

**Experimentelle und numerische Untersuchungen  
zum Rissverhalten von mehrlagig bewehrten  
Stahlbetonbauteilen bei Verwendung großer  
Stabdurchmesser**

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

**DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)**

genehmigte

**DISSERTATION**

von

**Dipl.-Ing. Felix Breit**

aus Bexbach

Dekan: Prof. Dr.-Ing. H. Sadegh-Azar  
1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. J. Schnell  
2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. C. Glock  
Tag der mündl. Prüfung: 03.11.2021

Kaiserslautern 2021

(D 386)



Felix Breit

**Experimentelle und numerische Untersuchungen  
zum Rissverhalten von mehrlagig bewehrten  
Stahlbetonbauteilen bei Verwendung großer  
Stabdurchmesser**





## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in den Jahren 2015 bis 2020 am Fachgebiet für Massivbau und Baukonstruktion der Technischen Universität Kaiserslautern.

Die wesentliche Grundlage meiner Forschungstätigkeit war ein vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördertes Forschungsvorhaben, dessen ein Teil der in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungsergebnisse zugrunde liegt. Für die Finanzierung bedanke ich mich an dieser Stelle ausdrücklich. In diesem Zusammenhang möchte ich auch der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) für die Förderung, der Forschungsvereinigung Gemeinschaftsausschuss Kaltformgebung e. V. (GAK) sowie den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für die intensive Begleitung danken. Für die großzügige Unterstützung mit Versuchsmaterial sei zudem auch der Badischen Stahlwerke GmbH sowie Pentair Eng. Electrical & Fastening Solutions gedankt.

Mein besonderer Dank gilt dem ersten Berichterstatter Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. J. Schnell, der mir durch die Anstellung am Fachgebiet und die Übertragung des Forschungsthemas überhaupt erst die Gelegenheit zur Promotion bot. Ich möchte mich daher ganz aufrichtig für das entgegengebrachte Vertrauen und seine bis heute uneingeschränkte Unterstützung bedanken. Aber auch für die fachliche Förderung und persönliche Prägung im Zuge unserer Zusammenarbeit bin ich ihm sehr dankbar.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Glock, welcher freundlicherweise die Erstellung des Zweitberichts auf sich genommen hat, für die hilfreichen und wegweisenden fachlichen Diskussionen. Auch seiner Unterstützung durfte ich mir immer sicher sein.

Herrn Prof. Dr.-Ing Matthias Pahn danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen der Fachgebiete Massivbau und Baukonstruktion sowie Stahlbau für die unzähligen, interdisziplinären Diskussionen und die kollektive Unterstützung. Hierzu zählen selbstverständlich auch die Kolleginnen und Kollegen des Labors für Konstruktiven Ingenieurbau und die studentischen Hilfskräfte, die einen überaus großen Anteil an dem Gelingen dieser Arbeit und an meinem Wirken und Schaffen insgesamt am Fachgebiet haben. Ich habe die konstruktive und zielführende Zusammenarbeit stets sehr genossen.

Mein ganz besonderer Dank gilt zuletzt meiner Familie, vor allem meinen Eltern und meiner Lebensgefährtin Katrin für die jahrelange Förderung, das entgegengebrachte Verständnis, die grenzenlose Unterstützung und die sehr willkommenen Abwechslungen abseits des Schreibtischs.

Saarbrücken, im November 2021

Felix Breit



## Inhaltsverzeichnis

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Kurzfassung</b>   | <b>ix</b>   |
| <b>Abstract</b>  | <b>xi</b>   |
| <b>Formelzeichen, Variablen und Abkürzungen</b>                      | <b>xiii</b> |
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>1</b>    |
| 1.1 Allgemeines zur Rissbildung im Stahlbetonbau                     | 1           |
| 1.2 Große Stabdurchmesser  | 2           |
| 1.3 Problemstellung, Zielsetzung und Vorgehensweise                  | 4           |
| <b>2 Grundlagen der Rissbreitenbeschränkung</b>                      | <b>7</b>    |
| 2.1 Einführung   | 7           |
| 2.2 Mechanische Grundlagen des Rissgeschehens                        | 7           |
| 2.2.1 Rissarten im Stahlbeton  | 7           |
| 2.2.2 Rissmechanik   | 9           |
| 2.2.3 Einflussfaktoren der Rissbildung                               | 14          |
| 2.2.3.1 Materialbedingte Einflussgrößen                              | 14          |
| 2.2.3.2 Geometrische Einflussgrößen                                  | 15          |
| 2.2.3.3 Beanspruchungsbedingte Einflussgrößen                        | 15          |
| 2.2.3.4 Mechanische Einflussgrößen                                   | 15          |
| 2.2.3.5 Sonstige Einflussgrößen                                      | 16          |
| 2.3 Forschungsvorhaben zur Rissbreitenbegrenzung                     | 17          |
| 2.3.1 Allgemeines und Historie der Rissbreitenbegrenzung             | 17          |
| 2.3.2 Ausgewählte Forschungsvorhaben                                 | 22          |
| 2.3.2.1 Untersuchungen von G. Rehm (1975)                            | 22          |
| 2.3.2.2 Untersuchungen von G. Rehm (1976)                            | 23          |
| 2.3.2.3 Untersuchungen von D. Jungwirth                              | 25          |
| 2.3.2.4 Untersuchungen zum Rissverlauf und zur Oberflächenrissbreite | 26          |
| 2.3.2.5 Untersuchungen von M. Empelmann (et al.)                     | 29          |

## Inhaltsverzeichnis

---

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 2.3.2.6 | Untersuchungen von M. Schäfer                    | 32 |
| 2.3.3   | Ausgewählte Ingenieurmodelle                     | 35 |
| 2.3.3.1 | Modell nach MC 2010                              | 35 |
| 2.3.3.2 | Modell nach prEN1992-1-1                         | 37 |
| 2.3.3.3 | Modell nach Empelmann et al. 2015b               | 39 |
| 2.3.3.4 | Modell nach Schäfer 2016                         | 40 |
| 2.3.3.5 | Modell nach Tran 2018                            | 42 |
| 2.4     | Bemessungskonzepte zur Rissbreitenbegrenzung     | 43 |
| 2.4.1   | EN 1992-1-1 für Europa                           | 44 |
| 2.4.2   | DIN EN 1992-1-1/NA für Deutschland               | 46 |
| 2.4.3   | Europäische Mitgliedstaaten (NDPs)               | 46 |
| 2.4.4   | Ausgewählte internationale Bemessungskonzepte    | 48 |
| 2.4.4.1 | Schweiz  | 48 |
| 2.4.4.2 | USA  | 48 |
| 2.4.4.3 | Kanada   | 49 |
| 2.5     | Große Stabdurchmesser                            | 50 |
| 2.5.1   | Historie   | 50 |
| 2.5.2   | Eurocode 2 und Nationaler Anhang für Deutschland | 51 |
| 2.5.3   | Europäische Mitgliedstaaten (NDPs)               | 53 |
| 2.5.4   | prEN1992-1-1                                     | 53 |
| 2.5.5   | Empfehlungen in MC 2010                          | 53 |
| 2.5.6   | Ausgewählte internationale Regelwerke            | 54 |
| 2.5.6.1 | Schweiz  | 54 |
| 2.5.6.2 | USA  | 54 |
| 2.5.6.3 | Kanada   | 54 |
| 2.6     | Rissbreitenbegrenzung in der Baupraxis           | 54 |
| 2.6.1   | Planerische Entwurfsgrundsätze                   | 54 |
| 2.6.2   | Maßnahmen zur Rissbreitenbegrenzung              | 55 |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.6.2.1  | Planerisch-konstruktive Maßnahmen _____                             | 55        |
| 2.6.2.2  | Betontechnologische Maßnahmen _____                                 | 56        |
| 2.6.2.3  | Ausführungstechnische Maßnahmen _____                               | 56        |
| 2.6.3    | Abwägung bezüglich der Bemessung für frühen und späten Zwang _____  | 56        |
| 2.6.4    | Rissbreitenmessung _____  | 58        |
| 2.7      | Diskussionsbedarf und kritische Bewertung _____                     | 60        |
| 2.7.1    | Definition der Rissbreite _____                                     | 60        |
| 2.7.2    | Andere Auffassungen zur Definition der Rissbreite _____             | 62        |
| 2.7.3    | Nachweiskonzept zur Rissbreitenbegrenzung _____                     | 64        |
| 2.7.4    | Aussagegenauigkeit des nationalen Bemessungsmodells _____           | 65        |
| 2.7.5    | Geeignete Fraktilwerte im Hinblick auf die Versuchsauswertung _____ | 67        |
| 2.7.6    | Messung der Rissbreite _____  | 69        |
| 2.7.7    | Vergleich von Mess- und Rechenwerten _____                          | 69        |
| 2.8      | Zusammenfassung und weiteres Vorgehen _____                         | 70        |
| <b>3</b> | <b>Experimentelle Untersuchungen _____</b>                          | <b>73</b> |
| 3.1      | Untersuchungskonzept und allgemeine Vorgehensweise _____            | 73        |
| 3.2      | Untersuchungsprogramm _____   | 73        |
| 3.3      | Querschnittskonzeptionierung _____                                  | 78        |
| 3.4      | Herstellung der Versuchskörper _____                                | 80        |
| 3.5      | Prüfstand und Versuchsaufbau _____                                  | 82        |
| 3.5.1    | Prinzip und Funktionsweise des Prüfstandes _____                    | 82        |
| 3.5.2    | Messtechnik _____   | 84        |
| 3.5.3    | Versuchsbegleitende Feststellungen und Fehlerquellen _____          | 85        |
| 3.6      | Versuchsdurchführung _____  | 85        |
| 3.6.1    | Festlegung des Belastungsregimes _____                              | 85        |
| 3.6.2    | Inaugenscheinnahme der Versuchskörper _____                         | 86        |
| 3.6.3    | Lastaufbringung _____   | 86        |
| 3.6.4    | Rissbreitenmessung _____  | 87        |

## Inhaltsverzeichnis

---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.6.4.1  | Allgemeines   | 87         |
| 3.6.4.2  | Festlegungen zur Rissbreitenmessung                   | 88         |
| 3.6.4.3  | Praktisches Vorgehen                                  | 91         |
| 3.6.4.4  | Fehlerquellen und deren Vermeidung                    | 92         |
| 3.6.5    | Rissabstandsmessung                                   | 92         |
| 3.7      | Versuchsergebnisse                                    | 93         |
| 3.7.1    | Versuchsbegleitende Materialprüfungen                 | 93         |
| 3.7.1.1  | Eigenschaften des Festbeton                           | 93         |
| 3.7.1.2  | Eigenschaften des Betonstahls                         | 93         |
| 3.7.2    | Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen         | 94         |
| 3.7.2.1  | Beobachtungen zur Rissentwicklung                     | 94         |
| 3.7.2.2  | Ergebnisse der Rissbreitenmessung                     | 103        |
| 3.7.2.3  | Ergebnisse der Rissabstandsmessung                    | 113        |
| 3.7.2.4  | Zusammenfassung der Versuchsbeobachtungen             | 118        |
| 3.8      | Statistische Versuchsauswertung                       | 128        |
| 3.8.1    | Allgemeines und Begriffsklärungen                     | 128        |
| 3.8.2    | Festlegungen zur Auswertung der Versuchsergebnisse    | 129        |
| 3.8.2.1  | Verteilung der Rohdaten                               | 129        |
| 3.8.2.2  | Fraktilwert und Konfidenzniveau                       | 142        |
| 3.8.2.3  | Auswerteverfahren                                     | 142        |
| 3.8.3    | Ergebnisse der statistischen Versuchsauswertung       | 144        |
| 3.8.4    | Bewertung der Ergebnisse                              | 145        |
| 3.8.4.1  | Vergleich mit anderen Datenbanken                     | 145        |
| 3.8.4.2  | Rissbreite $w_{0,75}$                                 | 146        |
| 3.8.4.3  | Rissabstand $s_{0,75}$                                | 149        |
| 3.8.5    | Nebenbetrachtung zur logarithmischen Normalverteilung | 149        |
| 3.9      | Zusammenfassung und weiteres Vorgehen                 | 151        |
| <b>4</b> | <b>Numerische Untersuchungen zum Rissgeschehen</b>    | <b>153</b> |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.1      | Einführung   | 153        |
| 4.2      | Vorbemerkungen   | 154        |
| 4.2.1    | Allgemeines  | 154        |
| 4.2.2    | Programmauswahl  | 154        |
| 4.2.3    | Modellierungsaufgabe   | 154        |
| 4.2.4    | Modelleigenschaften  | 155        |
| 4.2.4.1  | Grundsätzliches zur Beschreibung des Materialverhaltens                          | 155        |
| 4.2.4.2  | Verwendetes Rissmodell   | 155        |
| 4.2.4.3  | Materialdefinitionen   | 156        |
| 4.2.4.4  | Belastung und Festhaltungen  | 159        |
| 4.2.4.5  | Elementdimension, Elementtyp und Netzgenerierung                                 | 160        |
| 4.2.4.6  | Berechnung   | 162        |
| 4.2.4.7  | Crack spacing (min und max)  | 162        |
| 4.3      | Simulationsergebnisse und Vergleich mit den Bauteilversuchen                     | 163        |
| 4.3.1    | 2D-Untersuchungen  | 164        |
| 4.3.1.1  | Ergebnisdarstellung  | 164        |
| 4.3.1.2  | Erörterung der Untersuchungsergebnisse   | 169        |
| 4.3.1.3  | Plausibilitätsbetrachtungen  | 170        |
| 4.3.2    | 3D-Untersuchungen  | 173        |
| 4.3.2.1  | Ergebnisdarstellung  | 173        |
| 4.3.2.2  | Erörterung der Untersuchungsergebnisse   | 175        |
| 4.3.2.3  | Plausibilitätsbetrachtung  | 176        |
| 4.4      | Wertung und Zusammenfassung  | 177        |
| <b>5</b> | <b>Nachrechnung der Versuchsergebnisse mit Ingenieur- und Bemessungsmodellen</b> | <b>179</b> |
| 5.1      | Einführung   | 179        |
| 5.2      | Allgemeines  | 179        |
| 5.3      | Festlegungen und Randbedingungen   | 180        |

## Inhaltsverzeichnis

---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.3.1    | Materialeigenschaften   | 181        |
| 5.3.2    | Dauer der Lasteinwirkung  | 184        |
| 5.3.3    | Wirkungsbereich der Bewehrung (Längsbewehrung)                    | 184        |
| 5.3.4    | Berücksichtigung der Querbewehrung                                | 185        |
| 5.3.5    | Berücksichtigung einer gemischten Bewehrung                       | 185        |
| 5.3.6    | Berücksichtigung der Betondeckung                                 | 186        |
| 5.3.7    | Berücksichtigung der Rissphasen                                   | 186        |
| 5.4      | Korrelation von Versuchs- und Rechenwerten                        | 186        |
| 5.4.1    | Ansatz aus Eckfeldt 2005  | 187        |
| 5.4.2    | Ansatz aus DAfStb 630   | 188        |
| 5.4.3    | Ansatz aus Schäfer 2016   | 189        |
| 5.4.4    | Diskussion und kritische Wertung                                  | 189        |
| 5.5      | Gegenüberstellung von Versuchs- und Rechenwerten                  | 192        |
| 5.5.1    | Bewertungsmaßstäbe  | 192        |
| 5.5.2    | Rechenwerte $w_{k,cal}$ ohne Modifikation                         | 194        |
| 5.5.2.1  | Exkurs zum „Bauteilinneren“                                       | 199        |
| 5.5.2.2  | Exkurs zum rechnerischen Rissabstand                              | 200        |
| 5.5.2.3  | Exkurs zur Querschnittskonzeption                                 | 202        |
| 5.5.2.4  | Exkurs zum Einfluss der statistischen Auswertung                  | 205        |
| 5.5.2.5  | Exkurs zu anderen Literaturdatenbanken                            | 207        |
| 5.5.3    | Rechenwerte $w_{k,cal,surf}$ mit Modifizierung nach Eckfeldt 2005 | 209        |
| 5.5.4    | Rechenwerte $w_{k,cal,surf}$ mit Modifizierung gemäß Schäfer 2016 | 212        |
| 5.5.5    | Zusammenstellung und abschließende Bewertung                      | 215        |
| 5.6      | Zusammenfassung und weiteres Vorgehen                             | 217        |
| <b>6</b> | <b>Umsetzung der Rissbreitenbegrenzung in der Praxis</b>          | <b>221</b> |
| 6.1      | Vorbemerkungen  | 221        |
| 6.2      | Vorgehensweisen zur Modellfindung                                 | 222        |
| 6.3      | Vorschlag zur weiteren Verfahrensweise                            | 223        |



|  |            |
|--|------------|
| 6.3.1 Rechnerischer Rissbreitennachweis auf der Bauteiloberfläche _____  | 224        |
| 6.3.1.1 Nachweis zum Zeitpunkt $t = 0$ _____                             | 224        |
| 6.3.1.2 Nachweis zum Zeitpunkt $t = \infty$ _____                        | 225        |
| 6.3.2 Anordnung einer Oberflächenbewehrung ohne konkreten Nachweis _____ | 226        |
| 6.4 Validierung und Aussage zur Modellzuverlässigkeit _____              | 227        |
| 6.5 Zusammenfassung _____  | 228        |
| <b>7 Zusammenfassung und Ausblick _____</b>                              | <b>229</b> |
| 7.1 Zusammenfassung der Vorgehensweise _____                             | 229        |
| 7.2 Fazit _____  | 230        |
| 7.3 Ausblick und offene Fragen _____                                     | 234        |
| <b>Schriftum _____</b>   | <b>237</b> |
| <b>Lebenslauf _____</b>  | <b>249</b> |
| <b>Anhang A – Materialeigenschaften _____</b>                            | <b>251</b> |
| <b>Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung _____</b>           | <b>253</b> |
| <b>Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung _____</b>          | <b>255</b> |



## Kurzfassung

Die Rissbildung in Stahlbetonbauteilen ist systemimmanent und stellt keinen Mangel dar, sofern die am Bauteil auftretenden Risse auf unschädliche Breiten begrenzt sind. Die Begrenzung der Rissbreite kann dabei im Allgemeinen durch planerisch-konstruktive, beton technologische und ausführungstechnische Maßnahmen zielgerichtet gesteuert werden.

Die derzeit in Deutschland bauaufsichtlich eingeführten Regelwerke DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA enthalten Berechnungskonzepte, um Rissbreiten und Rissabstände etwaig auftretender Risse im Rahmen der Bemessung näherungsweise rechnerisch vorauszubestimmen. Bei flächenartigen Bauteilen mit mehrlagig, kreuzweise angeordneter Bewehrung aus großen Stabdurchmessern (d. h.  $\phi > 32$  mm), wie sie beispielsweise in hochbeanspruchten dicken Sohlplatten zum Einsatz kommen können, stellt sich die Frage, ob die am Bauteil auftretenden Risse mit Hilfe der in DIN EN 1992-1-1 und in DIN EN 1992-1-1/NA enthaltenen Berechnungskonzepte realitätsnah vorauszubestimmen sind. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund in Frage zu stellen, dass die den aktuellen normativen Nachweisen zugrundeliegenden Bemessungsformeln vorwiegend an zentrisch bewehrten Versuchsquerschnitten mit „kleinen“ Stabdurchmessern (üblicherweise  $\phi 6$  mm bis  $\phi 14$  mm) hergeleitet wurden.

Zur Bewertung der Übertragbarkeit wurden im Rahmen dieser Arbeit umfangreiche experimentelle Untersuchungen zum Rissverhalten mehrlagig bewehrter Bauteile mit Variation zahlreicher Einflussfaktoren der Rissbildung (z. B. Stabdurchmesser, Querbewehrung, Oberflächenbewehrung) durchgeführt. Das im Rahmen dieser Bauteilversuche feststellbare Trag- und Verformungsverhalten mehrlagig bewehrter Bauteile wurde im Anschluss durch numerische Untersuchungen mit dem nicht linearen Finite-Elemente Programm Atena verifiziert.

Auf Grundlage einer Gegenüberstellung von statistisch ausgewerteten Versuchswerten und den Ergebnissen einer Nachrechnung nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA und weiteren ausgewählten Ingenieur- und Bemessungsmodellen, wurde die Zuverlässigkeit der rechnerischen Vorhersagegenauigkeit der aktuellen Bemessungsmodelle detailliert überprüft. Als ein Ergebnis bleibt festzuhalten, dass Modifikationen der Bemessungsgleichungen nach DIN EN 1992-1-1/NA für Querschnittskonzeptionen mit mehrlagig, kreuzweise angeordneter Bewehrung zwingend zu empfehlen sind, um eine realitätsnähere, auf der sicheren Seite liegende rechnerische Vorhersage der zu erwartenden Rissbreiten sicherstellen zu können. Zudem zeigt sich, dass bei fehlender Oberflächenbewehrung insgesamt keine zuverlässige Berechnung der Rissbreite nach DIN EN 1992-1-1/NA auf der Bauteiloberseite erfolgen kann. Für das Bauteilinnere konnte dagegen festgestellt werden, dass die Versuchsergebnisse in den nach DIN EN 1992-1-1/NA zu erwartenden Größenordnungen liegen.

Die aus der eigenen Versuchsnachrechnung gewonnenen Erkenntnisse zur Vorhersagegenauigkeit zeigen, dass sich für die vorliegend untersuchten Querschnittskonzeptionen insgesamt das Bemessungsmodell nach prEN1992-1-1 hinreichend gut eignet.



## Abstract

Cracking in reinforced-concrete elements is inherent in the system and does not result in a defect, as long as the cracks occurring in the elements are limited to harmless widths. The limitation of the crack width can generally be controlled in a systematic manner by means of design, concrete technology and execution measures.

The standards DIN EN 1992-1-1 and DIN EN 1992-1-1/NA, which are implemented by the building authorities in Germany, contain calculation concepts for the approximate prediction of crack widths and crack spacing of any cracks that may occur during design. In the case of flat components with multi-layer, crosswise reinforcement consisting of large bar diameters ( $\phi > 32$  mm), as can be used, for example, in highly stressed foundation slabs, the question arises as to whether the cracks occurring on the element can be realistically predicted with the aid of the calculation concepts contained in DIN EN 1992-1-1 and in DIN EN 1992-1-1/NA. In particular, this is to be doubted in view of the fact that the design formulas, on which the current normative verifications are based, were mainly derived from centrally reinforced test cross-sections with "small" bar diameters (usually  $\phi 6$  mm to  $\phi 14$  mm).

Within the course of this work, extensive experimental investigations on the cracking behavior of multilayer reinforced structural elements with variation of numerous influencing factors of cracking (e. g. bar diameter, transverse reinforcement, surface reinforcement) were carried out in order to evaluate the transferability. The load-bearing and deformation behavior of multi-layer reinforced elements determined in the course of these structural tests was subsequently verified by numerical investigations using the non-linear finite element program Atena.

Based on a comparison of statistically evaluated test values and the results of a recalculation according to DIN EN 1992-1-1 and DIN EN 1992-1-1/NA (and other selected engineering and design models), the reliability of the computational prediction accuracy of the current design models was verified in detail. The result is that modifications of the design equations according to DIN EN 1992-1-1/NA for cross-section concepts with multi-layer, crosswise reinforcement are urgently recommended in order to ensure a more realistic mathematical prediction of the expected crack widths. Moreover, it is shown that in the absence of surface reinforcement, no reliable calculation of the crack width, according to DIN EN 1992-1-1/NA, can be performed on the top side of the element. For the inside of the element, on the other hand, the test results were found to be within the expected orders of magnitude according to DIN EN 1992-1-1/NA.

The results of our own test calculations on the prediction accuracy show that the design model, according to prEN1992-1-1, is sufficiently suitable for the cross-section concepts examined here.



## Formelzeichen, Variablen und Abkürzungen

### Lateinische Buchstaben

|                |   |
|----------------|---|
| $A_c$          | (Brutto-) Betonquerschnitt  |
| $A_{ci}$       | ideelle Betonquerschnittsfläche                                     |
| $A_s$          | Bewehrungsquerschnitt der Hauptbewehrung                            |
| $A_{ct,ext}$   | externe Betonzugfläche  |
| $A_{s,surf}$   | Bewehrungsquerschnitt der Oberflächenbewehrung                      |
| $a$            | Kantenlänge des Würfels   |
| $a_{s,x}$      | (Achs-) Abstand der Querbewehrung                                   |
| $a_{s,y}$      | horizontaler (Achs-) Abstand der Bewehrungsstäbe der Hauptbewehrung |
| $a_{s,y}$      | vertikaler (Achs-) Abstand der Bewehrungsstäbe der Hauptbewehrung   |
| $c_{v,surf}$   | Verlegemaß der Oberflächenbewehrung                                 |
| $c_{v,large}$  | Verlegemaß der Hauptbewehrung                                       |
| $c_{nom}$      | Betondeckung  |
| $E_{cm}$       | mittlerer Elastizitätsmodul des Betons                              |
| $E_s$          | Elastizitätsmodul der Bewehrung                                     |
| $E_s'$         | gewichteter Elastizitätsmodul der Bewehrung                         |
| $d$            | Durchmesser des Zylinders   |
| $d_g$          | Größtkorndurchmesser  |
| $f_{cm,cube}$  | Mittelwert der Betondruckfestigkeit (Würfeldruckfestigkeit)         |
| $f_{ctm}$      | Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit des Betons                 |
| $f_{ct,sp}$    | Mittelwert der Betonspaltzugfestigkeit                              |
| $f_{ct,eff}$   | effektive Betonzugfestigkeit  |
| $f_R$          | bezogene Rippenfläche der Stahlbewehrung                            |
| $h$            | Höhe des Zylinders  |
| $k_3$          | Fraktilefaktor (auch $k_R$ )  |
| LNV            | logarithmische Normalverteilung                                     |
| NV             | Normalverteilung  |
| $N_{cr,cal,m}$ | (mittlere) rechnerische Risschnittgröße                             |

## Formelzeichen, Variablen und Abkürzungen

---

|               |  |
|---------------|--|
| $N_{cr,test}$ | Risschnittgröße im Bauteilversuch                            |
| $n$           | Stichprobenumfang  |
| $l_e$         | Einleitungslänge   |
| $p$           | Abdeckung des Anteilsbereichs                                |
| $R_{p0,2}$    | 0,2 %-Dehngrenze der Bewehrung                               |
| $s_r$         | rechnerischer Rissabstand                                    |
| $s_m$         | mittlerer Rissabstand  |
| $s_{max}$     | maximaler Rissabstand  |
| $s_x$         | Standardabweichung der Stichprobe                            |
| $s_{0,75}$    | 75 %-Fraktile des Rissabstandes                              |
| $V_x$         | Variationskoeffizient  |
| $w_k$         | rechnerische Rissbreite                                      |
| $w_{k,cal}$   | Rechenwert der Rissbreite im Rahmen der Versuchsnachrechnung |
| $w_m$         | mittlere Rissbreite  |
| $w_{max}$     | maximale Rissbreite  |
| $w_{test}$    | Ergebnisse der experimentellen Rissbreitenuntersuchungen     |
| $w_{0,75}$    | 75 %-Fraktile der Rissbreite                                 |
| $w_{0,95}$    | 95 %-Fraktile der Rissbreite                                 |

### Griechische Buchstaben

|                 |   |
|-----------------|---|
| $(1 - \alpha)$  | Vertrauensniveau  |
| $\epsilon_s$    | Stahldehnung  |
| $\epsilon_{sm}$ | mittlere Stahldehnung                                   |
| $\epsilon_c$    | Betondehnung  |
| $\epsilon_{cm}$ | mittlere Betondehnung                                   |
| $\sigma_s$      | Stahlspannung   |
| $\phi$          | Stabdurchmesser (Nenndurchmesser)                       |
| $\phi_A$        | Außendurchmesser des Bewehrungsstabes (Ist-Durchmesser) |
| $\gamma_{mod}$  | Modellsicherheit  |



# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeines zur Rissbildung im Stahlbetonbau

Die Rissbildung in Stahlbetonbauteilen ist systemimmanent und stellt keinen Mangel dar, sofern die am Bauteil auftretenden Risse auf zulässige Breiten begrenzt sind.

Die Rissbildung ist unweigerlich mit der Entfaltung der avisierten Tragwirkung eines auf Biegung beanspruchten Stahlbetonquerschnitts verbunden, wonach der Beton ausschließlich für den Abtrag von Druckkräften und der Bewehrungsstahl zur Aufnahme von Zugkräften herangezogen wird. Würde demnach die Rissbildung im Grenzzustand der Tragfähigkeit vollständig ausgeschaltet werden, dann könnte sich dieser werkstoffspezifische Lastabtrag nicht einstellen. Auch Schnittgrößenumlagerungen und die ggf. damit einhergehende Aktivierung von Systemreserven sowie eine Sicherstellung von duktilem Bauteilverhalten (welches wesentlich durch die Indikatoren Rissbildung und Verformung charakterisiert ist) wären nicht denkbar.

Auch im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit lassen sich Risse im Allgemeinen nicht mit vertretbarem wirtschaftlichem Aufwand vollumfänglich vermeiden. Somit ist also insbesondere die Begrenzung der Rissbreite auf unschädliche Maße üblicherweise auch Gegenstand der Bemessung.

In besonderen Fällen (z. B. wasserundurchlässige Bauteile, Bauteile im Umgang mit wassergefährdenden Stoffen) kann jedoch auch eine Rissvermeidung angezeigt sein, die dann als Entwurfgrundsatz (beispielsweise in Anlehnung an DBV 2016) im Zuge der Bemessung zu berücksichtigen ist. An dieser Stelle ist jedoch anzumerken, dass Rissvermeidung nicht durch die eingelegte Stahlbewehrung sichergestellt werden kann, da die anliegende (äußere) Zugdehnung bei Wirksamwerden der Bewehrung bereits die Bruchdehnung des Betons (näherungsweise ca. 0,1 ‰) überschritten hat. Vielmehr sind somit parallel zur Bemessung zusätzliche planerisch-konstruktive, betontechnologische und ausführungstechnische Maßnahmen zu ergreifen.

Zur dauerhaften Sicherstellung der Tragfähigkeit, der Gebrauchstauglichkeit sowie eines unbeeinträchtigten Erscheinungsbildes von Stahlbetonbauteilen sind entstehende Risse somit durch planerische, konstruktive und betontechnologische Maßnahmen in ihrer Breite auf ein unschädliches Maß zu begrenzen. Unschädlich sind Risse, wenn der Korrosionsschutz für die eingelegte Bewehrung nicht beeinträchtigt ist, wenn sich der in der Statischen Berechnung unterstellte Kraftfluss einstellen kann (klaffende Risse können u. U. eine Reduktion der Tragfähigkeit bedingen), wenn die Gebrauchstauglichkeit des Bauteils sichergestellt ist (Rissbildungen beeinflussen u. a. die Gasdichtheit und die Verformungssteifigkeit) und wenn keine wesentlichen optischen Beeinträchtigungen vorhanden sind (wasserführende und/oder mit Schmutz zugesetzte Risse sind z. T. deutlich sichtbar; im Einzelfall können solche optischen Beeinträchtigungen aber hingenommen werden, z. B. Selbstheilung von Rissen).

In diesen Fällen stellen Risse in Stahlbetonbauteilen grundsätzlich keinen Mangel dar, sondern sind im juristischen Sinne als hinzunehmende Unzulänglichkeiten aufzufassen. In diesem Zusammenhang kann die folgende, sehr zutreffende Aussage aus DBV 2019 wie folgt zitiert werden: *„Mit der Entscheidung für Beton- oder Stahlbetonbauteile sind einwirkungsbedingte Risse systemimmanent. [...] Somit*

werden diese Risse geplant (gerissene Bauweise), damit ausgeschrieben und „bestellt und bezahlt“. Jedoch ist insbesondere im Hinblick auf das optische Erscheinungsbild eines Stahlbetonbauteils anzumerken, dass in diesem Zusammenhang eine pauschale Bewertung schwerfällt und vor diesem Hintergrund ggf. bereits vorab zusätzliche Anforderungen an die Oberflächenqualität (z. B. Sichtbeton) vertraglich zu vereinbaren sind.

Die derzeit allgemein bauaufsichtlich eingeführten Regelwerke DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA enthalten Bemessungskonzepte, um etwaig am Bauteil auftretende Risse und deren Rissbreiten im Zuge der Bemessung näherungsweise rechnerisch vorausbestimmen zu können. Dies kann einerseits durch eine direkte Berechnung oder auch durch die Anwendung von Tabellenwerten sowie die Berücksichtigung von Konstruktionsregeln (indirekte Verfahren) erfolgen.

### 1.2 Große Stabdurchmesser

Der Begriff „große Stabdurchmesser“, wie er im Titel dieser Arbeit bereits verwendet wurde, wird in DIN EN 1992-1-1/NA (in Verbindung mit DIN EN 1992-1-1) konkretisiert, wonach Bewehrungsstäbe mit einem Stabdurchmesser  $\phi_{\text{large}}$  größer als  $\phi 32$  mm als solche aufzufassen sind.

Bewehrungsstäbe mit großen Stabdurchmessern werden vorwiegend in hochbeanspruchten Stahlbetonkonstruktionen wie z. B. in Hochhausstützen und Sohlplatten eingesetzt. Solche hochbewehrten Bauteile können durch die Verwendung großer Stabdurchmesser in baupraktischer Hinsicht optimiert hergestellt werden, da die erforderliche Stabanzahl sowie die Anzahl der Bewehrungslagen reduziert werden können und sich dadurch der lohnintensive Verlegeaufwand auf der Baustelle erheblich rationalisieren lässt. Außerdem gestaltet sich der Betoneinbau bei weniger engmaschiger Bewehrungsanordnung deutlich einfacher.

Ein Bewehrungsstab  $\phi 40$  mm ( $A_s = 12,56 \text{ cm}^2$ ) entspricht bezüglich seiner Querschnittsfläche insgesamt 2  $\phi 28$  mm, 4  $\phi 20$  mm, 11  $\phi 12$  mm oder 25  $\phi 8$  mm Bewehrungsstäben (vgl. Abb. 1-1), sodass der Verlegeaufwand infolge einer geringeren Stabanzahl nachweislich reduziert und Stablagen damit eingespart werden können.



Abb. 1-1: Gegenüberstellung von Bewehrungsstäben  $\phi 8$  mm,  $\phi 12$  mm,  $\phi 20$  mm,  $\phi 28$  mm und  $\phi 40$  mm mit jeweils annähernd gleicher Gesamtquerschnittsfläche (Foto: T. Brenner)

Auch in statisch-konstruktiver Hinsicht birgt der Einsatz großer Stabdurchmesser Vorteile. Beispielsweise können größere statische Nutzhöhen (ggf. einlagige statt mehrlagige Bewehrungsanordnung möglich) und höhere geometrische Bewehrungsgrade erreicht werden. Vor diesem Hintergrund können vergleichbar schlankere Bauteile

(Reduzierung der Bauteildicken) realisiert und infolgedessen wiederum Herstellkosten eingespart werden.

Die Verwendung von Bewehrungsstäben mit großen Stabdurchmessern ist derzeit normativ in DIN EN 1992-1-1 (in Verbindung mit DIN EN 1992-1-1/NA) geregelt. Im Vergleich zu kleineren Stabdurchmessern sind in diesem Zusammenhang zahlreiche Zusatzregeln zu berücksichtigen, welche die wirtschaftlichen Vorteile der großen Stabdurchmesser beschneiden und teilweise sogar egalisieren. Wesentlich betreffen diese zusätzlichen Konstruktionsregeln nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA die Rissbreitenbeschränkung, wonach eine zusätzliche Oberflächenbewehrung einzulegen ist, um die Risse innerhalb der Betondeckung fein zu verteilen und die Rissbreiten an den Bauteilrändern so zu begrenzen.

Neben den zusätzlichen konstruktiven Regeln ist insbesondere auch die praktische Handhabung der Bewehrungsstäbe mit großem Stabdurchmesser auf der Baustelle als Nachteil zu nennen. Aufgrund des hohen Eigengewichts (ca. 10 kg/m für  $\phi 40$  mm) ist der Bewehrungseinbau kräftegebunden und kann nicht (oder nur sehr eingeschränkt) händisch erfolgen.

Auch die Herstellung (Walzen) und Weiterverarbeitung (Biegen, Ablängen) solcher Bewehrungsstäbe sind unter Umständen mit den derzeit vorhandenen industriellen Ausrüstungen und Kapazitäten nur eingeschränkt möglich. Gegebenenfalls würde aber hier ein größerer Absatzmarkt für große Stabdurchmesser in diesem Zusammenhang entsprechende Umstellungen der Produktionen bedingen und damit zur weiteren Industrialisierung und Automatisierung der stahlverarbeitenden Betriebe beitragen.

Trotz der eingänglich beschriebenen Vorteile, die der Einsatz großer Stabdurchmesser mit sich bringt, konnten sich diese in der Baupraxis bisher nicht vollumfänglich etablieren. Dies zeigt sich insbesondere an einem Beispiel aus der Vergangenheit.

In Hegger et al. 1994 wird vom Bau des 51-geschossigen Trianon-Hochhauses in Frankfurt/Main (Fertigstellung im März 1992) berichtet, dessen unverkennbare Grundrissform einem gleichseitigen Dreieck angenähert ist. Bei der Herstellung der bis zu 6 m dicken flachgegründeten Bodenplatte wurde auf die Verwendung großer Bewehrungsstabdurchmesser verzichtet, die damals jedoch auch noch nicht normativ geregelt waren. Stattdessen wurde die untere, kreuzweise angeordnete Bewehrungslage aus bis zu 28 Stablagen (kreuzweise, Achsabstand 15 cm) mit Stabdurchmesser  $\phi 28$  mm hergestellt. Dies entspricht ca. 98 Stück  $\phi 28$  mm je laufendem Meter und je Bewehrungsrichtung. Auf der Bauteiloberseite wurde eine konstruktive Mindestbewehrung von  $15 \text{ cm}^2/\text{m}$  vorgesehen. Es ist davon auszugehen, dass die Bewehrungsführung letztendlich aufgrund von Restriktionen festgelegt wurde, die möglicherweise auf normative und bemessungstechnische Aspekte, bauablauftechnische Anforderungen, fehlende planerische und baupraktische Erfahrung im Umgang mit großen Stabdurchmessern oder beschränkte Verfügbarkeit entsprechender Bewehrungsstäbe zurückzuführen sind. Dies kann jedoch vorliegend nicht aufgeklärt werden. Angesichts der hier beschriebenen beeindruckenden Bewehrungskonzeption stellt sich jedoch die Frage, ob derzeit bestehende Nachweiskonzepte zur Sicherstellung einer Rissbreitenbegrenzung für solche Querschnittskonzeptionen überhaupt geeignet sind.

Auch gegenwärtig kommen große Bewehrungsstabdurchmesser nur selten und dabei überwiegend bei hochbelasteten Sonderkonstruktionen zum Einsatz (u. a. „AirRail“ bzw. „The Squire“ am Flughafen in Frankfurt/Main, Tiefbahnhof „Stuttgart 21“). Zusammenfassend muss damit als „status quo“ festgestellt werden, dass die Randbedingungen für einen problemlosen Praxiseinsatz großer Bewehrungsstabdurchmesser derzeit in Deutschland nicht gegeben sind.

Dies hängt augenscheinlich damit zusammen, dass bei den am Planen und Bauen Beteiligten gewisse Vorbehalte im Umgang mit großen Stabdurchmessern bestehen. Möglicherweise können diese auf die Begrenzung der Rissbreite im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und dem damit verbundenen Mehraufwand im Hinblick auf die zusätzlich zu berücksichtigenden Konstruktionsregeln bereits in der Planungsphase zurückgeführt werden. Weiterhin ist die Rissbreitenbegrenzung nach eigener Auffassung im Gegensatz zu anderen statisch-konstruktiven Herausforderungen im Umgang mit großen Stabdurchmessern (z. B. Ausführung von Übergreifungsstößen, konstruktive Durchbildungen) nicht ohne Weiteres mit vertretbarem bauorganisatorischem und wirtschaftlichem Aufwand (z. B. alternative Ausführung eines Übergreifungsstoßes mit mechanischen Verbindungsmitteln) zu lösen.

Dabei bietet sich der Einsatz großer Stabdurchmesser ungeachtet aller Vorbehalte insbesondere für hochbelastete und in dieser Folge oftmals auch hochbewehrte Bauteile, wie z. B. Druckglieder, Pfahlkopf- und Sohlplatten sowie Abfangeträger an. Insgesamt ist somit eine Anwendung in Infrastrukturbauten (z. B. Brücken- und Tunnelbauwerke), Hochbauten und auch für Bauwerke in erdbebengefährdeten Gebieten grundsätzlich denkbar (vorausgesetzt, die im Rahmen einer Erdbebenbemessung angestrebte plastische Verformungsfähigkeit des Bauwerks wird durch eine entsprechende Duktilität des Bewehrungsstahls ermöglicht).

Ebenso ist ein uneingeschränkter Einsatz in Fertigteilverken möglich, wodurch das systematische Bauen mit (Halb-)Fertigteilen und hohen Vorfertigungsgraden weiter begünstigt wird.

### 1.3 Problemstellung, Zielsetzung und Vorgehensweise

In den in DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA enthaltenen Bemessungsformeln zur näherungsweise rechnerischen Begrenzung der Rissbreite stellt der Stabdurchmesser der Stahlbewehrung eine maßgebende Eingangsgröße dar.

Vor dem Hintergrund, dass die in o. g. Regelwerken enthaltenen Bemessungsgleichungen aber ausschließlich an Stabdurchmessern kleiner als  $\phi_{\text{large}}$  (überwiegend in den Bandbreiten  $\phi 10$  mm bis  $\phi 14$  mm) hergeleitet und verifiziert wurden, ist zu hinterfragen, ob diese auch uneingeschränkt auf große Stabdurchmesser  $\phi_{\text{large}}$  übertragen werden können, um die am Bauwerk auftretenden Risse zielsicher zu begrenzen. Diese Problemstellung wurde auch schon umfassend in Schäfer 2016 beleuchtet, konnte dort aber noch nicht abschließend geklärt werden.

Vorgenannte Zweifel an einer Übertragbarkeit aktueller Bemessungskonzepte auf große Stabdurchmesser werden zudem noch wesentlich dadurch gemehrt, dass die in Rede stehenden Bemessungsformeln vorwiegend an stabförmigen Dehnkörpern (einfach zentrisch bewehrte Versuchsquerschnitte) mit „kleinen“ Stabdurchmessern

hergeleitet wurden, deren Bauteilgeometrien in dieser Form nicht uneingeschränkt praxisübliche Anwendungsfälle darstellen. Insbesondere flächenartige Bauteile mit mehrlagig, kreuzweise angeordneter Bewehrung, wie sie beispielsweise regelmäßig als hochbeanspruchte Sohlplatten (sowohl unter Verwendung baupraktisch üblicher Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm bis  $\phi 28$  mm als auch großer Stabdurchmesser) zum Einsatz kommen, werden durch stabförmige Dehnkörper nicht ausreichend genau abgebildet. Vor diesem Hintergrund stellt sich damit auch die Frage, ob die an mehrlagig bewehrten flächenartigen Bauteilen auftretenden Risse unter Zugrundelegung von DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA bei Verwendung großer Stabdurchmesser insgesamt zuverlässig begrenzt werden können.

Zwecks ganzheitlicher Klärung der voranstehenden Fragestellungen und darüber hinaus auch, um derzeit bestehende (und z. T. restriktive) Konstruktionsregeln bei Verwendung großer Stabdurchmesser ggf. modifizieren und damit insgesamt den Zugang zur Baupraxis erleichtern zu können, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit zahlreiche experimentelle Untersuchungen zum Rissverhalten von flächenartigen Bauteilen mit kreuzweise verlegter Bewehrung an der TU Kaiserslautern durchgeführt. In diesem Zusammenhang wurden diverse Einflussfaktoren auf die Rissbildung (z. B. Stabdurchmesser, Querbewehrung, Oberflächenbewehrung) variiert. Das im Rahmen dieser Bauteilversuche feststellbare Trag- und Verformungsverhalten wurde dabei durch numerische Untersuchungen mit dem nicht linearen Finite-Elemente Programm Atena nachvollzogen.

Auf Grundlage einer Gegenüberstellung von Versuchswerten mit den Ergebnissen der Nachrechnung wurde die Güte der rechnerischen Vorhersagegenauigkeit ausgewählter Bemessungs- und Ingenieurmodelle überprüft. Als ein Ergebnis konnte dabei u. a. für die aktuellen Bemessungsgleichungen nach DIN EN 1992-1-1/NA befunden werden, dass insgesamt ein modifiziertes Bemessungskonzept für die Rissbreitenbegrenzung für Stahlbetonquerschnitte mit großen Stabdurchmessern und/oder mehrlagiger Bewehrungsanordnung angezeigt ist, um eine realitätsnähere rechnerische Vorhersage der zu erwartenden Rissbreiten sicherzustellen.

Die im Rahmen dieser Arbeit verfolgte und voranstehend beschriebene Vorgehensweise ist zusammenfassend auch nachfolgend in einem Ablaufschema (s. Abb. 1-2) dargestellt.

Die hier vorgestellten Ergebnisse zu den experimentellen Untersuchungen zum Rissverhalten von mehrlagig bewehrten Stahlbetonbauteilen sowie die auf deren Grundlage vorgeschlagene Modifikation der Bemessungs- und Konstruktionsregeln im Hinblick auf die Rissbreitenbegrenzung entstammen teilweise einem, von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) und dem Gemeinschaftsausschuss Kaltformgebung e. V. (GAK) finanziell geförderten Verbundforschungsvorhaben IGF 18821. Im Rahmen dessen wurden an den Massivbauinstituten der RWTH Aachen University (Verbundtragverhalten und Zugstöße), der TU Kaiserslautern (Rissbreitenbeschränkung und Oberflächenbewehrung) und der TU Braunschweig (Druckglieder und Druckstöße) verschiedene Bemessungs- und Konstruktionsschwerpunkte im Umgang mit großen Stabdurchmessern untersucht. Die hier zugehörigen Zwischenergebnisse zur Thematik der Rissbreitenbegrenzung wurden u. a. im Schlussbericht 2018 und in Breit et al. 2018 veröffentlicht.

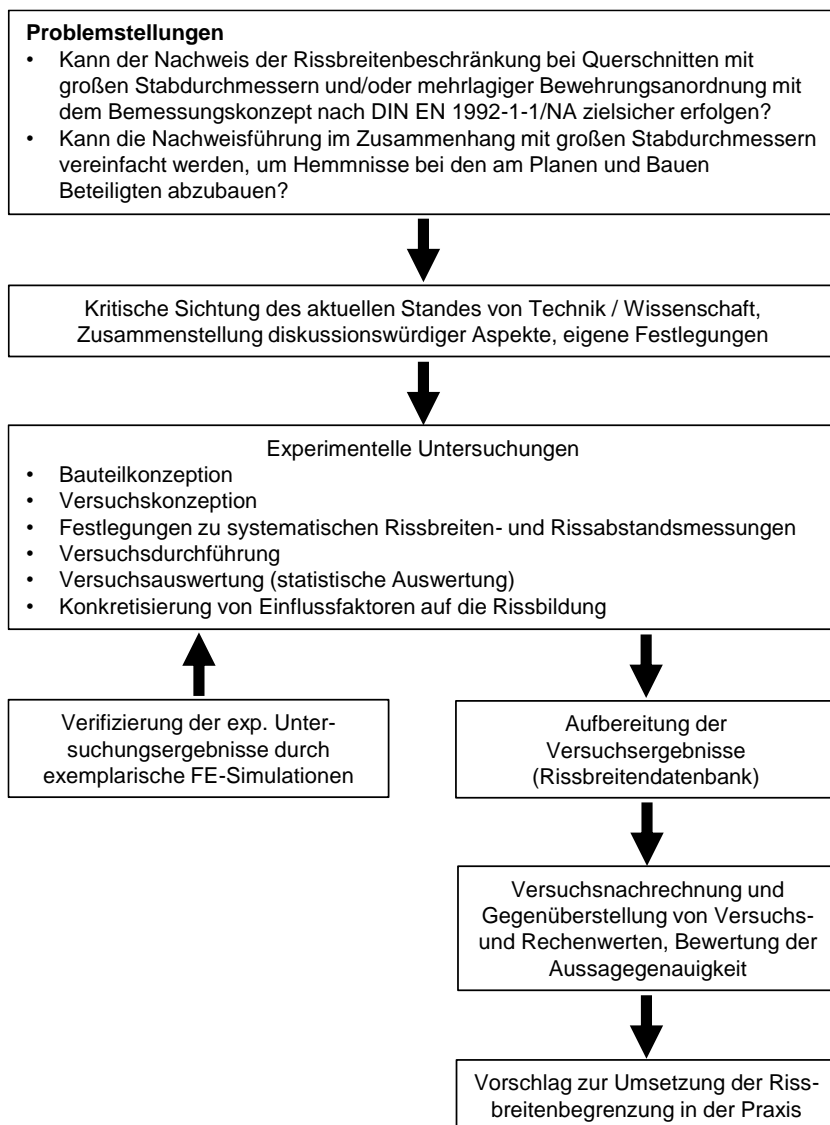


Abb. 1-2: Allgemeine Vorgehensweise dieser Arbeit

## 2 Grundlagen der Rissbreitenbeschränkung

### 2.1 Einführung

Die Thematik „Rissbildung“ einschließlich ihrer Ursachen (rissauslösende Faktoren) und ihrer Folgen (Bewertung, Akzeptanz oder ggf. Instandsetzung) wird im Stahlbetonbau oftmals kontrovers diskutiert und birgt zusätzlich – je nach betrachtetem Bauteil und vorgesehenem Verwendungszweck – ein erhebliches Konfliktpotential zwischen den am Planen und Bauen Beteiligten und dem Bauherrn.

Die Grundsätzlichkeit und der Stellenwert dieser Diskussion überraschen zunächst, da angesichts der Tragwirkung des Verbundwerkstoffs Stahlbeton, welche sich bekanntermaßen erst mit Rissbildung entfaltet, offensichtlich ist, dass die Stahlbetonbauweise eben eine gerissene Bauweise ist. In DBV 2019 heißt es in diesem Zusammenhang: *„Mit der Entscheidung für Beton- oder Stahlbetonbauteile sind einwirkungsbedingte Risse systemimmanent. [...] Somit werden diese Risse geplant (gerissene Bauweise), damit ausgeschrieben und „bestellt und bezahlt“: Wenn sie dann auch noch „geliefert“ werden, hat sich der Werkerfolg wie geplant tatsächlich eingestellt.“* Die in DBV 2019 genannte Systemimmanenz fordert jedoch auch ein, dass Risse durch planerisch-konstruktive, betontechnologische und ausführungstechnische Maßnahmen in ihrer Breite begrenzt und ausreichend verteilt werden, um die Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit des Bauteils sicherzustellen.

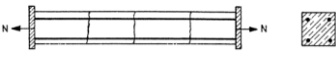
Im Abschnitt 2 dieser Arbeit wird der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik in Bezug auf die Rissbildung im Stahlbetonbau zusammengefasst und kritisch beleuchtet. Es werden grundlegende, aber dennoch z. T. kontrovers in der Fachwelt aufgefasste Zusammenhänge erörtert und diskutiert. Die in diesem Zusammenhang gewonnenen Erkenntnisse werden zu einem späteren Zeitpunkt als Festlegungen und Randbedingungen für die beschriebenen experimentellen Untersuchungen und deren Auswertung herangezogen.

### 2.2 Mechanische Grundlagen des Rissgeschehens


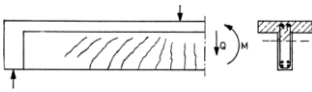
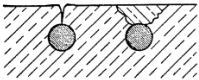
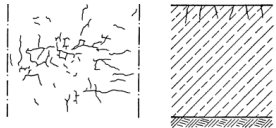
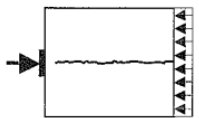
#### 2.2.1 Rissarten im Stahlbeton

Rissbildungen in Stahlbetonbauteilen können im Hinblick auf ihre Ursache in last- und/oder zwanginduzierte Risse oder herstellungsbedingte Risse unterschieden werden. Die zur besseren Veranschaulichung der rissauslösenden Ursachen und der jeweiligen Ausprägung des Rissbildes nachfolgend abgedruckten schematischen Darstellungen entstammen aus Leonhardt 1978 und DBV 2006.

