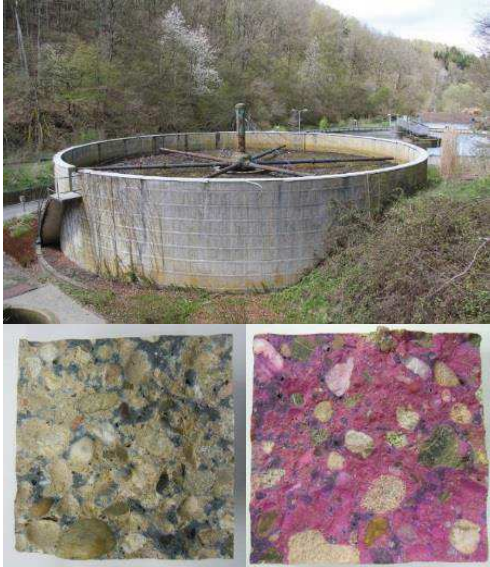
Legende Tab. VI. 26 bis Tab. VI. 39:

- 1) Messlänge zur Aufzeichnung der Dehnung
- 2) mittlere In-situ-Betondruckfestigkeit des jeweiligen Prüfbereichs – bezogen auf den Bohrkern mit einer Schlankheit $h/d = 1,0$
- 3) obere Prüfspannung: Sollwert nach *DIN EN 12390-13:2014-06* $f_{cm}/3$ mit f_{cm} als Mittelwert der Betondruckfestigkeit des Probekörpers mit einer Schlankheit $h/d = 2,0$

Anmerkung: Abweichend von der in *DIN EN 12390-13:2014-06* definierten oberen Prüfspannung wurde bei den Bauwerken Tropfkörper Kläranlage Blümltal, Autobahnunterführung Vogelwoog I und II, Bauwerk I (anonymisiert), Brücke Autobahnkreuz Mainz-Süd und Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, der Wert als 1/3 der mittleren Betondruckfestigkeit des Probekörpers mit einer Schlankheit $h/d = 1,0$ und somit zu hoch festgelegt. Bei den Bauwerken Stützwand Kusel, Unterführung A6 (504 A-D) und Unterführung A6 (504 E-H) wurde die obere Prüfspannung hingegen zu niedrig festgelegt.

- 4) untere Prüfspannung
- 5) durchschnittliche Dehnung bei oberer Prüfspannung beim dritten Belastungszyklus
- 6) durchschnittliche Dehnung bei Vorbelastungsspannung beim zweiten Belastungszyklus
- 7) stabilisierter Elastizitätsmodul (Sekantenmodul)
- 8) arithmetischer Mittelwert nach Gleichung (2.1)

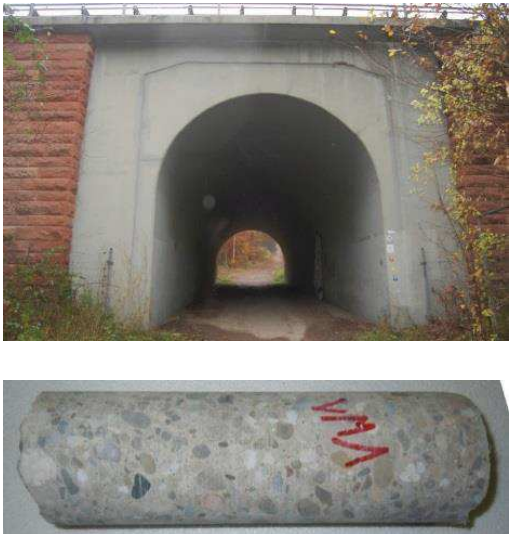
Tab. VI. 26 Tropfkörper Kläranlage Blümeltal, Pirmasens – Elastizitätsmodul

Tropfkörper Kläranlage Blümeltal, Pirmasens <i>Thiele u. Weber 2016</i>							
Elastizitätsmodul							
Güte-/Festigkeitsklasse	B225	[-]					
Größtkorndurchmesser	16	[mm]					
Art Zuschlag	Rundkorn	[-]					
Karbonatisierung	nein	[-]					
Messlänge ¹⁾	113	[mm]					
Bohrkernschlankheit	113/230	[mm]					
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]					
Lagerung	trocken	[-]					
Baujahr	1970	[-]					
Prüfdatum	2013	[-]					
Alter	43	[Jahre]					
							