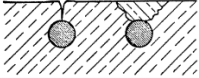
- Rissbildung infolge äußerer Lasten und/oder Zwang:

|            |   |  |
|------------|---|--|
| Trennrisse | infolge Zugbeanspruchung, durchtrennen den gesamten Querschnitt |  |
|------------|---|--|

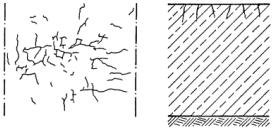
## 2 Grundlagen der Rissbreitenbeschränkung

|                                       |   |   |
|---------------------------------------|---|---|
| Biegerisse                            | infolge Biegebeanspruchung, erstrecken sich vom gezogenen Querschnittsrand bis etwa zur Dehnungsnulllinie                               |   |
| Schubrisse                            | infolge (dominierender) Querkraftbeanspruchung, verlaufen zur Stabachse geneigt   |   |
| Verbundrisse                          | infolge übermäßiger Verbundspannungen (Längskräfte), verlaufen parallel zur Stablängsachse  |    |
| Oberflächenrisse (Kra-<br>keelerisse) | infolge Eigenspannungen (z. B. Schwinden, Abfließen der Hydratationswärme), oftmals ungerichteter Verlauf, geringe Risstiefe            |    |
| Spaltrisse                            | infolge Teilflächenbelastung und den infolgedessen hervorgerufenen Spaltzugspannungen, verlaufen in Richtung der Hauptdrucktrajektorien |  |

- Herstellungsbedingte Rissbildungen und Risse infolge handwerklicher Fehler bei der Erstellung des Bauteils (z. B. infolge unzureichender Nachbehandlung oder fehlerhaften Verdichtens des Betons):

|            |   |   |
|------------|---|---|
| Längsrisse | vgl. Verbundrisse, infolge zu geringer Betonüberdeckung oder infolge Setzens des Frischbetons |  |
|------------|---|---|



|                  |   |   |
|------------------|---|---|
| Oberflächenrisse | vgl. Oberflächenrisse, infolge unzureichender Nachbehandlung oder infolge zu frühen Ausschalens |  |
|------------------|---|---|

Nach DBV 2016 können außerdem noch folgende, für unplanmäßige Rissbildungen ursächliche Faktoren genannt werden:

- unzutreffende oder gar falsche Annahmen im Zuge der rechnerischen Rissbreitenbegrenzung (z. B. Vernachlässigung maßgebender Zwangseinwirkungen, nichtzutreffende Annahmen zur Entwicklung der Betonzugfestigkeit bis zum Zeitpunkt des Aufreißens des Querschnitts, ungeeignete Nachweisführung),
- planerisch-konstruktive und/oder ausführungstechnische Fehler im Zuge der Betonstahlverlegung (zu große Stababstände oder Stabdurchmesser, fehlerhafte Bewehrungsführung und -positionierung, fehlende Betondeckung, unzureichende Nachbehandlung),
- unplanmäßige, zu frühe Belastungen während der Erhärtungsphase.

### 2.2.2 Rissmechanik

Die grundlegenden mechanischen Zusammenhänge im Hinblick auf die Rissbildung von Stahlbetonbauteilen können sehr anschaulich am Beispiel des (idealisierten) Zugstabes aufgezeigt werden, dessen konstante Spannungsverteilung grundsätzlich als Ausschnitt aus einer beliebigen Zugzone (z. B. Zugzone eines Biegebauteils) angesehen werden kann.

Dieser grundlegenden Betrachtungen wurde sich bereits zahlreich in Lehrbüchern bedient, sodass diese als hinreichend bekannt vorausgesetzt werden. Vor diesem Hintergrund werden die mechanischen Zusammenhänge in der hier vorliegenden Arbeit lediglich im gebotenen Umfang zusammenfassend wiedergegeben, mit dem Ziel, die grundlegende „Rissmechanik“ im Hinblick auf die durchgeführten experimentellen und numerischen Untersuchungen zusammenzustellen. Eine Herleitung der Bemessungsgleichungen zur Begrenzung der Rissbreite, welche ausgehend von den im Folgenden thematisierten mechanischen Zusammenhängen denkbar wäre, ist nicht Inhalt dieser Arbeit. In diesem Zusammenhang wird beispielsweise auf Krips et al. 1985 verwiesen.

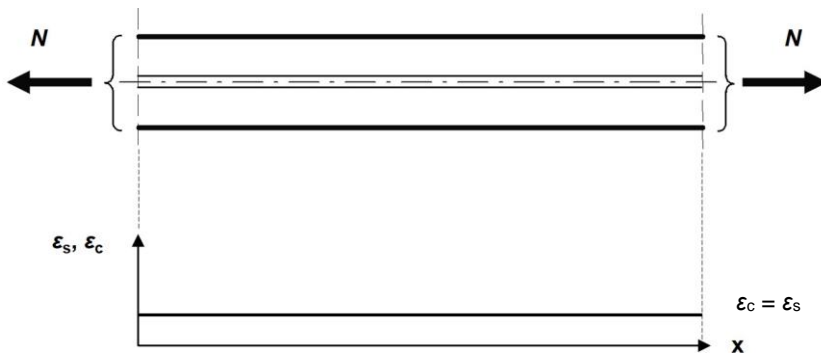
Den nachfolgenden Betrachtungen liegt jeweils ein rechteckförmiger Querschnitt zugrunde. Die Bewehrung des Zugstabes ist zu einem einzelnen, mittig eingelegten Bewehrungsstab vereinfacht. Die zentrisch angreifende Beanspruchung infolge äußerer Last (und/ oder infolge Zwang) kann in beliebigen Laststufen kontinuierlich bis zum Erreichen der Traglast aufgebracht werden. Dabei können, wie nachfolgend im Detail dargelegt, fünf Phasen unterschieden werden:

### Phase I - Zugstab ungerissen

Solange der Zugstab ungerissen ist, d. h. die Betonzugfestigkeit  $f_{ct}$  an keiner Stelle überschritten ist, befindet sich dieser im Zustand I.

Kennzeichnend für diesen Zustand ist, dass die Dehnungen des Betons  $\epsilon_c$  und die des eingelegten Bewehrungsstahls  $\epsilon_s$  an jeder Stelle des Zugstabes (im Hinblick auf jeweils benachbarte Fasern des Betons und des Stahls) übereinstimmen. Es treten somit keine Verschiebungen zwischen Beton und Stahl auf.

Der Stahlquerschnitt und der Betonquerschnitt beteiligen sich gleichermaßen am Lastabtrag. Die Stahlspannung ist damit gerade um das Verhältnis der E-Moduln ( $\alpha = E_s/E_c$ ) größer als die Betonspannung.



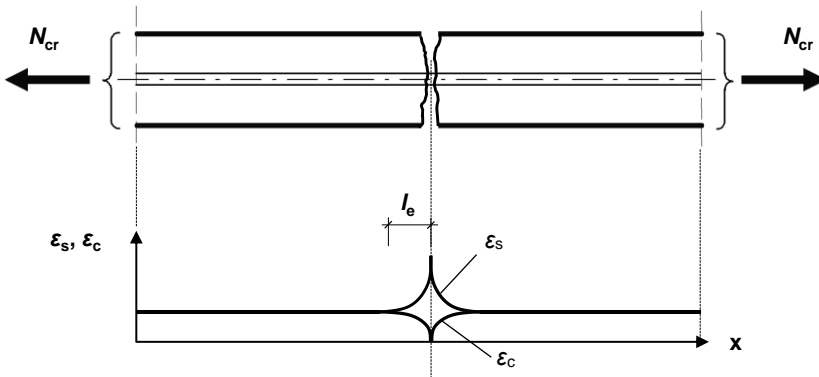
### Phase II - Erstrissbildung

Wird die angreifende Last  $N$  weiter erhöht, entsteht bereits auf geringem Lastniveau ein erster Riss (zugehörige Risschnittgröße  $N_{cr}$ ). Die ertragbare Dehnung von Normalbeton bis zum Aufreißen des Querschnitts beträgt nur ca. 0,1 ‰. Das Bauteil geht in den Zustand II über.

Dieser Erstriss entsteht unmittelbar (d. h. er entwickelt sich nicht sukzessiv) und bildet sich an der zufällig schwächsten Stelle (minimale Betonzugfestigkeit  $f_{ct}$  wird erreicht, die Betonzugfestigkeit variiert innerhalb eines Bauteils üblicherweise in den Grenzen  $\pm 20\text{--}30\%$ ) entlang des Stabes. Der Beton reißt auf, entzieht sich dem Lastabtrag und die am Zugstab angreifende äußere Last  $N_{cr}$  wird im Riss alleine durch den Betonstahl abgetragen. Infolgedessen erreicht die Stahldehnung im Riss ihr Maximum, während die Betondehnung an dieser Stelle den Wert 0 annimmt (Spannungen analog).

Infolge des lokalen Dehnungsunterschieds zwischen den Verbundpartnern Stahlbewehrung und Beton resultieren Relativverschiebungen (die zur Rissstelle hin zunehmen), wodurch in der näheren Umgebung des Rissbereichs hohe Verbundspannungen aktiviert werden (der Bewehrungsstab ist beidseitig verankert). Die Stahlspannungen werden dadurch entlang der Einleitungslänge  $l_e$  anteilig zurück in den Beton geleitet, bis die Betonspannung wieder die Betonzugfestigkeit erreicht.

Die Rissbreite entspricht dabei gerade der gegenseitigen Verschiebung der Rissufer. Am Ende der Einleitungslänge stimmen die Dehnungen des Betons und die des Bewehrungsstahls wieder überein (vgl. Zustand I).

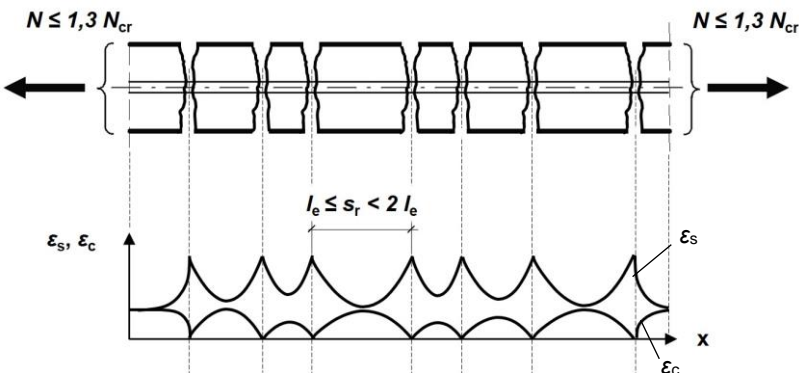


### Phase III - abgeschlossenes Erstrissbild

Steigert man die Belastung auf Niveau der Risschnittgröße  $N_{cr}$  geringfügig weiter ( $N \leq 1,3 N_{cr}$ , da die Betonzugfestigkeit  $f_{ct}$  über die Bauteillänge in den zuvor genannten Grenzen streut, ist eine geringe Laststeigerung erforderlich, um erneut die Betonzugfestigkeit an einer anderen zufälligen Stelle zu erreichen), so entstehen so lange weitere Risse, bis die Betonzugfestigkeit  $f_{ct}$  an keiner Stelle mehr erreicht wird.

Der Abstand zwischen zwei Rissen stellt sich in diesem Zusammenhang nicht beliebig ein. In der unmittelbaren Umgebung eines bestehenden Risses kann ein weiterer Riss erst im Abstand  $l_e \leq s_r < 2 l_e$  auftreten.

Zwischen den Rissen existieren weiterhin noch Querschnitte, in denen die Dehnungen des Betons  $\epsilon_c$  und die des Bewehrungsstahls  $\epsilon_s$  übereinstimmen.

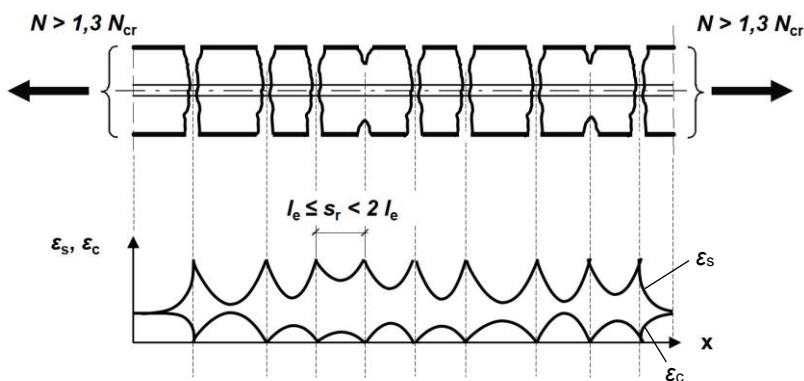


### **Phase IV - abgeschlossenes Rissbild**

Bei weiterer kontinuierlicher Laststeigerung ( $N > 1,3 N_{cr}$ ) nimmt die Stahlspannung zu und es kann beobachtet werden, dass sich schon vorhandene Risse aufweiten. Auch die Betonspannung kann lokal anwachsen, sodass weitere Zwischenrisse entstehen. Dies wird als sukzessive Rissbildung bezeichnet.

Kennzeichnend für diesen Zustand ist, dass die Dehnungen des Betons  $\varepsilon_c$  und die des Bewehrungsstahls  $\varepsilon_s$  an keiner Stelle des Zugstabes mehr übereinstimmen und über die gesamte Stablänge Verbundspannungen aktiviert werden.

Der Abstand zwischen zwei Rissen beträgt  $l_e \leq s_r < 2 l_e$ . Nach Zilch et al. 2010 liegt der mittlere Rissabstand näherungsweise bei ca.  $s_{rm} = 1,5 l_e$ .



### **Phase V - Stahlfließen**

Wird die Belastung auch über das abgeschlossene Rissbild hinaus weiter gesteigert, beginnt die Stahlbewehrung im Bereich der Risse zu fließen, bis dann schließlich die Tragfähigkeit (abhängig von der Zugfestigkeit der Bewehrung) erreicht ist.

Es kann in dieser Phase insgesamt eine wesentliche Zunahme der Stabverformung beobachtet werden.

Im Hinblick auf die Dehnung des Stahlglieds des Zugstabes ist anzumerken, dass die mittlere Dehnung im Vergleich zum „reinen Zustand II“ (d. h. alleinige Belastung eines Stahlstabes) etwas geringer ausfällt. Dies ist der Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen zuzumessen (und gilt analog auch für die Phasen I bis IV).

Die beschriebenen mechanischen Zusammenhänge der Rissbildung am Beispiel des zentrischen Zugstabes können anschaulich in nachstehendem Last-Verformungsdiagramm aus DBV 2016 zusammengefasst werden.

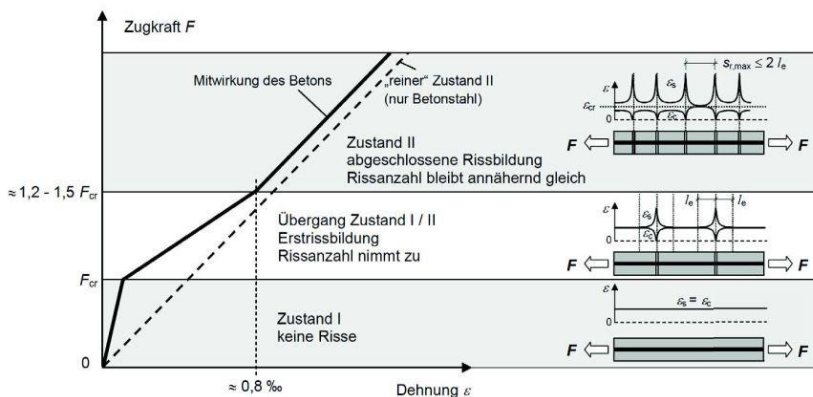


Abb. 2-1: Zusammenfassung der mechanischen Zusammenhänge des Rissgeschehens in einem Last-Verformungsdiagramm (aus DBV 2016)

In dem in Abb. 2-1 abgebildeten Last-Verformungsdiagramm ist die (äußere) Zugkraft  $F$  über die Stabdehnung  $\varepsilon$  (der eingelegten Bewehrung) aufgetragen.

Für den Zustand I (ungerissener Querschnitt) ist zu erkennen, dass die Last-Dehnungslinie einen steilen, linearen Verlauf aufweist. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass sich beide Verbundpartner am Lastabtrag beteiligen und für dieses Lastniveau ein linear-elastisches Materialverhalten unterstellt werden kann.

Mit Erreichen der Risschnittgröße  $F_{cr}$  (zuvor mit  $N_{cr}$  bezeichnet) setzt die Rissbildung ein und die Last-Dehnungslinie flacht infolge des Steifigkeitsverlustes unmittelbar ab. Auf dem Niveau der Erstrisschnittgröße (in Abb. 2-1 bis ca.  $1,2\text{--}1,5 F_{cr}$ ) bilden sich bis zum Erreichen des abgeschlossenen Erstrissbildes weitere Risse und die mittlere Stahldehnung wächst kontinuierlich an. Gemäß voranstehender Abbildung kann dem abgeschlossenen Erstrissbild stark vereinfachend in etwa eine mittlere Dehnung von  $0,8 \text{ ‰}$  zugeordnet werden. Dieser (pauschale) Grenzwert unterstellt ein Schwindmaß des Betons von ca.  $\varepsilon_{CS} = 0,4 \text{ ‰}$  und eine Temperaturdifferenz von  $\Delta T = 40 \text{ K}$  und dient der Rechenvereinfachung.

Mit weiterer Steigerung der äußeren Last entstehen weitere Risse (sukzessive Rissbildung bis zum Erreichen des abgeschlossenen Rissbildes), wobei tendenziell die Anzahl neuer Risse mit zunehmender Beanspruchung abnimmt.

Nach Erreichen des abgeschlossenen Rissbildes nähert sich die Last-Dehnungslinie immer mehr derjenigen des reinen Zustands II an. Der verbleibende Abstand zwischen den beiden Arbeitslinien ist der Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen geschuldet.

Die mechanischen Zusammenhänge im Hinblick auf das Rissgeschehen stellen sich zunächst unabhängig davon dar, ob es sich um eine Last- oder Zwangbeanspruchung handelt. Jedoch gilt es zu beachten, dass das abgeschlossene Erstrissbild erst bei einer mittleren Stahldehnung  $\varepsilon_{sm}$  von ca.  $0,8 \text{ ‰}$  (s. Abb. 2-1) erreicht wird. Für übliche Zwangbeanspruchungen aus Temperatur- und Schwindeinwirkung ( $\varepsilon_{CS} = 0,4\text{--}0,5 \text{ ‰}$  und  $\Delta T = 20 \text{ K}$ , d. h.  $\varepsilon_{sm} < 0,8 \text{ ‰}$ ) ist somit nicht zu erwarten, dass das Rissgeschehen über die Phase des abgeschlossenen Erstrissbildes hinweg ansteigt.

### 2.2.3 Einflussfaktoren der Rissbildung

Wie bereits ausgeführt, ist die Rissbildung grundsätzlich auf das Erreichen der Betonzugfestigkeit infolge direkter und/oder indirekter Einwirkungen zurückzuführen.

In dem hier vorliegenden Abschnitt werden Einflussfaktoren der Rissbildung von Stahlbetonbauteilen stichpunktartig zusammengestellt.

#### 2.2.3.1 Materialbedingte Einflussgrößen

Die Zusammensetzung eines Betons bestimmt maßgeblich dessen Frisch- und Festbetoneigenschaften.

Die wesentlichen Festbetoneigenschaften, welche als Eingangsgrößen für die (rechnerische) Rissbreitenbegrenzung herangezogen werden, sind die Zugfestigkeit  $f_{ct,eff}$  und der E-Modul  $E_{cm}$ . Für beide Größen kann erfahrungsgemäß eine Streubreite von mindestens ca.  $\pm 20\%$  angegeben werden. Die Größenordnung der Streubreite hängt maßgeblich von der jeweiligen Betonzusammensetzung (u. a. Zuschlagsart) ab.

Rissbildungen treten somit an Stellen der zufällig geringsten Zugfestigkeit auf. Erschwerend kommt hinzu, dass zwischen den am Normprobekörper geprüften Materialeigenschaften (welche der Bemessung zugrunde gelegt werden) und den am Bauwerk „tatsächlich“ vorliegenden Materialeigenschaften (welche die Rissbildung unmittelbar beeinflussen) erhebliche Differenzen vorliegen. In Leonhardt 1985 heißt es, dass die Zugfestigkeit im Allgemeinen am Bauwerk in etwa 20–30 % niedriger ist, als zugehörige Laborwerte. Dies kann insbesondere auf folgende wesentliche Einflussgrößen zurückgeführt werden:

- unterschiedliche Verdichtung von Probekörper und Bauwerksbeton,
- unterschiedliche Nachbehandlung und Lagerung von Probekörper und Bauwerksbeton,
- unterschiedliche Querschnittsabmessungen von Probekörper und Bauteil.

Infolgedessen kann geschlussfolgert werden, dass in diesem Zusammenhang grundsätzlich unzutreffende Berechnungseingangsparameter angesetzt werden. Belastbare Ergebnisse im Hinblick auf heutzutage verwendete Betone liegen diesbezüglich nicht vor, sodass keine konkreten Zahlenwerte für die o. g. Diskrepanz angegeben werden können. In Weber 2019 finden sich hierzu beispielsweise Untersuchungsansätze.

Die Betonzugfestigkeit weist eine vom Bauteilalter und von den äußeren Witterungs- und Umweltbedingungen sowie der Bauteilgeometrie zeitabhängige Entwicklung auf. Dies ist insbesondere für den Nachweis der Mindestbewehrung zum Zeitpunkt des Abfließens der Hydratationswärme von großer Bedeutung. Aus betontechnologischer Sicht können in diesem Zusammenhang entsprechende Zemente hinsichtlich ihrer Frühfestigkeitsentwicklung (z. B. Zusammensetzung des Zements, Mahlfeinheit der Bestandteile) ausgewählt werden.

In geringerem Umfang beeinflussen außerdem die Kornform und die Korngröße der Zuschlagsstoffe die Zugfestigkeit. Kleinere, runde Zuschlagskörner (z. B. Rheinkies,  $d_g = 8\text{ mm}$ ) wirken sich nachteiliger auf die Zugfestigkeit aus, als beispielsweise

größere, gebrochene Zuschlagskörner. Dies ist vorwiegend auf die bessere Kornverzahnung bei raueren Oberflächen zurückzuführen. Der E-Modul wird dagegen sehr stark durch die Art der verwendeten Gesteinskörnung und auch durch den Zementstein beeinflusst (vgl. hierzu DBV 2016 und Fingerloos et al. 2016).

Die Betonstahlbewehrung findet in den Nachweisen zur Rissbreitenbegrenzung über den Stabdurchmesser und den E-Modul Berücksichtigung. Weiterhin ist die Oberflächengeometrie der Bewehrung durch die normative Festlegung der bezogenen Rippenfläche geregelt. Im Gegensatz zur Herstellung des Betons werden die Stahlbewehrungsprodukte industriell und mit weitgehend gleichmäßigen Materialeigenschaften gefertigt, sodass beim Betonstahl i. A. keine nennenswerten materialbedingten Streuungen zu erwarten sind.

### 2.2.3.2 Geometrische Einflussgrößen

Die geometrischen Einflussgrößen auf die Rissbildung können wie folgt zusammengefasst werden:

- Querschnittsabmessungen des Bauteils („dünn“ oder „dick“ Bauteil),
- Querschnittsänderungen (Ausparungen oder Verdickung/Verjüngung),
- Lage der Bewehrung (Betonüberdeckung, Abstände untereinander),
- Wirkungsbereich der Bewehrung (die rissverteilende Wirkung der Bewehrung ist auf einen begrenzten Bereich im Querschnitt beschränkt),
- Stabdurchmesser und ggf. Kombination verschiedener Stabdurchmesser (Haupt- und Oberflächenbewehrung),
- Bewehrungsgrad.

Der Stabdurchmesser stellt einen zentralen Parameter dar. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass mit größer werdendem Stabdurchmesser auch größer werdende Rissbreiten zu erwarten sind.

### 2.2.3.3 Beanspruchungsbedingte Einflussgrößen

Rissbildungen treten infolge last- und/oder zwanginduzierter Beanspruchung auf. Hierbei ist wie folgt zu unterscheiden:

- biege- oder normalkraftdominierte Beanspruchung,
- Art der Belastung (statische oder dynamische Belastung),
- Dauer der Belastung (Einfluss des Verbundkriechens),
- Größe der Stahlspannung (die Bewehrung wird planmäßig so bemessen, dass diese beim Aufreißen des Querschnitts nicht ins Fließen gerät).

### 2.2.3.4 Mechanische Einflussgrößen

Als wesentliche mechanische Einflussgröße in Bezug auf die Rissbildung kann die Verbundwirkung zwischen Beton und Betonstahl identifiziert werden, welche wiederum

wesentlich von der Oberflächengeometrie des Bewehrungsstabes (glatte oder gerippte Oberfläche) beeinflusst wird.

Im Hinblick auf die Rissbildung wurde in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, dass im Umgebungsbereich eines Risses Verbundspannungen aktiviert werden, wodurch Stahlspannungen anteilig entlang der Einleitungslänge zurück in den Beton geleitet werden. D. h. erst infolge der durch Rissbildung bedingten Dehnungsunterschiede kann die Verbundwirkung aktiviert werden.

Dabei wird die Güte des Zusammenwirkens von Beton und Betonstahl („Verzahnung“) maßgeblich durch die folgenden Parameter bestimmt:

- Oberflächengestaltung des Betonstahls (Stabdurchmesser, Rippengeometrie, z. B. Rippenform, Rippenneigung und Rippenfläche),
- Oberflächenzustand der Bewehrung (Walzhaut, Korrosionsrückstände),
- mechanische Eigenschaften des Betons (Betondruck- und -zugfestigkeit; abhängig von der Betonzusammensetzung und den Frischbetoneigenschaften),
- Verbundbedingungen des Betonstahls (u. a. abhängig von der Stablage sowie der Einfüllrichtung des Betons und infolgedessen ggf. vorhandener Luftporen),
- ausreichend große und dichte Betonüberdeckung.

Im Hinblick auf die Rissbreitenberechnung (nach DIN EN 1992-1-1/NA) bedient man sich z. T. starker Vereinfachungen der komplexen mechanischen, nicht linearen Zusammenhänge im Hinblick auf das Verbundtragverhalten. Diesbezüglich wird eine idealisierte, auf experimentellen Untersuchungen basierende Verbundspannung-Schlupf-Beziehung zugrunde gelegt und es wird angenommen, dass die Verbundspannungen konstant über den Stabumfang entlang der Einleitungslänge („mittlere Verbundspannung“  $\tau_{sm}$ ) verteilt sind.

Für einen zugbeanspruchten Bewehrungsstab kann insgesamt zwischen Scherverbund, Haftverbund und Reibungsverbund unterschieden werden. Während der Haftverbund bereits bei geringen Relativverschiebungen aufgehoben und der Scherverbund nur bei ausreichend großen Querpressungen wirksam ist, bilden sich in der Modellvorstellung nach Tefers et al. 1968 ausgehend von den Rippen rotations-symmetrisch Druckstreben aus. In tangentialer Richtung stellt sich ein Zugring zur Herstellung des Gleichgewichts ein.

Einen ausführlichen Überblick über unterschiedliche Verbundmodelle und eine Zusammenfassung des aktuellen Wissensstandes sind in Eckfeldt 2005 und Schoening 2018 (insbesondere im Hinblick auf große Stabdurchmesser) enthalten.

### 2.2.3.5 Sonstige Einflussgrößen

Handwerkliche Fehler beim Einbau und Verdichten des Betons (z. B. Kiesnester oder Lufteinschlüsse) oder unzureichende Nachbehandlungsmaßnahme (z. B. fehlender Schutz der Betonflächen vor Austrocknung) können die Rissbildung begünstigen.



## 2.3 Forschungsvorhaben zur Rissbreitenbegrenzung

### 2.3.1 Allgemeines und Historie der Rissbreitenbegrenzung

Intensive Untersuchungen zur Rissbildung im Stahlbetonbau wurden in Deutschland (erkennbar) erstmals in den 1960er Jahren angestrengt (z. B. werden in Rehm et al. 1968 in diesem Zusammenhang u. a. die „Münchener Versuche“ genannt, die von Rüschi, H. und Rehm, G. zwischen 1962 und 1963 durchgeführt wurden). Bis zu diesem Zeitpunkt wurde eine konkrete Begrenzung der Rissbreite im Zuge des Planen und Bauens weitestgehend nicht vorgesehen. Vielmehr wurden erfahrungsbasierte konstruktive Maßnahmen ergriffen, um das Auftreten größerer Rissbreiten zu vermeiden. Konkrete Bemessungskonzepte zur Begrenzung der Rissbreite waren bis dahin nicht Gegenstand der DIN 1045 1959.

Im Zuge der Erarbeitung der grundlegenden Neufassung der DIN 1045 1972 wurde jedoch das Bewusstsein für das Erfordernis einer Rissbreitenbegrenzung im Stahl- und Spannbetonbau im Hinblick auf Dauerhaftigkeitsaspekte geschärft. Ausschlaggebend hierbei war nach Rehm et al. 1968 u. a. die avisierte Einführung des Traglastverfahrens für die Querschnittsbemessung in der neuen Normgeneration (DIN 1045 1972) und die damit einhergehende höhere planmäßige Ausnutzung der verwendeten Baustoffe Beton und Stahl. Möglicherweise trug hierzu auch die ab diesem Zeitpunkt verstärkt einsetzende Verwendung gerippter Bewehrungsstähe (vorher Einsatz überwiegend glatter Stäbe) bei.

Im Vorfeld zur DIN 1045 1972 wurde deshalb zahlreiche Untersuchungen zum Rissgeschehen durchgeführt, auf Grundlage derer Ansätze zur rechnerischen Begrenzung der Rissbreite abgeleitet wurden. In diesem Zusammenhang wurde u. a. in Rehm et al. 1968 ein Vorschlag für die Berechnung der Rissbreite  $w_{95\%}$  vorgestellt, welcher unter Hinzuziehung experimentell gewonnener Erkenntnisse die zu jener Zeit den Stand des Wissens darstellenden rechnerischen Ansätze beträchtlich erweiterte.

Die allgemeinen Zusammenhänge zwischen der Rissbreite und dem Rissabstand für das abgeschlossene Rissbild wurden in Rehm et al. 1968 zunächst für die mittlere Rissbreite  $w_m$  hergeleitet und dann auf die kritische Rissbreite  $w_{95\%}$  erweitert. Die kritische Rissbreite stellt demnach einen Wert dar, welcher von 95 % aller gemessenen Rissbreiten (im Rahmen experimenteller Untersuchungen) nicht überschritten wurde.

$$w_{95\%} = k_4 \cdot \left( k_1 \cdot \bar{u}_b + k_2 \cdot k_3 \cdot \frac{\phi}{\mu} \right) \cdot \frac{\sigma_{\text{ell}}}{E_e} \cdot \left( 1 - \frac{\Delta\sigma_{\text{ell}}}{\sigma_{\text{ell}}} \right) \quad \text{Gl. 2-1}$$

|     |             |  |
|-----|-------------|--|
| mit | $k_4$       | Beiwert zur Berechnung der kritischen Rissbreite aus dem Mittelwert der Rissbreite (ermittelt an Bauteilversuchen) |
|     | $k_1$       | Korrekturglied zur Berücksichtigung der Betondeckung   |
|     | $\bar{u}_b$ | Betonüberdeckung   |
|     | $k_2$       | Korrekturglied zur Berücksichtigung der Verbundwirkung der Bewehrung   |
|     | $k_3$       | Korrekturglied zur Berücksichtigung des Einflusses der mitwirkenden Betonfläche (Lage der Nulllinie)               |

## 2 Grundlagen der Rissbreitenbeschränkung

---

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| $\mu$                       | Bewehrungsgehalt   |
| $\phi$                      | Stabdurchmesser  |
| $\sigma_{\text{ell}}$       | rechnerische Stahlspannung   |
| $\Delta\sigma_{\text{ell}}$ | Berücksichtigung der Mitwirkung des Betons durch Abminderung der rechnerischen Stahlspannung |
| $E_e$                       | E-Modul der Stahlbewehrung   |

Das Abzugsglied  $\Delta\sigma_{\text{ell}}$  zur Berücksichtigung der Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen berechnet sich wie folgt:

$$\Delta\sigma_{\text{ell}} = \left( \frac{0,18 \cdot \beta_z}{\mu} \right)^2 \cdot \frac{1}{\sigma_{\text{ell}}} \quad \text{Gl. 2-2}$$

mit  $\beta_z$  Betonzugfestigkeit

Die Korrekturglieder  $k_1$  bis  $k_3$  sowie das Verhältnis der kritischen Rissbreite  $w_{95\%}$  zum Mittelwert der Rissbreite  $w_m$  ( $k_4$ ) wurden auf Grundlage experimenteller Untersuchungen empirisch kalibriert. Die so hergeleitete Bemessungsgleichung wurde vor dem Hintergrund der Anwendbarkeit in der Praxis in einem weiteren Schritt nochmals vereinfacht. Das so in Rehm et al. 1968 dargelegte Bemessungskonzept konnte durch Nachrechnung von Versuchsergebnissen in guter Näherung verifiziert werden. Im Zuge dessen wurde das Konzept auch weiteren, zu seiner Zeit existierenden (und z. T. auch internationalen) Berechnungsformeln gegenübergestellt. Es zeigte sich, dass die in Rehm et al. 1968 vorgeschlagene Berechnungsformel die größte Aussagegenauigkeit aufwies.

Unter Würdigung der bis hierhin gewonnenen Forschungsergebnisse wurden in DIN 1045 1972 im Abschnitt 17.6.2 erstmals konkrete Regeln zur Begrenzung der Rissbreite etabliert. Im Hinblick auf eine praxisgerechte Anwendung wurde die Bemessungsgleichung wie folgt stark vereinfacht:

$$\phi \leq r \cdot \frac{\mu_z}{\sigma_{\text{ed}}^2} \quad \text{Gl. 2-3}$$

mit  $\phi$  (größter) Stabdurchmesser der Längsbewehrung  
 $r$  tabellierter Beiwert zur Rissbreitenbeschränkung (vgl. Abb. 2-2)  
 $\mu_z$  Bewehrungsgrad (bezogen auf die Betonzugzone)  
 $\sigma_{\text{ed}}$  Stahlspannung im gerissenen Zustand (Zustand II) unter Gebrauchslast

Der Nachweis der Rissbreitenbegrenzung war nach DIN 1045 1972 für zentrisch belastete Bauteile mit Bewehrungsgraden  $\mu_z > 0,3\%$  ( $\mu_z > 0,15\%$  für Biegung) zu erbringen. Der Nachweis selbst wurde, wie anhand der Gl. 2-3 ersichtlich ist, indirekt über die Berechnung eines Grenzstabdurchmessers  $\phi$  geführt. Der Beiwert  $r$  wurde in diesem Zusammenhang für verschiedene Bemessungsrissbreiten und verschiedene Verbundverhältnisse tabelliert vorgegeben. Die so angegebenen Werte waren für damals übliche Betondeckungen zwischen 1,0 bis 3,0 cm gültig.

## 2.3 Forschungsvorhaben zur Rissbreitenbegrenzung

| Stahlart        | Lage der Stäbe               | Rißbreite $w_{95}$ in mm |      |      |
|-----------------|------------------------------|--------------------------|------|------|
|                 |                              | 0,3                      | 0,25 | 0,20 |
| Rundstahl glatt | B günstiger Verbundbereich   | 60                       | 40   | 25   |
|                 | A ungünstiger Verbundbereich | 40                       | 27   | 18   |
| Rippenstahl     | B günstiger Verbundbereich   | 120                      | 80   | 50   |
|                 | A ungünstiger Verbundbereich | 80                       | 53   | 33   |

Abb. 2-2: Beiwerte  $r$  zur Rissbreitenbeschränkung nach DIN 1045 1972 (aus Leonhardt 1978)

Gemäß Leonhardt 1978 wurden die oben tabellierten Beiwerte  $r$  so bestimmt, dass für bemessungsrelevante Stahlspannungen  $\sigma_e$  in den Nachweisen der Gebrauchstauglichkeit genügend genaue Übereinstimmungen mit den auf damaligem Erkenntnisstand beruhenden Berechnungsformeln (z. B. Rehm et al. 1968) erzielt werden konnten.

Unter Berücksichtigung der Ausführungen in Leonhardt 1978 waren die o. g. Zusammenhänge zur Rissbreitenbegrenzung lediglich für Zug- und Biegebeanspruchungen infolge Last (nicht für Zwang) gültig. Weiter dienten die angegebenen Konstruktionsregeln vorrangig ästhetischen Aspekten und dem Korrosionsschutz der Stahlbewehrung. Zum damaligen Zeitpunkt wurde diesbezüglich die Auffassung vertreten, dass ein wesentlicher Zusammenhang zwischen der Größe der Rissbreite und der Korrosionsanfälligkeit der Bewehrung bestand (vgl. DAfStb 400 1994). Weiterführende Untersuchungen (u. a. von P. Schiessl, s. Leonhardt 1978) trugen dann zu dem heute vorherrschenden Verständnis bei, dass weniger die Rissbreite selbst, sondern insbesondere eine ausreichend dichte und dicke Betondeckung sowie ein ausreichend hoher Zementgehalt wesentlich zum Korrosionsschutz der eingelegten Betonstahlbewehrung beitragen.

In Leonhardt 1985 wurde das in DIN 1045 1972 enthaltene Konzept zur Rissbreitenbeschränkung später scharf kritisiert. Die nach Auffassung des Verfassers vorliegenden Unzulänglichkeiten des Bemessungsmodells bezogen sich dabei insbesondere auf die unzutreffende Festlegung der Beiwerte  $r$  und die grundsätzliche Art der Nachweisführung durch Bestimmung eines Grenzstabdurchmessers. Auch das nach DIN 1045 1972 nicht angezeigte Erfordernis der Nachweisführung für Grenzbewehrungsgrade  $\mu_z \leq 0,3\%$  (für zentrischen Zug) bzw.  $\mu_z \leq 0,15\%$  (für Biegung) wurde in Leonhardt 1985 beklagt. Demnach sollen Schadensfälle an Flüssigkeitsbehältern (Trennrissbildungen) unmittelbar auf voranstehendes Kriterium und die in der Praxis vor diesem Hintergrund ausbleibenden Nachweise zur Rissbreitenbegrenzung zurückgeführt werden.

Die intensive Auseinandersetzung der Fachwelt mit der Thematik der Rissbreitenbegrenzung führte dazu, dass weitere, z. T. verfeinerte aber nicht weniger kontrovers diskutierte Bemessungs- und Konstruktionskonzepte entwickelt wurden. Insgesamt können diese Bemessungskonzepte hinsichtlich ihrer Zuordnung nach klassischer Rissbreitentheorie und kontinuierlicher Rissbreitentheorie unterschieden werden.

Unter der klassischen Rissbreitentheorie sind diejenigen Bemessungsformeln und Berechnungsansätze gemäß Hegger et al. 2010 zu verstehen, welche die Mechanik des Rissgeschehen stark vereinfacht abbilden. Demnach werden dabei z. T. maßgebende Einflussfaktoren (z. B. Verbundeigenschaften) durch empirische Korrekturfaktoren beschrieben, die überwiegend an Bauteilversuchen kalibriert wurden. Dadurch sind die so abgeleiteten Rissmodelle u. U. wesentlich mit der betrachteten Versuchskonzeption verknüpft, sodass eine Allgemeingültigkeit nicht immer sichergestellt werden kann. Die Untersuchungen zur Erfassung des Rissgeschehens wurden sowohl an biegebeanspruchten als auch an zentrisch zugbelasteten Bauteilen durchgeführt. Ihnen allen ist gemein, dass im Zuge dieser Untersuchungen vornehmlich kleine Stabdurchmesser (hauptsächlich 6 – 10 mm) mit unterschiedlicher Rippengeometrie betrachtet wurden. Auch unterscheiden sich diese Untersuchungen z. T. wesentlich in Bezug auf die Interpretation und Auswertung der Versuchsergebnisse. Das Bemessungskonzept in DIN 1045 1988, welches auf Martin et al. 1980 zurückgeht und an das in Rehm et al. 1968 zuvor beschriebene Konzept anknüpft, ist der klassischen Rissbreitentheorie zuzuordnen.

Im Rahmen der Nachweisführung zur Beschränkung der Rissbreite unter Gebrauchslast waren nach DIN 1045 1988 der Nachweis der Mindestbewehrung (Abschnitt 17.6.2) und die Regeln für die statisch erforderliche Bewehrung (Abschnitt 17.6.3) zu berücksichtigen. Nach DIN 1045 1988 wurde die Rissbreite hiermit so begrenzt, dass das äußere Erscheinungsbild und die Dauerhaftigkeit des Bauteils nicht beeinträchtigt wurden.

Die oberflächennah einzulegende Mindestbewehrung, mittels derer die Risschnittgröße auf Erstrissniveau infolge Zwangs aufzunehmen war, war gemäß nachstehender Gleichung zu ermitteln:

$$\mu_z = \frac{k_0 \cdot \beta_{bZ}}{\sigma_s} \quad \text{Gl. 2-4}$$

mit  $\mu_z$  Bewehrungsgrad (bezogen auf die Betonzugzone nach Zustand I)  
 $k_0$  Beiwert zur Beschränkung der Breite von Erstrissen in Bauteilen,  $k_0 = 0,4$  (für Biegezwang) oder  $k_0 = 1,0$  (für zentrischen Zwang)  
 $\beta_{bZ}$  Betonzugfestigkeit  
 $\sigma_s$  Stahlspannung im gerissenen Zustand (Zustand II)

Für die statisch erforderliche Bewehrung, welche aus der Querschnittsbemessung auf Traglastniveau (Biegebemessung, Bemessung für kombinierte Beanspruchung aus Biegung und Längskraft, Bemessung für Längskraft) resultierte, waren tabellierte Anforderungen an den Grenzstabdurchmesser  $d_s$  oder an die Höchstwerte der Stababstände einzuhalten (s. Abb. 2-3).

Gegebenenfalls musste zur Erfüllung dieser konstruktiven Vorgaben die zuvor ermittelte statisch erforderliche Bewehrung erhöht werden.

## 2.3 Forschungsvorhaben zur Rissbreitenbegrenzung

Tabelle 14. **Grenzdurchmesser  $d_s$**  (Grenzen für den Vergleichsdurchmesser  $d_{sV}$ ) **in mm**. Nur einzuhalten, wenn die Werte der Tabelle 15 nicht eingehalten sind und stets einzuhalten bei Ermittlung der Mindestbewehrung nach Abschnitt 17.6.2

|   | 1   | 2              | 3   | 4   | 5   | 6   | 7                  |    |
|---|---|----------------|-----|-----|-----|-----|--------------------|----|
| 1 | Betonstahlspannung $\sigma_s$ in N/mm <sup>2</sup>            | 160            | 200 | 240 | 280 | 350 | 400 <sup>26)</sup> |    |
| 2 | Grenzdurchmesser in mm bei Umweltbedingungen nach Tabelle 10, | Zeile 1        | 36  | 36  | 28  | 25  | 16                 | 10 |
| 3 |   | Zeilen 2 bis 4 | 28  | 20  | 16  | 12  | 8                  | 5  |

Die Grenzdurchmesser dürfen im Verhältnis  $\frac{d}{10(d-h)} \geq 1$  vergrößert werden.

$d$  Bauteildicke  
 $h$  statische Nutzhöhe

jeweils rechtwinklig zur betrachteten Bewehrung

Bei Verwendung von Stabbindeln mit  $d_{sV} > 36$  mm ist immer eine Hautbewehrung nach Abschnitt 18.11.3 erforderlich. Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden.

<sup>26)</sup> Hinsichtlich der Größe der Betonstahlspannung  $\sigma_s$ , siehe Erläuterung zu Gleichung (18).

Tabelle 15. **Höchstwerte der Stababstände in cm**. Nur einzuhalten, wenn die Werte der Tabelle 14 nicht eingehalten sind.

|   | 1   | 2              | 3   | 4   | 5   | 6   |    |
|---|---|----------------|-----|-----|-----|-----|----|
| 1 | Betonstahlspannung $\sigma_s$ in N/mm <sup>2</sup>                        | 160            | 200 | 240 | 280 | 350 |    |
| 2 | Höchstwerte der Stababstände in cm bei Umweltbedingungen nach Tabelle 10, | Zeile 1        | 25  | 25  | 25  | 20  | 15 |
| 3 |   | Zeilen 2 bis 4 | 25  | 20  | 15  | 10  | 7  |

Für Platten ist Abschnitt 20.1.6.2 zu beachten. Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden.

(Tabelle 16 ist entfallen)

Abb. 2-3: Regeln für die statisch erforderliche Bewehrung gemäß DIN 1045 1988

Die kontinuierliche Risstheorie ist als Weiterentwicklung der klassischen Theorie zu verstehen. Es ist ein, gegenüber den Modellen der klassischen Theorien, vergleichsweise deutlich ausgeprägteres mechanisches Modell beinhaltet, welches die Verbund- und Materialeigenschaften (Betonzugfestigkeit) präziser abbildet (Hegger et al. 2010). Außerdem werden nun auch die verschiedenen Stadien der Rissbildung (Erstrissbild, abgeschlossenes Rissbild), die sich insbesondere durch die Mitwirkung des Betons unterscheiden, dezidiert berücksichtigt. In Noakowski 1985 heißt es diesbezüglich: „Eine Theorie des alleinigen Endrisszustands kann es daher streng genommen nicht geben.“ Jedoch kann hier ebenfalls nicht vollständig auf den Ansatz empirisch ermittelter Faktoren verzichtet werden. Ein erstes wesentliches, von der klassischen Rissbreitentheorie losgelöstes Rissmodell wird in Noakowski 1985 beschrieben. Nach Hegger et al. 2010 ist das in DIN 1045-1 2008 enthaltene Bemessungskonzept (so auch in DIN EN 1992-1-1/NA), welches ausführlich in DAFStb 466 1996 beschrieben ist, ausdrücklich der kontinuierlichen Risstheorie zuzuordnen.

Im Abschnitt 2.4 wird eine Auswahl der derzeit national und international verwendeten Bemessungskonzepte zur Begrenzung der Rissbreite vorgestellt. Vor diesem Hintergrund werden die Bemessungsgleichungen nach DIN 1045-1 2008 bzw. DIN EN 1992-1-1/NA an dieser Stelle nicht weiter vertieft.

Es sei außerdem darauf hingewiesen, dass die voranstehende Zusammenfassung der Entwicklungen historischer Bemessungsansätze zur rechnerischen Begrenzung der

Rissbreite keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Vielmehr soll in diesem Zusammenhang auf Schäfer 2016 verwiesen werden.

### 2.3.2 Ausgewählte Forschungsvorhaben

Die in Bemessungsnormen etablierten Bemessungs- und Berechnungsmodelle sind vielfach ein Resultat vorangehender intensiver Forschungsarbeiten. Vor diesem Hintergrund werden im vorliegenden Abschnitt ausgewählte Forschungsvorhaben näher beleuchtet, welche für die hier beschriebene Arbeit insgesamt von Bedeutung sind. Dabei werden sowohl grundlegende Versuchsreihen, auf Basis derer die in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen historischen Bemessungsansätze abgeleitet wurden, als auch neuere Untersuchungen zum Einfluss großer Stabdurchmesser auf das Rissgeschehen betrachtet.

#### 2.3.2.1 Untersuchungen von G. Rehm (1975)

Im Hinblick auf den seitens der Firma Dyckerhoff und Widmann avisierten Einsatz von GEWI-Stählen BSt 42/50  $\phi 50$  mm in massigen Stahlbetonbauteilen und die damit verbundene Überschreitung der Anwendungsgrenzen der DIN 1045 1972 (nur Stabdurchmesser bis  $\phi 28$  mm geregelt) wurde in Rehm et al. 1975 gutachterlich Stellung bezogen. In diesem Zusammenhang wurde das Erfordernis zusätzlicher Regeln zur Sicherstellung des Tragverhaltens im Gebrauchs- und Bruchzustand überprüft.

Im Gegensatz zu Deutschland fanden Bewehrungsstäbe mit einem Stabdurchmesser  $> 28$  mm gemäß Rehm et al. 1975 seinerzeit im europäischen (z. B. Österreich) und nicht-europäischen Ausland (z. B. USA) bereits regelmäßig Anwendung. Hierbei zu beachtende Konstruktionsregeln bezogen sich hauptsächlich auf die Einhaltung von Mindeststababständen und Mindestbetonüberdeckungen.

In Rehm et al. 1975 wurde eine weitreichende Beurteilung der Eignung der in Rede stehenden GEWI-Stähle vorgenommen, wovon ausgehend auch Vorschläge für Anwendungsrichtlinien abgeleitet wurden. Diese beziehen sich u. a. auf die Beschränkung der Rissbreite. Nach Rehm et al. 1975 muss in diesem Zusammenhang grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass – falls wenige Stäbe mit großem Stabdurchmesser statt vieler Stäbe mit kleinem Stabdurchmesser eingebaut werden – vor dem Hintergrund der vergleichsweise geringeren Oberfläche größere Verbundkräfte in den Beton einzuleiten sind, weshalb größere Rissbreiten zu erwarten sind. Andere, für die Planung und Ausführung gleichermaßen bedeutsame Anwendungsregeln (z. B. Stöße und Verankerungen) werden in der hier vorliegenden Arbeit nicht weiter thematisiert.

Die in Rehm et al. 1975 beschriebenen Feststellungen werden nachfolgend stichwortartig zusammengefasst.

- Eine Vergrößerung der Betondeckung bedingt eine Vergrößerung des mittleren Rissabstandes und der Rissbreite.
- Eine zusätzliche Hautbewehrung aus dünnen Stabdurchmessern wirkt sich äußerst positiv auf die sich einstellenden Rissabstände und Rissbreiten aus.

- Die kritische Rissbreite  $w_{95}$  % kann unter Berücksichtigung einer Bewehrung aus unterschiedlichen Stabdurchmessern, welche jeweils verschiedene Betondeckungen aufweisen, in Anlehnung an Rehm et al. 1968 wie nachfolgend angegeben berechnet werden. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Bezeichnungen der Gl. 2-1 übernommen. Die Beiwerte  $k_1$ ,  $k_2$  und  $k_3$  wurden durch die entsprechenden Zahlenwerte ausgedrückt.

$$w_{95} \% = k_4 \cdot \left( 1,5 \cdot \bar{u}'_b + 2,5 \cdot \frac{\phi_{e,1}}{\mu} \cdot \frac{1}{\alpha} \right) \cdot \varepsilon_{em} \quad \text{Gl. 2-5}$$

Der Faktor  $\alpha$  war wie folgt zu bestimmen:

$$\alpha = 1 + \frac{F_{eH}}{F_e} \cdot \left( \frac{\phi_{e,1}}{\phi_{eH}} - 1 \right) \quad \text{Gl. 2-6}$$

|      |                    |   |
|------|--------------------|---|
| mit: | $\bar{u}'_b$       | wirksame Betondeckung                           |
|      | $\phi_{e,1}$       | Stabdurchmesser des dicken Stabes               |
|      | $\phi_{eH}$        | Stabdurchmesser der Hautbewehrung               |
|      | $F_e$              | Querschnittsfläche der gesamten Längsbewehrung  |
|      | $F_{eH}$           | Querschnittsfläche der Hautbewehrung            |
|      | $\varepsilon_{em}$ | mittlere Dehnung des Stabes zwischen den Rissen |

- Die Hautbewehrung sollte aus einer engmaschigen, geschweißten Bewehrungsmatte aus gerippten Stäben bestehen.
- Der Hautbewehrungsgehalt sollte mindestens 2 cm<sup>2</sup>/m betragen.
- Zulässige Rissbreiten wurden in Anlehnung an Tabelle 2 aus DIN 1045 1972 vorgegeben.
- Voranstehende Festlegungen gelten für biegebeanspruchte Bauteile. Für eine kombinierte Beanspruchung aus Biegung und Längskraft wurden in Rehm et al. 1975 zunächst keine Angaben gemacht.

### 2.3.2.2 Untersuchungen von G. Rehm (1976)

In Rehm et al. 1976 wurden zentrische, einfach exzentrische und zweifach exzentrische Dehnkörperversuche durchgeführt, die vornehmlich das Bauteilverhalten infolge Einwirkungen aus zentrischem Zwang abbilden sollten. Es wurden quadratische und rechteckige Querschnittsformen mit verschiedenen Abmessungen berücksichtigt, die mit Stabdurchmessern  $\phi 6$  mm,  $\phi 8$  mm und  $\phi 10$  mm bewehrt waren. Die Versuchskörper wiesen Bewehrungsgrade zwischen 0,5 % und 2,6 % auf. Insgesamt wurden so 25 Dehnkörper untersucht.

Die Bauteile wurden aus Betonen mit einer mittleren Würfeldruckfestigkeit zwischen 240 – 360 kp/cm<sup>2</sup> hergestellt (geprüft an Probewürfeln mit Kantenlänge 200 mm; dies entspricht unter Berücksichtigung von Prüfwürfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm und einem Umrechnungsfaktor 1,05 gemäß DIN 1045 1988 sowie heute gebräuchlichen SI-Einheiten einer Betondruckfestigkeit von ca. 25 N/mm<sup>2</sup> – 38 N/mm<sup>2</sup>). Der verwendete Bewehrungsstahl bestand aus kaltverformten, gerippten

## 2 Grundlagen der Rissbreitenbeschränkung

---

Drähten der Güte BSt 50/55. Die zugehörige Rippenfläche (zur Vergleichbarkeit mit heute verwendeten Stäben) betrug jeweils 0,053 (für  $\phi 6$  mm), 0,061 (für  $\phi 8$  mm) und 0,064 (für  $\phi 10$  mm).

Nach Betonage der Versuchskörper wurden diese nach ca. 48 h ausgeschalt und im Anschluss fallweise 7 d feucht außerhalb der Schalung, 7 d feucht in der Schalung (zwecks Vermeidung von Vorkrümmungen) oder in Folie (zwecks Beeinflussung des Schwindens) gelagert.

Die Versuchskörper wurden weggesteuert in vertikaler Lage zunächst bis zur Entstehung des Erstrisses („Anrisslast“) belastet, ehe sie danach kurzzeitig auf ca. 90 % der Anrisslast entlastet wurden. Im Anschluss wurden 30 zyklische Wechselbeanspruchungen bis zum ca. 1,1–1,5-fachen der Anrisslast durchgeführt. Als zugehörige Unterlast wurde hierbei die Eigenlast (vertikale Prüfkörperanordnung im Versuchstand) festgelegt. Im Anschluss wurde der Versuchskörper bis zu einer Stahlspannung von 5 MP/cm<sup>2</sup> (entspricht näherungsweise ca. 500 N/mm<sup>2</sup>) belastet.

Die Aufnahme und Dokumentation der Risse erfolgte auf der Bauteiloberfläche. Zur Rissmessung wurde ein Mikroskop (Genauigkeit 0,01 mm) eingesetzt. Die Stellen der Rissbreitenmessung fielen u. a. mit der Stabachse der Bewehrung zusammen.

Die Untersuchungsergebnisse lassen sich wie folgt stichpunktartig zusammenfassen:

- Insgesamt wurde das Rissverhalten der betrachteten Versuchskörper stark von der jeweiligen Querschnittsform und der Bewehrungsanordnung geprägt:
  - Im Hinblick auf die Entwicklung des Rissbildes konnte für die quadratischen, zentrisch bewehrten Versuchskörper festgestellt werden, dass eine reine Trennrissbildung erst bei höheren Laststufen vorlag.
  - Bei den rechteckigen, zentrisch bewehrten Versuchskörpern bildeten sich zwischen den Trennrissen auch weitere, nicht den Querschnitt durchtrennende Risse aus. Zusätzlich konnten Längsrisse ausgehend von Querrissen (infolge großer Querkzugspannungen) festgestellt werden.
  - Auch an den rechteckigen, exzentrisch bewehrten Versuchskörpern konnten nur wenige Trennrisse beobachtet werden. Zwischen diesen bildeten sich ebenfalls weitere, den Querschnitt nicht durchtrennende Risse aus. Längsrisse konnten nicht festgestellt werden.
- Für zentrisch bewehrte Versuchskörper konnte festgestellt werden, dass der mittlere Rissabstand mit zunehmendem Verhältnis von Stabdurchmesser zu Bewehrungsgrad ( $\phi/\mu$ ) ebenfalls anwächst. Für exzentrisch bewehrte Versuchskörper stellte es sich so dar, dass der mittlere Rissabstand kleiner war als derjenige der zentrisch bewehrten Bauteile.
- Das Verhältnis der Stahlspannungen bei Erreichen des abgeschlossenen Rissbildes zur Stahlspannung bei Anrisslast („Erstriss“) betrug zwischen 1,5 und 3,5 (gemittelt ca. 2,5).
- Die Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen wurde infolge der Lastwechsel nachweislich reduziert.



- Die Ausbildung von Längsrissen wirkte sich ungünstig auf die Rissbreite aus (die Rissbreite nahm zu).
- Der Quotient aus kritischer Rissbreite  $w_{95\%}$  und mittlerer Rissbreite  $w_m$  betrug für das abgeschlossene Rissbild ca. 1,4 bis 2,0 (bei Vernachlässigung einzelner Extremalwerte im Mittel ca. 1,63). Dieser Verhältniswert ist in Gl. 2-1 aus Rehm et al. 1968 als Faktor  $k_4$  bezeichnet.
- Anhand der Versuche konnte bestätigt werden, dass die eingelegte Bewehrung das sich einstellende Rissbild lediglich in einem begrenzten Bereich, der näherungsweise ca. dem 8-fachen des Stabdurchmessers entsprach, beeinflusst.

Die Nachrechnung der so gewonnenen Versuchsergebnisse erfolgte auf Grundlage des in Rehm et al. 1968 angegebenen Berechnungskonzeptes für das abgeschlossene Rissbild (s. auch Gl. 2-1). Unter Berücksichtigung der erzielten Untersuchungsergebnisse wurde die dort angegebene Gleichung im Hinblick auf die mitwirkende Betonfläche und die Beanspruchungsart wie in Gl. 2-7 angepasst. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Faktoren der Gl. 2-1 wiederum weitgehend übernommen, sodass eine Erläuterung an dieser Stelle entfallen kann.

$$w_{95\%} = k_4 \cdot \left( k_1 \cdot \dot{u}_b + k_2 \cdot k_3 \cdot \frac{\phi}{\mu} \right) \cdot \frac{1}{E_e} \cdot (\sigma_{\text{ell}} - \Delta\sigma_{\text{ell}}) \quad \text{Gl. 2-7}$$

Das Abzugsglied  $\Delta\sigma_{\text{ell}}$  zur Berücksichtigung der Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen berechnet sich dabei, abweichend zum Berechnungsansatz in Rehm et al. 1968, gemäß nachstehender Gl. 2-8:

$$\Delta\sigma_{\text{ell}} = \frac{k_5 \cdot k_6 \cdot \beta_z}{\mu} \geq 0,5 \cdot \sigma_{\text{ell}} \quad \text{Gl. 2-8}$$

Neu in diesem Zusammenhang sind die Faktoren  $k_5$  (zur Berücksichtigung von Lastdauer und Lastwiederholungen) und  $k_6$  (zur Berücksichtigung der Belastungsart, d. h. zentrischer Zug oder reine Biegung).

### 2.3.2.3 Untersuchungen von D. Jungwirth

In Jungwirth et al. 1977 wurde der praxisbezogene Einsatz großer Stabdurchmesser am Beispiel des Dywidag-Gewindestabes (Gewi-Stahl 42/50 RU,  $d_e = 50$  mm) vorgestellt. Im Hinblick auf die Rissbreitenbegrenzung wurden nachfolgende Anwendungsrichtlinien formuliert:

- Die Betondeckung ist zur Verminderung der Sprengrissbildung zu vergrößern.
- Große Betondeckungen in Verbindung mit Stäben großen Durchmessers können u. U. große Rissabstände und damit große Rissbreiten bedingen. Vor diesem Hintergrund ist eine Hautbewehrung vorzusehen, mit Hilfe derer sich die einstellenden Risse in ihrer Breite begrenzen lassen. Der erforderliche

## 2 Grundlagen der Rissbreitenbeschränkung

Hautbewehrungsgehalt (in [cm<sup>2</sup>/m]) kann gemäß nachfolgendem einheitengebundenem Ansatz berechnet werden.

$$\frac{F_{eH}}{b_0} = \left( 500 \cdot \frac{\frac{25 \cdot 10^2}{\sigma_{ed}} \cdot w_{95\%} - 0,04 \cdot \dot{u}_1 - \frac{0,55}{\mu_{z,50}}}{2,4 \cdot \dot{u}_2 - \frac{1600 \cdot 10^2}{\sigma_{ed}} \cdot w_{95\%}} \right) \cdot d_{eH} \quad \text{Gl. 2-9}$$

|      |               |   |
|------|---------------|---|
| mit: | $F_{eH}$      | Querschnittsfläche der Hautbewehrung              |
|      | $b_0$         | Bauteilbreite                                     |
|      | $\sigma_{ed}$ | Stahlspannung unter Dauerlast                     |
|      | $\dot{u}_1$   | Betondeckung der Stäbe mit großem Stabdurchmesser |
|      | $\dot{u}_2$   | Betondeckung der Hautbewehrung                    |
|      | $\mu_{z,50}$  | Bewehrungsgrad (bzgl. der großen Stabdurchmesser) |
|      | $d_{eH}$      | Einzelstabdurchmesser der Hauptbewehrung          |
|      | $w_{95\%}$    | zul. Rissbreite nach DIN 1045 1972                |

- Als Mindesthautbewehrung waren 2 cm<sup>2</sup>/m vorzusehen. Hiermit sollen insbesondere Einwirkungen aus zentrischem Zwang pauschal berücksichtigt werden.

### 2.3.2.4 Untersuchungen zum Rissverlauf und zur Oberflächenrissbreite

Es ist allgemein bekannt, dass sich die Oberflächenrissbreite wesentlich von der Rissbreite auf Höhe des Bewehrungsstabes unterscheidet. Der Rückschluss von der Oberflächenrissbreite auf die Rissbreite auf Höhe der Bewehrung ist u. a. insbesondere für die Bewertung der Korrosionsgefahr von Bedeutung.

Anschaulich wird der Verlauf der Rissbreite entlang der Betondeckung in Leonhardt 1978 dargestellt.

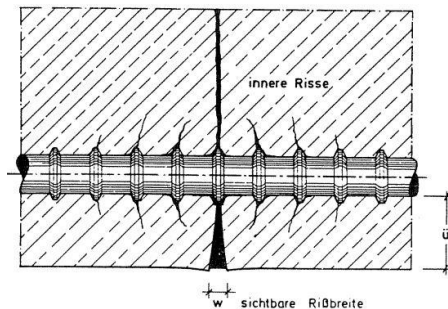


Abb. 2-4: Vergleich der Rissbreite auf der Bauteiloberfläche und der Rissbreite auf Höhe des Bewehrungsstabes nach Leonhardt 1978

In den 1960er Jahren wurden u. a. von Husain et al. 1968 hierzu experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um den Verlauf der Rissbreite ausgehend von der Bewehrungsstaboberfläche bis hin zur Bauteiloberfläche zu erfassen. In den dort zugrundeliegenden Versuchen wurden die angetroffenen Risse unter Last mit einem druckfesten Epoxidharz injiziert und die gerissenen Probekörper im Anschluss aufgesägt, sodass die Rissverläufe im Bauteilinneren detailliert aufgenommen werden

konnten. Als ein Ergebnis wurde festgestellt, dass sich für verschiedene Betondeckungen zwischen 0,75 – 3,00 Inch (ca. 20 – 75 mm) ein Verhältnis der Rissbreite am Bewehrungsstab zur Rissbreite an der Bauteiloberfläche zu ca. 0,10 bis 0,31 einstellt. Es konnte somit nachweislich festgestellt werden, dass die Oberflächenrissbreite durch die Größe der Betondeckung beeinflusst wird und es zu einer Rissaufweitung hin zur Bauteiloberfläche kommt. Der Rissverlauf wird in Husain et al. 1968 insgesamt als „trapezförmig“ beschrieben.

Auch die in Beeby 1978 im Hinblick auf das Korrosionsgeschehen veröffentlichten Untersuchungsergebnisse zum Rissverlauf entlang der Betonüberdeckung zeigen, dass sich keine konstante Rissbreite einstellt (s. Abb. 2-4). Ein konkreter Zusammenhang zwischen der Oberflächenrissbreite und der Rissbreite auf Höhe der Stahlbewehrung kann nach Beeby 1978 nicht festgestellt werden.

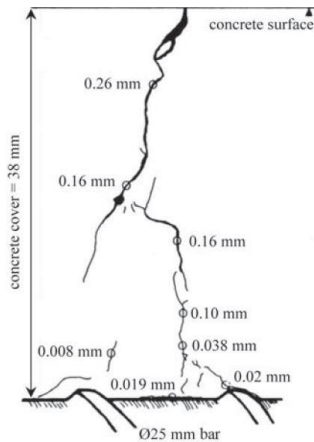


Abb. 2-5: Rissbreitenmessungen im Bereich der Betonüberdeckung (aus Beeby 1978)

In Leonhardt 1985 wird das Verhältnis von Rissbreite am Bewehrungsstab zur Rissbreite an der Bauteiloberfläche, abhängig von den Verbundbedingungen und der Betondeckung (seinerzeit üblicherweise ca. 30 mm), zu 0,3 bis 0,5 angegeben und ist damit tendenziell größer, als in Husain et al. 1968 angegeben. Vor diesem Hintergrund wurde in Leonhardt 1985 bereits vorgeschlagen, zulässige Überschreitungen der Rissbreite an der Bauteiloberfläche zu definieren, um die Haftung des Unternehmers, der die Herstellung eines mangelfreien Bauteils schuldet, zu relativieren. Für normativ vorgegebene zulässige Rissbreiten und Betondeckungen größer 30 mm (bis max. 60 mm) wurde außerdem empfohlen, die zulässige Rissbreite verhältnismäßig zu vergrößern, sodass in diesem Zusammenhang ein linearer Verlauf zugrunde gelegt wurde. Für sehr große Betondeckungen war eine Hautbewehrung aus dünnen Bewehrungsstäben erforderlich.

In Jungwirth 1985 heißt es diesbezüglich, dass sich die Breite von Biegerissen nicht nur entsprechend dem Abstand zur Nulllinie verhält (linearer Verlauf), sondern dass sich die Rissbreite an der Stahloberfläche außerdem durch Verteilung auf mehrere Risse zusätzlich reduziert.

## 2 Grundlagen der Rissbreitenbeschränkung

In Eckfeldt 2005 wird ein Ansatz zur Beschreibung der Oberflächenrissbreite entwickelt, der einen parabelförmigen Verlauf der Rissbreite entlang der Betondeckung zugrunde legt. Dieser Ansatz ist nach Auffassung von L. Eckfeldt „realitätsnaher“ als die bisher abgeleiteten, linearen Zusammenhänge (vgl. Husain et al. 1968).

$$w_{\text{surface}} = \frac{w_{\text{cal,th}} - w_s}{1 - \frac{\left(c - z + \frac{\phi}{2}\right)}{c^2}} \quad \text{Gl. 2-10}$$

|     |                      |  |
|-----|----------------------|--|
| mit | $w_{\text{surface}}$ | Oberflächenrissbreite  |
|     | $w_{\text{cal,th}}$  | rechnerische Rissbreite, berechnet für die Bezugshöhe der relevanten Dehnungsfunktion (s. auch $z$ ) |
|     | $w_s$                | Rissbreite auf Höhe der Bewehrung  |
|     | $c$                  | Betondeckung   |
|     | $z$                  | vertikale Berechnungsposition für $w_{\text{cal,th}}$ (hier: $z = c/2$ )                             |
|     | $\phi$               | Stabdurchmesser  |

In Borosnyói et al. 2010 wurde die Rissbreite entlang des Rissverlaufs innerhalb der Betonüberdeckung detailliert an prismatischen Versuchskörpern mit einem einzelnen Bewehrungsstab  $\phi 20$  mm (zentrische/exzentrische Anordnung) untersucht. Die Betonüberdeckung des Bewehrungsstabes variierte zwischen 20 mm und 80 mm. Die Versuchskörper wurden bis zum Erreichen des abgeschlossenen Rissbildes durch eine quasi-statische Zugkraft beansprucht ( $\sigma_s < 500$  N/mm<sup>2</sup>), infolgedessen Rissbreiten größer 0,30 mm auf der Bauteiloberfläche angetroffen werden konnten. Die vorgefundenen Risse wurden unter Belastung druckfest mit einem Epoxidharz verpresst, nach Aushärten des Verpressguts aufgeschnitten und die Rissbreiten im Bauteilinneren entlang ihres Verlaufs in engen Abständen (ca. 2 mm) vermessen.

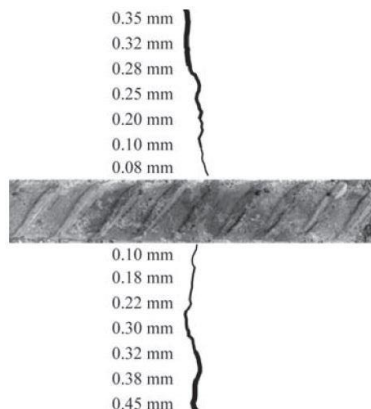


Abb. 2-6: Rissbreitenmessung entlang einer Betonüberdeckung in Höhe von 50 mm (aus Borosnyói et al. 2010)

Die voranstehende Abb. 2-6 zeigt exemplarisch das Ergebnis einer Rissbreitenmessung entlang einer Betonüberdeckung in Höhe von 50 mm. Die zugehörige Beanspru-

chung wurde in diesem Fall exzentrisch aufgebracht. Es ist ersichtlich, dass die Rissbreite entlang der Betondeckung keinen konstanten Wert annimmt. Für die Bauteiloberfläche kann befunden werden, dass die sich dort einstellenden Rissbreiten bei sehr großen Betondeckungen bis zu 10-mal größer sein können, als unmittelbar im Bereich der Stahlbewehrung. Weiter wurde festgestellt, dass sich die Rissbreite auf Höhe der Bewehrung weitgehend unabhängig von der jeweils vorhandenen Betonüberdeckung einstellt.

Als Ergebnis werden in Borosnyói et al. 2010 die nachfolgend abgebildeten Regressionskurven dargestellt. Demnach folgt die Rissbreite entlang des Rissverlaufs keinem linearen Zusammenhang, sondern ist vielmehr mit Hilfe einer Potenzfunktion zu beschreiben. Ein konkreter funktionaler Zusammenhang wird diesbezüglich in Borosnyói et al. 2010 aufgrund fehlender Allgemeingültigkeit der Versuchsergebnisse jedoch nicht vorgestellt.

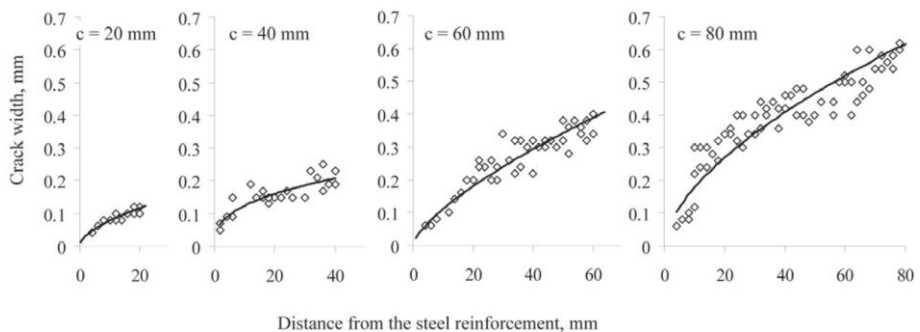


Abb. 2-7: Darstellung der Rissbreite entlang der Betonüberdeckung (aus Borosnyói et al. 2010)

Auch in Schäfer 2016 wurden Untersuchungen zum Rissverlauf durchgeführt, im Rahmen derer ein linearer Rissbreitenverlauf entlang der Betondeckung angesetzt wurde. Die in Schäfer 2016 gewonnenen Erkenntnisse werden im Abschnitt 2.3.2.6 ausführlich beschrieben.

Grundsätzlich wirkt sich die Aufweitung eines Risses zur Oberfläche hin wesentlich auf die Vergleichbarkeit eines Rechenwertes der Rissbreite (beispielsweise nach DIN EN 1992-1-1/NA) mit der am Bauteil aufgenommenen Oberflächenrissbreite aus. Im Rahmen einer Gegenüberstellung von experimentellen Versuchsergebnissen und Rechenwerten der Rissbreite kann es angezeigt sein, dies zu berücksichtigen.

### 2.3.2.5 Untersuchungen von M. Empelmann (et al.)

In Empelmann et al. 2015a wurden Berechnungs- und Bemessungsmodelle nach DIN EN 1992-1-1, DIN EN 1992-1-1/NA und MC 2010 im Hinblick auf die Berechnung der Rissbreite gegenübergestellt. Eingangsparameter für die Berechnung liefern in diesem Zusammenhang vorab überprüfte und seitens der Verfasser als geeignet eingestufte Datenbanken, welche nachfolgende Eigenschaften aufweisen:

- Es werden ausschließlich zentrische Zugversuche herangezogen.
- Die Konzipierung der Versuchskörper (z. B. Stabdurchmesser, Betondeckung) ist vollständig dokumentiert.

- Die Einzelrissbreiten sind größer (oder gleich) 0,05 mm.
- Die zur Berechnung der Rissbreite notwendige Eingangsgröße der effektiven Zugfestigkeit ( $f_{ct,eff}$ ) wird aus der Risschnittgröße zurückgerechnet. Nach Empelmann et al. 2015a kann so der Einfluss etwaig eingepprägter Schwindspannungen (infolge unterschiedlicher Probekörperlagerung) ausgeschlossen werden.
- Für die betrachteten Versuche kann jeweils eine „kurzzeitige“ Belastung zugrunde gelegt werden. Der Einfluss einer „langandauernden“ Belastung wurde anhand von Vergleichsrechnungen überprüft.

Insgesamt konnte so eine Datenbasis mit 121 Einzelwerten berücksichtigt werden. Die hierzu herangezogenen Bauteile wiesen Betondeckungen von ca. 25 – 35 mm auf. Es ist davon auszugehen, dass die dokumentierten Rissbreiten auf der Bauteiloberfläche gemessen wurden.

Die Versuchswerte der Rissbreite wurden als 95 %-Fraktile ( $w_{0,95}$ ) ausgewertet. Die dabei zugrundeliegende Verteilung der Rohwerte (z. B. Normalverteilung), der unterstellte Vertrauensbereich und das gewählte Auswerteverfahren sind nicht benannt.

Um die betrachteten Bemessungsmodelle miteinander zu vergleichen, werden die Ergebnisse der Versuchsnachrechnung (rechnerische Rissbreiten  $w_k$  nach DIN EN 1992-1-1, DIN EN 1992-1-1/NA und MC 2010) üblicherweise den Versuchswerten  $w_{0,95}$  gegenübergestellt. Um eine qualifizierte Aussage hinsichtlich der Vorhersagegenauigkeit der Bemessungsansätze treffen zu können, wird in Empelmann et al. 2015a weiterhin eine statistische Auswertung des Quotienten  $w_k/w_{0,95}$  als 95 %-Fraktile vorgenommen (beträgt der Zahlenwert des Quotienten in diesem Zusammenhang weniger als 1,0, so sind die rechnerischen Rissbreiten kleiner als die experimentell ermittelten Rissbreiten).

Im Zuge der Auswertung wurden fallweise eine Normalverteilung oder eine logarithmischen Normalverteilung zugrunde gelegt. Der unterstellte Vertrauensbereich ist nicht benannt.

Die Untersuchungsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die vergleichende Betrachtung einer Normalverteilung oder einer logarithmischen Normalverteilung zeigt, dass die sich einstellenden Abweichungen im Hinblick auf die ermittelten Fraktile weitgehend vernachlässigt werden können.
- Die Bemessungsgleichungen nach DIN EN 1992-1-1/NA liefern Rechenresultate, welche die Versuchswerte in sehr guter Näherung bestätigen, tendenziell jedoch leicht auf der unsicheren Seite liegen (der Mittelwert der Vorhersagegenauigkeit beträgt 0,88), sodass die tatsächlich am Bauteil vorkommenden Rissbreiten gering unterschätzt werden.
- Die Vorhersagegenauigkeit des Rechenmodells nach MC 2010 ist im Vergleich zu DIN EN 1992-1-1/NA etwas geringer. Die Ergebnisse liegen aber tendenziell auf der sicheren Seite (der Mittelwert der Vorhersagegenauigkeit beträgt 1,13).

- Das Rechenmodell nach DIN EN 1992-1-1 ist sehr konservativ und weist für die untersuchten Modelle die geringste Vorhersagegenauigkeit auf. Die sich am Bauwerk einstellenden Rissbreiten werden tendenziell (deutlich) überschätzt (der Mittelwert der Vorhersagegenauigkeit beträgt 1,59).

Die Untersuchungen von Empelmann et al. 2018a knüpfen inhaltlich an die voranstehend beschriebenen Untersuchungen an und dienen der Bewertung der Vorhersagegenauigkeiten ausgewählter nationaler Anwendungsdokumente des Eurocodes 2 im Hinblick auf die Berechnung der Rissbreite.

Die hier zugrundeliegende Datenbasis wurde (im Vergleich zur Gegenüberstellung der Berechnungs- und Bemessungsmodelle nach DIN EN 1992-1-1, DIN EN 1992-1-1/NA und MC 2010) durch Hinzunahme weiterer Datenbanken erweitert. Wie auch zuvor wurden seitens der Verfasser konkrete Randbedingungen an die Versuchsdaten gestellt. Ergänzend hierzu wurden restriktive Anforderungen an die Materialeigenschaften vorgegeben (Mindestbetonfestigkeit  $f_c = 20 \text{ N/mm}^2$ , gerippte, normalfeste Bewehrungsstähle mit einer Mindeststreckgrenze  $f_y = 400 \text{ N/mm}^2$ ). Nach Empelmann et al. 2018a sollte so der Gebrauch üblicher Betone und Bewehrungsstähle sichergestellt werden. Durch diese Randbedingung reduziert sich die Anzahl auf 110 auswertbare Einzelwerte.

Es kann auch hier davon ausgegangen werden, dass ausschließlich auf der Bauteiloberfläche aufgenommene Rissbreiten in den herangezogenen Versuchsdatenbanken dokumentiert sind.

Folgende Bemessungsmodelle auf europäischer Ebene wurden in die Bewertung einbezogen:

- DIN EN 1992-1-1
- DIN EN 1992-1-1/NA (nationaler Anhang für Deutschland)
- ÖNORM B 1992-1-1 (nationaler Anhang für Österreich)
- NF EN 1992-1-1/NA (nationaler Anhang für Frankreich)
- DS/EN 1992-1-1 DK NA (nationaler Anhang für Dänemark)
- BFS 2015-6 EKS 1 (nationaler Anhang für Schweden)

Zusätzlich wurde der Bemessungsansatz gemäß MC 2010 betrachtet.

Der Quotient  $w_k/w_{0,95}$  wird in Empelmann et al. 2018a als  $\gamma_{\text{mod}}$  bezeichnet. Die Verteilung der Werte  $\gamma_{\text{mod}}$  wurde als logarithmisch-normalverteilt angenommen. Hierzu wurden im Vorhinein statistische Signifikanztests durchgeführt, um die Annahmen zu verifizieren. Der Quotient  $\gamma_{\text{mod}}$  wurde wiederum als 95 %-Fraktile ausgewertet. Der zugrunde gelegte Vertrauensbereich ist nicht angegeben.

Die Untersuchungsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Das Bemessungsmodell nach DIN EN 1992-1-1 sowie diejenigen unter Berücksichtigung der national festzulegenden Parameter Frankreichs, Dänemarks und Schwedens überschätzen die Versuchswerte deutlich, d. h. die ermittelten Rechenwerte sind größer als die Versuchswerte. Im Vergleich

hierzu unterschätzt das Bemessungsmodell nach DIN EN 1992-1-1/NA (analog zum nationalen Anhang für Österreich) die Versuchswerte.

- Die festgestellten Abweichungen zwischen Rechenwerten und Versuchswerten sind überwiegend auf die Berechnung des Rissabstandes (variiert der Ansatz einer Verbundstörung in den betrachteten Bemessungsmodellen) zurückzuführen.
- Die Verfasser schlagen eine grundsätzliche Abwägung vor, ob für den Nachweis der Rissbreite im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit eine Betrachtung auf „Mittelwertniveau“ ausreichend sei.

### 2.3.2.6 Untersuchungen von M. Schäfer

In Schäfer 2016 wurden zahlreiche Untersuchungen zum Rissverhalten von mit großen Stabdurchmessern bewehrten Stahlbetonbauteilen unter zentrischer Zugbeanspruchung (statische und zyklische Lastaufbringung) durchgeführt.

In Abb. 2-8 sind die in Schäfer 2016 untersuchten Bauteile schematisch dargestellt.

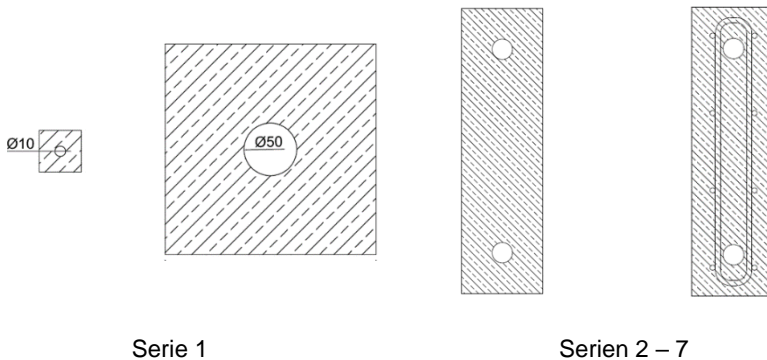


Abb. 2-8: Schematische Darstellung der Versuchsquerschnitte (aus Schäfer 2016)

Es wurden einerseits quadratische, stabförmige Versuchskörper (Serie 1) mit einem zentrisch eingelegten Bewehrungsstab  $\phi 40$  mm oder  $\phi 50$  mm betrachtet (zu Referenzzwecken wurden außerdem die Stabdurchmesser  $\phi 10$  mm,  $\phi 14$  mm,  $\phi 20$  mm,  $\phi 25$  mm und  $\phi 28$  mm berücksichtigt). Die Kantenlänge des Querschnitts betrug jeweils  $4 \cdot \phi$ , sodass sich die Betondeckung des zentrisch eingelegten Bewehrungsstabes allseitig zu  $1,5 \cdot \phi$  ergab. Für die in Abhängigkeit des Stabdurchmessers variierenden Bauteilquerschnitte konnte ein einheitlicher Bewehrungsgrad in Höhe von ca. 5 % berücksichtigt werden.

Weiterhin wurde das Rissverhalten von Stahlbetonplatten (Serien 2 – 7, „flächige Bauteile“) untersucht, welche mit großen Bewehrungsstäben  $\phi 40$  mm und zusätzlich fallweise mit einer Oberflächenbewehrung aus dünnen Stabdurchmessern ( $\phi 10$  mm) bewehrt wurden. Bezogen auf die Hauptbewehrung  $\phi 40$  mm betrug die Betondeckung (seitlich, oben/unten) hierbei 60 mm ( $= 1,5 \cdot \phi$ , vgl. Serie 1) und der Bewehrungsgrad ca. 2,8 %. Der Bewehrungsgrad der Oberflächenbewehrung variierte zwischen 1 % und 2 % von  $A_{ct,ext}$  nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA.



Die Konzipierung der Querschnitte erfolgte unter Berücksichtigung des Nenn-Durchmessers der Bewehrung. Etwaige Querschnittsvergrößerungen durch die Rippengeometrie (Ist-Durchmesser), wie sie insbesondere für große Stabdurchmesser von Bedeutung sein können (Querschnittsvergrößerungen bis ca. 10–15 %) und ggf. zu Konflikten bei übereinanderliegenden Stablagen führen können, wurden nicht angesetzt.

Die Versuchskörper wurden aus Betonen der Festigkeitsklassen C30/37 und C50/60 hergestellt. Als Zuschlagstoff wurde jeweils ein Rundkorn (Rheinkies) mit dem Größtkorndurchmesser  $d_g = 16$  mm (in Ausnahmen 8 mm) verwendet.

Es wurde eine Stahlbetonbewehrung nach DIN 488-1 und DIN 488-2 eingesetzt.

Die zugrundeliegenden Bauteilversuche wurden als Dehnkörperversuche konzipiert. Die Lastaufbringung erfolgte in mehreren Stufen bis zum Erreichen einer maximalen Stahlspannung von ca. 450 N/mm<sup>2</sup>. Die lastinduzierten Risse wurden mit Hilfe eines digitalen Rissmikroskops auf der Bauteiloberfläche aufgenommen.

Die Untersuchungsergebnisse, auf Grundlage derer in Schäfer 2016 konkrete Bemessungsvorschläge abgeleitet wurden, werden stichpunktartig zusammengefasst:

- Im Zuge der statistischen Auswertung wurden auch sehr kleine Rissbreiten (bis 0,01 mm) berücksichtigt.
- Die Auswertung des Rissabstandes (für die Serien 2 – 7) erfolgte vor dem Hintergrund, dass die Bauteilkante als „erstes Rissufer“ aufgefasst wurde.
- Die experimentell ermittelten Rissbreiten (Aufnahme der Risse auf der Bauteiloberfläche) und Rissabstände wurden unter Zugrundelegung des in DIN EN 1990 beschriebenen Bayes'schen Verfahrens statistisch ausgewertet. Es wurde jeweils das 75 %-Fraktile angesetzt und es wurde eine Normalverteilung angenommen.
- Die Nachrechnungen der Versuchsergebnisse basieren auf DIN EN 1992-1-1/NA. Es wurden jeweils die Ergebnisse der versuchsbegleitenden Materialprüfungen (auf Mittelwertniveau) in die Berechnung miteinbezogen.
- Die Untersuchungen zum Rissabstand (wesentlich an Versuchsquerschnitten der Serie 1, vgl. Abb. 2-8) zeigten, dass dieser erwartungsgemäß mit zunehmendem Stabdurchmesser ansteigt. Mit der Bemessungsgleichung nach DIN EN 1992-1-1/NA konnte der rechnerische Rissabstand für Stabdurchmesser  $\phi \leq 28$  mm im Hinblick auf die Versuchsergebnisse (75 %-Fraktile) gut angenähert werden. Für Stabdurchmesser  $\phi > 28$  mm und Bewehrungsgrade  $\rho_{\text{eff,netto}} > 4,5$  % stellte es sich so dar, dass die Bemessungswerte des Rissabstandes nach DIN EN 1992-1-1/NA deutlich von den Versuchsergebnissen (75 %-Fraktile) abweichen. Für Bauteile ohne Oberflächenbewehrung (Serie 2) konnte festgestellt werden, dass die experimentellen Rissabstände rechnerisch unterschätzt werden, d. h. die zur Verfügung stehenden Rechenregeln liefern kleinere, auf der unsicheren Seite liegende Rissabstände, wodurch dann jeweils größere Rissbreiten zu erwarten sind. Bei Bauteilen mit einer Oberflächenbewehrung (Serien 3 – 7, vgl. Abb. 2-8) wurden die experimentellen Rissabstände hingegen rechnerisch überschätzt.

Die Überschätzung wurde mit der Berechnungsweise des Vergleichsstadtdurchmessers nach DIN EN 1992-1-1 erklärt.

- Im Zuge der Rissbreitenuntersuchungen konnte festgestellt werden, dass die an der Bauteiloberfläche aufgenommenen Rissbreiten (75 %-Fraktile) bei allen im Gebrauchszustand auftretenden Stahlspannungsniveaus rechnerisch unterschätzt wurden. Dies gilt insbesondere für kleine Stahlspannungen (80 N/mm<sup>2</sup> bis 280 N/mm<sup>2</sup>). Eine Angleichung zwischen dem Rechenwert der Rissbreite (nach DIN EN 1992-1-1/NA) und den Versuchsergebnissen kann erst bei ca. 360 N/mm<sup>2</sup> beobachtet werden. Für größere Stahlspannungen (bis ca. 450 N/mm<sup>2</sup>) folgte dann eine rechnerische Überschätzung der experimentellen Rissbreiten. Eine Beschränkung der Rissbreite ausschließlich mit großen Stabdurchmessern konnte daher nicht empfohlen werden.
- In den Versuchen hat sich gezeigt, dass eine gegenüber den Anforderungen des nationalen Anhangs (DIN EN 1992-1-1/NA) reduzierte Oberflächenbewehrung ( $A_{s,surf}$  nur 1 % der externen Betonzugfläche  $A_{ct,ext}$ ) keine erkennbare Verschlechterung des sich einstellenden Rissbildes (Rissbreiten und Rissabstände) bedingt.
- Eine zyklische Beanspruchung (Aufbringung einer sinusförmigen Lastamplitude mit bis zu 1.000.000 Lastwechseln) bedingte eine (mittlere) Rissaufweitung in Höhe von ca. 30 %. Die Oberspannung der zyklischen Beanspruchung wurde aus den statischen Versuchen abgeleitet und entsprach dort derjenigen Stahlspannung, für die eine mittlere Rissbreite von 0,3 mm beobachtet werden konnte. Die Unterlast wurde pauschal zu 2/3 der Oberlast definiert. Anhand vergleichender Berechnungen konnte gezeigt werden, dass die rechnerische Rissbreitenzunahme nach DIN EN 1992-1-1 (unabhängig von Lastwechselanzahl und Lastamplitude) insgesamt die experimentell ermittelte Rissaufweitung unterschätzt. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass in Schäfer 2016 lediglich orientierende Untersuchungen zum Einfluss einer zyklischen Beanspruchung auf die Rissbreite durchgeführt wurden, die noch entsprechend zu verifizieren sind.
- Vor dem Hintergrund, dass der Rechenwert der Rissbreite nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA offensichtlich nicht der Oberflächenrissbreite entspricht, wurden in Schäfer 2016 Untersuchungen zur Rissgeometrie an Versuchskörpern der Serie 1 (Abb. 2-8) durchgeführt. Hierzu wurde das sich im Zuge der zentrischen Zugbeanspruchung eingestellte Rissbild vor Entlastung mit einem druckfesten Injektionsharz verpresst. Anschließend wurden die Versuchskörper durch Sägeschnitte geöffnet und die Rissverläufe wurden ausgehend vom Bewehrungsstab bis zur Bauteiloberfläche vermessen und dokumentiert. Es zeigte sich, dass der Rissverlauf im Bereich der Betondeckung annähernd linear angenommen werden kann. Der Quotient aus Rissbreite am Bewehrungsstab und Rissbreite an der Bauteiloberfläche ergab sich zu 0,3 bis 0,4 und stimmt damit in guter Näherung mit den Angaben aus der Literatur (z. B. Husain et al. 1968, Leonhardt 1985) überein.

Das aus den Versuchsergebnissen in Schäfer 2016 abgeleitete Ingenieurmodell wird detailliert im Abschnitt 2.3.3.4 vorgestellt.

### 2.3.3 Ausgewählte Ingenieurmodelle

Die Bemessungs- und Konstruktionsregeln, wie sie in bauaufsichtlich eingeführten Regelwerken (u. a. DIN-Normen des Deutschen Instituts für Normung e.V. oder europäische Normen EN des Europäischen Komitees für Normung [CEN], z. B. DIN EN 1992-1-1 und EN 1992-1-1) enthalten sind, gehören zu den allgemein anerkannten Regeln der Technik. Im Gegensatz zu Ingenieurmodellen (s. unten), welche überwiegend an Forschungsergebnissen verifiziert wurden, genügen allgemein anerkannte Regeln der Technik (a. a. R. d. T.) den folgenden Aspekten:

- In wissenschaftlicher Hinsicht gelten a. a. R. d. T. als theoretisch richtig.
- Die a. a. R. d. T. sind technischen Experten in der Baupraxis allgemein bekannt.
- Die a. a. R. d. T. haben sich aufgrund praktischer Erfahrung ausreichend lange bewährt.

Die nachfolgend beschriebenen Ingenieurmodelle zur rechnerischen Begrenzung der Rissbreite erfüllen die zuvor genannten Aspekte nicht oder nur teilweise (eine praktische Erprobung ist weitestgehend nicht erkennbar), sodass diese aus Sicht des Verfassers lediglich den gegenwärtigen Stand des Wissens darstellen. Die Bemessungskonzepte zur Rissbreitenbegrenzung nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA, als anerkannte Regeln der Technik, sind Gegenstand der Abschnitte 2.4 und 2.5.

#### 2.3.3.1 Modell nach MC 2010

Die Festlegungen des MC 2010 sind nicht normativ, sondern sind gemäß dem Vorwort vielmehr als „*pre-normative*“ und als eine Informationsquelle („*source of information*“) aufzufassen. Durch Einbezug neuerer Forschungserkenntnisse und Sicherung etablierter Modellanschauungen wird der aktuelle Stand des Wissens vermittelt, sodass eine fundierte Ausgangslage für die Erarbeitung zukünftiger Normengenerationen besteht.

Die Berechnung des Bemessungswertes der Rissbreite  $w_d$  (design crack width), unabhängig vom betrachteten Risszustand, erfolgt in MC 2010 im Abschnitt 7.6.4.4 (Calculation of crack width in reinforced concrete members). Das Nachweisformat sieht vor, der rechnerischen Rissbreite  $w_d$  eine Grenzzrissbreite  $w_{lim}$  gegenüberzustellen, welche beispielsweise unter Berücksichtigung von Dauerhaftigkeitsaspekten festzulegen ist. An dieser Stelle ist anzumerken, dass sich die in Rede stehenden Rissbreiten  $w_d$  und  $w_{lim}$  (für reine Zugbeanspruchung) jeweils auf die Rissbreite an der Bauteiloberfläche beziehen. Hierbei ist der Wert der Betondeckung  $c$  zu berücksichtigen. Nach Schäfer 2016 wurden die Berechnungsformeln anhand von Versuchen an Bauteilen kalibriert, die jeweils eine Betondeckung von 25 mm auf-

## 2 Grundlagen der Rissbreitenbeschränkung

---

wiesen. In Schäfer 2016 werden in diesem Zusammenhang auch Ansätze beschrieben, um die rechnerische Rissbreite  $w_d$  an der Bauteiloberfläche für Betondeckungen  $c > 25$  mm umzurechnen.

Die Rissbreite  $w_d$  berechnet sich gemäß nachstehender Gleichung:

$$w_d = 2 \cdot l_{s,\max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs}) \quad \text{Gl. 2-11}$$

mit  $l_{s,\max}$  Einleitungslänge (an deren Ende weisen Beton und Stahlbewehrung wieder gleiche Dehnungen auf)  
 $\varepsilon_{sm}$  mittlere Dehnung der Bewehrung entlang der Länge  $l_{s,\max}$   
 $\varepsilon_{cm}$  mittlere Dehnung des Betons entlang der Länge  $l_{s,\max}$   
 $\varepsilon_{cs}$  Dehnung des Betons infolge (freien) Schwindens

Die Einleitungslänge  $l_{s,\max}$  ist in diesem Zusammenhang wie folgt zu bestimmen:

$$l_{s,\max} = k \cdot c + \frac{1}{4} \cdot \frac{f_{ctm}}{\tau_{bms}} \cdot \frac{\phi_s}{\rho_{s,ef}} \quad \text{Gl. 2-12}$$

mit  $k$  empirischer Parameter, der den Einfluss der Betondeckung berücksichtigt (vereinfacht:  $k = 1,0$ )  
 $c$  Betondeckung  
 $f_{ctm}$  mittlere Betonzugfestigkeit zum betrachteten Zeitpunkt  
 $\tau_{bms}$  mittlere Verbundspannung zwischen Betonstahl und Beton (s. u.)  
 $\phi_s$  Stabdurchmesser des Betonstahls  
 $\rho_{s,ef}$  effektiver Bewehrungsgrad

Die Dehnungsdifferenz  $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs}$  ergibt sich zu:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs} = \frac{\sigma_s - \beta \cdot \sigma_{sr}}{E_s} + \eta_r \cdot \varepsilon_{sh} \quad \text{Gl. 2-13}$$

mit  $\sigma_s$  Stahlspannung (reine Stahlspannung im Riss)  
 $\sigma_{sr}$  maximale Stahlspannung im Einzelriss bei Erstrissbildung  
hier: für reinen Zug gilt:  $\sigma_{sr} = \frac{f_{ctm}}{\rho_{s,ef}} (1 + \alpha_e \rho_{s,ef})$   
 $\beta$  Beiwert zur Berücksichtigung der Belastungsdauer (s. u.)  
 $\eta_r$  Beiwert zur Berücksichtigung des Schwindens  
 $\varepsilon_{sh}$  freie Schwinddehnung (s. u.)

Die Faktoren  $\tau_{bms}$ ,  $\beta$  und  $\eta_r$ , sind jeweils vom betrachteten Risszustand (Erstrisszustand, abgeschlossenes Rissbild) abhängig und sind gemäß nachfolgender Abb. 2-9 (Table 7.6-2 aus MC 2010) zu wählen.

Weiter heißt es in MC 2010, dass mit den in Gl. 2-11 bis Gl. 2-13 zur Verfügung stehenden Rechenmodellen die Rissbreite im Bereich der effektiven Betonzugfläche  $A_{c,ef}$  (effective area of concrete) begrenzt werden kann. Außerhalb von  $A_{c,ef}$  können größere Rissbreiten auftreten. In diesem Zusammenhang wird die Verwendung einer rissverteilenden Bewehrung empfohlen, die an dieser Stelle jedoch nicht weiter konkretisiert wird.

**Table 7.6-2:** Values for  $\tau_{bms}$ ,  $\beta$  and  $\eta_r$  for deformed reinforcing bars

|   | <i>Crack formation stage</i>  | <i>Stabilized cracking stage</i>                                     |
|---|---|--|
| Short term,<br>instantaneous<br>loading | $\tau_{bms} = 1.8 \cdot f_{ctm}(t)$<br>$\beta = 0.6$<br>$\eta_r = 0$  | $\tau_{bms} = 1.8 \cdot f_{ctm}(t)$<br>$\beta = 0.6$<br>$\eta_r = 0$ |
| Long term,<br>repeated<br>loading       | $\tau_{bms} = 1.35 \cdot f_{ctm}(t)$<br>$\beta = 0.6$<br>$\eta_r = 0$ | $\tau_{bms} = 1.8 \cdot f_{ctm}(t)$<br>$\beta = 0.4$<br>$\eta_r = 1$ |

Abb. 2-9: Beiwerte  $\tau_{bms}$ ,  $\beta$  und  $\eta_r$  gemäß Tab. 7.6-2, MC 2010

### 2.3.3.2 Modell nach prEN1992-1-1

Im Hinblick auf die Erarbeitung einer neuen Eurocodegeneration existiert eine Entwurfsfassung prEN1992-1-1 für den Eurocode 2, welche derzeit den Mitgliedsstaaten zur Abstimmung vorliegt (s. auch Abschnitt 2.4) und welche bisweilen auch bereits weiter fortgeschrieben wurde.

Diese Entwurfsfassung beinhaltet in Abschnitt 9.2 (crack control) ein Modell zur Vorherbestimmung der Rissbreite, welches sich von DIN EN 1992-1-1 (vgl. Abschnitt 2.4.1) wie folgt unterscheidet.

Die rechnerische Oberflächenrissbreite  $w_{k,cal}$  wird folgendermaßen bestimmt:

$$w_{k,cal} = s_{r,max,cal} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} + \eta_r \cdot \epsilon_{cs}) \quad \text{Gl. 2-14}$$

- mit
- $s_{r,max,cal}$  max. Rissabstand im abgeschlossenen Rissbild oder max. „Schlupflänge“ im Erstrisszustand
  - $\epsilon_{sm}$  mittlere Stahldehnung (einschl. tension stiffening)
  - $\epsilon_{cm}$  mittlere Betondehnung
  - $\eta_r$  zeitabhängiger Beiwert zur Berücksichtigung der Rissbreitenzunahme infolge Schwindens des Betons für Kurzzeitbeanspruchung und auf Erstrissniveau (infolge Langzeitbeanspruchung) ist  $\eta_r$  zu 0 zu setzen. Für das abgeschlossene Rissbild unter Langzeitbeanspruchung nimmt  $\eta_r$  den Wert  $R_{ax}$  an (Erläuterung s. unten)
  - $\epsilon_{cs}$  Schwinddehnung des Betons

Ein erster Unterschied in der Berechnung zu DIN EN 1992-1-1 kann in Bezug auf den Index „cal“ festgestellt werden. Damit soll nach prEN1992-1-1 deutlich gekennzeichnet werden, dass es sich um berechnete (calculated) Werte handelt, die ggf. von Messwerten abweichen können. Weiterhin ist die berechnete Rissbreite  $w_{k,cal}$  zweifelsfrei als Rissbreite an der Bauteiloberfläche definiert.

Die mittlere Dehnungsdifferenz  $\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$  entspricht bis auf kleine formale Änderungen dem Ansatz in DIN EN 1992-1-1 und kann gemäß nachstehender Gleichung berechnet werden:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,ef}}{\rho_{p,ef}} (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,ef})}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \quad \text{Gl. 2-15}$$

- mit  $\sigma_s$  Spannung in der Zugbewehrung unter Annahme eines gerissenen Querschnitts, einschl. Einflüssen infolge Kriechens und Schwindens
- $k_t$  Faktor, der von der Dauer der Lasteinwirkung abhängt:  
 $k_t = 0,6$  bei kurzzeitiger Lasteinwirkung  
 $k_t = 0,4$  bei langfristiger Lasteinwirkung
- $f_{ct,ef}$  wirksame Betonzugfestigkeit zum betrachteten Zeitpunkt
- $\rho_{p,ef}$  effektiver Bewehrungsgrad ( $\rho_{p,ef} = A_s/A_{c,ef}$ )
- $A_{c,ef}$  Wirkungsbereich der Bewehrung
- $\alpha_e$  Verhältnis der E-Moduln ( $\alpha_e = E_s/E_{cm}$ )
- $E_s$  E-Modul der Betonstahlbewehrung
- $E_{cm}$  mittlerer E-Modul des Betons

Auf Erstrissniveau sind für gezwängte (verschiebungsbehinderte) Bauteile Einwirkungen infolge Schwindens zu berücksichtigen. Der Dehnungsansatz  $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \eta_r \cdot \varepsilon_{cs}$  stellt sich dann wie folgt dar:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \eta_r \cdot \varepsilon_{cs} = R_{ax} \cdot \varepsilon_{free} - k_t \cdot \frac{f_{ct,ef}}{E_{cm}} \quad \text{Gl. 2-16}$$

- mit  $R_{ax}$  Zwangbeiwert; dieser entspricht näherungsweise dem Verhältnis aus der Spannung bei Zugrundelegung linear-elastischer Verhältnisse und der Größe Zwangspannung;  $R_{ax}$  kann üblicherweise zu 0,75 angenommen werden (für Wandeinspannung)
- $\varepsilon_{free}$  Zwangdehnung
- $E_{cm}$  mittlerer E-Modul des Betons

Ob die Annahme  $R_{ax} = 0,75$  auch für einen (gezwängten) Zugstab zutreffend ist, kann vorliegend nicht aufgeklärt werden.

Etwaige Einflüsse infolge Kriechens werden durch den Faktor  $k_t$  berücksichtigt.

Der maximale, rechnerische Rissabstand  $s_{r,max,cal}$  kann wie folgt berechnet werden:

$$s_{r,max,cal} = 2 \cdot c + 0,35 \cdot k_b \cdot \frac{\phi}{\rho_{p,ef}} \quad \text{Gl. 2-17}$$

- mit  $c$  Betondeckung der äußeren Längsbewehrung (bzgl. Staboberfläche)
- $k_b$  Beiwert zur Berücksichtigung der Verbundeigenschaften der Bewehrung:  
 $k_b = 0,8$  für Stäbe mit guten Verbundeigenschaften  
 $k_b = 1,6$  für Stäbe mit nahezu glatter Oberfläche
- $\phi$  Stabdurchmesser der Betonstahlbewehrung (bei einer gemischten Bewehrung aus unterschiedlichen Stabdurchmessern ist der Vergleichsstabdurchmesser  $\phi_{eq}$  zu berücksichtigen)

### 2.3.3.3 Modell nach Empelmann et al. 2015b

In Empelmann et al. 2015b wird ein praxisorientiertes, verbundspezifisches Bemessungsmodell zur Berechnung der charakteristischen Rissbreite vorgestellt.

Zur Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit wird gemäß Empelmann et al. 2015b ein verbundorientierter Ansatz (starr-plastische Verbundbeziehung) wie folgt verwendet.

$$w_k = s_{r,k} \cdot \varepsilon_{sm,k} \quad \text{Gl. 2-18}$$

mit  $s_{r,k}$  charakteristischer Rissabstand  
 $\varepsilon_{sm,k}$  mittlere Stahldehnung

Die Rissbreite  $w_k$  stellt hier die Rissbreite auf Höhe der Bewehrungslage dar. Der Einfluss der Betondehnungen wird vernachlässigt.

Hinsichtlich der Berechnung der Rissbreite ist zwischen Einzelrisszustand und abgeschlossenem Rissbild wie folgt zu unterscheiden. Für den Einzelrisszustand gilt in allgemeiner Form:

$$w_k = 2 \cdot l_e \cdot \frac{1}{E_s} \cdot \frac{\sigma_{s2} + \sigma_{s1}}{2} \quad \text{Gl. 2-19}$$

mit  $l_e$  Einleitungslänge  
 $E_s$  E-Modul der Betonstahlbewehrung  
 $\sigma_{s2}$  Stahlspannung im Riss  
 $\sigma_{s1}$  Stahlspannung am Ende der Einleitungslänge oder in der Mitte zwischen den Rissen

Für das abgeschlossene Rissbild gilt in allgemeiner Form:

$$w_k = s_{r,k} \cdot \frac{1}{E_s} \cdot \frac{\sigma_{s2} + \sigma_{s1}}{2} \quad \text{Gl. 2-20}$$

Der charakteristische Rissabstand kann gemäß nachstehender Gleichung berechnet werden:

$$s_{r,k} = \beta \cdot l_e = \beta \cdot \frac{\phi}{\alpha_1 \cdot 4 \cdot \rho_{s,eff}} \quad \text{Gl. 2-21}$$

mit  $\beta$  beanspruchungsabhängiger Beiwert; für das abgeschlossene Rissbild kann nach Empelmann et al. 2015b näherungsweise  $\beta = 1,6$  gesetzt werden (für Erstrisszustand:  $\beta = 2,0$ ).