Elastizitätsmodul $E_{c,s}$ in N/mm² nach DIN EN 12390-13:2014-06							
Bezeichnung	ϕ_m	Druckfestigkeit ²⁾	σ_o ³⁾	σ_u ⁴⁾	ϵ_o ⁵⁾	ϵ_u ⁶⁾	$E_{c,s}$ ⁷⁾
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
A 5	113,0	65,0	21,64	1,35	-0,0583	-0,0013	35500
B 2	112,8	65,2	21,61	1,36	-0,0557	-0,0014	37300
C 1	112,6	71,1	23,54	1,35	-0,0595	-0,0002	37400
D 4	113,0	73,9	24,63	1,35	-0,0629	-0,0021	38300
E 1	112,6	58,1	19,29	1,35	-0,0554	-0,0026	34000
F 1	112,8	59,7	19,81	1,35	-0,0512	-0,0009	36700
H 3	112,7	65,9	21,85	1,35	-0,0916	-0,0225	29700
Parameter der Stichprobe							
Stichprobenumfang n	7	[-]	Mittelwert \bar{x}^b			35600	[N/mm ²]

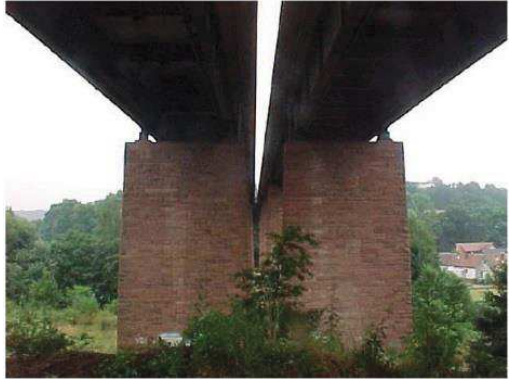
Tab. VI. 27 Autobahnunterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern

Autobahnunterführung Vogelwoog I, Kaiserslautern Thiele u. Weber 2016												
Elastizitätsmodul												
Güte-/Festigkeitsklasse	B225	[-]										
Größtkorndurchmesser	16	[mm]										
Art Zuschlag	Rundkorn	[-]										
Karbonatisierung	nein	[-]										
Messlänge ¹⁾	100	[mm]										
Bohrkernschlankheit	100/200	[mm]										
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]										
Lagerung	nass	[-]										
Baujahr	1957	[-]										
Prüfdatum	2014	[-]										
Alter	57	[Jahre]										
Elastizitätsmodul $E_{c,s}$ in N/mm² nach DIN EN 12390-13:2014-06												
Bezeichnung	ϕ_m	Druckfestigkeit ²⁾						σ_o ³⁾	σ_u ⁴⁾	ϵ_o ⁵⁾	ϵ_u ⁶⁾	$E_{c,s}$ ⁷⁾
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]					
F 1	100,0	38,5	12,85	1,75	-0,0336	-0,0003	33300					
H 1	100,0	40,9	13,63	1,75	-0,0614	-0,0039	20700					
Parameter der Stichprobe												
Stichprobenumfang n	2	[-]	Mittelwert \bar{x}^b			27000	[N/mm ²]					


Tab. VI. 28 Autobahnunterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern

Autobahnunterführung Vogelwoog II, Kaiserslautern Thiele u. Weber 2016							
Elastizitätsmodul							
Güte-/Festigkeitsklasse	B225	[-]					
Größtkorndurchmesser	16	[mm]					
Art Zuschlag	Rundkorn	[-]					
Karbonatisierung	nein	[-]					
Messlänge ¹⁾	100	[mm]					
Bohrkernschlankheit	100/200	[mm]					
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]					
Lagerung	nass	[-]					
Baujahr	1957	[-]					
Prüfdatum	2014	[-]					
Alter	57	[Jahre]					
Elastizitätsmodul $E_{c,s}$ in N/mm² nach DIN EN 12390-13:2014-06							
Bezeichnung	ϕ_m	Druckfestigkeit ²⁾	σ_o ³⁾	σ_u ⁴⁾	ϵ_o ⁵⁾	ϵ_u ⁶⁾	$E_{c,s}$ ⁷⁾
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
A 1	100,0	39,0	13,03	1,75	-0,0337	-0,0004	33900
B 1	100,0	43,2	14,42	1,75	-0,0319	-0,0010	41000
C 1	100,0	47,1	15,71	1,75	-0,0418	-0,0007	34000
Parameter der Stichprobe							
Stichprobenumfang n	3	[-]	Mittelwert \bar{x}^b			36300	[N/mm ²]

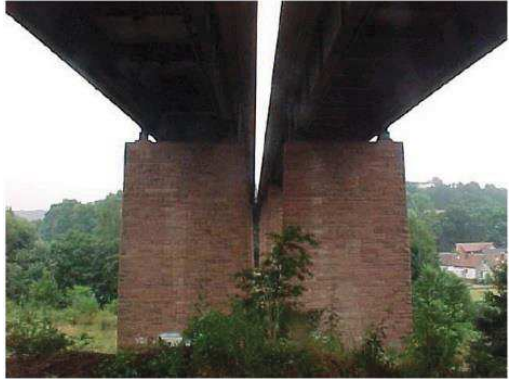
Tab. VI. 29 Lautertalbrücke Pfeiler B, Kaiserslautern

Lautertalbrücke Pfeiler B, Kaiserslautern Thiele u. Weber 2016							
Elastizitätsmodul							
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]					
Größtkorndurchmesser	16 (63)	[mm]					
Art Zuschlag	Rundkorn	[-]					
Karbonatisierung	nein	[-]					
Messlänge ¹⁾	100	[mm]					
Bohrkernschlankheit	100/200	[mm]					
Entnahmerichtung	parallel	[-]					
Lagerung	trocken	[-]					
Baujahr	1936	[-]					
Prüfdatum	1997	[-]					
Alter	61	[Jahre]					
Elastizitätsmodul $E_{c,s}$ in N/mm ² nach DIN EN 12390-13:2014-06							
Bezeichnung	ϕ_m	Druckfestigkeit ²⁾	σ_o ³⁾	σ_u ⁴⁾	ϵ_o ⁵⁾	ϵ_u ⁶⁾	$E_{c,s}$ ⁷⁾
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
B5	101	23,1	-	-	-	-	27000
B10	102	23,1	-	-	-	-	27400
B12	102	23,1	-	-	-	-	29800
B17	101	23,1	-	-	-	-	18100
Parameter der Stichprobe							
Stichprobenumfang n	4	[-]	Mittelwert $\bar{x}^{b)}$			25575	[N/mm ²]


Tab. VI. 30 Lautertalbrücke Pfeiler C, Kaiserslautern

Lautertalbrücke Pfeiler C, Kaiserslautern Thiele u. Weber 2016							
Elastizitätsmodul							
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]					
Größtkorndurchmesser	16 (63)	[mm]					
Art Zuschlag	Rundkorn	[-]					
Karbonatisierung	nein	[-]					
Messlänge ¹⁾	100	[mm]					
Bohrkernschlankheit	100/200	[mm]					
Entnahmerichtung	parallel	[-]					
Lagerung	trocken	[-]					
Baujahr	1936	[-]					
Prüfdatum	1997	[-]					
Alter	61	[Jahre]					
Elastizitätsmodul $E_{c,s}$ in N/mm ² nach DIN EN 12390-13:2014-06							
Bezeichnung	ϕ_m	Druckfestigkeit ²⁾	σ_o ³⁾	σ_u ⁴⁾	ϵ_o ⁵⁾	ϵ_u ⁶⁾	$E_{c,s}$ ⁷⁾
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
C4	101	23,8	-	-	-	-	16000
C8	101	23,8	-	-	-	-	13200
C10	101	23,8	-	-	-	-	25200
C16	102	23,8	-	-	-	-	17700
Parameter der Stichprobe							
Stichprobenumfang n	4	[-]	Mittelwert $\bar{x}^{b)}$			18025	[N/mm ²]