$\alpha_1$  verbundabhängiger Beiwert, der nach Empelmann et al. 2015b wie folgt bestimmt werden kann:

$$\alpha_1 = 0,15 \cdot \left( \frac{\phi}{\rho_{s,eff}} \right)^{0,3} \cdot f_{ct,eff}^{0,5}$$

$\rho_{s,eff}$  effektiver Bewehrungsgrad ( $\rho_{s,eff} = A_s/A_{c,eff}$ )

$\phi$  Stabdurchmesser der Bewehrung

Für die praktische Anwendung im Zuge der Bemessung können die voranstehenden Formeln zur Berechnung der Rissbreite im Einzelrisszustand (Gl. 2-19) und im abgeschlossenen Rissbild (Gl. 2-20) wie folgt vereinfacht werden.

Für normalfeste Betone und unter Zugrundelegung guter Verbundbedingungen kann die Rissbreite  $w_k$  im Einzelrisszustand wie folgt berechnet werden:

$$w_k = \frac{\phi}{3,2 \cdot \rho_{s,\text{eff}}} \cdot \frac{0,5 \cdot \frac{f_{\text{ct,eff}}}{\rho_{s,\text{eff}}}}{E_s} \quad \text{Gl. 2-22}$$

Für gute Verbundbedingungen berechnet sich die Rissbreite  $w_k$  im abgeschlossenen Rissbild zu:

$$w_k = \frac{\phi}{4 \cdot \rho_{s,\text{eff}}} \cdot \frac{\sigma_{s2} - 0,7 \cdot \frac{f_{\text{ct,eff}}}{\rho_{s,\text{eff}}}}{E_s} \quad \text{Gl. 2-23}$$

Zwecks Verifizierung der Berechnungsmodelle sind die so zu ermittelnden Rechenwerte der Rissbreite auch mit Versuchswerten (z. B. 95 %-Quantilwerte, Oberflächenrissbreite) zu vergleichen. Vor dem Hintergrund, dass die rechnerische Rissbreite  $w_k$  die Rissbreite jedoch auf Höhe der Bewehrung darstellt, war zunächst angezeigt, dass der Rechenwert zu einer rechnerischen Oberflächenrissbreite  $w_{k,\text{surf}}$  umzurechnen ist.

Gemäß Empelmann et al. 2015b wird die Oberflächenrissbreite wesentlich durch die Größe der Betondeckung und die vorhandene Stahlspannung beeinflusst. Die Aufweitung der Rissbreite (ausgehend von der Bewehrung zur Oberfläche) wird in Empelmann et al. 2015b für normalfeste Betone pauschal durch einen konstanten Additionsterm  $\Delta w = 0,10$  mm in den Berechnungsgleichungen berücksichtigt (vgl. DAfStb 630). Anwendungsgrenzen im Hinblick auf die Größe der Betondeckung werden in diesem Zusammenhang nicht definiert.

### 2.3.3.4 Modell nach Schäfer 2016

Ausgehend von den Untersuchungsergebnissen werden in Schäfer 2016 die folgenden Anpassungen der bestehenden Rissbreitengleichungen nach DIN EN 1992-1-1/NA wie folgt empfohlen:

- Um die Wirkung einer gemischten Bewehrung aus großen Stabdurchmessern ( $\phi_{\text{large}}$ ) als Hauptbewehrung und dünnen Bewehrungsstäben ( $\phi_{\text{surf}}$ ) als Oberflächenbewehrung in Form eines angepassten Vergleichsdurchmessers  $\phi_{\text{eq,large}}$  erfassen zu können, wird ein Änderungsvorschlag formuliert, welcher der Oberflächenbewehrung gemäß nachstehender Gleichung Gl. 2-24 (im Vergleich zu Formel 7.12 aus DIN EN 1992-1-1) mehr „Gewicht“ (3-fach) in der Berechnung des Vergleichsstabdurchmessers zuweist:

$$\phi_{\text{eq,large}} = \frac{3 \cdot n_{\text{surf}} \cdot \phi_{\text{surf}}^2 + n_{\text{large}} \cdot \phi_{\text{large}}^2}{3 \cdot n_{\text{surf}} \cdot \phi_{\text{surf}} + n_{\text{large}} \cdot \phi_{\text{large}}} \quad \text{Gl. 2-24}$$



|      |                       |  |
|------|-----------------------|--|
| mit: | $n_{\text{surf}}$     | Stabanzahl der Oberflächenbewehrung      |
|      | $\phi_{\text{surf}}$  | Stabdurchmesser der Oberflächenbewehrung |
|      | $n_{\text{large}}$    | Stabanzahl der Hauptbewehrung            |
|      | $\phi_{\text{large}}$ | Stabdurchmesser der Hauptbewehrung       |

Versuchstechnisch konnte die voranstehende Modifikation in der Berechnung des Vergleichsstabdurchmessers lediglich für  $\phi_{\text{large}} = 40$  mm überprüft werden. Ob die Gl. 2-24 auch für hiervon abweichende, jedoch praxisübliche Stabkombinationen (z. B.  $\phi 28$  mm und  $\phi 8$  mm) gültig ist, bleibt offen.

- Die Wirkungszone der Bewehrung  $A_{c,\text{eff}}$  bei Verwendung großer Stabdurchmesser kann gemäß den Angaben in DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA bestimmt werden.
- Die Rissbreite für Stahlbetonbauteile unter vorwiegend ruhender Belastung mit einer gemischten Bewehrung aus Oberflächenbewehrung und großen Stabdurchmessern (gemäß DIN EN 1992-1-1) kann wie folgt berechnet werden:

$$w_{k,\text{large}} = s_{r,\text{large}} \cdot (\epsilon_{\text{sm}} - \epsilon_{\text{cm}}) + \Delta w_{\text{large}} \quad \text{Gl. 2-25}$$

Die Bestimmung des Rissabstandes und der Dehnungsdifferenz kann hierbei analog zu DIN EN 1992-1-1/NA unter Berücksichtigung des Vergleichsstabdurchmessers (s. Gl. 2-24) bestimmt werden.

Der additive Anteil  $\Delta w_{\text{large}}$ , wurde empirisch aus den Versuchsergebnissen abgeleitet und ergibt sich zu:

$$\Delta w_{\text{large}} = \frac{0,5 \cdot f_{\text{ck}} + 85}{1000} - 2 \cdot \frac{A_{s,\text{surf}}}{A_{\text{ct,ext}}} \quad \text{Gl. 2-26}$$

|      |                     |  |
|------|---------------------|--|
| mit: | $f_{\text{ck}}$     | charakteristische (Zylinder-) Betondruckfestigkeit   |
|      | $A_{s,\text{surf}}$ | Querschnittsfläche der Oberflächenbewehrung  |
|      | $A_{\text{ct,ext}}$ | Querschnittsfläche des Betons unter Zug außerhalb der Bügel (nach Bild J.1 in DIN EN 1992-1-1, s. Abb. 2-15) |

Das Verhältnis  $A_{s,\text{surf}}$  zu  $A_{\text{ct,ext}}$  entspricht gerade dem gewählten Oberflächenbewehrungsgrad (z. B. 0,01). Insgesamt ist der additive Anteil  $\Delta w_{\text{large}}$  als dimensionsunreiner Zahlenwert aufzufassen.

Gemäß den Ausführungen in Schäfer 2016 ist der Ansatz des additiven Anteils  $\Delta w_{\text{large}}$  nur für eine Hauptbewehrung aus großen Stabdurchmessern vorgesehen.

- In Bezug auf den Rissverlauf wurde folgender Bemessungsvorschlag zur Bestimmung der Oberflächenrissbreite  $w_{\text{surf}}$  unterbreitet:

$$w_{\text{surf}} = w_k \cdot \frac{c}{[(c - 25) \cdot k_w + 25]} = w_k \cdot k_{\text{surf}} \quad \text{Gl. 2-27}$$

|      |       |   |
|------|-------|---|
| mit: | $w_k$ | Rechenwert der Rissbreite gemäß DIN EN 1992-1-1/NA  |
|      | $c$   | Betondeckung der Hauptbewehrung   |
|      | $k_w$ | Quotient aus Rissbreite $w_s$ (Rissbreite am Stab) und Rissbreite $w_{surf}$ (Rissbreite auf der Bauteiloberfläche), anhand von Bauteilversuchen zu $k_w = 0,3 - 0,4$ bestimmt. |

In voranstehender Gleichung wurde für den Rechenwert der Rissbreite eine nominelle Betondeckung von 25 mm (gemäß Schäfer 2016 in Anlehnung an MC 1990) als „Referenzwert“ zugrunde gelegt. Für übliche Betondeckungen zwischen 35 mm - 45 mm kann dann der Vergrößerungsfaktor  $k_{surf}$  zur Abschätzung der Oberflächenrissbreite nach Schäfer 2016 in den Bandbreiten 1,21 – 1,36 angenommen werden.

Die Modifikation der bestehenden Rissbreitengleichungen nach DIN EN 1992-1-1/NA (vgl. Gl. 2-25) wurde an Versuchsergebnissen kalibriert. Offen sind Einflüsse aus variierenden Bauteilgeometrien (z. B. Maßstabeffekte, mehrlagige Bewehrungsanordnungen) auf das Rechenergebnis, die bisher noch nicht überprüft wurden. Die rechnerische Rissbreite  $w_{k,large}$  ist nicht als Oberflächenrissbreite aufzufassen, sondern entspricht mutmaßlich der Definition der Rissbreite  $w_k$  in DIN EN 1992-1-1 (s. Abschnitt 2.7.1).

Die Anwendung des Bemessungsvorschlages zur Bestimmung der Oberflächenrissbreite (vgl. Gl. 2-27) ist auf die Betonfestigkeitsklasse C30/37 und auf zentrisch zugbeanspruchte Bauteile begrenzt. Der Einfluss einer Biegebeanspruchung (zusätzliche Rissöffnung durch Bauteilkrümmung) und der Einfluss einer mehrlagigen Bewehrung auf den Verlauf der Rissbreite (ausgehend vom Bewehrungsstab hin zur Bauteiloberfläche) sind bisher nicht geklärt.

### 2.3.3.5 Modell nach Tran 2018

In Tran 2018 wird ein mechanisches Querkraftmodell für bewehrte Stahlbetonbauteile ohne Schubbewehrung formuliert. Neuartig hierbei ist, dass weitestgehend keine empirischen Ansätze (z. B. anhand von Bauteilversuchen abgeleitet) zur Beschreibung des tatsächlichen mechanischen Tragverhaltens herangezogen werden. Lediglich die Bestimmung des maximalen Wertes der Verbundspannung zwischen Beton und Bewehrung wurde experimentell hergeleitet. Nach Tran 2018 ist das vorgestellte Berechnungsmodell allgemeingültig und kann beispielsweise auch auf nichtmetallische Bewehrung übertragen werden.

Die Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen ohne Schubbewehrung wird wesentlich durch die Rissverzahnung mitbestimmt. Eine Berücksichtigung dieses Traganteils setzt die Kenntnis über die mechanischen Zusammenhänge des Rissgeschehens voraus. Vor diesem Hintergrund wird in Tran 2018 zusätzlich ein geschlossenes mechanisches Modell auf Grundlage der Verbundspannung-Schlupf Beziehung zur Berechnung des Rissabstandes und der Rissbreite präsentiert.

Die Berechnung der Rissbreite für das abgeschlossene Rissbild kann in Anlehnung an DIN EN 1992-1-1 wie folgt vorgenommen werden:

$$w_k = s_{cr,max} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad \text{Gl. 2-28}$$

mit  $s_{cr,max}$  maximaler Rissabstand im abgeschlossenen Rissbild  
 $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$  mittlere Dehnungsdifferenz zwischen Betonstahl und Bewehrung

Die Rissbreite  $w_k$  ist gemäß Tran 2018 als die Rissöffnung auf Höhe der Bewehrung definiert. Im Zuge der Berechnung wird ebenfalls der (begrenzte) Wirkungsbereich der Bewehrung  $A_{c,ef}$  (wie z. B. in DIN EN 1992-1-1) berücksichtigt. Die einwirkungsabhängige (Unterschied Biegung und zentrischer Zwang) Bestimmung von  $A_{c,ef}$  ist gemäß Tran 2018 unweigerlich mit der Aussagequalität des Berechnungsmodells verknüpft. Es kann durch entsprechende Modifikation des Wirkungsbereichs auch die Rissbreite auf der Bauteiloberfläche berechnet werden.

In Tran 2018 werden jeweils Lösungen für den minimalen (einfache maximale Einleitungslänge  $l_{t,max}$ ) und den maximalen Rissabstand (zweifache maximale Einleitungslänge  $l_{t,max}$ ) vorgestellt. Nach Tran 2018 kann angenommen werden, dass der Rissabstand im abgeschlossenen Rissbild äquidistant verteilt ist, d. h. der Rissabstand kann in guter Näherung als Mittelwert des minimalen und maximalen Rissabstandes zugrunde gelegt werden. Für die Bemessung selbst ist jedoch der maximale Rissabstand wie folgt heranzuziehen:

$$s_{cr,max} = 1,5 \cdot l_{t,max} = 0,514 \cdot \sqrt{\frac{f_{ctm}}{\rho_{s,ef}}} \cdot \left( \frac{E_s}{1 + n_e \cdot \rho_{s,ef}} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left( \frac{\phi_s}{\sqrt{f_c}} \right)^{\frac{3}{4}} \quad \text{Gl. 2-29}$$

mit  $f_{ctm}$  mittlere Betonzugfestigkeit zum betrachteten Zeitpunkt  
 $\rho_{s,ef}$  effektiver Bewehrungsgrad  
 $E_s$  E-Modul des Betonstahls  
 $n_e$  Verhältnis der E-Moduln ( $n_e = E_s/E_c$ )  
 $\phi_s$  Stabdurchmesser des Betonstahls  
 $f_c$  (charakteristische) Betondruckfestigkeit ( $f_{ck}$  nach DIN EN 1992-1-1)

Die Berechnung der mittleren Dehnungsdifferenz erfolgt nach Tran 2018 in Anlehnung an DIN EN 1992-1-1 und MC 2010 wie folgt:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{1}{E_s} \cdot \left[ \sigma_s - \beta_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{s,ef}} \cdot (1 + n_e \cdot \rho_{s,ef}) \right] \geq (1 - \beta_t) \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \quad \text{Gl. 2-30}$$

mit  $\beta_t$  Beiwert zur Berücksichtigung der Belastungsdauer nach MC 2010  
 $\sigma_s$  Stahlspannung

Der in obiger Gleichung Gl. 2-30 enthaltene Grenzwert dient nach Tran 2018 dazu, eine Überschätzung der Betondehnung zu verhindern.

## 2.4 Bemessungskonzepte zur Rissbreitenbegrenzung

Obleich mit den Eurocodes ein europaweit einheitliches Regelwerk für die Planung und Erstellung von Tragwerken im Bauwesen durch die CEN-Mitgliedsstaaten (EU-Mitgliedsstaaten sowie das Vereinigte Königreich, Island, Norwegen, Schweiz, Republik Nordmakedonien, Serbien und Türkei) geschaffen wurde, sehen die seitens der Mitgliedsstaaten zusätzlich erarbeiteten Nationalen Anwendungsdokumente z. T.

abweichende Festlegungen im Hinblick auf Bemessungs- und Nachweiskonzepte vor. In diesem Zusammenhang ist gemäß Fingerloos et al. 2016 zwischen NDPs (nationally determined parameters, d. h. seitens der CEN-Mitgliedstaaten national festzulegende Parameter) und NCIs (non-contradictory complementary information, d. h. ergänzende, nicht widersprechende Angaben zur Anwendung) zu unterscheiden. Die Einführung dieser NDPs und NCIs zielt darauf ab, nationale Unterschiede in Bezug auf Bauarten, Sicherheitsanforderungen und klimatische Bedingungen seitens der Mitgliedsstaaten individuell berücksichtigen zu können. Der Eurocode 2 (mit den Teilen 1-1, 1-2, 2-1 und 2-2) enthält gemäß Ignatiadis et al. 2014 annähernd 190 NDPs. In diesem Zusammenhang wird nach Ignatiadis et al. 2014 im Zuge der derzeitigen Überarbeitung der Eurocodes auch eine Reduktion der NDPs und damit eine weitere Harmonisierung der Regelwerke angestrebt.

NDPs sind auch im Hinblick auf die hier in Rede stehende, in DIN EN 1992-1-1 (deutschsprachige Version des Ursprungsdokuments EN 1992-1-1) im Abschnitt 7.3 geregelte Begrenzung der Rissbreite vorgesehen. Vor diesem Hintergrund werden die in DIN EN 1992-1-1 enthaltenen Bemessungsregeln zur Begrenzung der Rissbreite mit den z. T. hiervon abweichenden Festlegungen der nationalen Anwendungsdokumente gegenübergestellt.

Ergänzend hierzu werden exemplarisch auch internationale Regelungen zur Begrenzung der Rissbreite nach SIA 262 (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Schweiz), ACI 318-14 (American Concrete Institute, USA) und CSA-A23.3 (Canadian Standards Association, Kanada) in die Betrachtung miteinbezogen.

Die nachfolgende Zusammenstellung beschränkt sich ausschließlich auf eine direkte Berechnung der Rissbreite infolge last- und oder zwanginduzierter Beanspruchung. Ansätze zur Berechnung der Mindestbewehrung (zur Rissbreitenkontrolle und Begrenzung des Stahlfließens auf Erstrissniveau, vgl. Abschnitt 7.3.2 in DIN EN 1992-1-1) und indirekte Berechnungsmethoden zur Begrenzung der Rissbreite (vgl. Abschnitt 7.3.3 in DIN EN 1992-1-1) werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

### 2.4.1 EN 1992-1-1 für Europa

Gemäß DIN EN 1992-1-1 (deutschsprachige Version von EN 1992-1-1, wird nachfolgend jeweils synonym verwendet) ist die charakteristische Rissbreite  $w_k$  als Produkt aus dem maximalen Rissabstand  $s_{r,max}$  (bei abgeschlossenem Rissbild) und der mittleren Dehnungsdifferenz ( $\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$ ) von Bewehrung und Beton wie folgt zu bestimmen:

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad \text{Gl. 2-31}$$

Die Dehnungsdifferenz ( $\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$ ) berechnet sich zu:

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \quad \text{Gl. 2-32}$$

|     |                |  |
|-----|----------------|--|
| mit | $\sigma_s$     | Spannung in der Zugbewehrung unter Annahme eines gerissenen Querschnitts   |
|     | $k_t$          | Faktor, der von der Dauer der Lasteinwirkung abhängt:<br>$k_t = 0,6$ bei kurzzeitiger Lasteinwirkung<br>$k_t = 0,4$ bei langfristiger Lasteinwirkung |
|     | $f_{ct,eff}$   | wirksame Betonzugfestigkeit zum betrachteten Zeitpunkt   |
|     | $\rho_{p,eff}$ | effektiver Bewehrungsgrad ( $\rho_{p,eff} = A_s/A_{c,eff}$ )   |
|     | $A_{c,eff}$    | Wirkungsbereich der Bewehrung  |
|     | $\alpha_e$     | Verhältnis der E-Moduln ( $\alpha_e = E_s/E_{cm}$ )  |
|     | $E_s$          | E-Modul der Betonstahlbewehrung  |
|     | $E_{cm}$       | mittlerer E-Modul des Betons   |

Der maximale Rissabstand  $s_{r,max}$  bei abgeschlossenem Rissbild wird gemäß nachstehendem additiven Ansatz (u. a. basierend auf Rehm et al. 1968) ermittelt zu:

$$s_{r,max} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi}{\rho_{p,eff}} \quad \text{Gl. 2-33}$$

|     |        |   |
|-----|--------|---|
| mit | $k_3$  | Beiwert zur Berücksichtigung der Betondeckung<br>(empfohlener Wert: $k_3 = 3,4$ )   |
|     | $c$    | Betondeckung der Längsbewehrung   |
|     | $k_1$  | Beiwert zur Berücksichtigung der Verbundeigenschaften der Bewehrung:<br>$k_1 = 0,8$ für Stäbe mit guten Verbundeigenschaften<br>$k_1 = 1,6$ für Stäbe mit nahezu glatter Oberfläche |
|     | $k_2$  | Beiwert zur Berücksichtigung der Dehnungsverteilung:<br>$k_2 = 0,5$ für Biegung<br>$k_2 = 1,0$ für reinen Zug   |
|     | $k_4$  | Beiwert zur Berücksichtigung des Verhältnisses aus Verbundspannung zur mittleren Betonzugfestigkeit<br>(empfohlener Wert: $k_4 = 0,425$ )   |
|     | $\phi$ | Stabdurchmesser der Betonstahlbewehrung (bei einer gemischten Bewehrung aus unterschiedlichen Stabdurchmessern ist der Ersatzstabdurchmesser $\phi_n$ zu berücksichtigen)           |

Die Absätze (1) und (2) in Abschnitt 7.3.4, DIN EN 1992-1-1 (hier Gl. 2-31 und Gl. 2-32) enthalten keine NDPs, sodass sich an dieser Stelle keine wesentlichen Unterschiede in der Berechnung der Dehnungsdifferenz zu erwarten sind. Gemäß DBV 2019 können jedoch unter Umständen kleinere rechnerische Abweichungen infolge unterschiedlicher Ansätze bei den Materialeigenschaften (z. B. Betonzugfestigkeit) erwartet werden.

In Absatz (3) (hier Gl. 2-33) sind die Faktoren  $k_3$  und  $k_4$  für die Berechnung des Rissabstandes als NDPs gekennzeichnet, sodass diese in den Nationalen Anwendungsdokumenten entsprechend konkretisiert werden können. Nach DBV 2019 ist dies Ursache dafür, dass wesentliche Unterschiede in der Berechnung der Rissbreite bei Zugrundelegung verschiedener Nationaler Anwendungsdokumente auftreten. Gemäß Abschnitt 2.3.3.2 sollen diese Beiwerte in der zukünftigen Eurocode-Generation entfallen und durch allgemein festgelegte Werte ersetzt werden.

### 2.4.2 DIN EN 1992-1-1/NA für Deutschland

Im Nationalen Anwendungsdokument DIN EN 1992-1-1/NA für Deutschland wird die Berechnung des Rissabstandes unter Beachtung des NDPs zu 7.3.4 (3) wie folgt vorgegeben:

$$s_{r,max} = \frac{\phi}{3,6 \cdot \rho_{p,eff}} \leq \frac{\sigma_s \cdot \phi}{3,6 \cdot f_{ct,eff}} \quad \text{Gl. 2-34}$$

Hierbei wird das in Gl. 2-33 beschriebene Produkt aus  $k_1$  und  $k_2$  zu 1,0 gesetzt. Dies geschieht nach Fingerloos et al. 2016 vor dem Hintergrund, dass der Beiwert  $k_1$  für glatte Betonstähle entfallen kann und die Dehnungsverteilung bei Zug- oder Biegebeanspruchung nicht modellgerecht sei. Die Faktoren  $k_3$  und  $k_4$  werden zu  $k_3 = 0$  (Entfall der Verbundstörung beidseits der Rissufer als ein Vielfaches der Betondeckung, vgl. Fingerloos et al. 2016) und zu  $k_4 = 1/3,6$  (Ansatz einer charakteristischen Verbundspannung  $\tau_{sk} = 1,8 \cdot f_{ct,eff}$  für Rippenstähle, vgl. Fingerloos et al. 2016) angenommen. In der Berechnung des Rissabstandes nach DIN EN 1992-1-1/NA wurde eine zusätzliche, obere Begrenzung des Rissabstandes ergänzt. Demnach muss für den Rissabstand höchstens die doppelte Einleitungslänge berücksichtigt werden, um die Risschnittgröße über Verbundwirkung wieder in den Beton einzuleiten (vgl. Fingerloos et al. 2016). Damit entspricht voranstehender Ansatz (Gl. 2-34) weitestgehend den Festlegungen in DIN 1045-1 2008.

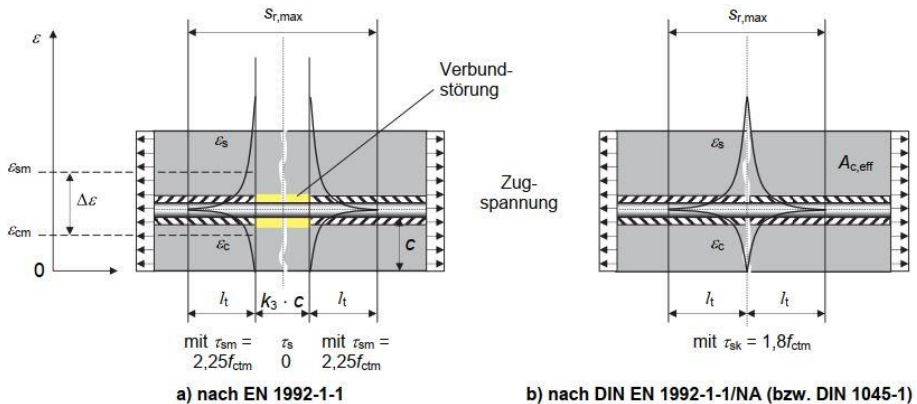


Abb. 2-10: Unterschiede in der Berechnung des Rissabstandes nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA gemäß Fingerloos et al. 2016

Die Überführung der Gl. 2-33 in die Gl. 2-34 ist detailliert in Fingerloos et al. 2016 beschrieben. Mit voranstehender Abb. 2-10 aus Fingerloos et al. 2016 können die Unterschiede in der Berechnung des Rissabstandes nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA veranschaulicht werden.

### 2.4.3 Europäische Mitgliedstaaten (NDPs)

Die nachfolgende Zusammenstellung zum Umgang der europäischen Mitgliedsstaaten mit den im jeweiligen Nationalen Anwendungsdokument zu regelnden Beiwerten  $k_3$

und  $k_4$  wurde unter Hinzuziehung von Ignatiadis et al. 2014 erarbeitet. Vergleichbare Betrachtungen werden diesbezüglich auch in Empelmann et al. 2018a thematisiert.

Neben Deutschland haben auch Österreich, Schweden und Dänemark gegenüber den Empfehlungen in DIN EN 1992-1-1 abweichende Werte für  $k_3$  und  $k_4$  in ihren Nationalen Anwendungsdokumenten festgelegt. Frankreich und Norwegen haben die empfohlenen Werte aus DIN EN 1992-1-1 weitestgehend übernommen, jedoch zusätzliche Modifikationen eingeführt. Aus Gründen der Übersicht werden die unterschiedlichen Regelungen in Bezug auf die Beiwerte  $k_3$  und  $k_4$  nachfolgend tabellarisch zusammengestellt.

Tab. 2-1: Zusammenstellung der Festlegungen in den NDPs zu den Beiwerten  $k_3$  und  $k_4$  gemäß Ignatiadis et al. 2014

| Mitglied   | Regelungsbereich   |
|------------|--|
| Österreich | <p>gemäß ÖNORM B 1992-1-1 ergeben sich die Beiwerte <math>k_3</math> und <math>k_4</math> wie folgt:</p> $k_3 = 0$ $k_4 = \frac{1}{3,6 \cdot k_1 \cdot k_2} \leq \frac{\rho_{p,eff} \cdot \sigma_s}{3,6 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot f_{ct,eff}}$ <p>mit <math>k_1 \cdot k_2 = 1</math></p> <p>damit entspricht der Bemessungsansatz demjenigen nach DIN EN 1992-1-1/NA</p> |
| Schweden   | <p>gemäß BFS 2019:1 EKS 11 ergibt sich der Beiwert <math>k_3</math> zu:</p> $k_3 = \frac{7 \cdot \phi}{c}$ <p>für <math>k_4</math> gilt der empfohlene Wert nach DIN EN 1992-1-1</p>   |
| Dänemark   | <p>gemäß DS/EN 1992-1-1 DK NA ergibt sich der Beiwert <math>k_3</math> zu:</p> $k_3 = 3,4 \cdot (25 / c)^{2/3}$ <p>für <math>k_4</math> gilt der empfohlene Wert nach DIN EN 1992-1-1</p>  |
| Frankreich | <p>gemäß NF EN 1992-1-1/NA ergibt sich der Beiwert <math>k_3</math> zu:</p> $k_3 = 3,4 \cdot (25 / c)^{2/3}, \text{ für } c \geq 25 \text{ mm, sonst } k_3 = 3,4$ <p>für <math>k_4</math> gilt der empfohlene Wert nach DIN EN 1992-1-1</p>  |
| Norwegen   | <p>gemäß NS-EN 1992-1-1/NA werden die Beiwerte <math>k_3</math> und <math>k_4</math> entsprechend den Empfehlungen in DIN EN 1992-1-1 übernommen; die Berechnung von <math>h_{c,ef}</math> für die Bestimmung von <math>A_{c,eff}</math> wird abweichend zu DIN EN 1992-1-1 geregelt</p>   |

Für Finnland ist der entsprechende Abschnitt im zugehörigen Nationalen Anwendungsdokument nicht geregelt. Die übrigen 21 Mitgliedsstaaten folgen den Empfehlungen aus DIN EN 1992-1-1 und übernehmen die Beiwerte  $k_3$  und  $k_4$  unverändert in ihren NDPs.

Insgesamt wird die Regelung der Beiwerte  $k_3$  und  $k_4$  im Hinblick auf eine weitgehende Harmonisierung der NDPs in Ignatiadis et al. 2014 der Kategorie D zugemessen, d. h., dass in diesem Zusammenhang mit großem Diskussionsbedarf zu rechnen und eine Vereinheitlichung nur mit erhöhtem Aufwand umsetzbar ist.

Zusammenfassend ist somit auf europäischer Ebene festzustellen, dass sich die wesentlichen Unterschiede in der Rissbreitenberechnung auf die Bestimmung des Rissabstandes belaufen.

## 2.4.4 Ausgewählte internationale Bemessungskonzepte

### 2.4.4.1 Schweiz

Die schweizerische Norm SIA 262 enthält selbst keine Bemessungsformel zur direkten Berechnung der Rissbreite. Die Beschränkung der Rissbreiten wird durch Begrenzung der Stahlspannung für verschiedene Einwirkungen wie folgt sichergestellt.

| Ziel  | Anforderungen          |  |  |
|---|------------------------|--|--|
|   | normal                 | erhöht   | hoch   |
| Verhindern spröden Versagens beim Erreichen von $f_{ctd}$   | $\sigma_s \leq f_{sd}$ | $\sigma_s \leq f_{sd}$   | $\sigma_s \leq f_{sd}$   |
| <i>Verhindern eines Fließens der Bewehrung für häufige Lastfälle gemäss SIA 260</i>   | -                      | $\sigma_s \leq f_{sd} - 80 \text{ N/mm}^2$                       | $\sigma_s \leq f_{sd} - 80 \text{ N/mm}^2$                       |
| <i>Begrenzen der Rissbreiten (unter Aufgezwungenen oder behinderten Verformungen bzw. für quasi-ständige Lastfälle gemäss Norm SIA 260) beim Erreichen vom <math>f_{ctd}</math> <sup>1)</sup></i> | $\sigma_s \leq f_{sd}$ | $\sigma_s \leq \sigma_{s,adm}$<br>für $w_{nom} = 0,5 \text{ mm}$ | $\sigma_s \leq \sigma_{s,adm}$<br>für $w_{nom} = 0,2 \text{ mm}$ |

Abb. 2-11: Einwirkungen und Anforderungen an die Rissbreitenbegrenzung nach SIA 262

### 2.4.4.2 USA

Auch die US-amerikanische Norm ACI 318-14 enthält keine Bemessungsformel zur direkten Berechnung der Rissbreite.

Die Begrenzung der Rissbreiten erfolgt indirekt durch die Begrenzung der Stababstände. Die maximal zulässigen Stababstände werden unter Berücksichtigung der Betondeckung und der Stahlspannung berechnet (vgl. Abb. 2-12)



**Table 24.3.2—Maximum spacing of bonded reinforcement in nonprestressed and Class C prestressed one-way slabs and beams**

| Reinforcement type   | Maximum spacing $s$ |   |
|--|---------------------|---|
| Deformed bars or wires   | Lesser of:          | $15 \left( \frac{40,000}{f_s} \right) - 2.5c_c$   |
|  |                     | $12 \left( \frac{40,000}{f_s} \right)$  |
| Bonded prestressed reinforcement                                     | Lesser of:          | $\left( \frac{2}{3} \right) \left[ 15 \left( \frac{40,000}{\Delta f_{ps}} \right) - 2.5c_c \right]$ |
|  |                     | $\left( \frac{2}{3} \right) \left[ 12 \left( \frac{40,000}{\Delta f_{ps}} \right) \right]$          |
| Combined deformed bars or wires and bonded prestressed reinforcement | Lesser of:          | $\left( \frac{5}{6} \right) \left[ 15 \left( \frac{40,000}{\Delta f_{ps}} \right) - 2.5c_c \right]$ |
|  |                     | $\left( \frac{5}{6} \right) \left[ 12 \left( \frac{40,000}{\Delta f_{ps}} \right) \right]$          |

Abb. 2-12: Beschränkung der Stababstände nach ACI 318-14

**2.4.4.3 Kanada**

Auch die kanadische Norm CSA-A23.3 weist keine Bemessungsformel zur direkten Berechnung der Rissbreite aus. Die (indirekte) Begrenzung der Rissbreite erfolgt unter Zuhilfenahme des Faktors  $z$  (s. Abb. 2-13).

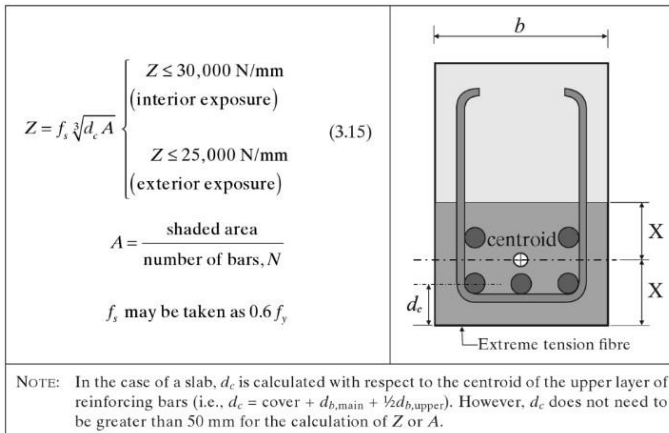


Abb. 2-13: Berechnung des Faktors  $z$  nach CSA-A23.3

Der Faktor  $z$  kann in diesem Zusammenhang als „potentieller Rissgrad“ aufgefasst werden. Stäbe in Balken und einachsig gespannten Platten sind demnach so in der Zugzone zu verteilen, dass der Faktor  $z$  einen Grenzwert von 30.000 N/mm (Innenbauteile) und 25.000 N/mm (Außenbauteile) nicht überschreitet.

Die auftretenden Risse sind so zu begrenzen, dass für Außenbauteile eine Rissbreite  $< 0,33$  mm und für Innenbauteile eine Rissbreite  $< 0,40$  mm nicht überschritten wird.

In CSA-A23.3 wird in diesem Zusammenhang angemerkt, dass eine Rissbreitenbegrenzung bei besonders exponierten Konstruktionen oder WU-Bauteilen alleine durch Einhaltung der genannten Grenzwerte für den Faktor  $z$  ggf. nicht ausreichend ist. Weitergehende, konkrete Vorgaben werden an dieser Stelle diesbezüglich nicht mitgeteilt.

Für Bauteile mit einer Gesamthöhe größer 750 mm ist nach CSA-A23.3 der Einbau einer randnahen Oberflächenbewehrung („skin reinforcement“) wie folgt vorzusehen.

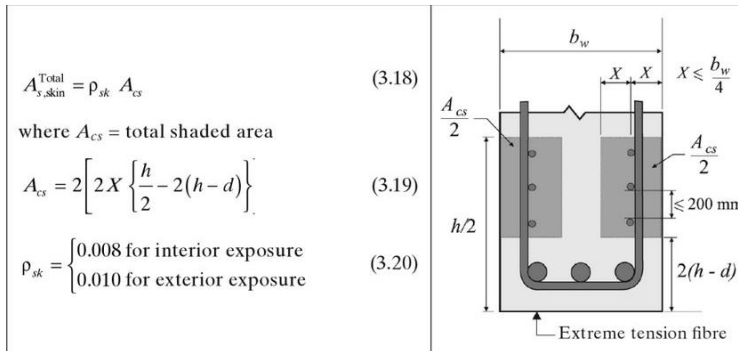


Abb. 2-14: Berechnung der Oberflächenbewehrung nach CSA-A23.3

Das Erfordernis einer Oberflächenbewehrung ist in diesem Zusammenhang mit der etwaigen Bildung breiter Risse im Bereich der Bauteilseitenflächen begründet. Der zugehörige Bewehrungsgrad unterscheidet sich für Innen- und Außenbauteile.

## 2.5 Große Stabdurchmesser

### 2.5.1 Historie

DIN 1045 1959, DIN 1045 1972 und DIN 1045 1988 regelten die Verwendung von Betonstabstählen mit den Stabdurchmessern  $\phi 6$  mm bis  $\phi 28$  mm. Größere Stabdurchmesser (außerhalb des Regelungsbereichs) für die keine entsprechenden Erfahrungswerte vorlagen, wurden seinerzeit zunächst durch bauaufsichtliche Zustimmungen (z. B. Zulassungsbescheide Z-1.1-78 und Z-1.1-59, s. Rehm 2004) erfasst, denen individuelle gutachterliche Stellungnahmen vorausgingen (z. B. Rehm et al. 1975, Rippenstähle mit  $\phi 50$  mm als Bewehrung in Stahlbetonbauteilen, s. auch Abschnitt 2.3.2.1).

Außerhalb von Deutschland (z. B. Österreich, USA) wurden gemäß Rehm et al. 1975 bereits in den 1970er Jahren Rippenstähle mit großen Stabdurchmessern (Durchmesser 40 mm bis 57 mm) mit vergleichbaren Stahlgüten zu BSt 42/50 und BSt 50/55 standardmäßig eingesetzt.

Mit bauaufsichtlicher Einführung der DIN 1045-1 2001 wurden auch Bewehrungsstäbe bis Stabdurchmesser  $\phi 40$  mm in Deutschland berücksichtigt, obwohl die Stabdurchmesser 32 mm und 40 mm in diesem Zusammenhang erst seit 2009 in den

zugehörigen Betonstahlnormen DIN 488-1 und DIN 488-2 geregelt sind. Da zum Zeitpunkt der Normerweiterung keine systematischen Untersuchungen für Stabdurchmesser  $\geq \phi 32$  mm vorlagen, wurden die Konstruktionsregeln zunächst aus bestehenden bauaufsichtlichen Zulassungen (z. B. für Gründungsbauteile) übernommen und die bereits geltenden Regelungen für Stabbündel auf große Stabdurchmesser sinngemäß übertragen. Im weiteren Verlauf wurden u. a. in Rehm 2004 konkrete Vorschläge für Bemessungs- und Konstruktionsregeln bei Verwendung großer Stabdurchmesser erarbeitet.

### 2.5.2 Eurocode 2 und Nationaler Anhang für Deutschland

In DIN EN 1992-1-1 sind im Abschn. 8.8 „Zusätzliche Regeln bei großen Stabdurchmessern“ formuliert, welche nachfolgende auszugsweise wiedergegebene Konstruktionsregeln enthalten und gemäß DIN EN 1992-1-1/NA damit für Stäbe mit einem Durchmesser  $\phi_{\text{large}} > 32$  mm zu berücksichtigen sind:

- Verwendung einer Oberflächenbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite und zur Vermeidung von Betonabplatzungen,
- Regelungen zur Ausführung von Verankerungen und Stößen,
- Zusatzbewehrung zur Verbundsicherung (Vermeidung klaffender Längsrisse).

Gemäß DIN EN 1992-1-1/NA beträgt die Mindestquerschnittsbreite von mit großen Stabdurchmessern bewehrten Bauteilen  $15 \phi_{\text{large}}$  und es können Betone der Betondruckfestigkeitsklassen C20/25 bis C80/95 verwendet werden.

Die Begrenzung der Rissbreite darf sowohl durch direkte Berechnung gemäß DIN EN 1992-1-1, Abschnitt 7.3.4 als auch durch Verwendung einer Oberflächenbewehrung (gemäß DIN EN 1992-1-1, Abschnitt 9.2.4) erfolgen.

Ab einem Stabdurchmesser  $\phi_{\text{large}} > 32$  mm oder auch bei Stabbündeln ab einem Vergleichsdurchmesser  $\phi_n > 32$  mm ist stets eine Oberflächenbewehrung vorzusehen. Diese Oberflächenbewehrung darf gemäß DIN EN 1992-1-1/NA nicht kleiner als  $0,02 \cdot A_{\text{ct,ext}}$  parallel und orthogonal zur (Haupt-) Zugbewehrung gewählt werden. Die externe Querschnittsfläche  $A_{\text{ct,ext}}$  ist in diesem Zusammenhang als die außerhalb der Bügelbewehrung, im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit unter Zugspannung stehende Querschnittsfläche des Betons zu verstehen (s. Abb. 2-15). Als Stabdurchmesser der Oberflächenbewehrung ist  $\phi_{\text{surf}} \leq 10$  mm vorzusehen.

Gemäß DIN EN 1992-1-1 darf die Querschnittsfläche der Oberflächenbewehrung nicht weniger als  $0,01 A_{\text{ct,ext}}$  (orthogonal zur Hauptbewehrung) oder  $0,02 A_{\text{ct,ext}}$  (parallel zur Hauptbewehrung) betragen (vgl. Absatz (8)). Zur Ausgestaltung dieser Oberflächenbewehrung wird diesem Zusammenhang im Abschnitt 9.2.4 auf den informativen Anhang J verwiesen, welcher lediglich in Deutschland normativen Charakter aufweist. Nach Anhang J.1, Absatz (2) hat der Querschnitt der minimalen Oberflächenbewehrung  $A_{\text{s,sruf,min}}$  orthogonal und parallel zur Hauptbewehrung mindestens  $0,01 A_{\text{ct,ext}}$  zu betragen. Hinsichtlich der Angaben im Abschnitt 8.8, Absatz (8) und den Ausführungen in Anhang J.1, Absatz (2) liegt augenscheinlich für DIN EN 1992-1-1 ein Widerspruch vor, der im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter beleuchtet wird.

Sowohl die Längs- als auch die Querstäbe der Oberflächenbewehrung dürfen als statisch erforderliche Bewehrung (Biege- oder Querkraftbewehrung) angesetzt werden, sofern die entsprechenden Bewehrungsregeln eingehalten werden.

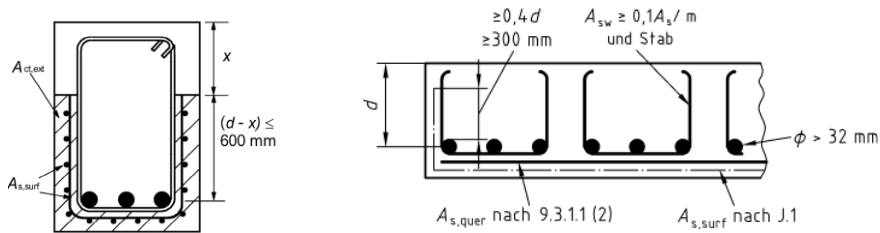


Abb. 2-15: Darstellung von  $A_{ct,ext}$  nach Bild J.1 aus DIN EN 1992-1-1 (links) und Zusatzbewehrung zur Verbundsicherung nach Bild NA.8.11.2 aus DIN EN 1992-1-1/NA

Der Verlegebereich der Oberflächenbewehrung ist gemäß DIN EN 1992-1-1, Bild J.1 auf eine Höhe von 600 mm oberhalb der Schwerachse der Hauptbiegezugbewehrung begrenzt (s. Abb. 2-15). Gemäß Fingerloos et al. 2016 ist dies als vereinfachte Festlegung zu verstehen, die dadurch begründet wird, dass die für die Rissbildung maßgebliche Wirkungszone der Bewehrung mit zunehmender Querschnittshöhe nicht mehr proportional anwächst. Die Oberflächenbewehrung ist aber mindestens 300 mm (oder  $0,4d$ ) in Richtung des gedrückten Bauteilrands zu führen (s. Abb. 2-15). In Fingerloos et al. 2016 wird dies mit der Notwendigkeit einer ausreichenden Umfassung der Bewehrung begründet.

Zur Verbundsicherung muss bei stabförmigen Bauteilen außerdem eine Bügelbewehrung angeordnet werden, deren Querschnittsfläche 10 % der eingefassten Querschnittsfläche der großen Stabdurchmesser entspricht. Die Querstäbe der Oberflächenbewehrung dürfen hierzu als Verbundsicherungsbewehrung herangezogen werden (s. Abb. 2-15).

Gemäß Abschnitt 8.4.2 in DIN EN 1992-1-1 ist der Bemessungswert der Verbundfestigkeit  $f_{bd}$ , welcher beispielweise im Zuge der Bemessung der Verankerung der Bewehrung in Rechnung zu stellen ist, für große Stabdurchmesser ( $\phi_{large} > 32 \text{ mm}$ ) mit dem Faktor  $\eta_2$  abzumindern. Dies ist gemäß Fingerloos et al. 2016 wesentlich darauf zurückzuführen, dass mit zunehmendem Bewehrungsdurchmesser der Widerstand gegen Aufspalten des Betons abnimmt. Eine vergleichbare Reduzierung der Verbundfestigkeit im Zuge der Rissbreitenberechnung ist derzeit normativ nicht vorgesehen. In den Berechnungsformeln nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA wird in diesem Zusammenhang eine konstante Verbundspannung  $\tau_{sk} = 1,8 \cdot f_{ct,eff}$  gemäß MC 1990 (unabhängig vom betrachteten Stabdurchmesser) zugrunde gelegt.

Gegenüber DIN EN 1992-1-1 (deutsche Fassung des EN 1992-1-1) beinhaltet DIN EN 1992-1-1/NA insgesamt 14 zusätzliche sog. NCIs, d. h. ergänzende und damit nicht im Widerspruch mit DIN EN 1992-1-1 stehende Anwendungshinweise in Bezug auf die zusätzlichen Konstruktionsregeln.

### 2.5.3 Europäische Mitgliedstaaten (NDPs)

Im Abschnitt 8.8 „Zusätzliche Regeln bei großen Stabdurchmessern“ der DIN EN 1992-1-1 (deutsche Fassung des EN 1992-1-1) wird der Stabdurchmesser  $\phi_{\text{large}}$ , anhand dessen eine Abgrenzung vorzunehmen ist, zu  $\phi_{\text{large}} > 32$  mm vorgeschlagen.

Nach Ignatiadis et al. 2014 folgen insgesamt 23 Mitgliedsstaaten dieser Empfehlung und übernehmen die Festlegung des Stabdurchmesser  $\phi_{\text{large}}$  unverändert in ihren NDPs. Frankreich (NF EN 1992-1-1/NA), Großbritannien (BS EN 1992-1-1/NA) und Irland (I.S. EN 1992-1-1/NA) definieren  $\phi_{\text{large}} > 40$  mm. Norwegen (NS-EN 1992-1-1/NA) unterscheidet diesbezüglich zwischen Einzelstäben ( $\phi_{\text{large}} > 32$  mm) und Stabbündeln ( $\phi_n > 40$  mm).

Im Hinblick auf die zusätzlichen Konstruktionsregeln unterscheiden sich die nationalen Anwendungsdokumente wesentlich im Hinblick auf die einzulegende Oberflächenbewehrung. Der in Anhang J.1, Absatz (2) empfohlene Mindestquerschnittswert der Oberflächenbewehrung  $A_{s,\text{srufl},\text{min}} = 0,01 A_{\text{ct},\text{ext}}$  gilt für die Niederlande (NEN-EN 1992-1-1 + C2/NB) normativ. Für die überwiegende Mehrzahl der Mitgliedstaaten (19) wurde dies als informativer Hinweis übernommen (vgl. Ignatiadis et al. 2014). In Österreich (ÖNORM B 1992-1-1) ist eine Oberflächenbewehrung nur dann erforderlich, wenn die Betondeckung mehr als 70 mm beträgt oder eine Rissbreitenbegrenzung durch direkte Berechnung nicht möglich ist. Großbritannien, Irland, Dänemark, Finnland und Norwegen sehen diesbezüglich keine Regelung vor, sodass mutmaßlich eine Oberflächenbewehrung gemäß den Angaben im Abschnitt 8.8 nach DIN EN 1992-1-1 zu berücksichtigen ist (vgl. Ignatiadis et al. 2014).

### 2.5.4 prEN1992-1-1

Im derzeit zur Diskussion vorliegenden Entwurf zur neuen Eurocode 2-Generation prEN1992-1-1 (Stand Oktober 2017) ist es nicht vorgesehen, einen großen Stabdurchmesser  $\phi_{\text{large}}$  in Anlehnung an DIN EN 1992-1-1 zu definieren. Auch sind diesbezüglich keine zusätzlichen Konstruktionsregeln zu berücksichtigen. Insbesondere die nach DIN EN 1992-1-1, Abschnitt 9.2.4 einzulegende Oberflächenbewehrung wird nicht gefordert.

Eine Ausnahme hiervon bildet hier die Ausführung von Stößen und Verankerungen. In diesem Zusammenhang sind bei Übergreifungsstößen mit Stabdurchmessern  $\phi > 32$  mm besondere Maßnahmen (z. B. Querbewehrung entlang der Überlappung) zu ergreifen. Im Hinblick auf die Rissbreitenbeschränkung im Überlappungsbereich wurde bisher noch kein Regelungsvorschlag formuliert. Diesbezüglich sollen zunächst ausstehende Forschungsergebnisse abgewartet werden. Ggf. kann Abschnitt 8.8, Absatz (2) aus DIN EN 1992-1-1 übernommen werden.

### 2.5.5 Empfehlungen in MC 2010

Die in MC 2010 formulierten Bemessungs- und Konstruktionsvorschläge können grundsätzlich für Bewehrungsstäbe bis zu einem Stabdurchmesser  $\phi \leq 40$  mm angewendet werden. Jedoch wird der Einsatz von Bewehrungsstäben mit einem Stabdurchmesser  $\phi > 32$  mm nur in begründeten Ausnahmefällen empfohlen.

Zusätzliche Konstruktionsregeln (in Anlehnung an Abschnitt 8.8 in DIN EN 1992-1-1) bei Verwendung großer Stabdurchmesser sind nicht enthalten (Ausnahme: Ausführung von Verankerungen und Stößen). Eine Oberflächenbewehrung wird nicht thematisiert.

### 2.5.6 Ausgewählte internationale Regelwerke

#### 2.5.6.1 Schweiz

Die in SIA 262 geregelten Bestimmungen zur konstruktiven Ausbildung von Stahlbetonbauteilen gelten grundsätzlich nur für Stabdurchmesser  $\phi \leq 40$  mm. Dabei sollte der Einsatz von Stäben mit einem Stabdurchmesser  $\phi > 32$  mm nur in Ausnahmefällen vorgesehen werden.

Zusätzliche Konstruktionsregeln (in Anlehnung an Abschnitt 8.8. in DIN EN 1992-1-1) existieren nicht.

#### 2.5.6.2 USA

Im US-amerikanischen Regelwerk ACI 318-14 finden sich zunächst keine Einschränkungen im Hinblick auf einen zulässigen Stabdurchmesser der zu verwendenden Hauptbewehrung. Im zugehörigen Anhang A (Appendix A, *Steel Reinforcement Information*) werden Stabdurchmesser bis 2,257 Inch (ca. 57 mm) gelistet.

Zusätzliche Konstruktionsregeln (in Anlehnung an Abschnitt 8.8. in DIN EN 1992-1-1) existieren nicht. Lediglich in Bezug auf Übergreifungsstöße und für die Ausführung von Bügelbewehrung wird der zulässige Stabdurchmesser beschränkt.

#### 2.5.6.3 Kanada

Das kanadische Regelwerk CSA-A23.3 sieht keine Begrenzung des zulässigen Stabdurchmessers vor. Ebenfalls existieren keine zusätzlichen Konstruktionsregeln (in Anlehnung an Abschnitt 8.8. in DIN EN 1992-1-1).

Lediglich das Bündeln von Stäben und die Ausführung von Übergreifungsstößen sind für Stäbe mit einem Stabdurchmesser  $> 35$  M (ca. 35,7 mm) nicht vorzusehen.

Für die Ausführung von Druckgliedern mit einem Stabdurchmesser  $> 35$  M (bis 55 M) sind zusätzliche konstruktive Maßnahmen (z. B. Umschließung der Stäbe mit Bügeln) zu berücksichtigen.

## 2.6 Rissbreitenbegrenzung in der Baupraxis

### 2.6.1 Planerische Entwurfsgrundsätze

Gemäß DBV 2016 stehen dem Tragwerksplaner im Zuge der Planungsphase drei verschiedene Entwurfsgrundsätze zur Beherrschung etwaig am Bauwerk auftretender Risse zur Verfügung.

Der Entwurfsgrundsatz a) zeichnet sich dadurch aus, dass durch besondere planerisch-konstruktive, betontechnologische und ausführungstechnische Maßnahmen sichergestellt werden soll, dass keine Rissbildungen auftreten. Dieser Entwurfsgrundsatz erfordert zwingend ein eng abgestimmtes Mitwirken aller am Planen und Bauen Beteiligten. Gleichwohl stellt es sich so dar, dass die Rissbildung immanent ist und deren ganzheitliche Vermeidung in Betonzugzonen daher nicht sichergestellt werden kann.

Die Entwurfsgrundsätze b) und c) sehen hingegen eine planmäßige (kontrollierte) Rissbildung vor, welche maßgeblich durch rissverteilende Bewehrung gesteuert werden kann. Die Rissbreite ist nach Entwurfsgrundsatz b) hierbei so zu begrenzen, dass die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit gemäß DIN EN 1992-1-1 erfüllt werden. Nach Entwurfsgrundsatz c) sind wenige, breite Risse zulässig, die zur Wahrung der Gebrauchstauglichkeit nach Fertigstellung planmäßig durch geeignete Maßnahmen (z. B. Injektionen, Tränkungen) geschlossen werden.

|          |   |
|----------|---|
| <b>a</b> | <b>Rissvermeidung</b><br>Vermeidung von Rissen durch die Festlegung von besonderen konstruktiven, betontechnischen und ausführungstechnischen Maßnahmen.  |
| <b>b</b> | <b>Rissverteilung</b><br>Festlegung von rechnerischen Rissbreiten, die die Mindestanforderungen des Eurocode 2 erfüllen, oder von geringeren rechnerischen Rissbreiten, die besondere Anforderungen der Gebrauchstauglichkeit auf eine bestimmte Art und Weise erfüllen sollen.   |
| <b>c</b> | <b>Rissbildung mit planmäßiger nachträglicher Behandlung</b><br>Festlegung von tolerierbaren rechnerischen Rissbreiten möglichst in definierten Bereichen (wenige breite Risse), die bei Bedarf mit im Entwurf planmäßig vorgesehenen lokalen Maßnahmen nach ihrem Auftreten dauerhaft geschlossen bzw. abgedichtet werden. |

Abb. 2-16: Entwurfsgrundsätze a), b) und c) nach DBV 2016

Die Wahl eines geeigneten Entwurfsgrundsatzes ist durch den Planer (Objektplaner und Tragwerksplaner) vor dem Hintergrund der Bedarfsplanung (Vorgaben des Bauherrn), und nach planerischen und ausführungstechnischen Festlegungen sowie wirtschaftlichen Aspekten abzuwägen und gegenüber dem Bauherrn entsprechend zu kommunizieren.

### 2.6.2 Maßnahmen zur Rissbreitenbegrenzung

Zur zielorientierten Umsetzung der in Abschnitt 2.6.1 genannten Entwurfsgrundsätze sind nach DBV 2016 entsprechende planerisch-konstruktive, betontechnologische und ausführungstechnische Maßnahmen erforderlich, die nachfolgend auszugsweise dem Grundsatz nach wiedergegeben werden.

#### 2.6.2.1 Planerisch-konstruktive Maßnahmen

Grundsätzlich können im Zuge der Planungsphase folgende Maßnahmen umgesetzt werden:

- Verkleinerung von Bauteilabmessungen (insbesondere Bauteildicke) und Optimierung der Querschnittsform (Vermeidung von Querschnittssprüngen),
- Reduktion von Verformungsbehinderungen durch angrenzende Bauteile oder das betrachtete Bauteil selbst (durch Bewegungsfugen, Schwind- und Temperaturänderungsgassen, Sollrissquerschnitte, möglichst reibungsfreie Auflagerung),
- Reduktion der Verformung (z. B. durch verkleinerte Betonierabschnitte, optimierte Betonierreihenfolgen).

### 2.6.2.2 Betontechnologische Maßnahmen

Hinsichtlich der Betontechnologie sind folgende Maßnahmen möglich und üblich:

- Optimierung der Betonausgangsstoffe in Bezug auf die Bauaufgabe,
- Abstimmung der Hydratationswärmentwicklung auf die Umgebungsbedingungen (z. B. durch Abstimmung von Zementart und Zementmenge, Regulierung der Frischbetontemperatur, Austausch von Zement durch geeignete Betonzusatzstoffe),
- Vermeidung von übermäßigen Überfestigkeiten (z. B. Austausch von Zement durch geeignete Betonzusatzstoffe).

### 2.6.2.3 Ausführungstechnische Maßnahmen

Im Rahmen der Ausführung kommen folgende Maßnahmen in Frage:

- Wahl geeigneter Betonierabschnitte (regelmäßige Form),
- Eine der Umgebung und den zugrunde gelegten Entwurfsgrundsätzen angepasste Nachbehandlung (z. B. Schutz vor schneller Austrocknung),
- geregelter Hydratationswärmeabfluss (z. B. durch zeitweise Auflagen von Wärmedämmung).

### 2.6.3 Abwägung bezüglich der Bemessung für frühen und späten Zwang

Eine wesentliche Randbedingung für die Rissbreitenbegrenzung für zwanginduzierte Einwirkungen stellt die Festlegung des voraussichtlichen Zeitpunktes der Rissentstehung durch den Tragwerksplaner dar (planerisch-konstruktive Festlegung in Anlehnung an voranstehenden Abschnitt 2.6.2). In diesem Zusammenhang ist zwischen „frühem“ und „spätem“ Zwang zu unterscheiden.

Für „frühen Zwang“ sind etwaig auftretende Rissbreiten für einen jungen Beton (d. h. das Bauteilalter beträgt ca. 3 – 5 Tage) mit entsprechend reduzierter Zugfestigkeit  $f_{ct,eff}$ , wie sie zu in der Frühphase der Erhärtungsphase anzutreffen sind, vorherzubestimmen. Dies bedingt, im Vergleich zur Bemessung unter Zugrundelegung der Endfestigkeit  $f_{ctm}$  des Betons (diese wird rechnerisch als die mittlere Betonzugfestigkeit im Regelfall nach 28 Tagen berücksichtigt), einen reduzierten Bewehrungsgehalt. Ein maßgebendes Beispiel für frühen Zwang in der Bemessung stellt in diesem Zusammenhang das Abfließen der Hydratationswärme dar.



Ist mit einer rissinduzierenden Zwangeinwirkung auch zu einem späteren Zeitpunkt zu rechnen, sodass die Betonzugfestigkeit  $f_{ctm}$  dann (annähernd) vollständig entwickelt ist, so ist die Begrenzung der Rissbreite für „späten Zwang“ vorzunehmen. Aus einer Bemessung für späten Zwang (unter Ansatz der Endfestigkeit  $f_{ctm}$ ) resultieren damit entsprechend größere Bewehrungsmengen. Späten Zwang infolge Änderung der Umgebungstemperatur erfährt beispielsweise eine natürlich belüftete Tiefgarage durch Zufuhr kalter Außenluft über einen längeren Zeitraum.

Die Bemessung für frühen Zwang ist vor dem Hintergrund der Einsparpotentiale an Stahlbewehrung grundsätzlich baupraktisch üblich und sinnvoll, wenn später Zwang nicht maßgebend wird. In der Vergangenheit wurde die wirksame Zugfestigkeit des jungen Betons, die zum Zeitpunkt des Auftretens der Risse zu erwarten ist, dabei oftmals pauschal mit  $f_{ct,eff} = 0,5 \cdot f_{ctm}$  abgeschätzt. Dieser Ansatz entstammt gemäß Rundschreiben 242 ursprünglich DIN 1045 1988 und ist in Bezug auf die Festigkeitsentwicklung der heutzutage verwendeten Betone, welche vornehmlich mit schnell erhärtenden Zementen hergestellt werden, veraltet und nicht mehr zutreffend. Im Rundschreiben 242 wird deshalb empfohlen, die Betonzugfestigkeit  $f_{ct,eff}$  üblicher Betone mit einem Bauteilalter zwischen 3 bis 7 Tagen zu 65–85 % der mittleren Zugfestigkeit  $f_{ctm}$  nach 28 Tagen anzunehmen. Somit ist festzustellen, dass die derzeit noch immer gebräuchliche Annahme  $f_{ct,eff} = 0,5 \cdot f_{ctm}$  auf der unsicheren Seite liegt, da sich infolge der größeren Risschnittgröße (bei höherer Zugfestigkeit des Bauteils) auch größere Rissbreiten als die vorausbestimmten einstellen werden.

In der A1 Änderung (Stand Dezember 2015) zu 7.3.2 aus DIN EN 1992-1-1/NA ist der wie folgt lautende Hinweis enthalten: „*Wenn der Abschluss der Rissbildung mit Sicherheit innerhalb der ersten 28 Tage festgelegt werden kann, darf ein niedrigerer Wert mit  $f_{ctm}(t)$  angesetzt werden*“. Wie anhand dieses Textauszugs erkennbar ist, wurde auf die Angabe einer konkreten Bandbreite, im Rahmen derer die Zugfestigkeit des jungen Betons variieren kann, verzichtet. Weiterhin ist dem Textauszug eine eingehende Sensibilisierung des Tragwerksplaners zuzumessen. In DIN EN 1992-1-1/NA (Stand Januar 2011 und April 2013) wurde dagegen die Abminderung der Betonzugfestigkeit noch konkret zu  $f_{ct,eff} = 0,5 f_{ctm}$  (28 d) angegeben.

Die Festlegung einer reduzierten Betonzugfestigkeit bei der Bemessung für frühen Zwang stellt nur einem Teil des Verantwortungsbereiches des Tragwerkplaners dar. Darüber hinaus obliegt es ihm gemäß DBV 2016 und Rundschreiben 242 außerdem, durch konstruktive Maßnahmen entsprechende Randbedingungen und Voraussetzungen zu schaffen (z. B. zwangarme Lagerungen), sodass eine zusätzliche rissauslösende Zwangeinwirkung zu einem späteren Zeitpunkt (z. B. Änderung der Umgebungstemperatur) nicht bemessungsrelevant wird. Bestehen diesbezüglich Zweifel, sollte gemäß DBV 2016 stets für späten Zwang bemessen werden.

Sofern der Tragwerksplaner in der Bauteilbemessung frühen Zwang zugrunde legt, ist es unbedingt erforderlich, dass diese Annahme auch ausreichend erkennbar in den Tragwerkausführungsunterlagen (Ausschreibung, Ausführungspläne) für alle am Bauen und Planen Beteiligten dokumentiert wird. Weiterhin hat dieser dann im Rahmen seiner Hinweis- und Aufklärungspflicht etwaige aus seiner Bemessung für frühen Zwang resultierende Risiken gegenüber dem Bauherrn zu kommunizieren (s. auch Rundschreiben 242).

### 2.6.4 Rissbreitenmessung

Sofern die Gebrauchstauglichkeit und das äußere Erscheinungsbild eines Stahlbetonbauteils nicht signifikant gestört sind und sich die in der Berechnung vorherbestimmten Rissbreiten vor Ort (am betrachteten Bauteil) näherungsweise eingestellt haben, besteht in der Regel keine Veranlassung, eine systematische Rissaufnahme am Bauwerk durchzuführen. Sofern in begründeten Fällen (z. B. im Rahmen von Beweisicherungsverfahren, Bauwerksuntersuchungen, Bauwerksinstandsetzungen) dennoch die Erfassung vorliegender Rissbreiten, die Messung der Rissbreitenänderung bestehender Risse infolge veränderlicher Randbedingungen (z. B. veränderliche Umgebungsbedingungen) oder das Monitoring bisher noch ungerissener Betonflächen vorgenommen werden soll, stehen verschiedenste Messverfahren zur Verfügung, die sich hinsichtlich der Messgenauigkeit und der praxisingerechten Handhabbarkeit auf der Baustelle signifikant unterscheiden.

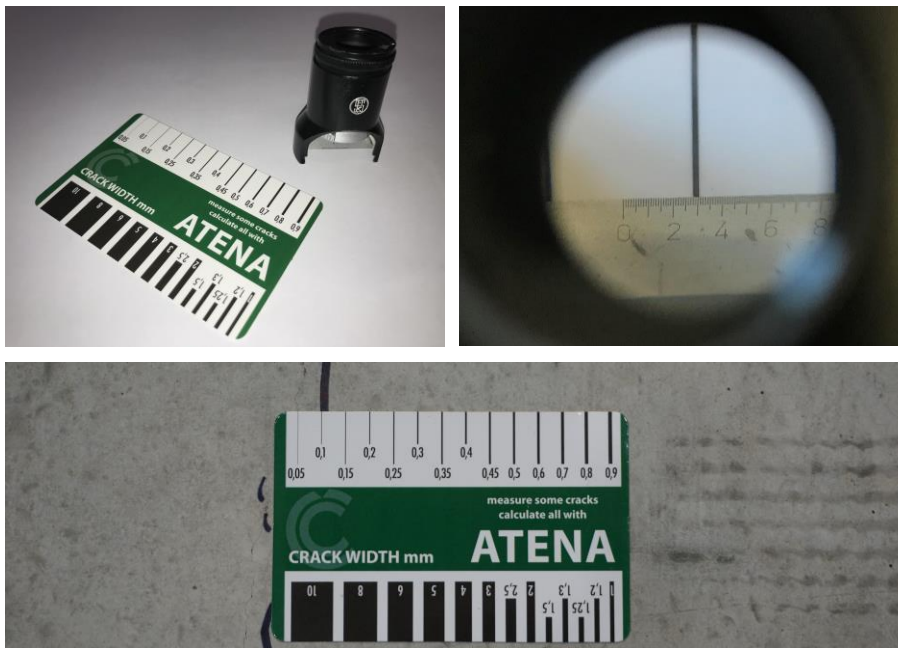


Abb. 2-17: Vergleich von Rissbreitenvergleichsmaßstab und Risslupe (links); Blick durch Risslupe (rechts), Rissbreitenmessung mit Vergleichsmaßstab (unten)

In Bezug auf die grundsätzliche Bewertung von Rissbreiten ist an dieser Stelle nochmals anzumerken, dass eine direkte Gegenüberstellung der rechnerischen Rissbreite nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA mit auf der Bauteiloberfläche gemessenen Rissbreiten schwerfällt (s. Abschnitt 2.7.1).

Die Breite vorhandener Risse kann mit Hilfe einfacher optischer Messverfahren (z. B. Rissmesslupe, Rissbreitenvergleichsmaßstab, s. Abb. 2-17) gemessen werden. Zur Erfassung etwaiger Rissweitenänderungen können beispielsweise Wegmessungen (Setzdehnungsmessungen) herangezogen werden.

Das Monitoring einer ausgedehnten (und zunächst rissfreien) Stahlbetonfläche zur Detektion entstehender Risse kann beispielsweise mittels Bildanalyseverfahren umgesetzt werden. In diesem Zusammenhang befinden sich derzeit auch weitere digitale Methoden zur Erfassung und Dokumentation von Rissen mittels Bildanalyseverfahren in der Erprobung. Ein Anwendungsfall stellen hier ausgedehnte Stahlbetonoberflächen dar, wie sie beispielsweise in Tiefgaragen anzutreffen sind.

Das Messen der Rissbreite selbst ist normativ nicht geregelt. Ein Hilfsmittel stellt in diesem Zusammenhang aber das DBV-Merkblatt zur Begrenzung der Rissbildung im Stahlbeton- und Spannbetonbau (DBV 2016) dar, welchem diesbezüglich konkrete Vorgehensweisen entnommen werden können. Praxisüblich wird die Rissbreite mit einem Rissbreitenvergleichsmaßstab oder einer Risslupe (s. Abb. 2-17) händisch auf der Bauteiloberfläche gemessen.

Die Messung der Rissbreite erfolgt in der Regel senkrecht zu den Rissufer (und in diesem Zusammenhang meistens ungeachtet der rissauslösenden Einwirkungen und der Dehnungsrichtung der Bewehrung, s. hierzu Abschnitt auch 2.7.6).

Die Messgenauigkeit der in Abb. 2-17 abgebildeten Messverfahren ist erfahrungsgemäß auf ca. 0,05 mm beschränkt (vgl. Eckfeldt 2009). Einen nicht unwesentlichen Einfluss auf das Messergebnis stellt in diesem Zusammenhang die Ablesegenauigkeit (subjektive Wahrnehmung bei Auswahl eines geeigneten Vergleichsmaßstabes für die Rissbreite) dar. Je nach vorliegenden äußerlichen Randbedingungen (Lichtverhältnisse, Feuchtezustand des Bauteils, eventuelle Abwitterungen etc.) sind jedoch auch größere Messungenauigkeiten möglich. In Eckfeldt 2009 werden in diesem Zusammenhang die Größe des Ablesefehlers bei Risslupenmessungen und damit auch Einschätzungen zur Qualität der Oberflächenrissmessung insgesamt thematisiert. Hinzu kommt, dass Risse in makroskopisch heterogenen Werkstoffen wie Beton keine konstante Breite aufweisen, wie sie sich bei mikroskopisch homogenen Werkstoffen (z. B. Stahl) einstellen.

In DBV 2016 werden konkrete Anwendungskriterien für die Rissbreitenmessung mit optischen Verfahren formuliert. Demnach ist es erforderlich, dass die Rissufer an den entsprechenden Messstellen scharf begrenzt und nicht beschädigt (z. B. Rissflankenbruch infolge Überfahrens) sind.

Treffen diese Randbedingungen für das betrachtete Bauteil örtlich nicht zu, ist eine Rissbreitenmessung auf der Bauteiloberfläche nicht möglich. Stattdessen kann in diesem Fall in Erwägung gezogen werden, dass die Untersuchungen an am Bauteil entnommenen Bohrkernen (nach vorangegangener Rissinjektion mit formstabilem Verpressgut) vorgenommen werden.

Für das in DBV 2016 enthaltene Verfahren (für ungeschädigte Rissufer) ist vorgesehen, dass nicht nur ein Messwert je Riss, sondern ein Mittelwert aus mehreren Messungen auszuwerten ist, um einen möglicherweise ungleichmäßigen Rissbreitenverlauf entlang eines Risses näherungsweise zu erfassen. Für die Auswertung der am Bauwerk gemessenen Rissbreite wird ein Attributverfahren (d. h. die Anzahl derjenigen Ergebnisse, welche außerhalb definierter Grenzwerte liegen, wird der in diesem Zusammenhang gerade noch tolerierbaren Anzahl gegenübergestellt) empfohlen, wonach dem Rechenwert der Rissbreite nach DIN EN 1992-1-1 und

DIN EN 1992-1-1/NA eine sog. maximale Überschreitungsmenge zugeordnet wird. Unter Überschreitungsmenge versteht man in diesem Zusammenhang diejenige Menge der Messwerte einer Stichprobe, welche den rechnerischen Wert  $w_k$  der Rissbreite übersteigen. Stellt es sich so dar, dass die Überschreitungsmenge der betrachteten Stichprobe größer ist als der entsprechende maximale Grenzwert, dann ist das Bauteil hinsichtlich der vor Ort festgestellten Rissbreite abzulehnen. An dieser Stelle verweist DBV 2016 auf den Umstand, dass eine repräsentative und ausreichend große Stichprobe vorliegen muss, um das Verfahren zielsicher anwenden zu können. Dies ist fallweise zu überprüfen. Andernfalls werden Bauteile ggf. unbegründet abgelehnt.

Im Folgenden sind die gemäß DBV 2016 aufgeführten Überschreitungsmengen für die rechnerischen Rissbreiten  $w_k$  nach DIN EN 1992-1-1/NA dargestellt:

- $w_k = 0,4 \text{ mm}$  max. 5 % Überschreitungsmenge,
- $w_k = 0,3 \text{ mm}$  max. 10 % Überschreitungsmenge,
- $w_k = 0,2 \text{ mm}$  max. 20 % Überschreitungsmenge.

Unter Zugrundelegung der obigen Zuordnung heißt das, dass bei einer berechneten Rissbreite von 0,4 mm 5 % der auf der Bauteiloberfläche gemessenen Rissbreiten größer sein dürfen, ohne dass dies einen Mangel darstellt (übrige Klassen analog).

Mathematisch gesehen kann die Zuordnung einer Überschreitungsmenge auch mit der Zuordnung eines Fraktilwerts gleichgesetzt werden (s. hierzu auch Abb. 2-20).

### 2.7 Diskussionsbedarf und kritische Bewertung

Trotz weitreichender Forschungsaktivitäten und umfangreicher Praxiserfahrungen im Umgang mit der Rissbreitenbegrenzung im Stahlbetonbau besteht dennoch weiterhin konkreter Diskussionsbedarf. Dieser wird nachfolgend im gebotenen Umfang zusammengefasst und kritisch beleuchtet. Ausgehend hiervon werden Festlegungen für die im weiteren Verlauf dieser Arbeit vorgestellte Auswertung der Versuchsergebnisse getroffen.

#### 2.7.1 Definition der Rissbreite

Die Breite am Bauteil auftretender Risse kann praxisgerecht ausschließlich direkt auf der Oberfläche gemessen werden und stellt sich infolge der Rissaufweitung dort in der Regel größer dar als die im Zuge der Tragwerksplanung vorausbestimmte (rechnerische) Rissbreite im Wirkungsbereich der Bewehrung (vgl. auch Abschnitt 2.3.2.4). Dieser Umstand birgt je nach Bauteil und dessen vorgesehenem Verwendungszweck ein erhebliches Konfliktpotential zwischen den am Planen und Bauen Beteiligten und dem Bauherrn, weswegen nicht selten die kontrovers diskutierte Frage aufkommt, wie die (rechnerische) Rissbreite  $w_k$  nach DIN EN 1992-1-1 in Verbindung mit DIN EN 1992-1-1/NA definiert ist und wie ein Vergleich zwischen dem Rechenwert der Rissbreite und dem Messwert auf der Bauteiloberfläche gelingen kann.

Die derzeit bauaufsichtlich eingeführte Fassung des Eurocodes 2 und des zugehörigen nationalen Anhangs für Deutschland enthalten diesbezüglich keine Definition. Dies

stellt sich so auch in Fingerloos et al. 2016 dar. Dort wird in diesem Zusammenhang aber folgender Hinweis formuliert: „Die in 7.3.3 und 7.3.4 angegebenen Verfahren [nach DIN EN 1992-1-1/NA] gestatten die Begrenzung der Rissbreite im Bereich nahe der im Verbund liegenden Bewehrung (d. h. innerhalb des Wirkungsbereichs der Bewehrung). Außerhalb dieses Bereichs können Risse mit größerer Breite auftreten.“

DAfStb 600 beinhaltet folgenden grundsätzlichen Hinweis zum Rissverlauf: „Die Breite eines Risses ist nicht über seine gesamte Tiefe konstant. Die in diesem Abschnitt (Anm.: Abschnitt 7.3 - Begrenzung der Rissbreite) ermittelten Werte stellen die Breite eines Risses in der Nähe der Bewehrung dar (in der Regel Mittelwert der Rissbreite über die Risstiefe im Wirkungsbereich der Bewehrung). Bei dünnen, biegebeanspruchten Bauteilen und maximaler Ausnutzung des Rotationsvermögens weisen die Risse eine eher keilförmige Gestalt mit größeren Rissbreiten an der Oberfläche auf. Gleiches gilt auch für Risse infolge von Eigenspannungen an der Oberfläche eines Bauwerks, besonders für weniger fein verteilte Einzelrisse.“

In den Erläuterungen zur Rissbreitenbegrenzung nach DIN 1045-1 (Fassung 2001) DAfStb 525 2003 wird die Rissbreite, welche entlang der Risstiefe erkennbar nicht konstant verläuft, gemäß nachfolgender Abb. 2-18 beschrieben. Der Rechenwert  $w_k$  nach DIN 1045-1 (Fassung 2001 und folgende) ist demnach als eine über den Wirkungsbereich der Bewehrung gemittelte Rissbreite zu verstehen und stellt damit ganz offensichtlich nicht die Rissbreite an der Bauteiloberfläche dar (analog zu DAfStb 600).

Auch in DBV 2016 wird die rechnerische Rissbreite  $w_k$  „als mittlere Breite im Wirkungsbereich der rissverteilenden Bewehrung“ definiert (s. auch Abb. 2-18).

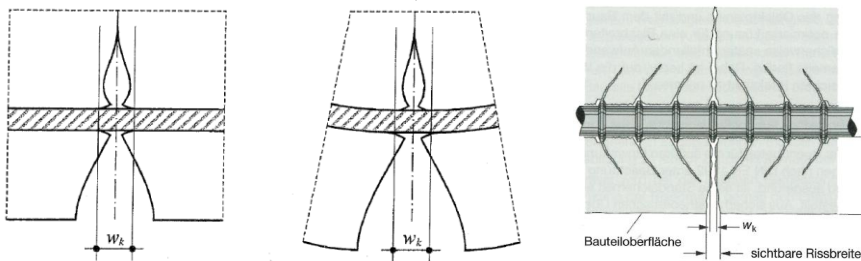


Abb. 2-18: Definition der rechnerischen Rissbreite  $w_k$  nach DAfStb 525 2003 (links und Mitte) und DBV 2016 (rechts)

Anhand der voranstehenden Abbildungen zum Rissverlauf ist zu erkennen, dass die Rissbreiten entlang der Randzone nicht konstant verlaufen, sondern mit zunehmendem Abstand von der Bewehrung eine keilförmige Aufweitung aufweisen. In Verbindung mit großen Betondeckungen kann dies dazu führen, dass die an der Oberfläche sichtbaren Rissbreiten deutlich größer sind als die Rissbreiten unmittelbar auf Höhe der Bewehrung und auch größer als der Rechenwert (über den Wirkungsbereich der Bewehrung gemittelte Rissbreite). Durch Bauteilkrümmung infolge Biegung kann dies weiter verstärkt werden.

In Eckfeldt 2005 (Bezug auf DIN 1045-1 2001) wird die eingangs formulierte Frage sinngemäß wie folgt gestellt: „Wo im Querschnitt ist die Rissbreite  $w_{cal}$  tatsächlich zu

finden, die berechnet wird?“. Gemäß Eckfeldt 2005 besteht allgemein die Auffassung, dass der (effektive) Betonquerschnitt eine konstante Dehnungsverteilung aufweist. Tatsächlich stellt sich nach Eckfeldt 2005 über die Höhe der Betondeckung eine veränderliche Betondehnung ein. Demnach ist die Rissbreite  $w_{cal}$  „aus einer Dehnungsberechnung mit einer auf eine bestimmte Querschnittshöhe bezogenen Betondehnungsfunktion zu erwarten“. Diese Querschnittshöhe entspricht näherungsweise in etwa der halben Betondeckung.

Zusammenfassend stellt der Rechenwert der Rissbreite  $w_k$  nach DIN EN 1992-1-1/NA offenbar einen charakteristischen Wert (oberer Quantilwert) dar, der nachweislich also nicht die Rissbreite an der Bauteiloberfläche, sondern einem Mittelwert über den Wirkungsbereich der Bewehrung („in der Nähe der Bewehrung“) entspricht. Gemäß DBV 2019 stimmt der Rechenwert der Rissbreite auch näherungsweise mit der Rissbreite auf Höhe der Stahlbewehrung überein. In Zilch et al. 2010 wird der Rechenwert der Rissbreite deshalb auch als „ein oberer Quantilwert der Rissbreite im Bereich der Bewehrung“ definiert.

Größere Betondeckungen oder Bauteilkrümmungen infolge Biegung können die an der Bauteiloberfläche sichtbare Rissbreite weiter vergrößern und damit zu einer Überschreitung der rechnerisch vorausbestimmten Rissbreite führen. Gemäß DBV 2019 ist diesbezüglich zu erwarten, dass einzelne Risse bis zu 0,1 - 0,2 mm größere Breiten aufweisen als die nach DIN EN 1992-1-1/NA vorherbestimmten Rissbreiten.

### 2.7.2 Andere Auffassungen zur Definition der Rissbreite

Die kontroverse Diskussion um die Definition der Rissbreite und den Vergleich von Rechen- und Messwert findet auch in Meichsner et al. 2018 Berücksichtigung. Dort wird eine, die konventionelle Rissbreitenvorstellung erweiternde Betrachtungsweise wie folgt beschrieben: „Nach allgemeiner Auffassung wird ein Riss von zwei Rissufern und einem offenen Spalt gebildet. Diese Vorstellung ist auch Grundlage der Rissbreitenberechnung nach DIN EN 1992-1-1. Tatsächlich ist die Rissgeometrie jedoch differenzierter zu sehen“. In diesem Zusammenhang wird in Meichsner et al. 2018 eine diffuse Übergangszone zwischen dem ungestörten Beton und dem Risspalt thematisiert, aus deren Berücksichtigung größere (messbare) Rissbreiten resultieren (Messung der Rissuferverschiebung) als durch alleinige Betrachtung des Rissspaltes (Messung des Abstandes der Rissufer). Diese Übergangszone besteht nach Meichsner et al. 2018 aus Bereichen der Rissprozesszone, welche Gefügestörungen und Mikrorissbildungen aufweist. Die Übergangszone kann mit optischen Verfahren (z. B. mittels Risslupe) messtechnisch nicht erfasst werden. Mit Hilfe einer weg-basierten Rissbreitenmessung (z. B. mit Wegaufnehmern) lassen sich die plastischen Längenänderungen jedoch zweifelsfrei nachweisen. Gemäß Meichsner et al. 2018 ist der Rissbreitenmesswert je nach Anwendungsfall wie folgt anzusetzen. So soll beispielsweise für die Beurteilung der Korrosionsgefahr der Stahlbewehrung der Abstand der Rissufer („Rissbreite“) angesetzt werden. Bei Bewertung der Rissüberbrückungsfähigkeit eines Oberflächenschutzsystems ist dagegen die Rissuferverschiebung zugrunde zu legen, wodurch aber für die Praxis kaum überwindbare Hürden in Bezug auf die Rissbreitenmessung selbst generiert werden (das Messsystem müsste bereits vor der Rissentstehung installiert werden). In

Meichsner et al. 2018 wird der Rechenwert der Rissbreite abschließend als Rissufer-verschiebung gedeutet. Ein Vergleich des Rechenwertes mit optisch ermittelten Messwerten wird vor diesem Hintergrund in Meichsner et al. 2018 nicht empfohlen.

In prEN1992-1-1 (unveröffentlichter Entwurf zur Neufassung des Eurocode 2, vgl. Abschnitt 2.3.3.2) heißt es in Abschnitt 9.2.4: „*The calculated crack width given in this section is to be understood as a nominal value only, to be compared with  $w_{lim,cal}$  and may differ from the values actually measured on site.*“ Demnach wird der Rechenwert der Rissbreite auch hier als Anhaltswert verstanden und am Bauteil selbst können somit größere Rissbreiten als die berechneten auftreten. Mit Gleichung 9.12 wird eine überarbeitete Berechnungsformel zur Bestimmung der Rissbreite  $w_{k,cal}$  vorgestellt, welche – anders als in DIN EN 1992-1-1 – explizit als Rissbreite an der Bauteiloberfläche aufzufassen ist.

Mit Blick auf die Historie wurde die voranstehende Einordnung bereits in ähnlicher Weise in DBV 1996 (Bezug zur DIN 1045 1988) vorgenommen: „*Bei der Definition der Rissbreite und den rechnerischen Maßnahmen zu ihrer Beschränkung geht man in der Regel von der Bauteiloberfläche aus. Zum Bauteilinneren hin nimmt sie, abgesehen von Trennrissen mit praktisch konstanter Breite, stark ab, so dass sie an der Bewehrung, ausreichende Betondeckung vorausgesetzt, wesentlich kleiner als an der Betonoberfläche ist.*“

Auch in MC 2010 (vgl. Abschnitt 2.3.3.1) wird mit den dort angegebenen Bemessungsverfahren der Rechenwert der Rissbreite an der Bauteiloberfläche bestimmt. Ebenso wurde diese Modellvorstellung der Oberflächenrissbreite in Leonhardt 1978 („*Messungen und rechnerische Nachweise werden auf die Rissbreite an der Betonoberfläche nahe dem Bewehrungsstab bezogen*“) beschrieben.

In Eckfeldt 2005 heißt es diesbezüglich: „*Die meisten standardisierten Modelle beziehen sich zwangsläufig durch empirische Anpassungen auf die Betondehnung  $\epsilon_c(x)$  an der Bauteiloberfläche und verfolgen deshalb die Dehnungsdifferenz ( $\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$ ) auf dem Niveau der Oberfläche*“. Dieser Vorstellung ist nach Eckfeldt 2005 auch das Rechenmodell nach MC 1990 (DIN 1045-1) zuzuordnen.

Die in Abschnitt 2.3.3 vorgestellten Ingenieurmodelle zur Berechnung der Rissbreite nach Empelmann et al. 2015b und Tran 2018 weisen die rechnerische Rissbreite als Rissbreite auf Höhe der Stahlbewehrung aus. Dies ist nach Tran 2018 damit begründbar, dass Berechnungsmodelle zur Bestimmung der Rissbreite am (einfachen) zentrischen Zugstab hergeleitet werden und in diesem Zusammenhang die Dehnungen des Betons und der Stahlbewehrung sowie deren mittlere Differenz an der Stahloberfläche berechnet werden. Demzufolge muss sich die auf Grundlage dessen berechnete Rissbreite auch auf Höhe der Bewehrung einstellen. Diesbezüglich abweichende Auffassungen zur Definition der rechnerischen Rissbreite (z. B. in den derzeit gültigen Regelwerken) sind nach Tran 2018 auf Vereinfachungen zur praktischen Anwendung zurückzuführen und spiegeln dabei nicht die technisch-mechanischen Gegebenheiten wider.

Insgesamt kann unter Berücksichtigung dieses Abschnitts festgehalten werden, dass die Definition der rechnerischen Rissbreite (also diejenige Stelle, an der die Rissbreite

rechnerisch vorhergesagt wird) modellabhängig ist und nicht allgemeingültig definiert werden kann.

### 2.7.3 Nachweiskonzept zur Rissbreitenbegrenzung

Die Begrenzung der Rissbreite dient wesentlich der Sicherstellung der Dauerhaftigkeit (wobei in Anlehnung an Fingerloos et al. 2016 hier anzumerken ist, dass einer ausreichend dicken und dichten Betonüberdeckung im Hinblick auf den Korrosionsschutz der eingelegten Bewehrung i. d. R. ein größerer Beitrag zuzumessen ist) und der Wahrung eines unbeeinträchtigten Erscheinungsbildes.

Im Rahmen der Bemessung nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA ist nachzuweisen, dass der Rechenwert der Rissbreite  $w_k$  (unter quasi-ständiger Einwirkungskombination) einen von den äußeren Umgebungs- und Nutzungsbedingungen (Expositionsklassen) sowie der Art des Tragwerks (schlaff oder vorgespannt bewehrtes Bauteil) abhängigen Grenzwert  $w_{max}$  der Rissbreite nicht überschreitet. Kann dieser Nachweis (rechnerisch) erbracht werden, ist den Anforderungen an die Dauerhaftigkeit und an das Erscheinungsbild Genüge getan (vgl. Fingerloos et al. 2016).

Der in Rede stehende Grenzwert  $w_{max}$  ist gemäß DIN EN 1992-1-1/NA wie folgt festgelegt und kann in diesem Zusammenhang nach Fingerloos et al. 2016 als eine „Mindestanforderung“ verstanden werden.

Tabelle 7.1DE — Rechenwerte für  $w_{max}$  (in mm)

| Expositionsklasse                          | Stahlbeton und Vorspannung ohne Verbund | Vorspannung mit nachträglichem Verbund | Vorspannung mit sofortigem Verbund |        |
|--|---|--|------------------------------------|--------|
|  | mit Einwirkungskombination              |  |                                    |        |
|  | quasi-ständig                           | häufig                                 | häufig                             | selten |
| X0, XC1                                    | 0,4 <sup>a</sup>                        | 0,2                                    | 0,2                                | —      |
| XC2 – XC4                                  | 0,3                                     | 0,2 <sup>b, c</sup>                    | 0,2 <sup>b</sup>                   |        |
| XS1 – XS3<br>XD1, XD2,<br>XD3 <sup>d</sup> |   |  | Dekompression                      | 0,2    |

<sup>a</sup> Bei den Expositionsklassen X0 und XC1 hat die Rissbreite keinen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit und dieser Grenzwert wird i. Allg. zur Wahrung eines akzeptablen Erscheinungsbildes gesetzt. Fehlen entsprechende Anforderungen an das Erscheinungsbild, darf dieser Grenzwert erhöht werden.

<sup>b</sup> Zusätzlich ist der Nachweis der Dekompression unter der quasi-ständigen Einwirkungskombination zu führen.

<sup>c</sup> Wenn der Korrosionsschutz anderweitig sichergestellt wird (Hinweise hierzu in den Zulassungen der Spannfahrten), darf der Dekompressionsnachweis entfallen.

<sup>d</sup> Beachte 7.3.1 (7).

Abb. 2-19: Grenzwert  $w_{max}$  gemäß DIN EN 1992-1-1/NA

In DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA wird nicht dargelegt, an welcher Querschnittsstelle der Grenzwert  $w_{max}$  definiert ist. Nach Auffassung des Verfassers stellt es sich so dar, dass ein Vergleich von  $w_k$  und  $w_{max}$  impliziert, dass jeweils eine „identische Betrachtungsbasis“ vorausgesetzt wird und die Definition von  $w_k$  (s. Abschnitt 2.7.1) auf  $w_{max}$  zu übertragen ist.



Der Rechenwert der Rissbreite  $w_k$  stellt einen charakteristischen Wert (oberer Quantilwert) dar. Etwaige Über- aber auch Unterschreitungen der rechnerischen Rissbreite, welche definitionsgemäß „in der Nähe der Bewehrung“ auftritt, sind damit unweigerlich zu erwarten. Diese Überschreitungen werden gemäß Abschnitt 2.7.1 jedoch noch zusätzlich dadurch forciert, dass sich der Rechenwert der Rissbreite im Wirkungsbereich der Bewehrung einstellt (und nicht an der Bauteiloberfläche) und dass sich Rissbildungen zur Bauteiloberfläche hin zusätzlich aufweiten. Damit ist das Auftreten einzelner Risse größerer Breite (als berechnet) auf der Bauteiloberfläche wahrscheinlich.

Es stellt sich an dieser Stelle daher unweigerlich die Frage, welches „Zuverlässigkeitskonzept“ der Rissbreitenberechnung – als ein Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit – zuzumessen ist und welche Vorhersagegenauigkeiten dem Bemessungsmodell zuzuweisen sind. In DBV 2019 heißt es diesbezüglich: *„In diesem Zusammenhang sind weniger die Charakteristika einer „klassischen Sicherheitsbetrachtung“ zugrunde zu legen, sondern eher eine Beurteilung im Hinblick auf die „Vorhersagegenauigkeit des Modells“ (s. hierzu Abschnitt 2.7.4).*

### 2.7.4 Aussagegenauigkeit des nationalen Bemessungsmodells

Das nationale Bemessungsmodell nach DIN EN 1992-1-1 in Verbindung mit DIN EN 1992-1-1/NA (identisch zu DIN 1045-1 2008) zur rechnerischen Begrenzung der Rissbreite wurde ausführlich im Abschnitt 2.4.2 beschrieben. Nachfolgend wird die (statistische) Aussagegenauigkeit dieses Bemessungsmodells vertieft betrachtet, mit dem Ziel, dem Rechenwert  $w_k$  einen konkreten Fraktilwert („Vorhersagegenauigkeit“) zumessen zu können.

In Fingerloos et al. 2016 wird zur Aussagegenauigkeit des Rechenwertes der Rissbreite  $w_k$  Folgendes (wortgleich aus DIN 1045-1 2008 übernommen) ausgeführt: *„Die im Folgenden angegebenen Verfahren erlauben keine exakte Vorhersage und Begrenzung der Rissbreite. Die Rechenwerte der Rissbreite sind daher nur als Anhaltswerte zu sehen, deren gelegentliche geringfügige Überschreitung im Bauwerk nicht ausgeschlossen werden kann. Dies ist jedoch bei Beachtung der Regeln dieses Abschnitts (Anm.: Abschnitt 7.3 - Begrenzung der Rissbreite) im Allgemeinen unbedenklich.* In DIN EN 1992-1-1 selbst sind diesbezüglich keine Hinweise enthalten.

In DBV 2016 heißt es, dass unter Zugrundelegung der zur Verfügung stehenden Rechenverfahren keine präzise Vorherbestimmung der sich am Bauwerk einstellenden Rissbreiten möglich ist, sondern dass die Rechenergebnisse vielmehr als Anhaltswerte zu deuten sind. Dies ist gemäß DBV 2016 insbesondere mit den getroffenen Vereinfachungen des Rechenmodells und den unvermeidlichen material- und systembedingten Streuungen zu begründen. Vor diesem Hintergrund können somit auch stets Risse größerer Breite (als im Zuge der Bemessung berechnet) auftreten. Dabei sinkt die Aussagegenauigkeit des Rechenmodells mit abnehmender Rissbreite, d. h. je kleiner die rechnerisch zu begrenzende Rissbreite ist, desto wahrscheinlicher treten Risse größerer Rissbreite auf.

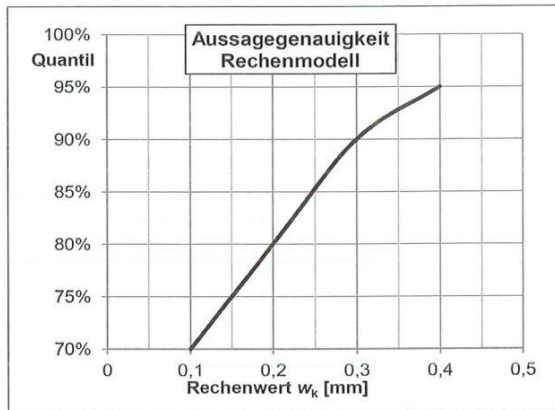


Abb. 2-20: Aussagegenauigkeit des Bemessungsmodells nach DIN EN 1992-1-1/NA gemäß DBV 2016

Auf Grundlage umfangreicher praktischer Erfahrungen in der Anwendung des Bemessungsmodells und der Gegenüberstellung von Rissbreitenmessungen mit Berechnungsmodellen im Zuge wissenschaftlicher Untersuchungen (z. B. Empelmann et al. 2015a, Auswertung der experimentellen Rissbreite  $w_{exp}$  als 95 %-Fraktil) ist in DBV 2016 ein erfahrungsbasierter Zusammenhang zwischen dem Rechenwert  $w_k$  und einem zugehörigen Quantilwert beschrieben (vgl. voranstehende Abb. 2-20).

Die ermittelten Werte  $w_k$  (Rechenwerte der Rissbreiten) wurden als Fraktilwerte hergeleitet. Insgesamt ist der Rechenwert  $w_k$  je nach Rissbreite deshalb als ein 70–95 %-Fraktilwert für die zu erwartende Rissbreite zu verstehen. Dies bedeutet, dass einzelne Risse größere (Ist-)Werte aufweisen dürfen, ohne dass dies zu beanstanden ist. Dies ist umso wahrscheinlicher, je kleiner die berechnete Rissbreite ist.

Inwieweit die in obiger Abb. 2-20 dargestellte Einschätzung von der statistischen Auswertung experimentell ermittelter Rissbreiten selbst abhängig ist (z. B. im Hinblick auf eine Auswertung als 75 %-Fraktil statt als 95 %-Fraktil), wird in DBV 2016 nicht diskutiert.

Unter Berücksichtigung des Vorgenannten ist jedoch grundsätzlich festzustellen, dass das Ergebnis einer Rissbreitenberechnung nach DIN EN 1992-1-1 in Verbindung mit DIN EN 1992-1-1/NA nur Anhaltswerte liefern kann. Aufgrund der unvermeidlichen Streuung aller Materialkennwerte des inhomogenen Werkstoffs Beton ist eine exakte Vorherberechnung der Rissbreiten mechanisch nicht möglich. In diesem Zusammenhang heißt es in Eckfeldt 2009 (mit Bezug zu DIN 1045-1 2008): „*Ein oberer 5 %-Fraktilwert [des Rechenwertes der Rissbreite  $w_k$  nach DIN 1045-1 2008] ist praktisch nicht realisierbar und unwirtschaftlich.*“

Gemäß DBV 2019 ist das in DIN EN 1992-1-1/NA EC2/NA enthaltene Bemessungsmodell weiterhin zur Abschätzung von Rissbreiten  $w_k < 0,10$  mm zu unpräzise und ist vor diesem Hintergrund für (sehr) kleine Rissbreiten als ungeeignet einzustufen.

Diesbezüglich werden in Eckfeldt 2009 Ansätze zur Verbesserung der Vorhersagenqualität solch kleiner Rissbreiten thematisiert, wie sie beispielsweise im Rahmen der Bemessung und Konstruktion von WU-Bauwerken auftreten.

### 2.7.5 Geeignete Fraktilwerte im Hinblick auf die Versuchsauswertung

Im Rahmen der Versuchsauswertung werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit zwecks Gegenüberstellung mit Rechenwerten experimentell gewonnene Einzelwerte der Rissbreite und des Rissabstandes (Stichproben) statistisch ausgewertet. Grundsätzlich ist es ebenfalls denkbar, Mittelwerte oder Extremalwerte direkt mit einem (charakteristischen) Rechenwert zu vergleichen und entsprechende zulässige Überschreitungsmengen (s. Abschnitt 2.7.3) zu definieren. Jedoch kann die Zuordnung einer Überschreitungsmenge mathematisch auch an dieser Stelle mit der Zuordnung eines Fraktilwerts gleichgesetzt werden.

Insgesamt stellt es sich damit so dar, dass im Zuge einer statistischen Auswertung vorab geeignete Fraktilwerte für die genannten Untersuchungsgrößen festzulegen sind.

Die Auffassungen über die Wahl des Fraktilwerts und die damit verbundene erwartbare Über- bzw. Unterschreitung der Prüfgrößen „Rissbreite“ und „Rissabstand“ sind im Hinblick auf die Auswertung von Rissbreitenversuchen durchaus kontrovers. In der Literatur lassen sich diesbezüglich u. a. Auswertungen als 75 %-Fraktil (z. B. in Schäfer 2016 mit Gegenüberstellung von Versuchswerten mit Rechenwerten nach DIN EN 1992-1-1/NA) und als 95 %-Fraktil (z. B. Rehm et al. 1968, Martin et al. 1980, Empelmann et al. 2018a, DBV 2019 mit Gegenüberstellung von Versuchswerten mit Rechenwerten nach DIN EN 1992-1-1, DIN EN 1992-1-1/NA und MC 2010) finden. In Schoening 2018 werden in Abhängigkeit des im Zuge der Versuchsnachrechnung verwendeten Bemessungsmodells unterschiedliche Fraktilwerte zugrunde gelegt (75 %-Fraktil bei Gegenüberstellung von Versuchswerten mit Rechenwerten nach MC 2010 und DIN EN 1992-1-1/NA und 95 %-Fraktil bei Gegenüberstellung von Versuchswerten mit Rechenwerten nach DIN EN 1992-1-1).

Eine allgemein anerkannte Auffassung über die Wahl eines geeigneten Fraktilwertes, ggf. auch unter Berücksichtigung des jeweils herangezogenen Bemessungsmodells im Zuge der Nachrechnung, liegt nicht vor.

Die Annäherung an einen geeigneten, einer statistischen Auswertung begründbar zuordenbaren Fraktilwert kann mit der Fragestellung gelingen, welche stochastischen Ansätze dem Bemessungsmodell selbst im Hinblick auf die zu berechnende Rissbreite zugrunde liegen. In diesem Zusammenhang wird – abgrenzend zum voranstehenden Abschnitt 2.7.4, im Rahmen dessen die Aussagegenauigkeit des nationalen Bemessungsansatzes nach DIN EN 1992-1-1/NA auf Grundlage von Erfahrungswerten beleuchtet wurde – der Versuch unternommen, ausgehend von dem Bemessungsmodell und den darin implementierten mechanischen sowie teilempirischen Ansätzen selbst auf einen Fraktilwert der Rissbreite zu schließen.

Hinsichtlich der Herleitung des zugrundeliegenden Bemessungsmodells unterscheiden sich die Ansätze nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA wesentlich. So basiert die Rissabstandsformel nach DIN EN 1992-1-1/NA (s. zugehörige Gl. 2-34) auf

dem Grundmaß der Verankerungslänge eines beidseitig des Rissufers verankerten Bewehrungsstabes. Die charakteristische Verbundspannung ist in diesem Zusammenhang gemäß MC 1990 zu  $\tau_{sm} = 1,8 \cdot f_{ct}$  definiert, wonach sich die so zu berechnende Rissbreite näherungsweise als 75 %-Fraktile („ $k_1 = 1,80$  leading to 75 % fractile of crack width for ribbed bars“, s. MC 1990) darstellt. Im Abschnitt 2.7.4 wurde diesbezüglich bereits in guter Übereinstimmung hierzu ausgeführt, dass der Rechenwert  $w_k$  je nach Rissbreite insgesamt als ein 70–95 %-Fraktilewert für die zu erwartende Rissbreite zu verstehen ist (vgl. DBV 2016). Die Rissabstandsformel in DIN EN 1992-1-1 (s. Gl. 2-33) basiert auf einem empirischen Modell (vgl. Zilch et al. 2010), welches grundsätzlich auch in Rehm et al. 1968 und Martin et al. 1980 beschrieben ist und mit Hilfe dessen sog. „kritische Rissbreiten“ bestimmt werden, welche hier als 95 %-Fraktile (statt 75 %-Fraktile nach DIN EN 1992-1-1/NA) gedeutet werden können.

Weiterhin spielen im Zuge der Festlegung eines Fraktilewerts auch Wirtschaftlichkeitsaspekte und juristische Belange in der Baupraxis eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Die Auswertung der Rissbreite mit höheren Fraktilewerten (beispielsweise 95 % statt 75 %) würde bedeuten, dass sich kleinere zulässige Überschreitungsmengen ergeben. Demnach könnte bereits eine kleinere Anzahl an Rissen, deren am Bauteil gemessene Breite größer ist, als die zuvor im Rahmen der Bemessung berechnete Breite, ausreichen, um das Bauteil in Bezug auf die Konformität abzulehnen (vgl. Attributverfahren nach DBV 2016). Infolgedessen wären größere Bewehrungsmengen einzubauen, um die Rissbreite in engeren Grenzen zu beschränken, ohne dabei jedoch größere Rissbreiten (auf der Bauteiloberfläche) sicher ausschließen zu können.

Insgesamt und auch unter Berücksichtigung der Ausführungen in Abschnitt 2.7.4 ist festzustellen, dass der Rechenwert  $w_k$  der Rissbreite (nach DIN EN 1992-1-1/NA) als ein 70–95 %-Fraktilewert (je nach Rissbreite) für die am Bauwerk auftretende Rissbreite aufgefasst werden kann. Ob diese Einschätzung jedoch auch für die Verwendung großer Stabdurchmesser zutreffend ist, musste aufgrund fehlender Erfahrungswerte im Umgang mit großen Stabdurchmessern zunächst offenbleiben.

Für die Gegenüberstellung der Rechenwerte  $w_k$  der Rissbreite nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA mit den Versuchsergebnissen wird im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit das 75 %-Fraktile  $w_{0,75}$  der Rissbreite angenommen. Damit wird ein unterer Grenzwert für die gemäß DBV 2016 angegebenen Bandbreiten (für DIN EN 1992-1-1/NA) insgesamt zugrunde gelegt. Das 75 %-Fraktile  $w_{0,75}$  der Rissbreite wird darüber hinaus auch ebenfalls für die Ingenieurmodelle gemäß MC 2010, prEN1992-1-1, Tran 2018 und Empelmann et al. 2015b herangezogen. Für diese Berechnungsmodelle liegen bisher keine fundierten Erfahrungswerte zu ihrer jeweiligen rechnerischen Vorhersagegenauigkeit (vgl. Abb. 2-20) vor, sodass diesbezüglich keine weitergehende Begründung dieser Festlegung vorgenommen werden kann.

Für den Vergleich der sich nach DIN EN 1992-1-1 ergebenden Rechenwerte mit Versuchswerten wird fallweise auch das 95 %-Fraktile  $w_{0,95}$  der Rissbreite (in Anlehnung an oben stehende Feststellung zur Herleitung der Bemessungsgleichung) berücksichtigt.

### 2.7.6 Messung der Rissbreite

Die Rissbreite stellt den Abstand zwischen den Rissufern dar, welcher gemäß DBV 2016 orthogonal zum Rissverlauf, d. h. senkrecht zu den Rissufern zu messen ist. Im Hinblick auf die z. T. un stetigen Rissverläufe ist naheliegend und mechanisch begründbar, die Rissbreite in Dehnungsrichtung der Bewehrung zu messen. Insbesondere für den Fall, dass die Belastungsrichtung (Hauptspannungsrichtung) mit der Dehnungsrichtung der Bewehrung und der Verschiebungsrichtung der Rissufer zusammenfällt, ist dies angezeigt und trifft für die im Kapitel 3 beschriebenen Dehnkörperversuche zu (s. Abschnitt 3.6.4). Dieses Vorgehen muss jedoch als „Sonderfall“ aufgefasst werden und kann nicht ohne Weiteres für die Baupraxis pauschalisiert werden, da sich beim Aufreißen des Querschnitts von in der Praxis z. T. schwer identifizierbaren Systemen unter Umständen Hauptspannungsrichtungen ändern, die Lage der Bewehrung und die Wirkungsrichtung der gegenwärtigen Beanspruchung (insbesondere bei Zwang) unbekannt sind und die Lokalisierung der Dehnungsrichtung der Bewehrung somit nicht trivial ist.

Dennoch gilt zu berücksichtigen, dass ein Messen der Rissbreite senkrecht zu den Rissufern oder in Richtung der Bewehrung z. T. erheblich voneinander abweichende Ergebnisse bedingt (s. Abschnitt 3.6.4).