Tab. VI. 31 Lautertalbrücke Pfeiler D, Kaiserslautern

Lautertalbrücke Pfeiler D, Kaiserslautern <i>Thiele u. Weber 2016</i>							
Elastizitätsmodul							
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]					
Größtkorndurchmesser	16 (63)	[mm]					
Art Zuschlag	Rundkorn	[-]					
Karbonatisierung	nein	[-]					
Messlänge ¹⁾	100	[mm]					
Bohrkernschlankheit	100/200	[mm]					
Entnahmerichtung	parallel	[-]					
Lagerung	trocken	[-]					
Baujahr	1936	[-]					
Prüfdatum	1997	[-]					
Alter	61	[Jahre]					
Elastizitätsmodul $E_{c,s}$ in N/mm ² nach DIN EN 12390-13:2014-06							
Bezeichnung	ϕ_m	Druckfestigkeit ²⁾	σ_o ³⁾	σ_u ⁴⁾	ϵ_o ⁵⁾	ϵ_u ⁶⁾	$E_{c,s}$ ⁷⁾
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
D4	101	22,5	-	-	-	-	24700
D8	101	22,5	-	-	-	-	32500
D14	101	22,5	-	-	-	-	16500
D20	101	22,5	-	-	-	-	21200
Parameter der Stichprobe							
Stichprobenumfang n	4	[-]	Mittelwert $\bar{x}^{b)}$			23725	[N/mm ²]


Tab. VI. 32 Lautertalbrücke Pfeiler E, Kaiserslautern

Lautertalbrücke Pfeiler E, Kaiserslautern <i>Thiele u. Weber 2016</i>							
Elastizitätsmodul							
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]					
Größtkorndurchmesser	16 (63)	[mm]					
Art Zuschlag	Rundkorn	[-]					
Karbonatisierung	nein	[-]					
Messlänge ¹⁾	100	[mm]					
Bohrkernschlankheit	100/200	[mm]					
Entnahmerichtung	parallel	[-]					
Lagerung	trocken	[-]					
Baujahr	1936	[-]					
Prüfdatum	1997	[-]					
Alter	61	[Jahre]					
Elastizitätsmodul $E_{c,s}$ in N/mm ² nach DIN EN 12390-13:2014-06							
Bezeichnung	ϕ_m	Druckfestigkeit ²⁾	σ_o ³⁾	σ_u ⁴⁾	ϵ_o ⁵⁾	ϵ_u ⁶⁾	$E_{c,s}$ ⁷⁾
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
E5	100	20,6	-	-	-	-	26100
E9	100	20,6	-	-	-	-	22000
E14	100	20,6	-	-	-	-	25100
E18	101	20,6	-	-	-	-	33700
Parameter der Stichprobe							
Stichprobenumfang n	4	[-]	Mittelwert $\bar{x}^{b)}$			26725	[N/mm ²]

Tab. VI. 33 Bauwerk 1 (anonymisiert)

Bauwerk 1 (anonymisiert)							
Elastizitätsmodul							
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]					
Größtkorndurchmesser	16	[mm]					
Art Zuschlag	Rundkorn	[-]					
Karbonatisierung	16	[-]					
Messlänge ¹⁾	100	[mm]					
Bohrkernschlankheit	100/200	[mm]					
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]					
Lagerung	nass	[-]					
Baujahr	unbekannt	[-]					
Prüfdatum	2017	[-]					
Alter	unbekannt	[Jahre]					
Elastizitätsmodul $E_{c,s}$ in N/mm ² nach DIN EN 12390-13:2014-06							
Bezeichnung	ϕ_m	Druckfestigkeit ²⁾	σ_o ³⁾	σ_u ⁴⁾	ϵ_o ⁵⁾	ϵ_u ⁶⁾	$E_{c,s}$ ⁷⁾
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
A1	99,6	42,7	14,10	2,10	-	-	33400
A7	99,5	42,7	14,10	2,10	-	-	39700
B1	99,4	42,4	14,00	2,10	-	-	39200
B6	99,3	42,4	14,00	2,00	-	-	30200
C2	99,3	43,6	14,30	2,10	-	-	38600
C5	99,2	43,6	14,30	1,90	-	-	37100
D1	99,0	37,7	12,50	2,00	-	-	36300
D4	99,0	37,7	12,50	2,00	-	-	31500
Parameter der Stichprobe							
Stichprobenumfang n	8	[-]	Mittelwert \bar{x}^b			35750	[N/mm ²]