Diese Problematik wurde bereits auch in Leonhardt 1978 thematisiert. Sofern die Richtungen der Bewehrung und der Hauptzugspannungen voneinander abweichen und die Rissbreite demnach nicht rechtwinklig, sondern schiefwinklig von der Bewehrung gekreuzt wurde, stellte sich die Rissbreite vergrößert dar. In diesem Zusammenhang wurden Faktoren zur Vergrößerung der (rechnerischen) Rissbreite in Abhängigkeit des zu erwartenden Winkels („Größe der Schiefwinkligkeit“) vorgeschlagen. Diesbezüglich finden sich auch weitere Ausführungen in DAfStb 630.

### 2.7.7 Vergleich von Mess- und Rechenwerten

Die im Zuge von Bauteilversuchen (oder im Rahmen von Bauwerksuntersuchungen direkt am Bauteil) aufgenommenen Messwerte werden zwecks Verifikation der Ausgengenaugigkeit eines Berechnungsmodells Bemessungswerten (z. B. nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA) gegenübergestellt. Eine solche Gegenüberstellung setzt jedoch zwingend eine Vergleichbarkeit der betrachteten Werte voraus, unabhängig davon, ob es sich bei den Versuchswerten um Mittelwerte, Extremalwerte oder charakteristische Werte handelt.

Während Risse nur praktikabel auf der Bauteiloberfläche dokumentiert und vermessen werden können (Oberflächenrissbreite), beziehen sich die Rechenwerte der Rissbreite (je nach betrachtetem Rechenmodell) auf einen wirksamen Bereich der Bewehrung oder auf die Stahloberfläche selbst. Hierbei ist bekannt, dass sich die Oberflächenrissbreite infolge Rissöffnung (bei biegebeanspruchten Bauteilen verstärkt!) größer darstellt, als der Rechenwert der Rissbreite. Für übliche Betondeckungen zwischen 25 mm und 35 mm ist in Schäfer 2016 diesbezüglich bereits ein Erhöhungsfaktor für die Oberflächenrissbreite von 1,10 bis 1,25 angegeben. Es entbehrt damit jeglicher Grundlage, Rechenwerte der Rissbreite unmittelbar mit Oberflächenmesswerten gegenüberzustellen.

Obwohl Vorbehalte gegenüber der Vergleichbarkeit von Oberflächenrissbreite und Rechenwert der Rissbreite begründet sind, ist jedoch auch festzuhalten, dass insbesondere Bemessungsformeln der klassischen Rissbreitentheorie (u. a. DIN 1045 1988) an Bauteilversuchen kalibriert oder Korrekturfaktoren anhand von Versuchsergebnissen abgeleitet wurden (vgl. auch Eckfeldt 2005). Auch die Bemessungsmodelle der kontinuierlichen Rissbreitentheorie (u. a. DIN EN 1992-1-1, MC 1990, MC 2010) beinhalten z. T. empirische Ansätze, welche auf experimentell gewonnenen Versuchsergebnissen beruhen. Mutmaßlich stellen diese Versuchsergebnisse Rissbreiten dar, die an der Bauteiloberfläche gemessen wurden. Vor diesem Hintergrund ist somit davon auszugehen, dass ein Vergleich der rechnerischen Rissbreite mit an der Oberfläche gewonnenen Messwerten (unter Berücksichtigung festgelegter Randbedingungen, wie beispielsweise eine definierte Betondeckung) theoretisch möglich sein muss.

In der vorliegenden Arbeit wird in diesem Zusammenhang jedoch die Auffassung vertreten, dass zur Vergleichbarkeit zwischen dem Rechenwert der Rissbreite nach DIN EN 1992-1-1 (und DIN EN 1992-1-1/NA) zunächst eine gemeinsame „Betrachtungsbasis“ festzulegen ist, ausgehend von der eine direkte Gegenüberstellung vorgenommen werden kann. Voneinander abweichende Definitions- und Messstellen sind in jedem Fall auszuschließen. Hiervon ausgenommen sind selbstredend Bemessungs- oder Ingenieurmodelle, die definitionsgemäß bereits eine rechnerische Oberflächenrissbreite ausweisen (z. B. MC 2010, prEN1992-1-1).

### **2.8 Zusammenfassung und weiteres Vorgehen**

Die Rissbildung in zugbeanspruchten Querschnittsbereichen von Stahlbetonbauteilen ist unweigerlich mit der Entfaltung der vorgesehenen Tragwirkung verbunden.

Eine zuverlässige Begrenzung der Rissbreite zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit und zur Wahrung ästhetischer Anforderungen an das äußere Erscheinungsbild setzt Kenntnisse über die rissmechanischen Zusammenhänge voraus. Diese sind allgemein bekannt, eine Überführung der Rissmechanik in zuverlässige Berechnungsmodelle für die rechnerische Vorherbestimmung am Bauwerk auftretender Risse bedarf jedoch vielfältiger Modellvereinfachungen. Vor diesem Hintergrund kann die rechnerische Rissbreite lediglich als Anhaltswert aufgefasst werden, insbesondere auch deswegen, da der Rechenwert der Rissbreite und die baupraktisch einfach zu erfassende Oberflächenrissbreite nicht übereinstimmen.

Im Zuge des voranstehenden Kapitels 2 wurden wesentliche Aspekte zur Rissbreitenbeschränkung im Hinblick auf den Stand von Wissenschaft und Technik beleuchtet und kritisch hinterfragt.

Für Bewehrungsstäbe mit großen Stabdurchmessern ( $> \phi 32$  mm) ist insgesamt festzustellen, dass diese derzeit nur vereinzelt in der nationalen Baupraxis Anwendung finden. Möglicherweise ist dies wesentlich auf die bestehenden (und z. T. restriktiven) Konstruktionsregeln zurückzuführen.

Mit dem Ziel, die Verwendung großer Stabdurchmesser in der Praxis attraktiver zu gestalten sowie wissenschaftliche Auffassungen im Hinblick auf das Rissgeschehen zu erweitern, wurden, anknüpfend an bereits abgeschlossene Forschungsvorhaben

---

## 2.8 Zusammenfassung und weiteres Vorgehen

(z. B. Schäfer 2016), weitere experimentelle Untersuchungen zum Rissverhalten von mehrlagig bewehrten flächenartigen Stahlbetonbauteilen bei Verwendung großer Stabdurchmesser durchgeführt.





### 3 Experimentelle Untersuchungen

#### 3.1 Untersuchungskonzept und allgemeine Vorgehensweise

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten 46 Bauteilversuche dienen der systematischen Untersuchung des Rissgeschehens von Stahlbetonbauteilen, welche mit einer mehrlagigen, kreuzweise angeordneten Bewehrung belegt sind und hohe Längs- und Querbewehrungsgrade aufweisen.

Unter der Begrifflichkeit „Rissgeschehen“ sind in diesem Zusammenhang die auf der Bauteiloberfläche messbaren Rissbreiten und der Abstand der entstehenden Risse sowie das sich einstellende Rissbild (Art und Verlauf) zu verstehen.

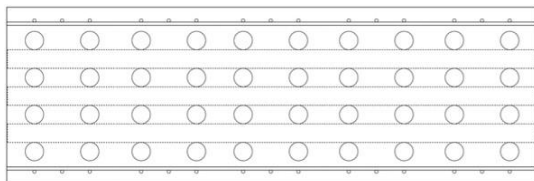
Die Bauteile wurden als sog. Dehnkörper ausgebildet und in einem Reißrahmen durch eine quasi-statische, zentrische Zugkraft in Bauteillängsachse belastet. Die sich infolge dieser Beanspruchung einstellenden Risse wurden mit Hilfe eines digitalen Rissmikroskops auf der Bauteiloberseite und auf den (vertikalen) Bauteilseitenflächen vermessen und anschließend statistisch ausgewertet.

Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen zielen darauf ab, den Einfluss einer mehrlagigen Bewehrung (wie sie üblicherweise bei flächenartigen Bauteilen anzutreffen ist) auf das Rissgeschehen zu analysieren und eine genügend große und belastbare Rissbreitendatenbasis zu gewinnen, anhand derer aussagekräftige statistische Untersuchungen durchgeführt werden können. Ein Hauptaugenmerk lag in diesem Zusammenhang auf dem Einfluss großer Bewehrungsstabdurchmesser  $\phi_{\text{large}}$  (hier  $\phi 40$  mm) auf das Rissgeschehen. Zu Referenzzwecken wurden vorliegend zudem aber auch baupraktisch übliche Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm und  $\phi 28$  mm als Haupt- und Querbewehrung vorgesehen.

#### 3.2 Untersuchungsprogramm

Die zur Untersuchung des Rissgeschehens herangezogenen Versuchskörper weisen vorliegend eine stabförmige Ausdehnung mit rechteckförmigem Querschnitt auf. Hierdurch werden die unter Zugbeanspruchung stehenden Querschnittsbereiche flächenartiger Bauteile (Querschnitte unter zentrischer Zugbeanspruchung oder Zugzonen biegebeanspruchter plattenartiger Bauteile) ausschnittsweise (idealisiert) abgebildet. Die seitlichen Ränder der Versuchskörper sind demnach als (vertikale) Schnittlinien, statt als Bauteilränder aufzufassen (vgl. nachstehende Abbildung).

„flächenartiges Bauteil“



betrachteter „Ausschnitt“

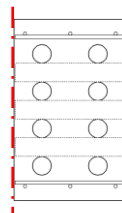


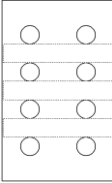
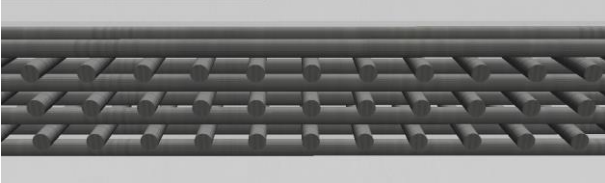
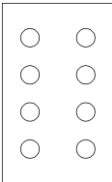
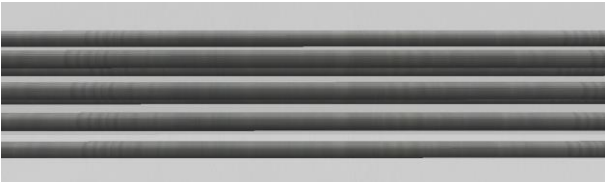
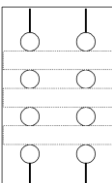
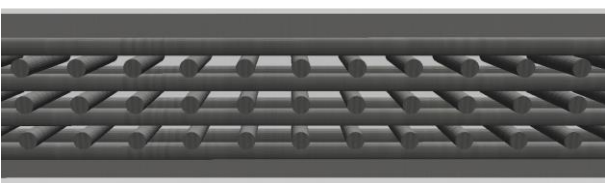
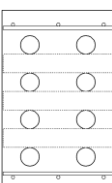
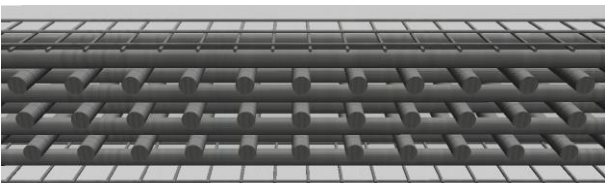
Abb. 3-1: Modellfindung und Bauteilkonzeption

### 3 Experimentelle Untersuchungen

Der Begriff „flächenartig“ wird vorliegend als Synonym für ausgedehnte Bauteile mit Längs- und Querbewehrung verstanden. Tatsächlich weisen die in dieser Arbeit herangezogenen Versuchskörper nicht das Tragverhalten einer Platte auf. Unter rein zentrischer Einwirkung und die sich in dieser Folge einstellende Rissbildung kann jedoch davon ausgegangen werden, dass das hier nicht berücksichtigte Querdehnungsverhalten einer Platte vernachlässigt werden kann. Vor diesem Hintergrund ist die Ausbildung der Versuchskörper als stabförmige Bauteile im Hinblick auf die Untersuchungen zum Rissverhalten genügend genau.

Nachstehend sind die untersuchten Querschnittsformen schematisch dargestellt (Querschnittsabmessungen s. Abschnitt 3.3).

Tab. 3-1: Querschnittsdarstellungen und Visualisierungen der Versuchsserien 1 bis 4

| Serie | Querschnitt   | Visualisierung   |
|-------|---|--|
| 1     |    |    |
| 2     |   |   |
| 3     |  |  |
| 4     |  |  |

Die Hauptbewehrung (in Versuchskörperlängsrichtung) wurde in vier Lagen verlegt und bestand insgesamt aus acht Stäben. Zwischen den Längsstäben wurden Querstäbe vorgesehen, welche gefluchtet übereinander angeordnet wurden. Fallweise

wurde zusätzlich eine Oberflächenbewehrung aus dünnen Stabdurchmessern  $\phi 8$  mm eingelegt.

Für die Haupt- und Querbewehrung wurden die Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm,  $\phi 28$  mm und  $\phi 40$  mm untersucht.

Nachfolgend werden die Versuchsserien eingehend beschrieben und deren jeweiliges Untersuchungsziel im Detail erläutert.

### Versuchsserie 1

In Serie 1 wurde der Einfluss einer kreuzweise verlegten Bewehrung auf das Rissbild untersucht. Hierzu wurden (ebenso auch in den Serien 3 und 4) Querbewehrungslagen zwischen den Längsstablagen eingelegt und gefluchtet übereinander angeordnet, wie es auch in der Praxis angestrebt wird, um den Beton entsprechend einbringen und verdichten zu können. Alternativ wäre auch eine versetzte Anordnung der Querstablagen denkbar gewesen.

Die eingelegten Querstäbe stellen in diesem Zusammenhang Stör- bzw. Sollbruchstellen rechtwinklig zur Lastrichtung dar, da die Betonquerschnittsfläche in diesen Bereichen lokal reduziert ist. Vor diesem Hintergrund konnte davon ausgegangen werden, dass eine mehrlagige Querbewehrung das Erstrissverhalten sowie die weitere Rissentwicklung hinsichtlich des Rissabstandes und der sich einstellenden Rissbreite signifikant beeinflussen. Eine gefluchtete Anordnung der Querbewehrungslagen forciert hierbei mutmaßlich deren Wirkung als Sollbruchstelle.

Der Abstand der Querstäbe  $a_{s,x}$  bezogen auf die Stabachse entsprach demjenigen der Längsstäbe  $a_{s,y}$ , sodass eine symmetrische kreuzweise Bewehrung zu Grunde gelegt werden konnte. Zwecks Überprüfung, inwieweit der Querstababstand selbst das Rissgeschehen beeinflusst, wurde dieser in den Serien 1.1 und 1.2 variiert. In der Serie 1.1 wurde der Querstababstand gegenüber der Serie 1 verdoppelt ( $a_{s,x} = 2 \cdot a_{s,y}$ ). In der Serie 1.2 (nur für  $\phi 40$  mm) wurde der Querstababstand auf den gemäß DIN EN 1992-1-1 geringstmöglichen Stababstand reduziert, welcher sich unter Berücksichtigung des verwendeten Größtkorndurchmessers ( $d_g = 16$  mm) zu  $a_{s,x} = 2 \cdot \phi$  ergab.

### Versuchsserie 2

Die Serie 2 wurde ohne Querstäbe ausgeführt und diente als Referenzserie, anhand derer ein möglicher Einfluss der Querbewehrung auf das Rissgeschehen identifiziert werden sollte.

### Versuchsserie 3

In Serie 3 wurden die äußeren Lagen der Längsstäbe jeweils mit einseitig in Längsrichtung angeschweißten Stahlblechen ( $t = 3$  mm) versehen, mit Hilfe derer Längsrisse eingepreßt wurden. Solche Längsrisse treten bei flächigen Bauteilen beispielsweise durch Querbiegung infolge Last oder Querkzug infolge Zwang auf.

Für einen zugbeanspruchten Bewehrungsstab stellt es sich so dar, dass sich im Rahmen der Verbundwirkung Druckstreben – ausgehend von den Rippen – rotationssymmetrisch um den Stab ausbilden. In tangentialer Richtung stellt sich ein

Zugring zur Herstellung des Gleichgewichts ein (Zugring nach Tepfers et al. 1968). Eingeprägte Längsrisse stören die Ausbildung dieses Zugrings und schädigen somit das Verbundtragverhalten. Es konnte folglich davon ausgegangen werden, dass die eingeprägten Längsrisse das Rissbild des Dehnkörpers beeinflussen (vgl. hierzu auch die Untersuchungsergebnisse in Martin et al. 1980). Um den Verbund zwischen Stahlblech und dem umgebenden Beton weitgehend auszuschalten, wurden die Stahlbleche zusätzlich mit einer PE-Folie beklebt.

#### Versuchsserie 4

In Serie 4 wurde eine zusätzliche kreuzweise Oberflächenbewehrung aus dünnen Stabdurchmessern ( $\phi 8$  mm) eingelegt. Damit sollte überprüft werden, ob die Rissbreiten an der Bauteiloberfläche auch bei sehr hohen Bewehrungsgraden durch eine Oberflächenbewehrung, wie sie für große Stabdurchmesser (hier  $\phi 40$  mm) gemäß DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA erforderlich ist, wirksam begrenzt werden können.

Zu Vergleichszwecken wurde der Einfluss der Oberflächenbewehrung auf das Rissgeschehen in gleicher Weise auch für die Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm und  $\phi 28$  mm überprüft.

Die Oberflächenbewehrung wurde entgegen den Festlegungen in DIN EN 1992-1-1/NA unter Berücksichtigung der in Schäfer 2016 dokumentierten Versuchsergebnisse zu  $A_{s,surf} = 0,01 \cdot A_{ct,ext}$  (parallel und orthogonal zur Längsbewehrung, nach DIN EN 1992-1-1, Bild J.1) gewählt (mit  $A_{ct,ext}$  gemäß Abb. 2-15). Dies zielte darauf ab – positive Versuchsergebnisse vorausgesetzt –, die in DIN EN 1992-1-1/NA insgesamt strengeren Festlegungen zur Ausbildung der Oberflächenbewehrung gegenüber DIN EN 1992-1-1 zu modifizieren. Die Querschnittsfläche  $A_{ct,ext}$  wurde vorliegend wie folgt angenommen:

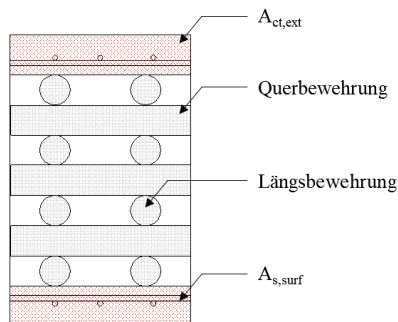


Abb. 3-2: Festlegung für  $A_{ct,ext}$  (schraffierter Querschnittsbereich)

Zwecks Vermeidung einer gemischten Oberflächenbewehrung aus unterschiedlichen Stabdurchmessern stellte es sich so dar, dass die tatsächlich eingelegte Oberflächenbewehrung den avisierten Oberflächenbewehrungsgrad für  $\phi 20$  mm geringfügig überschätzt bzw. für  $\phi 28$  mm geringfügig unterschätzt. Für  $\phi 40$  mm war dies nicht festzustellen.

Da die Versuchskörper Ausschnitte aus flächigen Bauteilen mit kreuzweise verlegter Hauptbewehrung darstellen und die Seitenränder demzufolge als Vertikalschnitte aufzufassen sind, wurde die Oberflächenbewehrung nur auf der Ober- und Unterseite des Dehnkörperquerschnitts angeordnet. Diese wurde dabei randnah, mit einem Verlegemaß  $c_{v,surf}$  von 30 mm zum oberen und unteren Bauteilrand, (geringfügig kleinere Betonüberdeckung als für Expositionsklasse XC2 und XC3 vorgesehen, gemäß Projektanforderung aus Schlussbericht 2018) angeordnet und damit nicht unmittelbar auf der Hauptbewehrung aufgelegt, welche selbst eine Betonüberdeckung von 60 mm aufwies. So sollte sichergestellt werden, dass der Wirkungsbereich der Oberflächenbewehrung den Bauteilrand erfasst und die auf der Oberfläche entstehenden Risse möglichst fein verteilt werden.

Der zwischen der Hauptbewehrung und der Oberflächenbewehrung resultierende vertikale Abstand wurde entgegen der baupraktischen Vorgehensweise durch punktförmige Abstandhalter statt durch Montagestäbe o. Ä. sichergestellt. Dies erfolgte bewusst, um mögliche zusätzliche Störstellen (neben den potentiellen Sollbruchstellen infolge der bereits vorhandenen Querbewehrung) infolge der Montagebewehrung ausschließen zu können. In Serie 4.1 wurde überprüft, ob eine Oberflächenbewehrung, welche aus baupraktischen Gründen einfachheitshalber auf die Hauptbewehrung aufgelegt wird, ebenso wirksam ist. Hierzu wurde das Verlegemaß  $c_{v,surf}$  auf 60 mm vergrößert.

Die verschiedenen Anordnungen der Oberflächenbewehrung in den Serien 4 und 4.1 sind nachfolgend schematisch dargestellt.

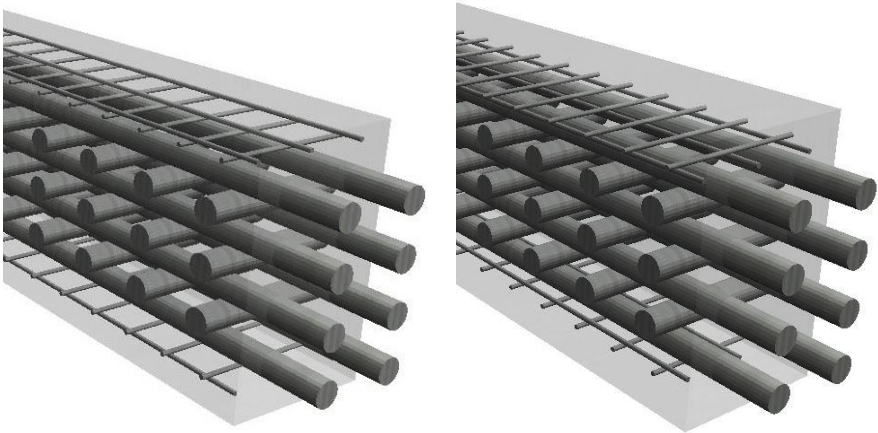


Abb. 3-3: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Anordnung der Oberflächenbewehrung aus dünnen Stabdurchmesser in Serie 4 (links) und Serie 4.1 (rechts)

Die Oberflächenbewehrung wurde aus Stabstahl ( $\phi 8$  mm) hergestellt. Auf die Verwendung baupraktisch üblicher Betonstahlmatten wurde verzichtet, um den positiven Einfluss der angeschweißten Querstäbe auf die Verankerung auszuschließen.

Das Versuchsprogramm setzte sich für jeden der betrachteten Stabdurchmesser gemäß Tab. 3-2 insgesamt wie folgt zusammen:

Tab. 3-2: Versuchsprogramm für die jeweils betrachteten Stabdurchmesser

| Serie   | Quer-<br>bewehrung          | Oberflächenbewehrung |              | Betonfestig-<br>keitsklasse | Prüfkörper-<br>anzahl |
|---|-----------------------------|----------------------|--------------|-----------------------------|-----------------------|
|   |                             | $A_{s,surf}$         | $C_{v,surf}$ |                             |                       |
| 1   | $a_{s,x} = a_{s,y}$         | ./.                  | ./.          | C30/37                      | 3                     |
|   |                             |                      |              | C50/60                      | 2                     |
| 1.1   | $a_{s,x} = 2 \cdot a_{s,y}$ | ./.                  | ./.          | C30/37                      | 1                     |
| 1.2 <sup>1)</sup>   | $a_{s,x} = 2 \cdot \phi$    | ./.                  | ./.          | C30/37                      | 1                     |
| 2   | ./.                         | ./.                  | ./.          | C30/37                      | 3                     |
|   |                             |                      | ./.          | C50/60                      | 2                     |
| 3   | $a_{s,x} = a_{s,y}$         | ./.                  | ./.          | C30/37                      | 1                     |
| 4   | $a_{s,x} = a_{s,y}$         | 1% $A_{ct,ext}$      | 30 mm        | C30/37                      | 1                     |
| 4.1   | $a_{s,x} = a_{s,y}$         | 1% $A_{ct,ext}$      | 60 mm        | C30/37                      | 1                     |
| 1) Serie 1.2 nur mit Stabdurchmesser $\phi 40$ mm ausgeführt. |                             |                      |              |                             |                       |

Für die Versuchskörper der Serien 1 bis 4 wurde standardmäßig ein im Hochbau praxisüblicher Normalbeton der Festigkeitsklasse C30/37 verwendet. Als Zuschlagstoff wurde dabei Rheinkies (Rundkorn) mit dem Größtkorndurchmesser  $d_g = 16$  mm eingesetzt. Ein rundkörniger Zuschlag wirkt sich in Bezug auf die Kornverzahnung ungünstiger auf die Rissbildung aus, als ein gebrochener Zuschlag. Der Beton selbst wurde an der TU Kaiserslautern im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau in einem Zwangmischer (Fassungsvermögen 600 l) hergestellt. Die Zusammensetzung des Betons kann detailliert dem Anhang A – Materialeigenschaften entnommen werden.

Zwecks Überprüfung, ob die an praxisüblichen Normalbetonen (C30/37) abgeleiteten Erkenntnisse zum Rissgeschehen auch auf höherfeste Normalbetone ( $\leq$  C50/60), wie sie üblicherweise in Fertigteilverken zum Einsatz kommen, ohne Einschränkung übertragen werden können, wurden gemäß Tab. 3-2 auch Versuchskörper mit einem Beton der Festigkeitsklasse C50/60 untersucht. In diesem Zusammenhang ergeben sich aus der höheren Betonfestigkeitsklasse größere Betonzug- und Verbundfestigkeiten, welche sich unmittelbar auf das Rissgeschehen auswirken. Der höherfeste Beton wurde als Transportbeton bereitgestellt, dessen Zusammensetzung gleichfalls im Anhang A – Materialeigenschaften dokumentiert ist.

Insgesamt wurden 46 großmaßstäbliche Versuche durchgeführt.

### 3.3 Querschnittskonzeptionierung

Die Querschnittskonzeptionierung der Versuchskörper wurde wie folgt vorgenommen:

- Die Abmessungen des Versuchsquerschnitts wurden ausgehend von der Bewehrungsführung im Bauteilinneren und in Abhängigkeit des Stabdurchmessers (Ist-Durchmesser) entwickelt. Dies hat zur Folge, dass sich die

Querschnittsabmessungen jeweils für die Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm ( $b/h = 138/281$  mm),  $\phi 28$  mm ( $b/h = 192/344$  mm) und  $\phi 40$  mm ( $b/h = 264/428$  mm) unterscheiden.

- Zur Sicherstellung einer „konfliktfreien“ Bewehrungsführung der unmittelbar aufeinander aufbauenden Stablagen wurden die tatsächlichen Stababmessungen (Außendurchmesser  $\phi_A$  einschließlich Rippung) berücksichtigt, welche näherungsweise mit  $\phi_A = 1,15 \phi_{\text{Nenn}}$  angenommen wurden.
- Der horizontale Achsabstand  $a_{s,y}$  der Längsstäbe betrug jeweils  $a_{s,y} = 3 \cdot \phi_A$ .
- Der vertikale Achsabstand der Längsstäbe  $a_{s,z}$  wurde zu  $a_{s,z} = 2 \cdot \phi_A$  gewählt. Somit konnte zwischen den Hauptbewehrungslagen eine Querstablage mit gleichem Stabdurchmesser  $\phi_A$  eingebaut werden.
- Der Achsabstand der Querbewehrung  $a_{s,x}$  in Versuchskörperlängsrichtung betrug standardmäßig  $a_{s,x} = a_{s,y} = 3 \cdot \phi_A$ . In den Serien 1.1 und 1.2 wurde der Querstababstand variiert (s. Tab. 3-2).
- Das vertikale Verlegemaß  $c_{v,\text{large}}$  der oberen und unteren Längsstablage (Hauptbewehrung, Bezeichnung  $c_{v,\text{large}}$  analog auch für  $\phi 20$  mm und  $\phi 28$  mm verwendet) wurde in allen Fällen zu 60 mm (bezogen auf den Außendurchmesser) festgelegt. Die seitliche Betondeckung der Längsstäbe entsprach einem Stabdurchmesser  $\phi_A$ . Für die Querstäbe wurde im Bereich der Bauteilflanken planmäßig keine Betonüberdeckung vorgesehen.
- Im Rahmen der Bauteilkonzeptionierung wurde die Mindestbauteildicke, welche bei Verwendung von großen Stabdurchmessern (hier:  $\phi 40$  mm) gemäß Abschnitt 8.8 in DIN EN 1992-1-1  $15 \phi_{\text{large}}$  beträgt, bewusst deswegen unterschritten, da die Bauteile bekanntermaßen Querschnittsausschnitte darstellen und es sich nicht um für sich abgeschlossene Bauteile handelt.

Die Geometrie ist in nachfolgender Skizze anschaulich dargestellt:

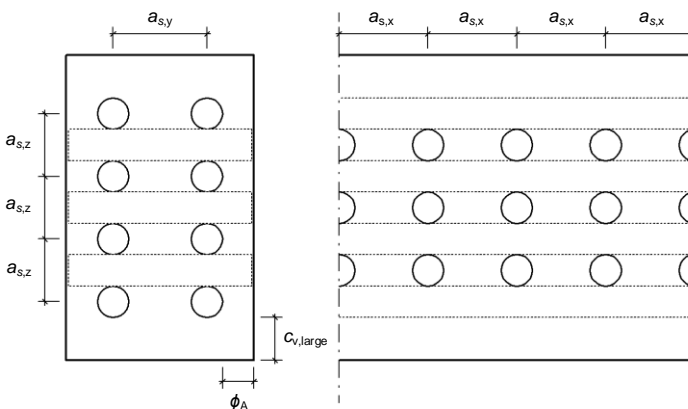


Abb. 3-4: Geometrie der Versuchskörper in Quer- (links) und Längsschnittdarstellung (rechts)  
Die Versuchskörpergesamtlänge betrug unabhängig vom verwendeten Stabdurchmesser immer 2,70 m.

### 3.4 Herstellung der Versuchskörper

Alle Versuchskörper wurden im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der TU Kaiserslautern hergestellt.

Um die Stäbe der Hauptbewehrung gemäß der beschriebenen Querschnittskonzeptionierung (s. Abb. 3-4) ausreichend lagegesichert in die Schalung einbauen zu können, wurden für diese Stäbe in der stirnseitigen Schalung Lehren vorgesehen. In Bauteilmitte stellten sich infolge des Stabeigengewichts (insbesondere bei Versuchsserien mit Haupt- und Querbewehrung) merklich und störende Durchbiegungen ein, weswegen dort zusätzliche Stabunterstützungen vorgesehen werden mussten. Um aber in diesem Zusammenhang einen Einfluss konventioneller punkt- oder linienförmiger Unterstützungen auf das Rissgeschehen ausschließen zu können (z. B. durch Initialisierung weiterer Sollbruchstellen im Bereich der Aufstandsflächen von Abstandhaltern o. Ä.), wurde stattdessen ein einzelnes, den Schalungslehren ähnliches scheibenartiges Unterstüztungsbauteil in Bauteilmitte eingesetzt. Dieses stützte alle vier Hauptbewehrungslagen gleichzeitig und stellte die gewünschte Soll-Lage der Bewehrung auch in Bauteilmitte sicher.

Die scheibenartige Unterstüztung fungierte des Weiteren als Querschnittsschwächung („Rissblech“) zur Initiierung eines Erstrisses. An der Stelle des Erstrisses wurden Dehnmessstreifen auf der Hauptbewehrung appliziert, sodass die Stabdehnungen in Bauteillängsachse während der Versuchsdurchführung aufgenommen werden konnten.



Abb. 3-5: Rissblech und Unterstüztung der Bewehrung in Bauteilmitte (Serie 1)

Gemeinsam mit den Versuchskörpern wurden Betonwürfel ( $a = 15 \text{ cm}$ ) und Betonzylinder ( $d = 15 \text{ cm}$ ,  $h = 30 \text{ cm}$ ) hergestellt, um die Festbetoneigenschaften (Würfeldruckfestigkeit  $f_{\text{cm,cube}}$  nach DIN EN 12390-3, Spaltzugfestigkeit  $f_{\text{ct,sp}}$  nach DIN EN 12390-6 und Elastizitätsmodul  $E_{\text{cm}}$  nach DIN EN 12390-13) begleitend zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung zu bestimmen. Die Ergebnisse der Festbetonprüfung können dem Anhang A – Materialeigenschaften entnommen werden.

Der Beton wurde lagenweise in die Schalung eingebracht und mit einem Innenrüttler konventionell verdichtet.





Abb. 3-6: Einbringen des Betons mit Kübel und Verdichten des Betons in der Schalung

Für das Abheben der Versuchskörper von der Schalbühne und für den Einbau der Bauteile in den Prüfstand wurden Plattengreifer mit schwerkraftgesteuerten Klemmbacken verwendet. Dadurch konnte vollständig auf Transportanker o. Ä. verzichtet werden, da auch diese als Sollbruchstellen gewirkt hätten und damit die Rissbildung und das Rissverhalten nicht unwesentlich hätten beeinflussen können.

Für die weitere Versuchsdurchführung ergab sich die Besonderheit, dass die Bauteile nach Abheben von der Schalbühne zunächst um  $180^\circ$  gedreht werden mussten. Dies war der Tatsache geschuldet, dass die offene Bauteilseite (Einfüllrichtung des Betons) im Hinblick auf die Oberflächenqualität (Poren, Unebenheiten) nicht als Beobachtungsseite im Zuge der Rissbreitenaufnahme in Frage kam. Das Drehen der Versuchskörper um ihre Längsachse wurde mittels zweier kreisrunder Holzscheiben umgesetzt (s. Abb. 3-7).

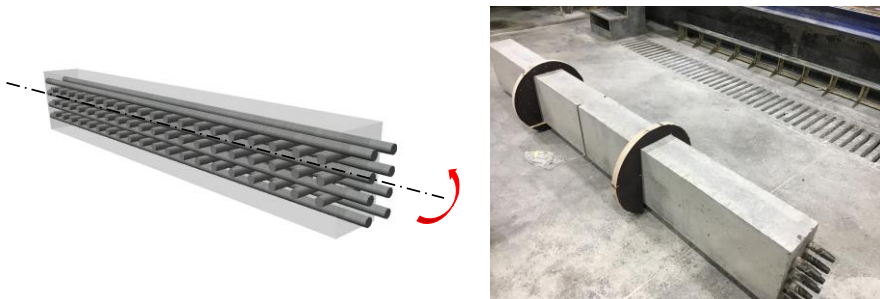


Abb. 3-7: Drehen des Versuchskörpers

Die Bauteile wurden frühestens nach 24 h ausgeschalt und bis zur eigentlichen Versuchsdurchführung gemeinsam mit den zugehörigen Festbetonproben zwischen-

gelagert. Im Sinne einer Nachbehandlung und zur Vermeidung von Schwindrissbildungen wurden die Versuchskörper in den ersten 2 – 5 Tagen mit Baufolie abgedeckt. Auf eine luftdichte Verpackung der Versuchskörper mit Folie zum Schutz gegen Austrocknen, wie es zum Teil für kleinmaßstäbige Rissbreitenversuche in der Literatur dokumentiert ist (z. B. Rehm et al. 1976), wurde in diesem Zusammenhang verzichtet.

## **3.5 Prüfstand und Versuchsaufbau**

### **3.5.1 Prinzip und Funktionsweise des Prüfstandes**

Die Bauteilversuche zur Erfassung des Rissgeschehens wurden als Dehnkörperversuche konzipiert und in einem Reißrahmen (s. Abb. 3-8 und Abb. 3-9) durchgeführt. Der in Rede stehende Reißrahmen bestand aus zwei in Längsrichtung angeordneten Stielen und zwei jeweils an deren Enden positionierten Traversen. An diese Traversen wurde der Versuchskörper über eine Lasteinleitungsstruktur kraftschlüssig angeschlossen. Durch Verfahren einer Traverse mittels zweier in der Stiellängsachse angeordneten Hohlkolbenpressen (je 1,5 MN Hubkraft) wurde der Versuchskörper durch eine zentrische Zugkraft gedehnt. Die Beanspruchung wurde wegschlüssig aufgebracht und entsprach damit einer zentrischen Zwangseinwirkung. Der Versuchskörper wurde auf punktförmigen Gleitlagern reibungsarm (und damit annähernd zwangsfrei) aufgelagert.

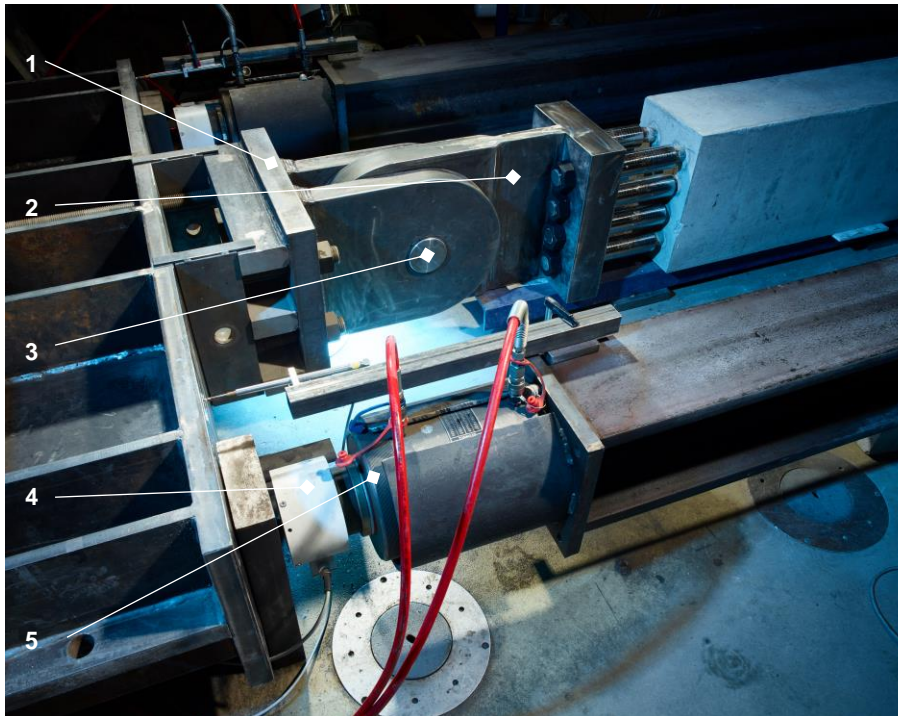
Die Lasteinleitungsstruktur, welche jeweils gleichartig an den beiden Enden des Versuchskörpers montiert wurde, war zweiteilig und bestand im Wesentlichen aus Augenplatten mit aufgeschweißten Kopfplatten. Das Hauptaugenmerk in Bezug auf die Lasteinleitungsstruktur lag darin, dass alle anzuschließenden Stäbe der Hauptbewehrung im Zuge der Belastung gleichmäßig beansprucht werden. Diese Vorgaben konnte versuchsbegleitend durch Dehnungsmessungen weitgehend bestätigt werden. Der Anschluss der Lasteinleitungsstruktur an den Versuchskörper selbst erfolgte mit Schraubmuffenverbindungen vom Typ Lenton S13 (abZ Z-1.5-200, Lenton 2005). Hierzu wurden konische Gewinde auf die Hauptbewehrungsstäbe aufgeschnitten, welche beidseitig 10 cm aus dem Versuchskörper herausgeführt wurden. Durch in die Kombinationsmuffen eingeschraubte Gewindebolzen und entsprechende Konterung wurden die Bewehrungsstäbe mit dem bauteilseitigen Element der Lasteinleitung verbunden. Über eine gelenkige Bolzenverbindung (Radialgelenklager) wurde das bauteilseitige Element mit dem prüfrahmenseitigen Lasteinleitungselement verbunden und an die Traverse angeschlossen.

Der Prüfstand ist nachfolgend in Abb. 3-8 und in Abb. 3-9 detailliert dargestellt. Die Hauptbestandteile des Prüfaufbaus sind in den Bildern betitelt und damit im Wesentlichen selbsterklärend. Mit dem hier vorliegenden Prüfaufbau konnte versuchstechnisch nur eine Zugbeanspruchung in Bauteillängsrichtung aufgebracht werden. Effekte aus zweiaxialer Plattentragwirkung infolge Querzugspannungen auf das Rissgeschehen konnten somit nicht erfasst werden. Solche Untersuchungen sind ergänzenden Versuchen vorbehalten, die allerdings einen noch wesentlich höheren technischen Aufwand erfordern.



- 1 Traverse, 2 Stiel, 3 Hohlkolbenpressen, 4 Versuchskörper, 5 Gleitlager  
6 Hydraulikaggregat und Steuerung, 7 Lenton Schraubmuffenverbindung,  
8 Lasteinleitungsstruktur, 9 Bolzenverbindung mit Radialgelenklager

Abb. 3-8: Reißrahmen zur Durchführung der Dehnkörperversuche (Foto: T. Brenner)



1 prüfrahmenseitiges Lasteinleitungselement, 2 bauteilseitiges Lasteinleitungselement, 3 Bolzenverbindung mit Radialgelenklager, 4 Krafringaufnehmer auf Zentrierdorn, 5 Hohlkolbenpresse

Abb. 3-9: Detail zur Lasteinleitung und Anschluss des Versuchskörpers an den Reißrahmen (Foto: T. Brenner)

#### 3.5.2 Messtechnik

Die durch den Vorschub der Traversen aufgebrachte Beanspruchung („Reißwirkung“) wurde durch zwei Krafringaufnehmer aufgezeichnet. Diese waren jeweils zwischen der Traverse und der Hohlkolbenpresse angeordnet und mittels Zentrierdorn lagegesichert (s. Abb. 3-9).

Die Lasteinleitungsstruktur wurde so ausgelegt, dass alle anschließenden Stäbe der Hauptbewehrung gleichmäßig belastet wurden. Dies wurde versuchsbegleitend durch Dehnungsmessungen im Bereich der aus dem Bauteil herausstehenden Bewehrungsstäbe bestätigt.

Im Bereich des Rissblechs zur Indizierung des Erstrisses (vgl. Abb. 3-5) wurden ebenfalls Dehnmessstreifen (lineare Dehnungsmessung in Stablängsrichtung) angeordnet, mit Hilfe derer die Stahldehnung im Riss gemessen und somit auf die „reine“ Stahlspannung an dieser Stelle zurückgerechnet werden konnte.



Mittels induktiver Wegaufnehmer wurde der Verschiebeweg der Traverse überwacht. Eine geringfügige Exzentrizität konnte in diesem Zusammenhang zugelassen werden, da dies durch das vorhandene Radialgelenklager kompensiert wurde.

### 3.5.3 Versuchsbegleitende Feststellungen und Fehlerquellen

Im Rahmen der Versuchsdurchführung konnten in Einzelfällen voneinander abweichende Pressenkräfte (Abweichung  $< 1\%$ ) der synchron geschalteten Hohlkolbenzylinder beobachtet werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass trotz Verwendung baugleicher Zylinder, Schläuche und Verteiler infolge innerer Reibung, Leckagen oder sonstiger Druckverluste unvermeidbare ungleiche Hubwege und Pressenkräfte resultierten. Etwaig hieraus entstehende ungewollte Momente konnten aber durch das in der Lasteinleitungskonstruktion verbaute Radialgelenklager ausgeglichen werden.

Die im Vorfeld festgelegten Pressenkräfte (s. Abschnitt 3.6.1) konnten im Zuge der Versuchsdurchführung mit einer Genauigkeit von ca.  $\pm 1\%$  aufgebracht werden. Zum Ende der Versuchsreihe und zeitlich nicht näher konkretisierbar konnten Abweichungen der Kraftaufnehmer festgestellt werden. Aufgedeckt werden konnte dieser Umstand durch einen Vergleich der Ergebnisse der Kraftaufnehmer, der Dehnungsmessung und der Anzeige des Druckmessgeräts des zum Betrieb der Hohlkolbenpressen erforderlichen Hydraulikaggregats. Insgesamt ist es somit nicht unwahrscheinlich, dass eine im Einzelfall bis zu ca. 10% größere Last unplanmäßig aufgebracht wurde.

Möglicherweise wurde die zuvor beschriebene Abweichung des Kraftaufnehmers auch dadurch begünstigt, dass keine zusätzliche Kalotte zur Vermeidung exzentrischer Lasteinleitung in den Kraftaufnehmer vorgesehen wurde. Eine solche Kalotte hätte im vorliegenden Fall jedoch eine Gelenkkette zur Folge gehabt, weswegen hiervon abgesehen wurde.

Durch eine einmalige Störung im Betriebsablauf konnte die Beanspruchung für die Laststufe 4 des Versuchs der Serie 1.2 ( $\phi 40$  mm) nicht vollständig aufgebracht werden.

## 3.6 Versuchsdurchführung

### 3.6.1 Festlegung des Belastungsregimes

Die Festlegung eines Belastungsregimes erforderte zunächst die Definition konkreter Stahlspannungsniveaus, für die eine Rissbreitenauswertung durchzuführen ist. Um in diesem Zusammenhang eine zielorientierte Bewertung der sich einstellenden Rissbreiten sicherzustellen und darüber hinaus auch eine Vergleichbarkeit mit Praxisfällen der Bemessung zu ermöglichen, wurden übliche Spannungsniveaus, wie sie im Zuge der Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit auftreten, in Anlehnung an Tabelle 7.2DE aus DIN EN 1992-1-1/NA ausgewählt.

Die so nach Tabelle 7.2DE im Zuge der Versuchsdurchführung festgelegten Stahlspannungen konnten mit Hilfe von Dehnungsmessungen im Bereich des initiierten Erstrisses überprüft werden.

### 3 Experimentelle Untersuchungen

---

Die zugehörigen Lastangaben in Tab. 3-3 (Angaben in [kN]) ergeben sich durch Multiplikation der betrachteten (reinen) Stahlspannung im Erstriss mit dem jeweils betrachteten Bewehrungsquerschnitt (Querschnittsfläche unter Berücksichtigung des Nenndurchmessers). Für  $\phi 40$  mm konnten lediglich Stahlspannungen bis  $280 \text{ N/mm}^2$  berücksichtigt werden, da der Prüfstand und seine tragenden Bestandteile für eine zulässige Pressenkraft in Höhe von  $3,0 \text{ MN}$  konstruiert und bemessen wurden.

Tab. 3-3: Rechnerische Laststufen der Versuchsdurchführung, Lastangaben in [kN]

| $\phi$<br>[mm] | Stahlspannung in [ $\text{N/mm}^2$ ] |         |         |         |         |         |
|----------------|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                | 80                                   | 160     | 240     | 280     | 320     | 360     |
| 20             | 201,1                                | 402,1   | 603,2   | 703,7   | 804,2   | 904,8   |
| 28             | 394,1                                | 788,2   | 1.182,2 | 1.379,3 | 1.576,3 | 1.773,4 |
| 40             | 804,2                                | 1.608,5 | 2.412,7 | 2.814,9 | ./.     | ./.     |

#### 3.6.2 Inaugenscheinnahme der Versuchskörper

Nach Ausschalen der Versuchskörper, vor Beginn der Lastaufbringung und während den Haltephasen der einzelnen Laststufen (s. Tab. 3-3) wurden die Versuchskörper in Augenschein genommen und etwaig vorgefundene Risse farbig gekennzeichnet und fotografisch dokumentiert.

Vor Versuchsbeginn (die Versuchskörper wurden bis zur Versuchsdurchführung annähernd zwangfrei gelagert) konnten augenscheinlich keine erkennbaren, systematischen Rissbildungen auf der Bauteiloberseite festgestellt werden. Lediglich im Bereich der Querschnittsschwächung in Versuchskörpermitte konnte bereits nach wenigen Tagen (ca. 3–5 Tage) der angestrebte Erstriss (Rissbreite jedoch deutlich geringer als  $0,05 \text{ mm}$ ) beobachtet werden.

Dieser Riss wurde in der Folge nicht weiter berücksichtigt und diente alleine dem Zweck, die aufgebrachte Stahlspannung an einer definierten Stelle und weitgehend ohne das Mitwirken des Betons mittels Dehnungsmessungen überprüfen zu können.

Weitere Rissbildungen außerhalb des durch das Rissblech planmäßig geschwächten Querschnittsbereiches (mit Ausnahme von Rissbildungen im Bereich Querbewehrung, welche ohne planmäßige seitliche Betondeckung eingebaut wurde) konnten nicht festgestellt werden. Somit ist davon auszugehen, dass vor Prüfbeginn eingeprägte Schwindspannungen keine Rissbildung induzieren und Effekte infolge Schwindens im Zuge der Auswertung der hier beschriebenen Versuchsreihen vernachlässigt werden können.

#### 3.6.3 Lastaufbringung

Die Belastung wurde weggesteuert und gleichmäßig mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit in insgesamt sechs Laststufen (bzw. vier Laststufen für  $\phi 40$  mm)

gemäß Tab. 3-3 aufgebracht und dabei messtechnisch aufgezeichnet. Die Belastungsgeschwindigkeit kann in diesem Zusammenhang orientierend zu ca. 3 kN/s (abgeleitet aus den aufgezeichneten Zylinderkraft-Zeit-Beziehungen; Geschwindigkeitsangabe für Wegreglung in dieser Form unüblich) angegeben werden.

Insgesamt ist die aufgebrachte Beanspruchung als kurzzeitige, quasi-statische Belastung aufzufassen.

Während der Inaugenscheinnahme und der Rissbreitenmessung (Verweildauer ca. 30 min je Laststufe) blieb der Zylinderweg infolge der Wegsteuerung konstant, wodurch die Last während der Haltezeit infolge Spannungsrelaxation des Betons (Stahlrelaxation vernachlässigbar) geringfügig ( $< 1\%$ ) abfiel.

Nach Abschluss der letzten Laststufe wurde der Versuchskörper vollständig entlastet.

### 3.6.4 Rissbreitenmessung

#### 3.6.4.1 Allgemeines

Der Rissbreitenmessung als Grundlage für die in dieser Arbeit durchgeführten systematischen Untersuchungen ist besonderes Augenmerk zuzumessen. Die im Abschnitt 2.6.4 beschriebenen praxisüblichen Methoden zur Messung der Rissbreite auf der Bauteiloberfläche (z. B. Vergleichsmaßstab) wurden vor dem Hintergrund erwartbarer Messtoleranzen bis 0,05 mm als zu unpräzise eingestuft und infolgedessen verworfen. Im vorliegenden Fall wurden zur Aufnahme und Vermessung der Oberflächenrissbreiten ein sog. Rissmikroskop (Digitalmikroskop) verwendet (s. hierzu auch Schäfer 2016). Mittels dessen wurden zunächst stark vergrößerte Bilder (ca. 84-fache Vergrößerung) der Risse in hoher Auflösung an definierten Stellen des Versuchskörpers aufgenommen und im Anschluss mit Hilfe der Messsoftware Metric PE Plus, Version 9.10) am Standbild vermessen. Die in diesem Zusammenhang durchgeführten linearen Abstandsmessungen zwischen den Rissufern basieren auf dem optischen Messprinzip der „Pixelzählung“. Im Vergleich zu üblichen Risslupen oder Risslinealen kann mit Hilfe dieser Messmethode eine wesentlich höhere Messgenauigkeit erreicht werden, die im vorliegenden Fall in etwa auf die Größe eines Pixels (ca. 2  $\mu\text{m}$ , s. auch Schäfer 2016) beschränkt ist. Tatsächlich hängt das Ergebnis der Messung wesentlich aber auch von der Bildqualität (insbesondere von der Helligkeit der Aufnahme und der Farbverteilung einzelner Pixel) und der Sorgfalt des Messenden ab, sodass die o. g. Messgenauigkeit nur als Anhaltswert zu verstehen ist. Auf Grundlage im Vorfeld durchgeführter Kalibriermessungen kann die Messgenauigkeit im vorliegenden Fall in den Bandbreiten von ca. 0,002–0,006 mm abgeschätzt werden (und ist damit ca. 10-fach feiner als bei Verwendung konventioneller Messmethoden). Nach Eckfeldt 2003 sind bei dieser Messmethode jedoch sehr kleine Rissbreiten insgesamt als problematisch anzusehen, da dort der Rissbereich und die Umgebung im „*Subpixelbereich*“ verschmelzen und damit die Rissöffnung nicht mehr eindeutig lokalisierbar ist.

Neben der weitaus höheren Messgenauigkeit im Vergleich zu konventionellen Methoden ist es darüber hinaus jederzeit möglich, dass die gespeicherte Bilddatei zu einem

### 3 Experimentelle Untersuchungen

---

späteren Zeitpunkt neu aufgerufen werden kann. Dies dient insbesondere der Fehlerminimierung, da im Zuge der Auswertung etwaig auftretende Unstimmigkeiten der Messergebnisse umgehend überprüft werden können.

Nachfolgend sind die Risskamera sowie ein damit aufgenommenes (stark vergrößertes) Bild eines Risses dargestellt.