Tab. VI. 34 Brücke Autobahnkreuz Mainz-Süd - Auflager, Mainz

Brücke Autobahnkreuz Mainz-Süd - Auflager, Mainz							
Elastizitätsmodul							
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]					
Größtkorndurchmesser	16	[mm]					
Art Zuschlag	Rundkorn	[-]					
Karbonatisierung	4	[-]					
Messlänge ¹⁾	100	[mm]					
Bohrkernschlankheit	100/200	[mm]					
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]					
Lagerung	trocken	[-]					
Baujahr	1965	[-]					
Prüfdatum	2017	[-]					
Alter	52	[Jahre]					
Elastizitätsmodul $E_{c,s}$ in N/mm² nach DIN EN 12390-13:2014-06							
Bezeichnung	ϕ_m	Druckfestigkeit ²⁾	σ_o ³⁾	σ_u ⁴⁾	ϵ_o ⁵⁾	ϵ_u ⁶⁾	$E_{c,s}$ ⁷⁾
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
WL-4	99,8	49,2	16,50	2,20	-	-	34700
WL-5	99,8	49,2	16,50	2,00	-	-	31700
WL-2	99,8	49,2	16,20	2,00	-	-	29300
Parameter der Stichprobe							
Stichprobenumfang n	3	[-]	Mittelwert \bar{x} ^{b)}			31900	[N/mm ²]


Tab. VI. 35 Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt

Kellerinnenwand Altersheim Schifferstadt, Schifferstadt							
Elastizitätsmodul							
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]					
Größtkorndurchmesser	16	[mm]					
Art Zuschlag	Rundkorn	[-]					
Karbonatisierung	nein	[-]					
Messlänge ¹⁾	100	[mm]					
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]					
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]					
Lagerung	trocken	[-]					
Baujahr		[-]					
Prüfdatum	2018	[-]					
Alter	-	[Jahre]					
Elastizitätsmodul $E_{c,s}$ in N/mm ² nach DIN EN 12390-13:2014-06							
Bezeichnung	ϕ_m	Druckfestigkeit ²⁾	σ_o ³⁾	σ_u ⁴⁾	ϵ_o ⁵⁾	ϵ_u ⁶⁾	$E_{c,s}$ ⁷⁾
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
A1	99,7	29,1	9,70	2,10	0,0400	-	22100
A2	99,5	29,1	9,70	2,00	0,0200	-	32800
A5	99,6	29,1	9,70	2,00	0,0300	-	28900
A6	99,6	29,1	9,70	1,90	0,0300	-	26400
A7	99,6	29,1	9,70	1,90	0,0300	-	28000
B3	99,7	32,5	10,80	2,00	0,0300	-	26800
B4	99,6	32,5	10,80	1,90	0,0300	-	29000
B5	99,7	32,5	10,80	1,90	0,0300	-	28600
B7	99,7	32,5	10,80	0,50	0,0400	-	28200
C5	99,7	37,8	12,60	1,90	0,0400	-	30000
C10	99,6	37,8	12,60	1,90	0,0400	-	29300
C11	99,7	37,8	12,60	1,90	0,0400	-	28600
C13	99,6	37,8	12,60	1,90	0,0400	-	29300
C14	99,6	37,8	12,60	1,80	0,0400	-	30500
Parameter der Stichprobe							
Stichprobenumfang n	14	[-]	Mittelwert $\bar{x}^{b)}$			28464	[N/mm ²]