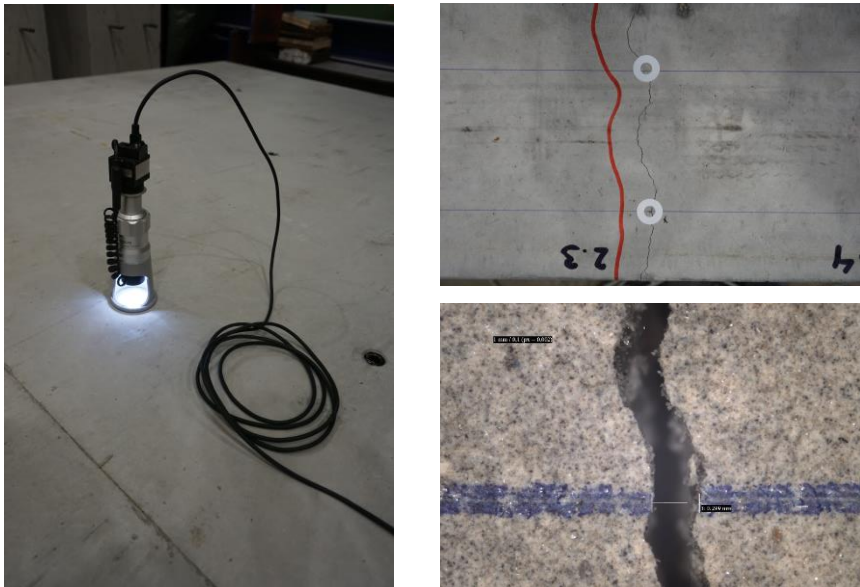


Abb. 3-10: Risskamera und Aufnahme eines Risses (links: Übersichtsbild, rechts oben: Detailaufnahme eines Risses, rechts unten: Riss stark vergrößert, Rissbreite ca. 0,30 mm)

#### 3.6.4.2 Festlegungen zur Rissbreitenmessung

Durch die Möglichkeit der hochpräzisen Vermessung der Rissbereiche galt es vorab, einige Randbedingungen festzulegen, um eine systematische und zielgerichtete Auswertung sicherzustellen, ohne dabei jedoch mathematische Genauigkeiten vorzutäuschen, die vor dem Hintergrund der vorliegenden Randbedingungen nicht einzuhalten sind.

Zunächst musste definiert werden, wie und an welcher Stelle die Rissbreite zu messen ist. Diese Fragestellung wurde bereits in Abschnitt 2.7 diskutiert und wird nachfolgend im notwendigen Umfang nochmals aufgegriffen.

In DBV 2016 heißt es diesbezüglich: „Als Rissbreite  $w_{\text{vorh}}$  wird der orthogonal zum Rissverlauf gemessene Abstand der Rissufer auf der Bauteiloberfläche bezeichnet.“ Diese Wahrnehmung ist möglicherweise dem praxisüblichen Messverfahren (z. B. Vergleichsmaßstab) geschuldet.

In Anbetracht der Belastungsart konnte davon ausgegangen werden, dass sich Risse bevorzugt rechtwinklig zur Bewehrungsrichtung in Form von Trennrissen einstellen. Tatsächlich zeigt es sich jedoch, dass der Rissverlauf stetigen Richtungsänderungen unterworfen ist. Dies wurde bereits in Schäfer 2016 beobachtet und thematisiert.



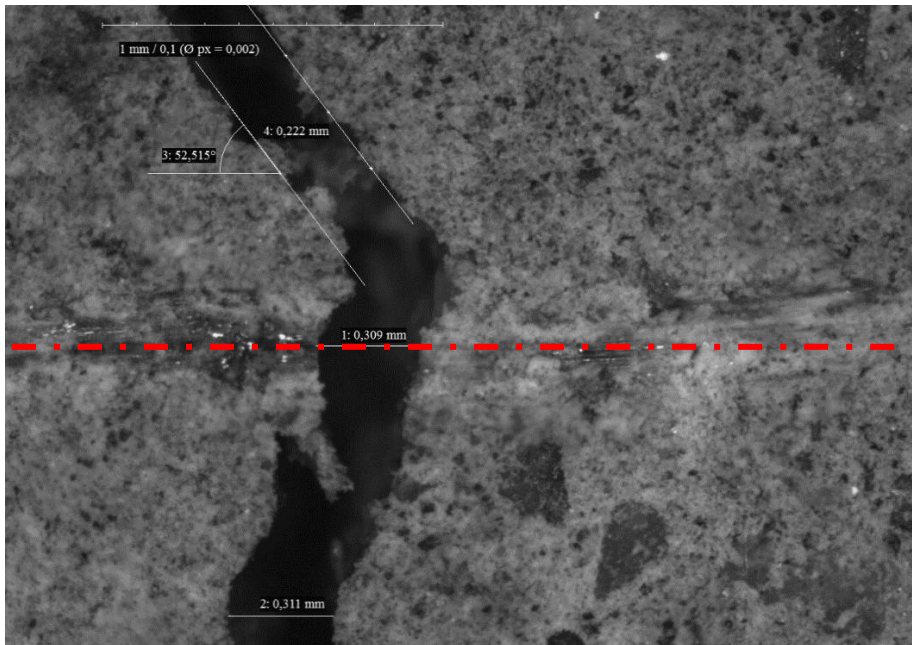


Abb. 3-11: Rissaufnahme und Rissbreitenmessung mit verschiedenen Messrichtungen aus Schäfer 2016 (die Bewehrungsachse ist mittels Strich-Punkt-Linie gekennzeichnet)

Anhand obiger Abb. 3-11 aus Schäfer 2016 ist zu erkennen, dass die Rissbreite in verschiedenen Messrichtungen, nämlich in Richtung der Bewehrung (s. Messungen (1) und (2) in Abb. 3-11; hier gleichbedeutend mit „in Lastrichtung“) und orthogonal zu den Rissufer (Messung (4) in Abb. 3-11) aufgenommen werden kann. Die Einzelwerte für verschiedene Messrichtungen unterscheiden sich deutlich. Während die Messungen (1) und (2) Rissbreiten identischer Größenordnung (ca. 0,310 mm) aufweisen, beträgt die Breite orthogonal zur Rissachse des ca. unter 52,5° zur Bewehrungsachse verlaufenden Risses nur ca. 0,220 mm.

Im Rahmen dieser Bewertung ist jedoch unbedingt auch einzubeziehen, dass die Rissbreitenmessung an unterschiedlichen Stellen entlang des Rissverlaufs vorgenommen wurde. (Geringfügige) Rissbreitenunterschiede stellen sich vor diesem Hintergrund zwangsläufig ein.

Im vorliegenden Fall stellt es sich so dar, dass die Versuchskörper in Bauteillängsachse (parallel zur Längsbewehrung) belastet wurden. Die Verschiebungsrichtung der Rissufer und die Dehnungsrichtung der Bewehrung sind daher gleichgerichtet. Vor diesem Hintergrund wurden die Rissbreiten im Zuge der weiteren Auswertung wie in Schäfer 2016 stets in Belastungsrichtung gemessen (s. auch Abb. 3-10). Würde die Rissbreite stattdessen wie in DBV 2016 orthogonal zum Rissufer gemessen werden, so ergäben sich stark unterschiedliche (kleinere) Rissbreiten.

Weiterhin wurden Auswahlkriterien festgelegt, um etwaig „auffällige“ Risse (z. B. hinsichtlich Rissverlauf, Rissgeometrie, Flankenbruch) von der weiteren Auswertung auszuschließen. In diesem Zusammenhang enthält DBV 2016 konkrete Hinweise.

### 3 Experimentelle Untersuchungen

Hinsichtlich des Rissverlaufs konnte beobachtet werden, dass sich bereits vorhandene Trennrisse bei zunehmender Beanspruchung „verästelten“ (vgl. Abb. 3-12) und die Messachsen (s. Abschnitt 3.6.4.3, Abb. 3-13) an mehreren Stellen kreuzten. In Anbetracht dessen drängte sich die Fragestellung auf, ob die Summe der Einzelrissbreiten jeweils der „eigentlichen“ Rissbreite an der betrachteten Stelle entspricht. Hier wurde so verfahren, dass solche Teilrisse, welche die Messachse kreuzen, entsprechend gemessen und zu einer fiktiven Rissbreite aufsummiert wurden.

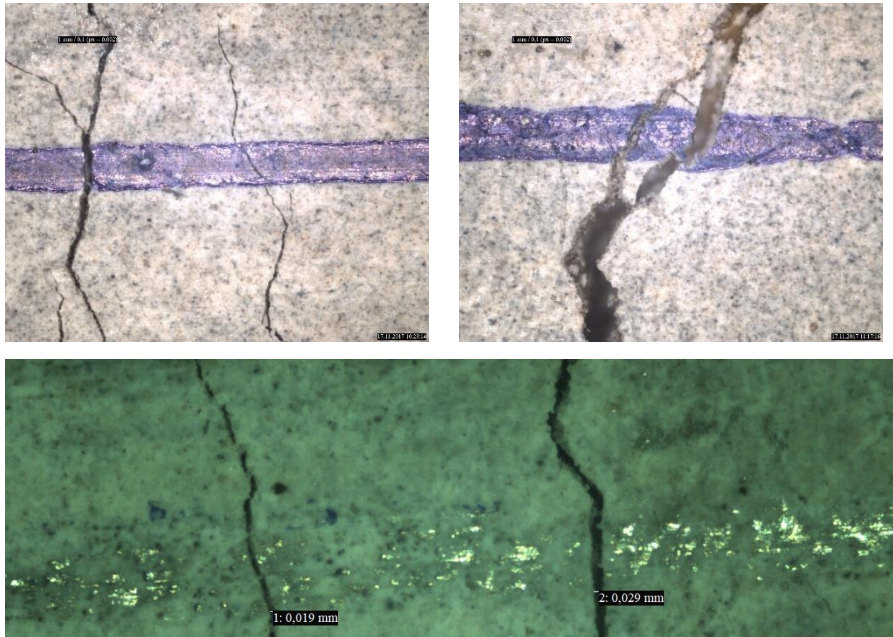


Abb. 3-12: Teilrissbildung im Bereich der Messachse (links) und beschädigtes Rissufer durch Ausbruch (rechts), Teilrissbreiten eines Trennrisses (unten)

Es wurde außerdem festgelegt, dass Risse mit Rissbreiten kleiner als 0,05 mm nicht in die Auswertung einzubeziehen sind. Dies hängt damit zusammen, dass solch kleine Rissbreiten nicht mehr systematisch erfasst werden können, da die Rissflanken nicht exakt lokalisierbar sind (vgl. auch Eckfeldt 2003 und DBV 2019). Weiterhin sind Rissbreiten dieser Größenordnung für die Baupraxis ohne wesentliche Bedeutung.

Diejenigen Risse aus Laststufe 1, welche den Stirnseiten des Bauteils in Längsrichtung jeweils am nächsten lagen (und jeder weitere noch näher zu der Stirnseite orientierte Riss aus den folgenden Laststufen), wurden nicht ausgewertet. Damit sollte pauschal eine Störzone im Lasteinleitungsbereich der Zugstäbe berücksichtigt werden, innerhalb derer von einer ungleichmäßigen Spannungsverteilung ausgegangen werden konnte. Diese pauschal angenommene Störzone erstreckte sich beidseitig auf ca. 30 cm.

### 3.6.4.3 Praktisches Vorgehen

Zur Sicherstellung systematischer Rissbreitenmessungen wurden die Messachsen auf den Bauteiloberflächen und -seitenflächen wie folgt definiert.



Messachsen a) und b)  
Bauteiloberseite

Messachsen 1) bis 4)  
Bauteilseitenfläche

Abb. 3-13: Darstellung der Messachsen (oben: Messachsen a) und b), Oberseite; unten: Messachsen 1) bis 4), Seitenfläche)

Die Messachsen fielen jeweils mit den Längsachsen der Bewehrungsstäbe zusammen.

Rissbreitenmessungen auf den Bauteilseitenflächen (s. Abb. 3-13, unten) wurden nicht für alle Versuchskörper nach Tab. 3-2 durchgeführt, sondern lediglich „exemplarisch“ vorgenommen, d. h. es wurden auch nicht alle über die Versuchskörperlänge vorkommenden Risse erfasst. Die Beobachtungsbereiche (ein ca. 60 cm breiter Ausschnitt über die gesamte Bauteilhöhe) für die betrachteten Versuchskörper wurden jedoch jeweils annähernd gleich gewählt.

Die Messachsen wurden vor Versuchsbeginn eingemessen und dauerhaft markiert. Nach Erreichen einer Laststufe wurde das vorgefundene Rissbild farbig skizziert, nummeriert und fotografisch dokumentiert. Die Kreuzungspunkte der Trennrisse mit

den Messachsen stellen die Messstellen dar. Diese wurden zur besseren Sichtbarkeit mit Positionsmarkierungen versehen (s. Abb. 3-10). Außerhalb der zuvor in Abb. 3-13 dargestellten Messachsen wurden keine weiteren Risse vermessen.

#### **3.6.4.4 Fehlerquellen und deren Vermeidung**

Die Rissbreitenmessung mittels optischer Verfahren setzt ein sorgfältiges Arbeiten voraus. Vorliegend wurde dies in zwei Arbeitsschritten, nämlich die fotografische Aufnahme des Risses und die softwaregestützte Vermessung des Risses, ausgeführt. Die Qualität des Messergebnisses ist demnach von zahlreichen Faktoren abhängig.

Die fotografische Aufnahme ist hochauflösend und mit ausreichendem Kontrast zu erstellen. Damit wird sichergestellt, dass die Rissflanken präzise lokalisiert werden können. Andernfalls werden Ungenauigkeiten generiert, die eine systematische Auswertung verfälschen. Außerdem muss die auf der Bauteiloberfläche angezeichnete Messachse erkennbar sein, um exakt in Belastungsrichtung (Bewehrungsrichtung) messen zu können.

Im Zuge der softwareunterstützten (Abstands-) Messung ist sicherzustellen, dass der betrachtete Riss über mehrere Laststufen jeweils an der identischen Stelle vermessen wird. Dies wird individuell durch den Messenden beeinflusst.

Zur Größe des mit dem hier gewählten Verfahren zusammenhängenden Messfehlers kann vorliegend keine Aussage getroffen werden.

#### **3.6.5 Rissabstandsmessung**

Die Vermessung des Rissabstandes erfolgte mit einem Maßband am vollständig entlasteten Versuchskörper nach Versuchsende. Es kann in diesem Zusammenhang eine Messgenauigkeit von ca.  $\pm 1$  mm unterstellt werden.

Es wurden die Rissabstände auf der Bauteiloberfläche entlang der Messachsen a und b und auf der Seitenfläche entlang der Messachse 2 aufgenommen. Hierbei wurden die Stirnseiten an den Versuchskörperenden nicht als Rissufer aufgefasst. Auch für die Rissabstandsmessungen wurde eine Störzone berücksichtigt (vgl. Abschnitt 3.6.4.2).

## 3.7 Versuchsergebnisse

### 3.7.1 Versuchsbegleitende Materialprüfungen

Zur Einordnung und Bewertung der Versuchsergebnisse und auch im Hinblick auf spätere Versuchsnachrechnungen (Berücksichtigung von Ist-Festigkeiten) wurden begleitend zu den Bauteilversuchen die nachfolgend näher beschriebenen Materialprüfungen durchgeführt.

#### 3.7.1.1 Eigenschaften des Festbeton

Die Festbetonprüfungen wurden durch das Materialprüfamt (MPA) der Technischen Universität Kaiserslautern vorgenommen. Die zugehörigen Prüfergebnisse können dem Anhang A – Materialeigenschaften entnommen werden.

Die Ergebnisse der im Zuge der Versuchsdurchführung begleitenden Festbetonuntersuchungen der Betonfestigkeitsklassen C30/37 und C50/60 weisen keine übermäßigen Über- oder Unterfestigkeiten auf. Zur Sicherstellung der festgelegten Betondruckfestigkeit und zum Ausgleich unplanmäßiger Streuungen ist diesbezüglich grundsätzlich ein Vorhaltemaß vorzusehen, welches nach Grübl et al. 2001 so groß zu wählen ist, dass die Konformitätskriterien sicher erfüllt werden. In Grübl et al. 2001 wird für das Vorhaltemaß eine Bandbreite von 6 bis 12 N/mm<sup>2</sup> angegeben. Dies wurde im vorliegenden Fall berücksichtigt. Somit ist festzustellen, dass die Betondruckfestigkeiten am Versuchstag denjenigen der avisierten Betondruckfestigkeitsklassen C30/37 und C50/60 entsprechen.

Der ebenfalls versuchsbegleitend geprüfte E-Modul des Betons streut z. T. sehr stark und unterschreitet die in DIN EN 1992-1-1 angegebenen Rechenwerte nennenswert. Bei normalfesten Betonen (bis C50/60) wird der E-Modul hauptsächlich durch die Art der verwendeten Gesteinskörnung beeinflusst. Im vorliegenden Fall wurde ein Rheinkies (Rundkorn, Größtkorndurchmesser  $d_g = 16$  mm) verwendet. Weiterführende Untersuchungen zur Aufklärung der Abweichungen des Prüfwertes von den Rechenwerten nach DIN EN 1992-1-1 wurden nicht vorgenommen.

Die (mittlere) zentrische Betonzugfestigkeit  $f_{ct}$  wurde indirekt über die Spaltzugfestigkeit  $f_{ct,sp}$  an drei Zylindern nach DIN EN 12390-6 geprüft und gemäß der nachstehenden Näherungsformel aus DIN EN 1992-1-1 umgerechnet:

$$f_{ct} = 0,9 \cdot f_{ct,sp} \quad \text{Gl. 3-1}$$

#### 3.7.1.2 Eigenschaften des Betonstahls

Die Werkstoffeigenschaften der Bewehrung wurden durch das Materialprüfamt (MPA) der Technischen Universität Braunschweig ermittelt. In diesem Zusammenhang wurden der Elastizitätsmodul  $E_s$ , die Streckgrenze  $R_{p0,2}$  (als 0,2%-Dehngrenze) sowie die bezogene Rippenfläche  $f_R$  als Mittelwert an je drei Proben geprüft.

Die Prüfung der mechanischen Eigenschaften erfolgte gemäß den übergebenen Prüfprotokollen in Anlehnung an DIN EN ISO 15360-1.

Die zugehörigen Prüfergebnisse und -protokolle können dem Anhang A entnommen werden.

#### **3.7.2 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen**

Im vorliegenden Abschnitt werden die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zum Rissgeschehen (Rissentwicklung in Abschnitt 3.7.2.1, Oberflächenrissbreite in 3.7.2.2 und Rissabstand in Abschnitt 3.6.5) vorgestellt.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen im Hinblick auf die Rissbreiten- und Rissabstandsmessungen werden hier zunächst als Rohwerte, d. h. ohne eine vorangehende statistische Aufbereitung dargestellt (die Ergebnisse der statistischen Auswertung sind Gegenstand des Abschnitts 3.8). Diese Darstellungsform ermöglicht eine dezidierte Betrachtung der angetroffenen Bandbreiten der Versuchsergebnisse. Durch die Entwicklung empirischer Dichtefunktionen unter Zugrundelegung der Rohwerte kann mit optischer Wertung auf eine konkrete Verteilung der Versuchswerte (z. B. Normalverteilung) geschlossen werden. Die Festlegung eines konkreten Verteilungsansatzes der Rohwerte bildet die Ausgangsbasis für die dann folgende statistische Auswertung der Versuchsergebnisse (s. hierzu Abschnitt 3.8.2.1).

Im Abschnitt 3.7.2.4 werden die Versuchsergebnisse insgesamt zusammenfassend beschrieben und im Hinblick auf diverse Einflussparameter (z. B. Stabdurchmesser, Betondruckfestigkeitsklasse, Oberflächenbewehrung) beleuchtet.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit können die Untersuchungsergebnisse nachfolgend lediglich auszugsweise dargestellt werden. Einzelwerte der Rissbreiten- und Rissabstandsmessungen können aber den jeweiligen Anhängen (Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung, Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung) entnommen werden. Dort werden jeweils die Einzelmesswerte, die Punktwolken-diagramme und empirischen Dichtefunktionen sowie die zugehörigen statistischen Auswertungen je betrachtetem Stabdurchmesser und Serie angegeben. Eine Unterscheidung nach einzelnen Versuchskörpern einer Serie wird nicht vorgenommen. Bei den abgedruckten Einzelergebnissen handelt es sich um bereinigte Messwerte, d. h. die Werte genügen den in den Abschnitten 3.6.4 und 3.6.5 formulierten Anforderungen und Werte aus Störbereichen sind nicht enthalten.

Mit den umfangreichen Anhängen werden die Ergebnisse transparent zusammengefasst und können zur Erweiterung bestehender Datenbanken herangezogen werden.

##### **3.7.2.1 Beobachtungen zur Rissentwicklung**

Unter der Begrifflichkeit „Rissentwicklung“ werden hier die Rissbildung auf Erstriss-niveau sowie die im Zuge der weiteren Belastung eintretende sukzessive Rissbildung (bis zum Erreichen des abgeschlossenen Rissbildes) verstanden. Die Untersuchungen zielten darauf ab, Einflussparameter auf die Rissbildung zu identifizieren und belegbare Annahmen für die (effektive) Betonzugfestigkeit im Zuge der Nachrechnung der Versuchsergebnisse (Rissbreite und Rissabstand, vgl. Abschnitt 4) ableiten zu können.

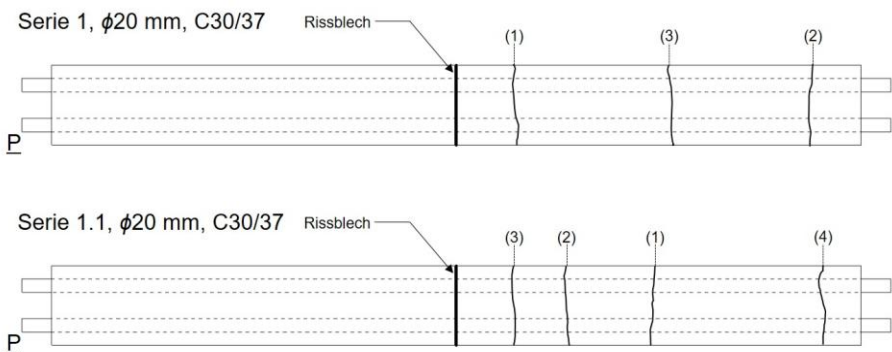
Die hier beschriebenen Untersuchungen beziehen sich ausschließlich auf die Bauteiloberseite (vgl. Abb. 3-13).

Im Zuge der Lastaufbringung innerhalb der ersten Laststufe (planmäßige Stahlspannung der Hauptbewehrung bis  $80 \text{ N/mm}^2$ ) wurde die augenscheinlich erkennbare Auftrittsreihenfolge der Rissbildungen auf Erstrissniveau exemplarisch an insgesamt 14 Versuchskörpern für die Stabdurchmesser  $\phi 20 \text{ mm}$ ,  $\phi 28 \text{ mm}$ ,  $\phi 40 \text{ mm}$  dokumentiert (s. Abb. 3-14). Zusätzlich wurde die zugehörige Zugkraft, welche augenscheinlich zum Erstriss führte, festgehalten. Zur besseren Fokussierung des Beobachtungsbereichs wurde dieser auf die halbe Versuchskörperlänge reduziert (d. h. vom mittig eingelegten Rissblech bis zum Versuchskörperende, s. Abb. 3-14).

Mit Belastungsbeginn zeigte sich, dass zunächst erwartungsgemäß eine Rissaufweitung des schon vor Versuchsbeginn bereits vorhandenen Risses im Bereich der Querschnittsschwächung in Bauteilmitte (infolge eingepprägter Schwindspannungen, Rissbreite zum Zeitpunkt des Belastungsbeginns  $\ll 0,05 \text{ mm}$ ) eintrat. Im weiteren Verlauf und mit zunehmender Belastung auf Erstrissniveau konnten dann weitere, zufällig auftretende Rissbildungen (s. Abb. 3-14) beobachtet werden. Für die ab dann weiter fortschreitende Rissbildung konnte keine Systematik, zum Beispiel dass Risse überwiegend zunächst in den Randbereichen auftreten und sich dann erst im Bereich der Bauteilmitte konzentrieren (oder umgekehrt), festgestellt werden. Vielmehr traten die Risse in unsystematischer Reihenfolge auf. Es liegt somit nahe, dass die Reihenfolge der Rissentstehung auf Erstrissniveau wesentlich durch die Streuung der Betonzugfestigkeit über die Versuchskörperlänge beeinflusst wird.

Ebenfalls nicht festgestellt werden konnte, dass den im Zuge der experimentellen Untersuchung betrachteten Einflussparametern (z. B. Stabdurchmesser, Querschnittsabmessungen, Bewehrungsanordnung, Betondruckfestigkeitsklasse) ein erkennbarer Einfluss auf die Anzahl und die Reihenfolge der Rissentstehung zuzumessen ist.

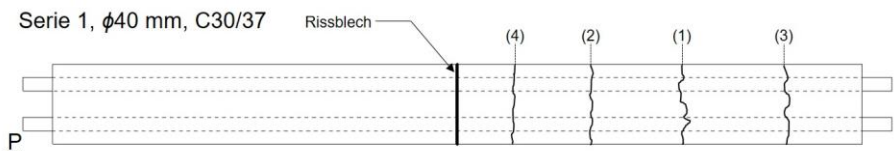
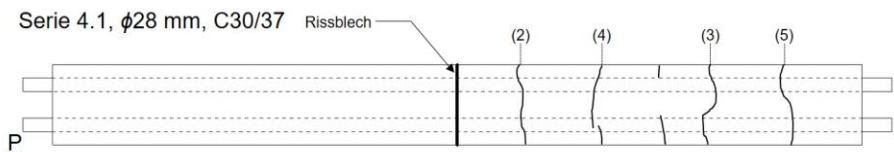
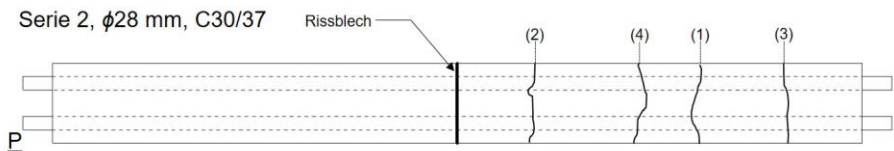
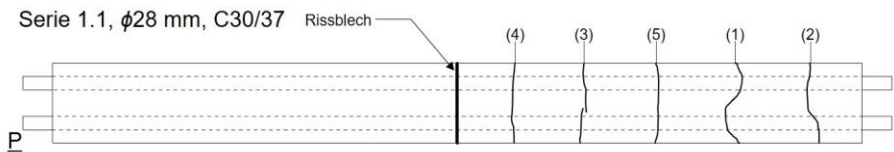
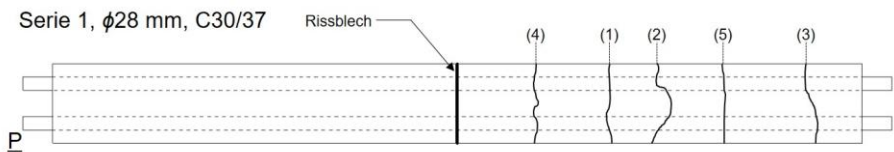
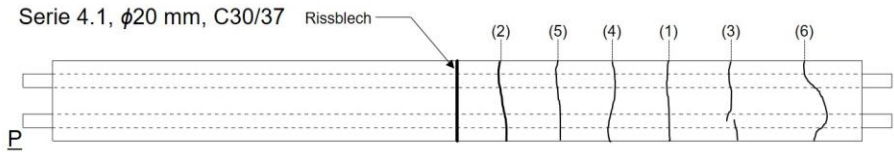
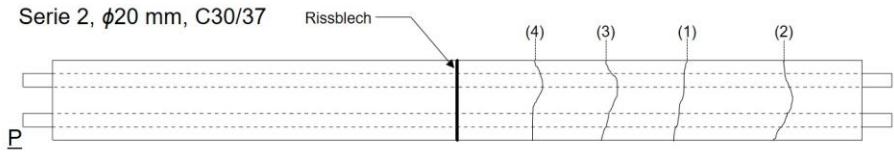
Nachfolgend sind exemplarische Skizzen zur Reihenfolge der Rissentstehung dargestellt. Betrachtet wird dabei jeweils die Versuchskörperoberseite (vgl. Abb. 3-13). Die Nummerierungen der Risse entsprechen dabei ihrer Eintrittsreihenfolge. Die Position der Hohlkolbenpressen ist mit P gekennzeichnet. Die Skizzen sind entsprechend beschriftet, sodass diese weitestgehend selbsterklärend sind.





### 3 Experimentelle Untersuchungen

---





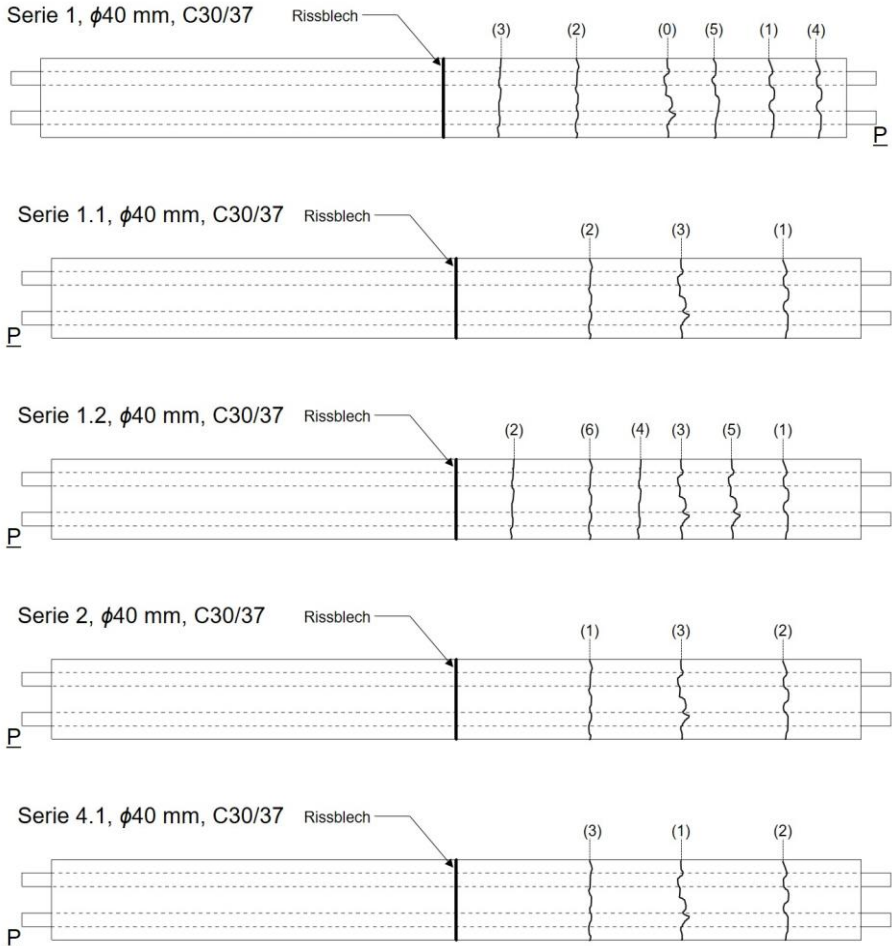


Abb. 3-14: Schematische Darstellungen zur Reihenfolge der Rissentstehung auf der Bauteiloberfläche bis zum Erreichen einer Stahlspannung  $\sigma_s = 80 \text{ N/mm}^2$  („Erstrissniveau“)

Die in Abb. 3-14 dargestellten Rissbilder zeigen Primärrisse (Trennrisse infolge zentraler Zugbeanspruchung). Sekundärrisse traten überwiegend nur auf der Bauteilseitenfläche (hier nicht dargestellt) auf.

Exemplarisch wurde im Zuge der Untersuchungen zum Rissgeschehen außerdem überprüft, auf welchem Lastniveau ( $N_{cr, \text{test}}$ ) augenscheinlich die Erstrissbildung (als streuungsbedingt kleinste Einwirkung bis zur Rissbildung außerhalb des induzierten Erstrisses durch das Rissblech) festzustellen war und ob diese mit der mittleren rechnerischen Risschnittgröße  $N_{cr, \text{cal}, m}$  unter Berücksichtigung der zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung vorhandenen mittleren Festbetoneigenschaften korrelieren. Diese Untersuchungen zielten im Detail darauf ab, die tatsächlich für das Bauteil zugrundeliegende Zugfestigkeit  $f_{ct, \text{eff}, is}$  für die nachgeschalteten Vergleichsrechnungen zu ermitteln, unabhängig von etwaigen Einflüssen infolge Schwinden der Versuchskörper

(in Rehm et al. 1976 heißt es diesbezüglich, dass sich die infolge der vorhandenen Bewehrung behinderte Schwinddehnung ggf. auf die Entwicklung der zentrischen Zugfestigkeit auswirkt). Weiterhin sollten mit Hilfe der so ermittelten Zugfestigkeit  $f_{ct,eff,is}$  zudem auch Effekte aus der indirekten Prüfung der Zugfestigkeit  $f_{ct,test}$  (über Spaltzugfestigkeit  $f_{ct,sp}$ ) ausgeschaltet werden. Zudem ist in diesem Zusammenhang die Korrelation zwischen Bauteilzugfestigkeit und an Normprobekörpern ermittelten Betonzugfestigkeiten vage (nach Leonhardt 1978 weicht die Betonzugfestigkeit wesentlich von der an Normprobekörpern ermittelten Zugfestigkeit ab, vgl. Abschnitt 2.2.3.1).

Die Feststellungen zur Risschnittgröße  $N_{cr,test}$  sind stark von der visuellen Wahrnehmung des Beobachters abhängig, sodass eine gewisse Fehlerhaftigkeit unterstellt werden muss. Die Risschnittgröße  $N_{cr,test}$  ist vor diesem Hintergrund damit lediglich als „orientierender“ Messwert aufzufassen. Ähnlich wird diesbezüglich auch in Eckfeldt 2009 berichtet.

Die rechnerische Risschnittgröße  $N_{cr,cal,m}$  wurde hier wie folgt bestimmt:

$$N_{cr,cal,m} = f_{ct} \cdot \left[ A_{ci} + \left( \frac{E_s}{E_c} - 1 \right) \cdot A_s \right] \quad \text{Gl. 3-2}$$

|     |          |  |
|-----|----------|--|
| mit | $f_{ct}$ | mittlere zentrische Betonzugfestigkeit gemäß Gl. 3-3 |
|     | $A_{ci}$ | ideelle Betonquerschnittsfläche                      |
|     | $E_s$    | E-Modul der Betonstahlbewehrung nach Anhang A        |
|     | $E_c$    | mittlerer E-Modul des Betons nach Anhang A           |
|     | $A_s$    | Querschnitt der Betonstahlbewehrung (Hauptbewehrung) |

Eine Reduktion des Betonquerschnitts durch eine eingelegte Querbewehrung (Serie 1, 1.1, 1.2) und Oberflächenbewehrung (Serie 4.1) wurde für die Berechnung der Risschnittgröße  $N_{cr,cal,m}$  (als freiwerdende Spannungsergebnisse) im Rahmen der Ermittlung von  $A_{ci}$  berücksichtigt. Es wurde hierzu die Nettobetonfläche an jener Querschnittsstelle in Ansatz gebracht, an der die Betonfläche durch die eingelegte Bewehrung größtmöglich reduziert wird. Für eine gemischte Bewehrung (bestehend aus Haupt- und Oberflächenbewehrung) wurde ein gewichteter E-Modul  $E_s$  betrachtet.

Nachfolgend sind die bezeichneten Größen  $N_{cr,test}$  und  $N_{cr,cal,m}$  tabellarisch gegenübergestellt. Zusätzlich ist die gerundete, prozentuale Abweichung  $\Delta$  der Versuchsbeobachtung  $N_{cr,test}$  vom Rechenwert  $N_{cr,cal,m}$  angegeben. Negative Vorzeichen weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass der Versuchswert  $N_{cr,test}$ , den Rechenwert  $N_{cr,cal,m}$  unterschreitet. In den beiden äußeren rechten Spalten sind die aus der Risschnittgröße abgeleitete und damit mutmaßlich auch im Bauteil vorliegende Betonzugfestigkeit  $f_{ct,eff,is}$  sowie die an Normprobekörpern aus der Spaltzugfestigkeit bestimmte Zugfestigkeit  $f_{ct,test}$  (gem. Gl. 3-1) gegenübergestellt.

Tab. 3-4: Gegenüberstellung von  $N_{cr,cal,m}$  und  $N_{cr,test}$  sowie von  $f_{ct,eff,is}$  und  $f_{ct,test}$ 

| $\phi$<br>[mm] | Serie | $N_{cr,cal,m}$<br>[kN] | $N_{cr,test}$<br>[kN] | $\Delta$ | $f_{ct,eff,is}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{ct,test}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|----------------|-------|------------------------|-----------------------|----------|---|---------------------------------------|
| 20             | 1     | 146                    | 150                   | + 3%     | 2,9                                     | 3,0                                   |
|                | 1.1   | 145                    | 110                   | - 25%    | 2,3                                     | 3,2                                   |
|                | 2     | 153                    | 160                   | + 5%     | 2,8                                     | 2,8                                   |
|                | 4.1   | 142                    | 150                   | + 6%     | 3,1                                     | 3,1                                   |
| 28             | 1     | 247                    | 245                   | - 1%     | 2,9                                     | 3,1                                   |
|                | 1.1   | 248                    | 340                   | + 37%    | 3,9                                     | 3,1                                   |
|                | 2     | 279                    | 285                   | + 2%     | 2,8                                     | 2,9                                   |
|                | 4.1   | 182                    | 340                   | + 86%    | 4,0                                     | 2,3                                   |
| 40             | 1     | 418                    | 260                   | - 62%    | 1,6                                     | 2,7                                   |
|                | 1.1   | 412                    | 700                   | + 69%    | 4,3                                     | 2,7                                   |
|                | 1.2   | 468                    | (100)                 | - 78%    | 0,6                                     | 3,1                                   |
|                | 2     | 456                    | 710                   | + 55%    | 3,8                                     | 2,6                                   |
|                | 4.1   | 431                    | 600                   | + 39%    | 3,8                                     | 2,9                                   |

Anhand der voranstehenden Tabelle ist zu erkennen, dass die Abweichung  $\Delta$  der Versuchsbeobachtung  $N_{cr,test}$  (als Einzelwert für die erste Rissbildung) zur rechnerischen (mittleren) Risschnittgröße  $N_{cr,cal,m}$  Bandbreiten zwischen - 78 % bis + 86 % für die betrachteten Versuchskörper annehmen. Fallweise konnten jedoch auch sehr gute Übereinstimmungen ( $\pm 5$  %) angetroffen werden. An dieser Stelle ist der Streuung der In-situ-Zugfestigkeit ein wesentlicher Einfluss auf die festgestellten Bandbreiten zuzumessen.

Wesentliche Unterschreitungen der rechnerischen mittleren Risschnittgröße  $N_{cr,cal,m}$  im Versuch (z. B. Serie 1.2 für  $\phi 40$  mm) sind ggf. auf lokale Minima der Betonzugfestigkeit, auf lokale Fehlstellen des Betongefüges und die damit einhergehende sehr geringe Zugfestigkeit oder bereits auf früh einsetzende Mikrorissbildungen zurückzuführen, die sich erst im Zuge der weiteren Belastung zu Trennrissen ausbildeten. In Eckfeldt 2009 wird diese Feststellung wie folgt geteilt: „Die aus den Rückrechnungen der Erstrisskräfte ermittelten Betonzugspannungen in der Rissprozesszone lagen

*deutlich unter dem Niveau der Zugfestigkeiten aus den Spaltzugversuchen. Die Differenz kann auf Vorverformungen aus Schwinden zurückgeführt werden.“*

Deutliche Überschreitungen der rechnerischen mittleren Risschnittgröße  $N_{cr,cal,m}$  (z. B. Serie 4.1 für  $\phi 28$  mm) im Versuch sind womöglich damit zu erklären, dass die Rissbildung tatsächlich deutlich früher einsetzte, dies aber visuell nicht erfasst werden konnte.

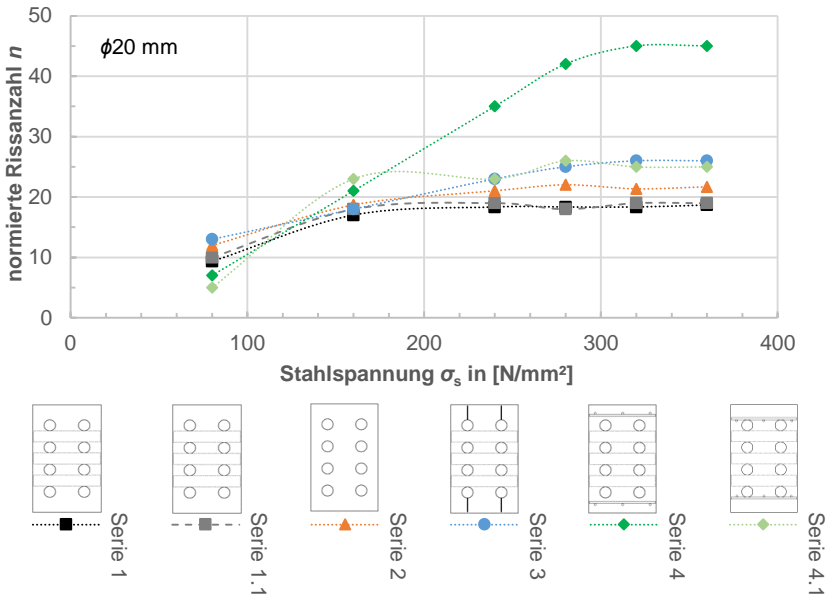
Insgesamt ist unter Berücksichtigung des Vorgenannten damit festzustellen, dass eine Nachrechnung der Erstrisschnittgröße und daraus gewonnene Rückschlüsse auf die tatsächlich im Bauteil vorhandene Betonzugfestigkeit  $f_{ct,eff,IS}$  nicht zielführend möglich sind. Es werden deshalb im weiteren Verlauf dieser Arbeit trotz der möglichen Vorbehalte jeweils die an Normprobekörpern ermittelten Festbetoneigenschaften berücksichtigt.

Im Bezug auf die bei Erstriss vorliegenden (rechnerische) Stahlspannung ist festzustellen, dass diese für alle betrachteten Stabdurchmesser zu ca.  $\sigma_s = 40\text{--}60$  N/mm<sup>2</sup> angegeben werden kann.

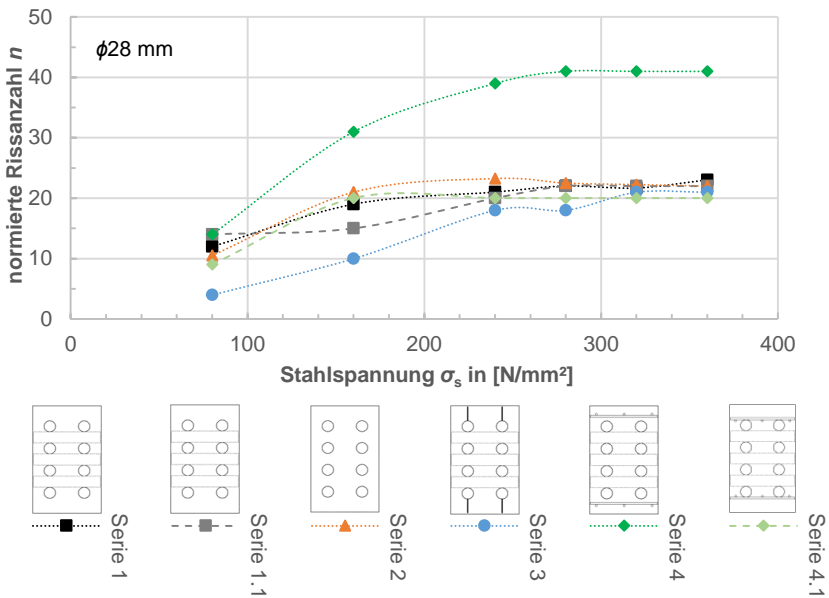
Zur weiteren Veranschaulichung der Rissentwicklung und zur Aufklärung der Frage, ob zum Zeitpunkt der Rissabstandsmessung (jeweils nach Beendigung der letzten Laststufe mit einer zugehörigen maximale Stahlspannung  $\sigma_s = 360$  N/mm<sup>2</sup> für  $\phi 20$  mm,  $\phi 28$  mm sowie  $\sigma_s = 280$  N/mm<sup>2</sup> für  $\phi 40$  mm) das abgeschlossene Rissbild vorlag, wird nachfolgend die lastabhängige Entwicklung der Rissanzahl  $n$  auf der Bauteiloberfläche betrachtet. Die Beantwortung obiger Fragestellung ist insbesondere wichtig, um im Rahmen der Nachrechnung der Versuchsergebnisse zutreffende Annahmen zugrunde legen zu können.

Im Hinblick auf die Rissentwicklung wird die Rissanzahl  $n$  jeweils über den einzelnen Laststufen aufgetragen. Die Rissanzahl  $n$  entspricht dabei der gemittelten Anzahl der im Rahmen der Versuchsdurchführung je Versuchskörper angetroffenen Risse (d. h. Rissanzahl auf einen Versuchskörper normiert). Durch diese Vereinfachung können die Ergebnisse verschiedener Serien mit unterschiedlichen Probekörperanzahlen miteinander verglichen werden.

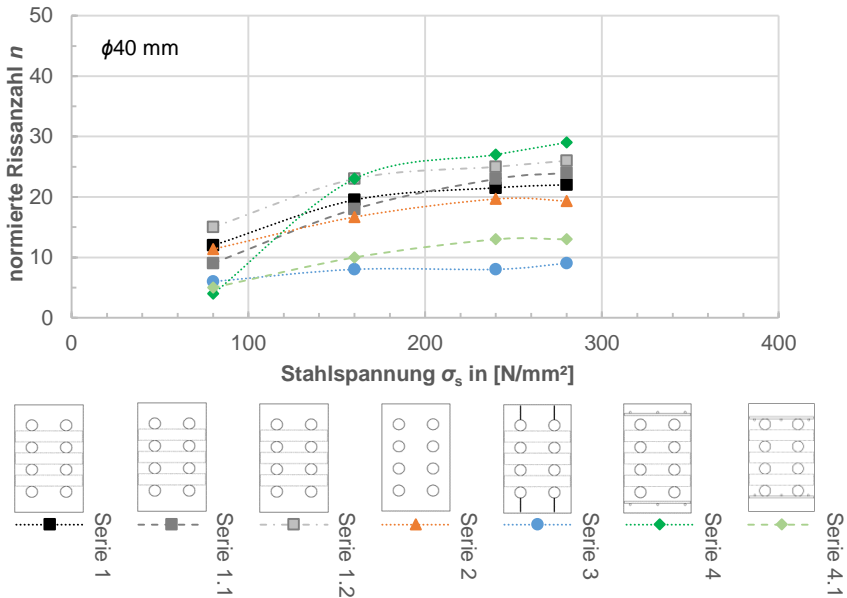
Teilweise traten noch weitere Risse auf, die jedoch nicht den in Abschnitt 3.6.4 formulierten Anforderungen (z. B. scharf begrenzte und unbeschädigte Rissufer) genügten und die vor diesem Hintergrund verworfen wurden.



a) Rissentwicklung für Stabdurchmesser φ20 mm



b) Rissentwicklung für Stabdurchmesser φ28 mm



c) Rissentwicklung für Stabdurchmesser  $\phi 40 \text{ mm}$

Abb. 3-15: Anzahl der berücksichtigten Risse auf der Bauteiloberfläche je Laststufe, C30/37

Zunächst ist festzustellen, dass über das Erstrissniveau hinweg (für  $\phi 20 \text{ mm}$  ca.  $65 \text{ N/mm}^2$ , für  $\phi 28 \text{ mm}$  ca.  $60 \text{ N/mm}^2$  und für  $\phi 40 \text{ mm}$  ca.  $50 \text{ N/mm}^2$ , Stahlspannungen unter Zugrundelegung der zugehörigen Materialeigenschaften aus Tab. 3-4 abgeleitet, Erstrissniveau bis ca. 30 % über Stahlspannung im Erstriss) eine sukzessive Rissbildung einsetzt. Ab einem Stahlspannungsniveau von ca. 280–320  $\text{N/mm}^2$  (LS 4 bis LS 5) stellte es sich dann insgesamt so dar, dass für alle betrachteten Stabdurchmesser ( $\phi 20 \text{ mm}$ ,  $\phi 28 \text{ mm}$ ,  $\phi 40 \text{ mm}$ ) keine wesentliche Vergrößerung der Rissanzahl  $n$  beobachtet werden konnte.

Weiter ist der Einfluss der randnah angeordneten Oberflächenbewehrung (Serie 4,  $c_{v,\text{surf}} = 30 \text{ mm}$ ) anhand der Diagramme deutlich zu erkennen. Durch die Oberflächenbewehrung werden die Risse fein verteilt. Es konnten bei sonst identischen Randbedingungen wesentlich mehr Risse je Laststufe dokumentiert werden als in Versuchen ohne Oberflächenbewehrung.

Vor dem Hintergrund, dass Stahlspannungen bis  $360 \text{ N/mm}^2$  (bzw.  $280 \text{ N/mm}^2$ ) erreicht wurden und im Zuge dessen dokumentiert werden konnte, dass für die betrachteten Versuchskörper keine oder nur eine unwesentliche Steigerung der Rissanzahl  $n$  in den letzten Laststufen auftrat, kann unterstellt werden, dass zum Zeitpunkt der Rissabstandsmessung jeweils das abgeschlossene Rissbild vorlag.

Die voranstehenden Untersuchungen und die daraus abgeleiteten Feststellungen zur Rissentwicklung beziehen sich ausschließlich auf die Bauteiloberfläche der Versuchskörper. Diese können so nicht auf die Bauteilseitenflächen erweitert werden, da die

Rissbreiten in diesem Bereich lediglich „exemplarisch“ (d. h. ohne allgemein definierte Abmessungen des Beobachtungsbereichs) erfasst wurden und im Hinblick auf die Rissanzahl somit kein objektiver Vergleich möglich ist.

### 3.7.2.2 Ergebnisse der Rissbreitenmessung

Die Ergebnisse der Rissbreitenmessungen der Serien 1 (1.1 und 1.2), 2, 3 und 4 (4.1) für die Betondruckfestigkeitsklasse C30/37 werden nachfolgend als mittlere Rissbreite, aufgetragen über den zugehörigen Stahlspannungen  $\sigma_s$ , abgebildet. Insgesamt werden sowohl die Rissbreiten auf der Bauteiloberseite als auch auf der Seitenfläche der Versuchskörper (vgl. Abb. 3-13) berücksichtigt. Der jeweilige Beobachtungsbereich ist anhand der Diagrammbeschriftung erkenntlich. In der Auswertung und Darstellung wurde ein unterer Grenzwert der Rissbreite von 0,05 mm zugrunde gelegt. Kleinere Rissbreiten wurden gemäß den Ausführungen in Abschnitt 3.6.4 nicht berücksichtigt.

Es sei angemerkt, dass der hier betrachtete Mittelwert einen schlechten Schätzer zur Beschreibung der gesuchten statistischen Parameter (charakteristische Rissbreite als Fraktilwert) darstellt, da dieser durch etwaige Extremalwerte empfindlich beeinflusst wird. Um jedoch einen ersten Eindruck im Hinblick auf den Einfluss der versuchs-technisch variierten Parameter (z. B. Stabdurchmesser, Oberflächenbewehrung) auf das Ergebnis der Rissbreite zu gewinnen, ist diese Darstellungsform vorliegend hinreichend genau.

Ergänzend zur Mittelwertdarstellung werden die Rohwerte der Rissbreitenmessung in einem Punktwolkendiagramm (jeweils bezogen auf die anliegende Stahlspannung  $\sigma_s$ ) zusammengefasst. Mit Hilfe dieser Darstellungen kann ein erster Eindruck insgesamt zu den Bandbreiten der festgestellten Rissbreiten (je Stahlspannungsniveau) gewonnen werden.

Den Punktwolkendiagrammen gegenübergestellt sind jeweils die zugehörigen empirischen Dichtefunktionen. Anhand dieser können die Häufigkeitsverteilungen der Rissbreite angezeigt werden, auf Grundlage derer an späterer Stelle die Annahme der Verteilung des statistischen Parameters (charakteristische Rissbreite) begründet werden kann. Zur besseren Lesbarkeit werden die Darstellungen in den Punktwolkendiagrammen und den empirischen Dichtefunktionen in unterschiedlichen Farben (je nach betrachtetem Stahlspannungsniveau) erstellt. Der Stichprobenumfang  $n$  ist im Punktwolkendiagramm angegeben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden nachfolgend jedoch lediglich die Ergebnisse der Untersuchungen zu den Serien 1 und 2 (Betondruckfestigkeitsklasse C30/37) für die betrachteten Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm,  $\phi 28$  mm und  $\phi 40$  mm abgedruckt. Der jeweilige Beobachtungsbereich (Bauteiloberfläche, Bauteilseitenfläche) ist mit einem Pfeil gekennzeichnet.