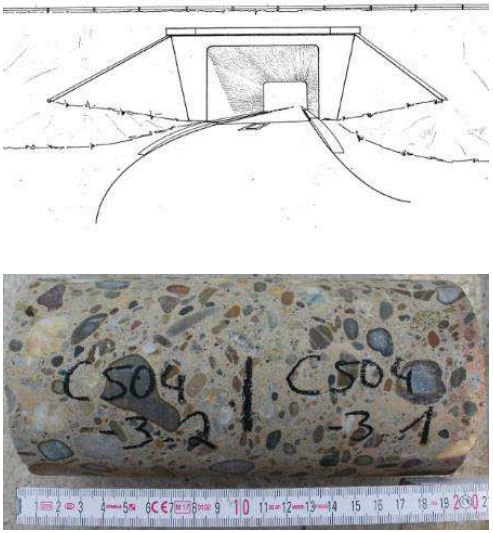
Tab. VI. 36 Stützwand, Kusel

Stützwand, Kusel							
Elastizitätsmodul			 				
Güte-/Festigkeitsklasse	-	[-]					
Größtkorndurchmesser	16	[mm]					
Art Zuschlag	gebrochen	[-]					
Karbonatisierung	nein	[-]					
Messlänge ¹⁾	100	[mm]					
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]					
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]					
Lagerung	nass	[-]					
Baujahr	unbekannt	[-]					
Prüfdatum	2018	[-]					
Alter	-	[Jahre]					
Elastizitätsmodul $E_{c,s}$ in N/mm ² nach DIN EN 12390-13:2014-06							
Bezeichnung	ϕ_m	Druckfestigkeit ²⁾	σ_o ³⁾	σ_u ⁴⁾	ϵ_o ⁵⁾	ϵ_u ⁶⁾	$E_{c,s}$ ⁷⁾
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
A1	99,7	59,7	5,30	2,10	-	-	29300
A2	99,6	59,7	5,30	2,10	-	-	29500
A4	99,6	59,7	5,30	2,10	-	-	26200
B1	99,6	59,7	5,30	2,10	-	-	28700
B6	99,7	59,7	5,30	2,10	-	-	25900
B7	99,8	59,7	5,30	2,10	-	-	21800
C3	99,7	59,7	5,30	2,10	-	-	29300
C5	99,7	59,7	5,30	2,10	-	-	24200
C6	99,7	59,7	5,30	2,10	-	-	27300
D4	99,8	59,7	5,30	2,10	-	-	24600
D14	99,7	59,7	5,30	2,10	-	-	32900
Parameter der Stichprobe							
Stichprobenumfang n	11	[-]	Mittelwert \bar{x}^b			27245	[N/mm ²]

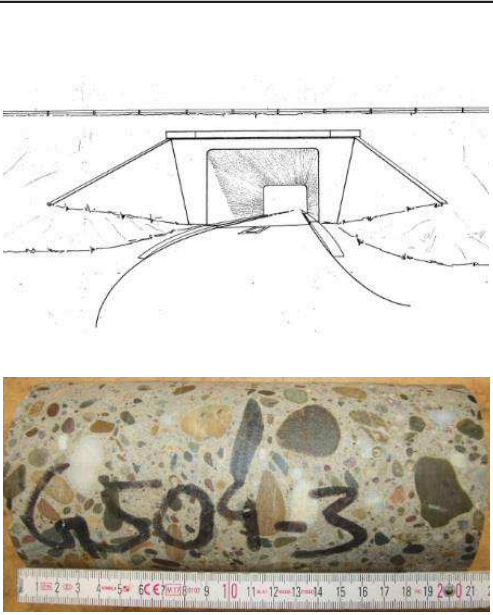
Tab. VI. 37 Unterführung A6 Kirchhausen-Biberach (501 A-D), Heilbronn

Unterführung A6 Kirchhausen-Biberach (501 A-D), Heilbronn							
Elastizitätsmodul							
Güte-/Festigkeitsklasse	B300	[-]					
Größtkorndurchmesser	32	[mm]					
Art Zuschlag	Rundkorn	[-]					
Karbonatisierung	nein	[-]					
Messlänge ¹⁾	100	[mm]					
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]					
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]					
Lagerung	trocken	[-]					
Baujahr	1965-67	[-]					
Prüfdatum	2018	[-]					
Alter	51	[Jahre]					
Elastizitätsmodul $E_{c,s}$ in N/mm ² nach DIN EN 12390-13:2014-06							
Bezeichnung	ϕ_m	Druckfestigkeit ²⁾	σ_o ³⁾	σ_u ⁴⁾	ϵ_o ⁵⁾	ϵ_u ⁶⁾	$E_{c,s}$ ⁷⁾
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
A1	99,4	38,6	10,40	2,30	0,0300	-	26400
A2	99,7	38,6	10,50	2,10	0,0500	0,0100	20000
A3	99,6	38,6	10,20	2,10	0,0500	0,0100	20000
B2	99,7	38,6	10,00	1,90	0,0400	-	22500
B3	99,6	38,6	10,20	1,90	0,0700	0,0200	16500
B6	99,5	38,6	10,50	2,00	0,0600	0,0100	17500
C2	99,7	38,6	10,30	1,90	0,0500	0,0100	19900
C3	99,8	38,6	10,20	1,90	0,0400	0,0100	22500
C5	99,6	38,6	10,30	1,90	0,0400	0,0100	22500
D1	99,7	38,6	10,00	1,80	0,0500	0,0100	19000
D2	99,6	38,6	10,60	1,90	0,0500	0,0100	21000
D4	99,9	38,6	10,40	1,80	0,0500	0,0100	22200
Parameter der Stichprobe							
Stichprobenumfang n	12	[-]	Mittelwert \bar{x}^b			20833	[N/mm ²]

Tab. VI. 38 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Heilbronn

Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 A-D), Heilbronn							
Elastizitätsmodul							
Güte-/Festigkeitsklasse	B300	[-]					
Größtkorndurchmesser	32	[mm]					
Art Zuschlag	rund	[-]					
Karbonatisierung	nein	[-]					
Messlänge ¹⁾	100	[mm]					
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]					
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]					
Lagerung	nass	[-]					
Baujahr	1965-67	[-]					
Prüfdatum	2018	[-]					
Alter	51	[Jahre]					
Elastizitätsmodul $E_{c,s}$ in N/mm ² nach DIN EN 12390-13:2014-06							
Bezeichnung	ϕ_m	Druckfestigkeit ²⁾	σ_o ³⁾	σ_u ⁴⁾	ϵ_o ⁵⁾	ϵ_u ⁶⁾	$E_{c,s}$ ⁷⁾
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]
A4	99,1	34,3	4,00	2,30	-	-	23300
A5	99,0	34,3	4,00	2,20	-	-	22700
B1	99,1	34,3	4,00	2,10	-	-	17000
B2	99,2	34,3	4,00	2,10	-	-	19600
C1	99,1	34,3	4,00	2,10	-	-	20000
C3	99,1	34,3	4,00	2,00	-	-	19800
D3	99,1	34,3	4,00	2,00	-	-	18500
D4	99,1	34,3	4,00	1,90	-	-	18500
D5	99,2	34,3	4,00	1,90	-	-	23100
Parameter der Stichprobe							
Stichprobenumfang n	9	[-]	Mittelwert $\bar{x}^{b)}$			20278	[N/mm ²]

Tab. VI. 39 Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), Heilbronn

Unterführung A6 Biberach-Neckargartach (504 E-H), Heilbronn												
Elastizitätsmodul												
Güte-/Festigkeitsklasse	B300	[-]										
Größtkorndurchmesser	32	[mm]										
Art Zuschlag	rund	[-]										
Karbonatisierung	nein	[-]										
Messlänge ¹⁾	100	[mm]										
Bohrkernschlankheit	100/100	[mm]										
Entnahmerichtung	senkrecht	[-]										
Lagerung	nass	[-]										
Baujahr	1965-67	[-]										
Prüfdatum	2018	[-]										
Alter	51	[Jahre]										
Elastizitätsmodul $E_{c,s}$ in N/mm² nach DIN EN 12390-13:2014-06												
Bezeichnung	ϕ_m	Druckfestigkeit ²⁾						σ_o ³⁾	σ_u ⁴⁾	ϵ_o ⁵⁾	ϵ_u ⁶⁾	$E_{c,s}$ ⁷⁾
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]	[N/mm ²]					
E1		39,0	3,50	2,40	-	-	19100					
E5		39,0	3,50	2,40	-	-	27000					
E6		39,0	3,50	2,40	-	-	26000					
F4		39,0	3,50	2,30	-	-	23300					
F5		39,0	3,50	2,30	-	-	29300					
F6		39,0	3,50	2,30	-	-	26900					
G2		39,0	3,50	2,50	-	-	17600					
G3		39,0	3,50	2,40	-	-	27700					
G4		39,0	3,50	2,40	-	-	20300					
H3		39,0	3,50	2,60	-	-	24200					
H6		39,0	3,50	2,30	-	-	20800					
Parameter der Stichprobe												
Stichprobenumfang n	11	[-]	Mittelwert \bar{x}^b			23836	[N/mm ²]					

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Michael Weber

Staatsangehörigkeit: deutsch

Ausbildung

1998 - 2007 Leibniz-Gymnasium, Pirmasens, Abitur

2008 - 2013 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Kaiserslautern mit der Vertiefungsrichtung „Konstruktiver Ingenieurbau“ und dem Abschluss „Dipl.-Ing.“

2013 - 2018 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Kaiserslautern im Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion bei Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell. Tätigkeitsbereich: Bauen im Bestand