Im Hinblick auf die den nachfolgend dargestellten empirischen Dichtefunktionen zugrundeliegenden Intervallbreiten existieren gemäß Weber 2019 keine allgemeingültigen Regeln, sondern lediglich „Faustregeln“. Vor diesem Hintergrund wurde die Intervallbreite unter Berücksichtigung praxisüblicher Rissbreiteneinteilungen zu 0,05 mm (vgl. beispielsweise auch Einteilung auf Vergleichsmaßstäben zur Rissbreitenmessung) gewählt. Die Anwendung der in Weber 2019 genannten Ansätze bestätigen die gewählte Intervallbreite in guter Näherung.

### 3 Experimentelle Untersuchungen

Weitere, hier nicht abgedruckte Versuchsauswertungen sind dem Anhang B beigelegt. Die Ergebnisse stellen sich demnach wie folgt dar.

#### Stabdurchmesser $\phi 20$ mm

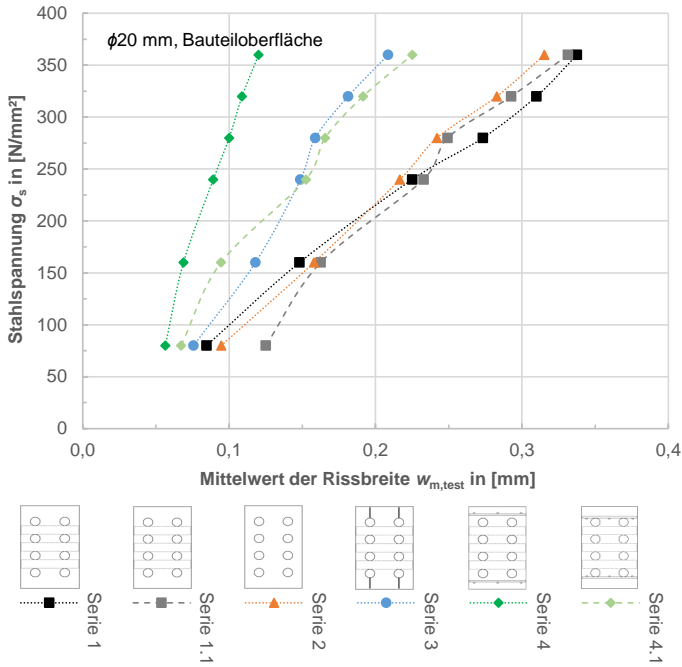


Abb. 3-16: Ergebnisdarstellung für die mittlere Rissbreite, Bauteiloberfläche,  $\phi 20$  mm, C30/37

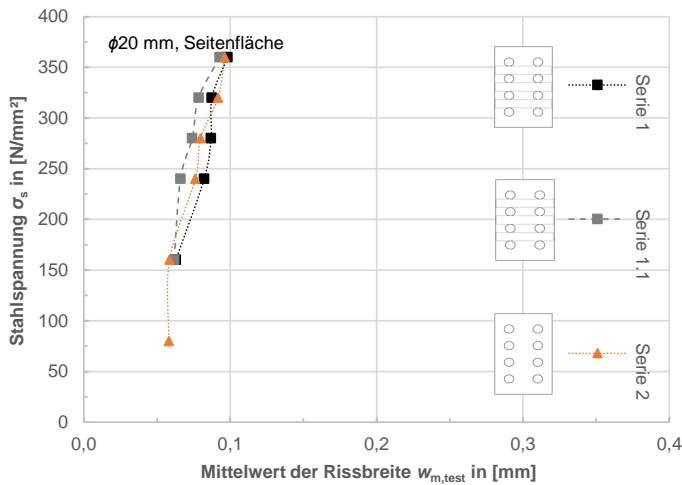


Abb. 3-17: Ergebnisdarstellung für die mittlere Rissbreite, Seitenfläche,  $\phi 20$  mm, C30/37



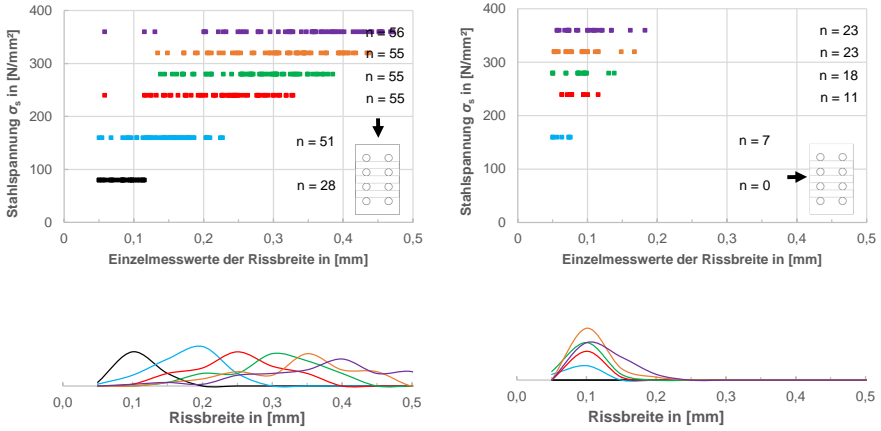


Abb. 3-18: Punktwolkendiagramme, empir. Dichtefunktionen für die Serie 1,  $\phi 20$  mm, C30/37

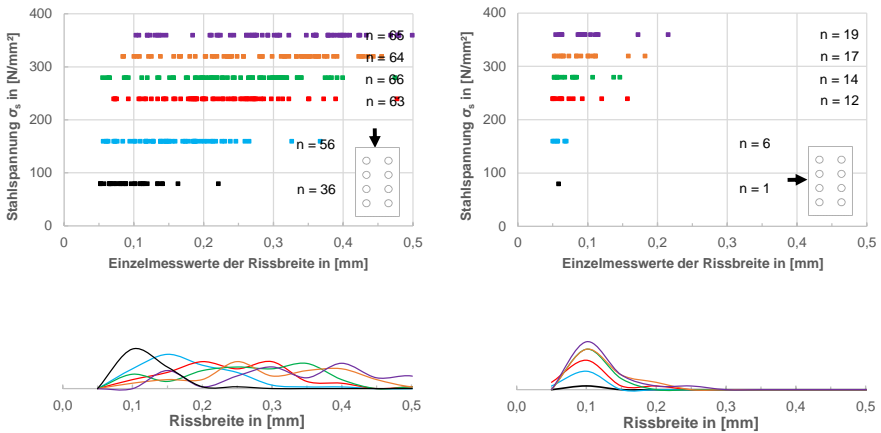


Abb. 3-19: Punktwolkendiagramme, empir. Dichtefunktionen für die Serie 2,  $\phi 20$  mm, C30/37

Stabdurchmesser  $\phi 28$  mm

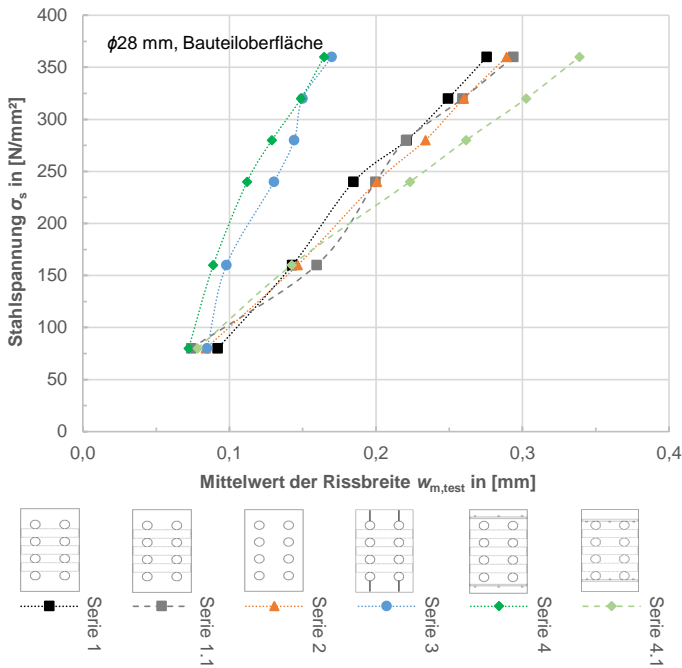


Abb. 3-20: Ergebnisdarstellung für die mittlere Rissbreite, Bauteiloberfläche,  $\phi 28$  mm, C30/37

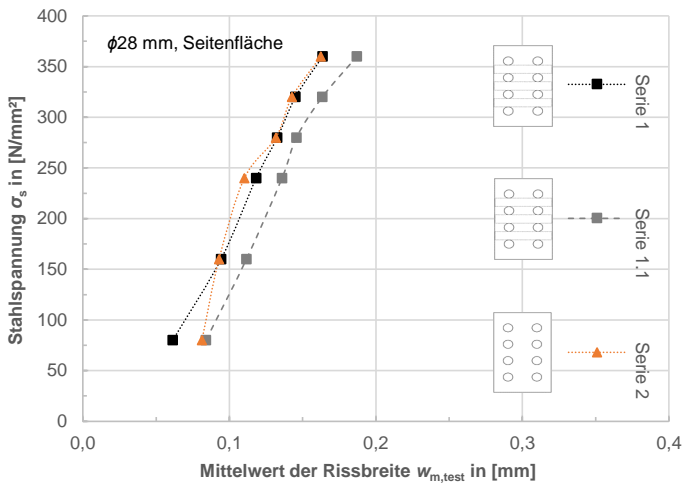


Abb. 3-21: Ergebnisdarstellung für die mittlere Rissbreite, Seitenfläche,  $\phi 28$  mm, C30/37

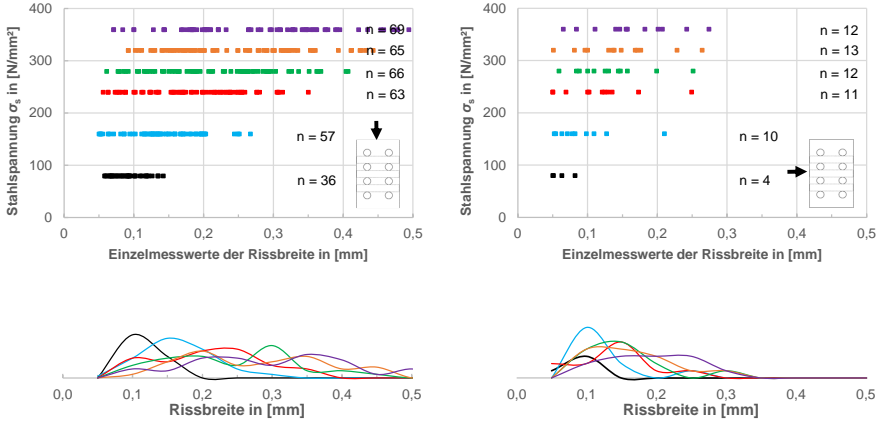


Abb. 3-22: Punktwolkendiagramme, empir. Dichtefunktionen für die Serie 1,  $\phi 28$  mm, C30/37

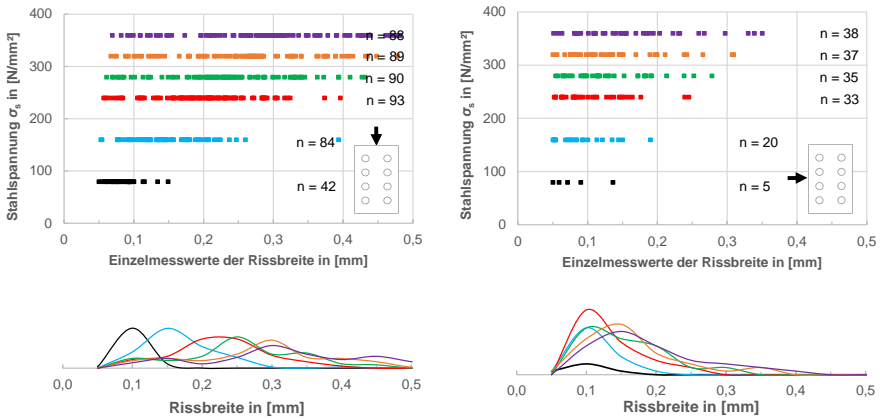


Abb. 3-23: Punktwolkendiagramme, empir. Dichtefunktionen für die Serie 2,  $\phi 28$  mm, C30/37

**Stabdurchmesser  $\phi 40$  mm**

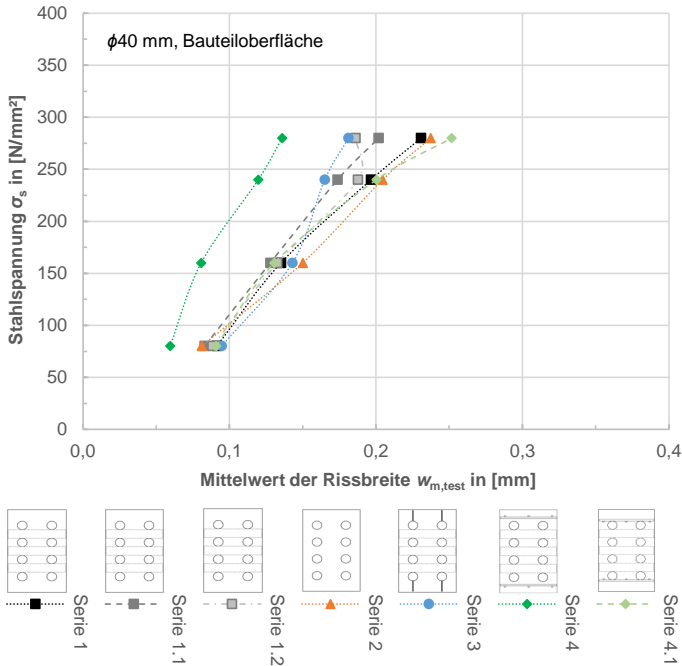


Abb. 3-24: Ergebnisdarstellung für die mittlere Rissbreite, Bauteiloberfläche,  $\phi 40$  mm, C30/37

Für die Serie 1.2 ist erkennbar, dass sich für die Laststufe 4 ( $\sigma_s = 280 \text{ N/mm}^2$ ) eine kleinere mittlere Rissbreite einstellt, als noch in der Laststufe 3 ( $\sigma_s = 240 \text{ N/mm}^2$ ). Dieser Umstand ist auf eine Störung im Betriebsablauf zurückzuführen, wonach die Beanspruchung für die Laststufe 4 nicht vollständig aufgebracht werden konnte.

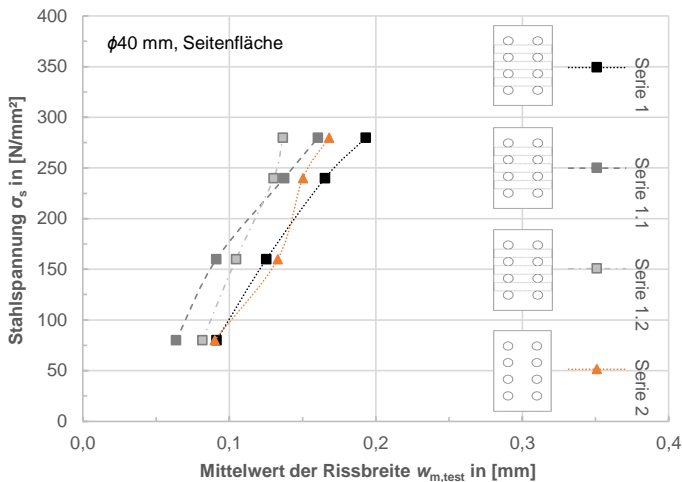


Abb. 3-25: Ergebnisdarstellung für die mittlere Rissbreite, Seitenfläche,  $\phi 40$  mm, C30/37

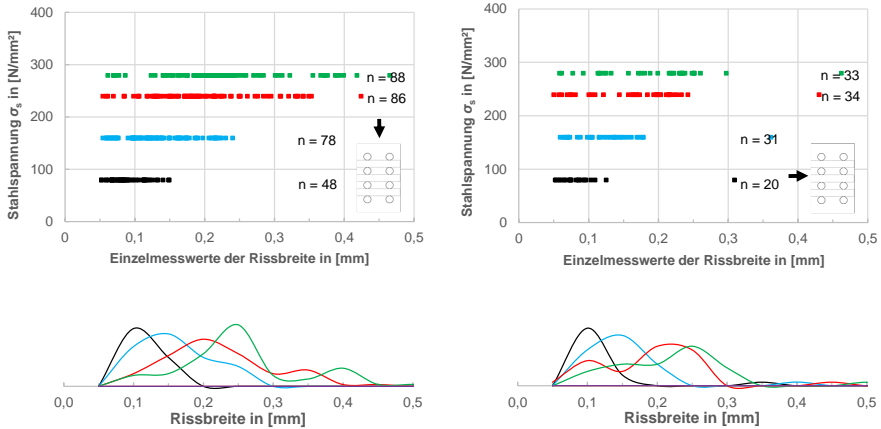


Abb. 3-26: Punktwolkendiagramme, empir. Dichtefunktionen für die Serie 1,  $\phi 40$  mm, C30/37

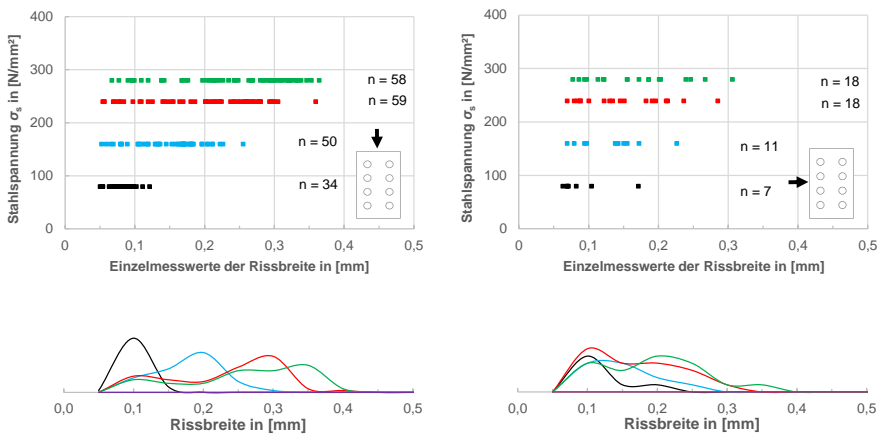
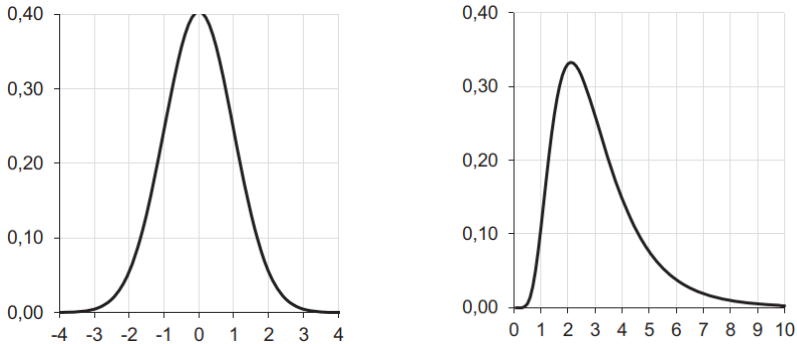


Abb. 3-27: Punktwolkendiagramme, empir. Dichtefunktionen für die Serie 2,  $\phi 40$  mm, C30/37

Nachdem voranstehend die empirischen Dichtefunktionen aus den Rohwerten der Rissbreite entwickelt wurden, ist in einem nächsten Schritt angezeigt, zu identifizieren, an welche (bekannte) Verteilungsart diese insgesamt angenähert werden können. Gemäß Martin et al. 1980 sind die am Bauwerk vorgefundenen Rissbreiten als stetige Daten logarithmisch-normalverteilt oder normalverteilt (weitergehende Ausführungen hierzu und Diskussion weiterer Verteilungsformen, s. Abschnitt 3.8.2.1). Vor diesem Hintergrund werden nachfolgend zunächst die Normalverteilung (auch als Gaußverteilung bezeichnet) und die logarithmische Normalverteilung (genauer deren Wahrscheinlichkeitsdichte) näher beleuchtet und deren Verlauf in Abb. 3-28 schematisch abgebildet sowie deren maßgebenden optischen Eigenschaften angegeben.

### 3 Experimentelle Untersuchungen

---



- Symmetrie zum Mittelwert
- eingipflige (unimodale) Verteilung
- rechtsschief (positive Schiefe)
- eingipflige (unimodale) Verteilung

Abb. 3-28: Gegenüberstellung der Verteilungsarten (Wahrscheinlichkeitsdichten) Normalverteilung und logarithmische Normalverteilung (aus Weber 2019)

Für die aus den Versuchsergebnissen abgeleiteten empirischen Dichtefunktionen ist im vorliegenden Fall unschwer festzustellen, dass der Verlauf – unabhängig vom Stabdurchmesser oder der Versuchsserie – wesentlich vom jeweils betrachteten Stahlspannungsniveau abhängt.

Für kleine Stahlspannungsniveaus, insbesondere auf Erstrissniveau (80 N/mm<sup>2</sup>, schwarze Kurven), kann die empirische Dichtefunktion für die betrachteten Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm,  $\phi 28$  mm und  $\phi 40$  mm der Serien 1 und 2 in guter Übereinstimmung mit einer Normalverteilung angenähert werden. Es sind eine deutlich sichtbare Symmetrie zum Mittelwert, keine übermäßig ausgeprägte Schiefe und ein Extremwert („eingipfliger“ Verlauf) erkennbar. Diese Kurvenverlaufseigenschaften sind vorwiegend darauf zurückzuführen, dass die Spannweite der Rissbreite auf Erstrissniveau von 0,05 mm bis 0,15 mm beträgt (vgl. Punktwolkendiagramme für 80 N/mm<sup>2</sup>) und die Einzelwerte damit „dicht zusammen“ liegen und jeweils nur ein geringes Streumaß aufweisen. Die festgestellten Beobachtungen treffen für die Beobachtungsbereiche „Bauteiloberseite“ und „Bauteilseitenfläche“ gleichermaßen zu, z. T. ergeben sich für die Bauteilseitenflächen sogar Verläufe ausgeprägter Symmetrie.

Für größere Spannungsniveaus finden sich z. T. deutlich größere Spannbreiten der Rissbreite (zwischen 0,05 mm und annähernd 0,5 mm, extremal für Serie 1,  $\phi 40$  mm). Die Einzelwerte liegen damit weiter auseinander als auf Erstrissniveau. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit zunehmender Laststeigerung die sukzessive Rissbildung einsetzt, d. h. es entstehen neue Risse mit tendenziell geringerer Rissbreite und bereits vorhandene Risse aus vorangegangenen Laststufen weiten sich auf. Die empirischen Dichtefunktionen weisen für größere Spannungsniveaus unsymmetrische Verläufe und mehrere Extremalstellen („mehrgipfliger“ Verlauf) auf. Dieser „mehrgipflige“ Verlauf wird insbesondere auch durch die Wahl der Intervallbreite beeinflusst. Die voranstehende Feststellung ist qualitativ für den Beobachtungsbereich „Oberfläche“ und „Seitenfläche“ in gleicher Weise zutreffend. Im Hinblick auf die Rissbreiten-

messung insgesamt kann befunden werden, dass sich für die Versuchskörperseitenflächen („Bauteilinneres“) deutlich kleinere Größenordnungen der mittleren Rissbreiten einstellen als auf der Bauteiloberfläche (vgl. Abb. 3-16 und Abb. 3-17, Abb. 3-20 und Abb. 3-21, Abb. 3-24 und Abb. 3-25). Die Untersuchungsergebnisse zur Rissbreite im Hinblick auf die betrachteten Einflussparameter sind in Abschnitt 3.7.2.4 beschrieben.

Voranstehend wurden die Punktwolkendiagramme und empirischen Dichtefunktionen für die Serien 1 und 2 betrachtet, die jeweils große Stichprobenumfänge  $n$  aufweisen. Für die übrigen untersuchten Serien (diese Ergebnisse sind im Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung abgedruckt) mit einem deutlich geringeren Stichprobenumfang weisen die empirischen Dichtefunktionen z. T. abweichende Verläufe auf. Fallweise ist eine ausgeprägtere Rechtsschiefe auszumachen, sodass auch eine Zuordnung zu einer logarithmischen Normalverteilung naheliegt.

Eine konkrete Zuordnung zu einer Verteilungsart in Anlehnung an Abb. 3-28 fällt somit insgesamt schwer. Eine weiterführende Betrachtung und Erörterung dieser Thematik ist in Abschnitt 3.8.2.1 enthalten. Die vorgefundene diffuse Verteilung der Rissbreiten für höhere Stahlspannungsniveaus ist mechanisch begründbar (s. o.) und „überrascht“ vor diesem Hintergrund nicht weiter. Es stellt sich jedoch die Frage, ob die vorgefundenen empirischen Dichtefunktionen der Rissbreitenergebnisse grundsätzlich durch die betrachtete Versuchskörperkonzeption (große Stabdurchmesser, mehrlagige Bewehrungsanordnung) beeinflusst werden oder ob sich diese auch vergleichbar bei „einfacheren Bauteilquerschnitten“ ähnlich einstellen würden. Vor diesem Hintergrund werden nachfolgend die Untersuchungsergebnisse an quadratischen, stabförmigen Versuchskörpern mit einem zentrisch eingelegten Bewehrungsstab aus Schäfer 2016 (vgl. Abschnitt 2.3.2.6) zu Referenzzwecken identisch ausgewertet. Es werden hierzu exemplarisch die Stabdurchmesser  $\phi 10$  mm,  $\phi 20$  mm,  $\phi 28$  mm und  $\phi 40$  mm betrachtet, um ggf. einen Einfluss des Stabdurchmessers auf den Verlauf der empirischen Dichtefunktion zu erkennen. Die Verteilungen der Einzelmesswerte, die in Schäfer 2016 als normalverteilt angenommen wurden, stellen sich wie folgt dar.

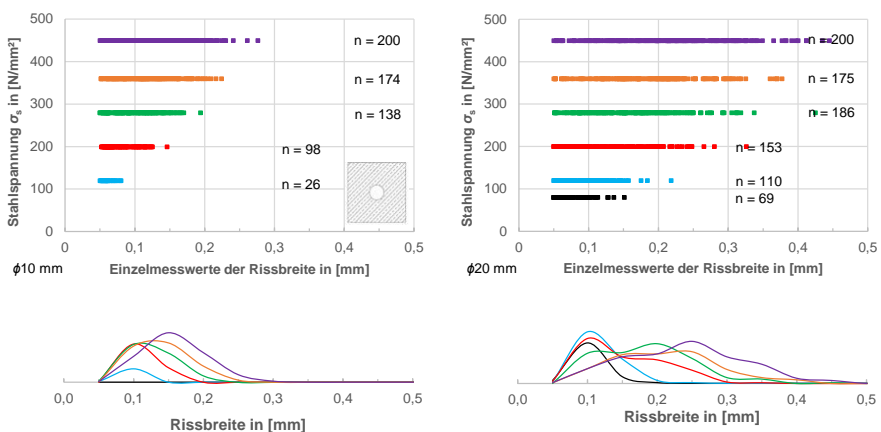


Abb. 3-29: Punktwolkendiagramme, empir. Dichtefunktionen für die Serie 1 aus Schäfer 2016,  $\phi 10$  mm und  $\phi 20$  mm, C30/37

### 3 Experimentelle Untersuchungen

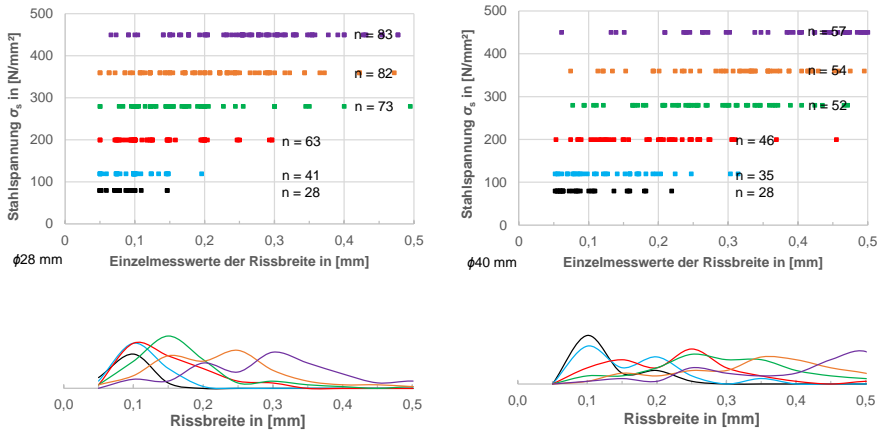


Abb. 3-30: Punktwolkendiagramme, empir. Dichtefunktionen für die Serie 1 aus Schäfer 2016,  $\phi 28$  mm und  $\phi 40$  mm, C30/37

Für die in Schäfer 2016 dokumentierten Rissbreitenergebnisse ist – analog zu den Ergebnissen der eigenen Versuchsreihen – festzustellen, dass der Verlauf der empirischen Dichtefunktionen für kleine Spannungsniveaus (hier 80–120 N/mm<sup>2</sup>) hinreichend genau einer Normalverteilung folgt. Die Einzelwerte sind symmetrisch zum Mittelwert verteilt und es ist keine übermäßig ausgeprägte Schiefe erkennbar. Lediglich für den Stabdurchmesser  $\phi 40$  mm ist dies nicht uneingeschränkt zutreffend.

Für kleine Stabdurchmesser ( $\phi 10$  mm) kann sogar näherungsweise für alle betrachteten Spannungsniveaus eine symmetrische, unimodale Verteilung der Einzelwerte beobachtet werden. Das Einsetzen der sukzessiven Rissbildung bei zunehmender Laststeigerung scheint in diesem Zusammenhang keinen wesentlichen Einfluss auf die Rissbreitenverteilung zu haben.

Für größere Stabdurchmesser (ab  $\phi 20$  mm) stellt sich für Stahlspannungsniveaus ab 200 N/mm<sup>2</sup> wiederum ein unsymmetrischer und z. T. diffuser, mehrgipfliger Verlauf ein, ggf. auch durch die Wahl der Intervallbreite begründet. Bereichsweise ist auch eine ausgeprägte Schiefe erkennbar. Betrachtet man die zugehörigen Einzelwerte im Punktwolkendiagramm, fällt auf, dass die Spannweite der gemessenen Rissbreiten zunehmen. Dies ist ganz offensichtlich auf den Einfluss der sukzessiven Rissbildung zurückzuführen. Unter Zugrundelegung der dargestellten Verläufe der empirischen Dichtefunktionen (Häufigkeitsverteilungen) kann auch hier zunächst keine uneingeschränkte Übereinstimmung mit der jeweils in Abb. 3-28 abgebildeten Normalverteilung oder logarithmischen Normalverteilung über alle Stahlspannungsniveaus vorgefunden werden.

Eine weiterführende Beschreibung und Wertung der Versuchsergebnisse erfolgen im Abschnitt 3.7.2.4.



### 3.7.2.3 Ergebnisse der Rissabstandsmessung

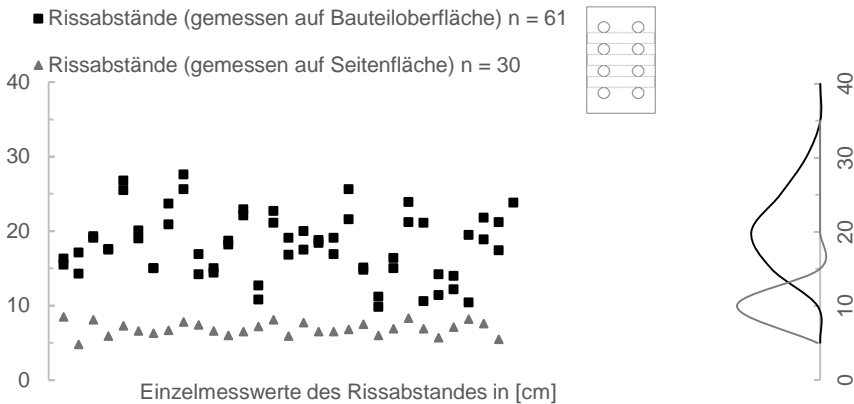
Die Einzelwerte der Rissabstandsmessungen auf der Bauteiloberseite und der Seitenfläche des Versuchskörpers werden – analog zu Abschnitt 3.7.2.2 – ebenfalls in einem Punktwolkendiagramm dargestellt und auch deren Verteilungen werden mit empirischen Dichtefunktionen beschrieben. Als Intervallbreite wurde im vorliegenden Fall 5,0 cm gewählt. Die Anwendung der in Weber 2019 genannten Ansätze bestätigt die gewählte Intervallbreite in guter Näherung.

Zusätzlich sind die Mittelwerte der Rissabstände angegeben, anhand derer ein erster Eindruck insgesamt im Hinblick auf den Einfluss der untersuchten Einflussparameter (z. B. Stabdurchmesser, Querbewehrung) gewonnen werden kann. In diesem Zusammenhang sind auch die Achsabstände der in Serie 1 eingelegten Querbewehrung angegeben.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden nachfolgend lediglich die Ergebnisse der Untersuchungen zu den Serien 1 und 2 (Betondruckfestigkeitsklasse C30/37) für die betrachteten Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm,  $\phi 28$  mm und  $\phi 40$  mm abgedruckt. Die Ergebnisse der übrigen Serien sind dem Anhang C beigefügt.

Die Ergebnisse stellen sich wie folgt dar.

#### Stabdurchmesser $\phi 20$ mm



$s_m = 18,1$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

$s_m = 6,9$  cm (bzgl. Seitenfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 1: 6,9 cm

Abb. 3-31: Ergebnisdarstellung zur Rissabstandsuntersuchung, Serie 1,  $\phi 20$  mm, C30/37

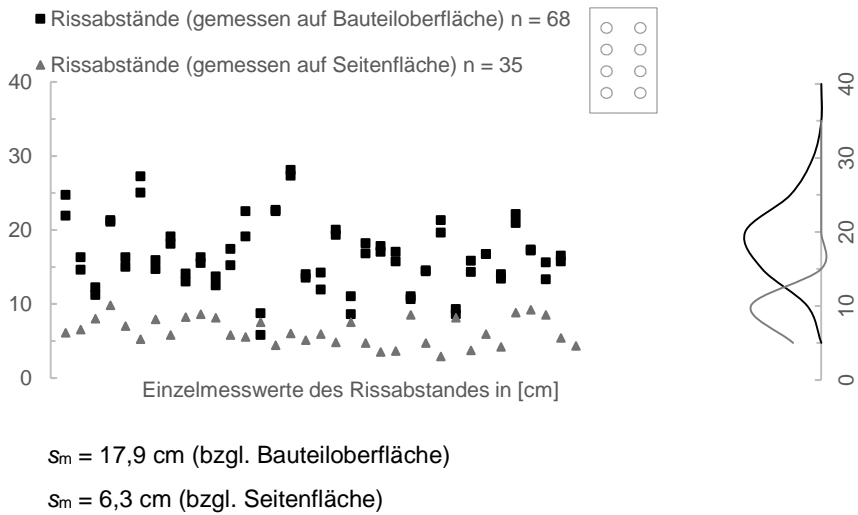


Abb. 3-32: Ergebnisdarstellung zur Rissabstandsuntersuchung, Serie 2,  $\phi 20$  mm, C30/37

**Stabdurchmesser  $\phi 28$  mm**

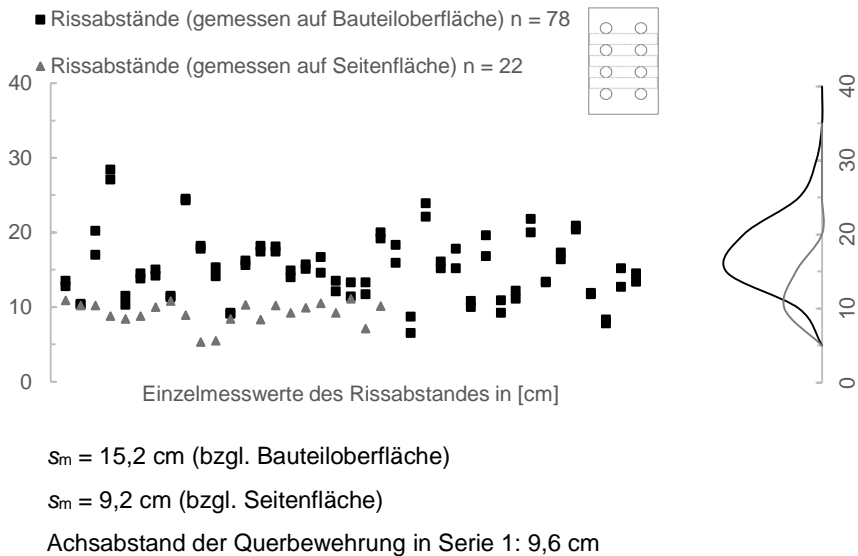
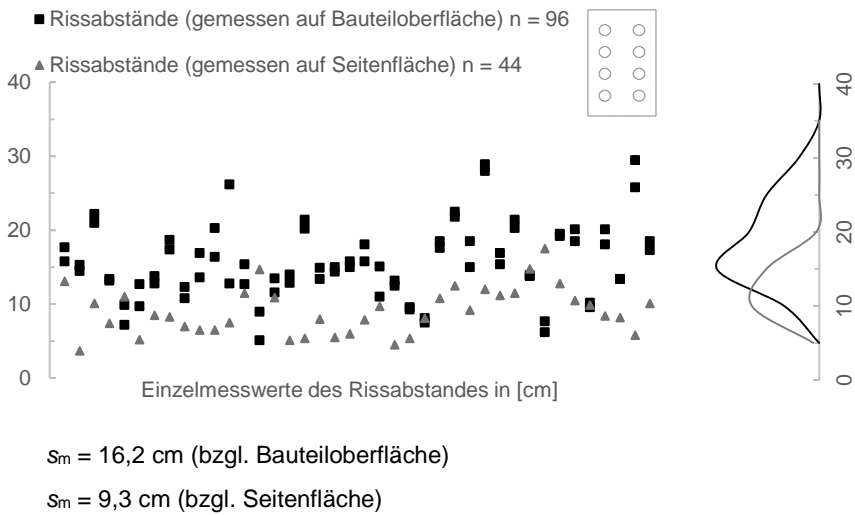
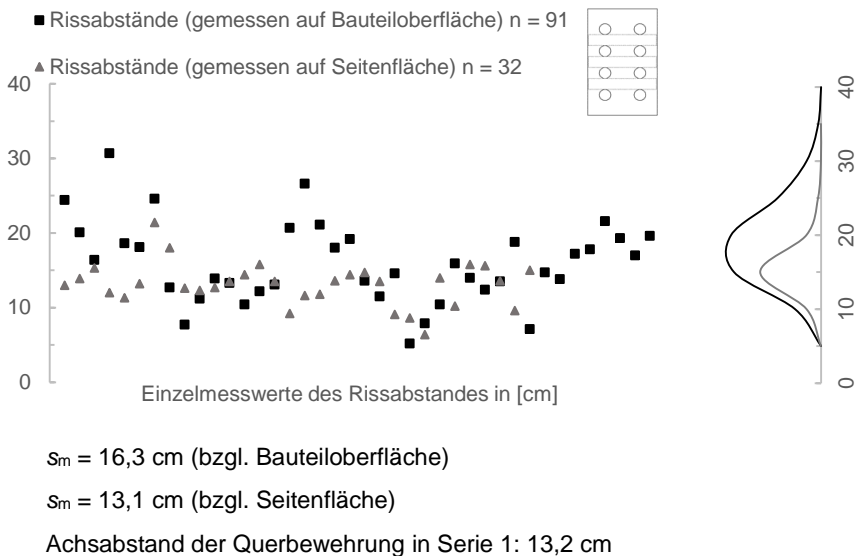


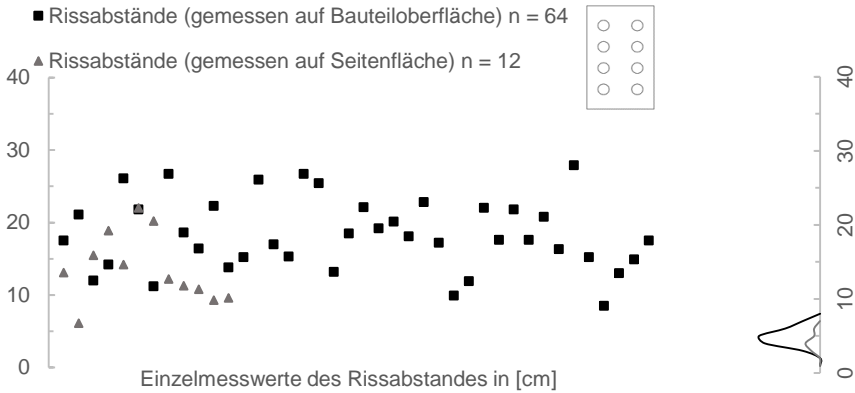
Abb. 3-33: Ergebnisdarstellung zur Rissabstandsuntersuchung, Serie 1,  $\phi 28$  mm, C30/37

Abb. 3-34: Ergebnisdarstellung zur Rissabstandsuntersuchung, Serie 2,  $\phi 28$  mm, C30/37

### Stabdurchmesser $\phi 40$ mm

Abb. 3-35: Ergebnisdarstellung zur Rissabstandsuntersuchung, Serie 1,  $\phi 40$  mm, C30/37

3 Experimentelle Untersuchungen



$s_m = 16,9$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

$s_m = 13,6$  cm (bzgl. Seitenfläche)

Abb. 3-36: Ergebnisdarstellung zur Rissabstandsuntersuchung, Serie 2,  $\phi 40$  mm, C30/37

Zunächst fällt auf, dass die Einzelwerte des Rissabstandes erwartungsgemäß große Streuungen um den Mittelwert aufweisen (ca. -50 % bis +100 %). Dabei ist die Streuung der auf der Bauteiloberfläche gemessenen Rissabstände wesentlich stärker ausgeprägt.

Im Hinblick auf die voranstehenden empirischen Dichtefunktionen ist überwiegend festzustellen, dass die Verteilung der Rohwerte in hinreichender Übereinstimmung an eine Normalverteilung (s. Abb. 3-28) angenähert werden kann. Es sind eine sichtbare Symmetrie zum Mittelwert, keine wesentlich ausgeprägte Schiefe und ein „eingipfliger“ Verlauf erkennbar. Dies trifft sowohl für die auf der Bauteiloberfläche als auch für die auf der Bauteilseitenfläche aufgenommenen Rissabstände zu. Die Versuchsergebnisse zu  $\phi 28$  mm weisen diesbezüglich Abweichungen auf. Der Kurvenverlauf ist in diesem Zusammenhang abschnittsweise unsymmetrisch und es ist eine deutlich ausgeprägtere Schiefe erkennbar. Analog zur Rissbreite stellt es sich auch so dar, dass fallweise aber auch eine ausgeprägtere Schiefe auszumachen ist, sodass die Zuordnung zu einer logarithmischen Normalverteilung ebenfalls naheliegt.

Für die auf der Bauteiloberfläche gemessenen Rissabstände ist für jeweils gleiche Stabdurchmesser festzustellen, dass sich Rissabstände annähernd gleicher Größenordnung unabhängig von einer etwaig vorhandenen Querbewehrung einstellen. Die vermutete Wirkung der Querbewehrung als „Sollbruchstelle“ kann somit für die Bauteiloberfläche nicht bestätigt werden. Ein größer werdender Stabdurchmesser bedingt an dieser Stelle zudem keine wesentliche Zunahme des Rissabstandes (vorliegend konnte der größte mittlere Rissabstand für  $\phi 20$  mm, Serie 1 angetroffen werden). Auf den Bauteilseitenflächen („Bauteilinneres“) stellten sich neben den Trennrissen auch zusätzliche Zwischenrisse, welche nicht den gesamten Querschnitt durchtrennen, s. Abb. 3-38 ein, sodass demnach auch ein wesentlich kleinerer

mittlerer Rissabstand vorliegt. Dieser wird augenscheinlich nicht durch eine etwaig vorhandene Querbewehrung beeinflusst. Vielmehr ist festzustellen, dass sich für die Serien 1 und 2 ein regelmäßiger mittlerer Rissabstand in der Größenordnung des dreifachen Stabdurchmessers einstellt.

Unter Zugrundelegung der Ergebnisse der Rissabstandsmessungen kann auch die Krafteinleitung vom Bewehrungsstahl zurück in den Beton zwischen zwei Trennrissen in Anlehnung an Abb. 3-37 aus Fingerloos et al. 2016 näher untersucht werden.

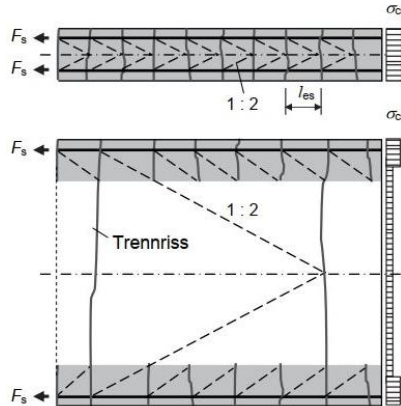


Abb. 3-37: Trennrissbildung bei dünnen Bauteilen (oben) und dicken Bauteilen (unten) aus Fingerloos et al. 2016

Für die betrachteten Querschnittsvarianten stellt sich das in Abb. 3-37 bezeichnete Ausbreitungsverhältnis wie folgt ein:

Tab. 3-5: Ausbreitungsverhältnisse in Anlehnung an Abb. 3-37

| $\phi$<br>[mm] | mittlerer<br>Rissabstand<br>$s_m$<br>[cm] | Ausbreitungsverhältnis |                   |
|----------------|---|------------------------|-------------------|
|                |   | Bauteil-<br>oberseite  | Seiten-<br>fläche |
| 20             | 18,0                                      | 1 : 5,2                | 1 : 3,9           |
| 28             | 15,7                                      | 1 : 3,3                | 1 : 2,5           |
| 40             | 16,6                                      | 1 : 2,5                | 1 : 1,9           |

Für die Näherungsbetrachtung zu den Ausbreitungsverhältnissen wurde als Rissabstand der Mittelwert der mittleren Rissabstände der Serie 1 und Serie 2 herangezogen (s. Tab. 3-5). Dies erfolgte vor dem Hintergrund, dass sich die Abstände zwischen den Trennrissen weitgehend unabhängig von einer etwaig vorhandenen Querbewehrung einstellten. Zwischenrisse auf der Bauteilseitenfläche, die den Rissabstand im Vergleich zur Oberseite deutlich reduzieren (vgl. Abb. 3-31 f.), wurden in

diesem Zusammenhang nicht berücksichtigt, sodass für Bauteiloberfläche und Bauteilseitenfläche der jeweils identische Rissabstand zugrunde gelegt werden konnte.

Zur Berechnung des Ausbreitungsverhältnisses auf der Bauteiloberseite wurde der horizontale Achsabstand der Hauptbewehrung (zwei Stäbe je Bewehrungslage) zugrunde gelegt. Dieser betrug  $a_{s,y} = 3 \cdot \phi_A$ . Für die Betrachtung der Seitenfläche wurde näherungsweise der Schwerpunkt der Bewehrung im jeweiligen Wirkungsbereich ober- bzw. unterhalb der Querschnittsschwerachse angesetzt. Dieser Abstand betrug  $a_{s,z} = 2 \cdot \phi_A$  und entspricht gerade dem vertikalen Achsabstand der Hauptbewehrung. Bereits hier ist damit festzustellen, dass sich für Bauteiloberseite und Bauteilseitenfläche unterschiedliche Ausbreitungsverhältnisse ergeben.

Es zeigt sich, dass das Ausbreitungsverhältnis mit zunehmendem Stabdurchmesser kleiner wird und sich dem in Fingerloos et al. 2016 angegebenen Verhältnis 1:2 annähert. Diese Beobachtung korreliert auch mit der Feststellung, dass die mittleren Rissabstände mit zunehmendem Stabdurchmesser abnehmen. Zusammenfassend kann damit festgehalten werden, dass sich die Einleitungslänge zwischen zwei Trennrissen für die vorliegenden Querschnittskonzeptionen (für alle Stabdurchmesser) tendenziell größer als im Verhältnis 1:2 einstellen.

Die weiteren Untersuchungsergebnisse zum Rissabstand sind unter Berücksichtigung der verschiedenen Einflussparameter ausführlich im nachfolgenden Abschnitt 3.7.2.4 zusammengefasst.

#### 3.7.2.4 Zusammenfassung der Versuchsbeobachtungen

Die in den voranstehenden Abschnitten 3.7.2.1 bis 3.7.2.3 dargestellten Versuchsergebnisse zur Rissentstehung und -entwicklung, zur mittleren Rissbreite und zum Rissabstand werden nachfolgend im Detail beschrieben. Die Ergebnisse werden hierbei hinsichtlich allgemeiner Beobachtungen oder fallweise untersuchter Einflussparameter auf die Rissbildung zusammengefasst.

- Rissarten: Im Rahmen der Versuchsdurchführung konnten grundsätzlich zwei Rissarten beobachtet werden (vgl. Abb. 3-38). Wesentlich und in Anbetracht der Belastung erwartbar, stellten sich Trennrisse ein, die den gesamten Querschnitt durchdringen. Zusätzlich konnten auf den Seitenflächen (Bauteilinneres, vgl. Abb. 3-1) Rissbildungen festgestellt werden, welche ausschließlich auf die vertikalen Randzonen begrenzt waren und den Querschnitt nicht vollständig durchdrangen. Diese Zwischenrisse stellten sich unabhängig von der Bewehrungsführung ein, wurden jedoch durch eine etwaig vorhandene Querbewehrung in ihrer Lage beeinflusst (s. auch nachfolgenden Absatz zur „Querbewehrung“). Auf der Bauteiloberfläche konnten diese Zwischenrisse nicht wahrgenommen werden. Ursächlich an dieser Stelle ist ggf. die Prüfkörperkonzeption und die geringere seitliche Betondeckung der Hauptbewehrung.

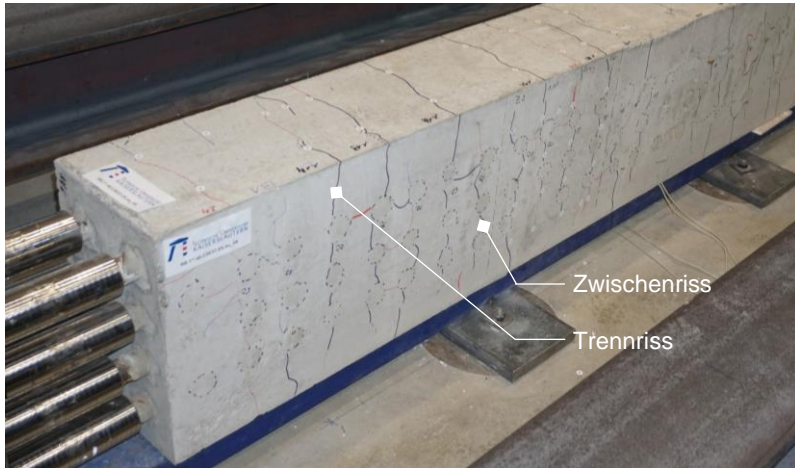


Abb. 3-38: Gegenüberstellung von Trenn- und Zwischenriss (exemplarisch)

- Stabdurchmesser  $\phi$ : Als Hauptbewehrung wurden die Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm,  $\phi 28$  mm und  $\phi 40$  mm berücksichtigt. Mit Zugrundelegung der Ergebnisse in Schäfer 2016 konnte zunächst davon ausgegangen werden, dass mit größer werdendem Stabdurchmesser sowohl die Rissbreite auf der Bauteiloberfläche als auch der Rissabstand jeweils zunehmen.

Für die hier vorliegenden Versuchsergebnisse stellt es sich insgesamt so dar, dass Rissbreiten unabhängig vom Stabdurchmesser bei gleichem Stahlspannungsniveau in annähernd gleicher Größenordnung auf der Bauteiloberfläche auftreten (vgl. Abb. 3-16, Abb. 3-20 und Abb. 3-24). Fallweise kann sogar festgestellt werden, dass bei einer Stahlspannung von  $280 \text{ N/mm}^2$  für  $\phi 20$  mm bis zu ca. 18 % größere mittlere Rissbreiten resultieren als für  $\phi 28$  mm und  $\phi 40$  mm (vgl. Serie 1). Der in Schäfer 2016 beschriebene Zusammenhang zwischen Rissbreite und Stabdurchmesser kann hier auf Mittelwertniveau zunächst nicht bestätigt werden.

Für die seitliche Bauteilfläche (Bauteilinneres) kann indes beobachtet werden, dass sich wesentlich kleinere mittlere Rissbreiten einstellen als auf der Bauteiloberfläche (vgl. Abb. 3-17, Abb. 3-21 und Abb. 3-25). Entgegen der auf der Bauteiloberfläche erkennbaren Tendenz stellt es sich hier so dar, dass die mittleren Rissbreiten mit zunehmendem Stabdurchmesser bei gleicher Stahlspannung anwachsen.

Für die hier zugrundeliegenden Bauteilkonzeptionen unterscheiden sich die Bewehrungsgrade der Versuchskörper mit  $\phi 20$  mm (6,5 %),  $\phi 28$  mm (7,5 %) und  $\phi 40$  mm (8,9 %) jedoch entscheidend (im Gegensatz zu Schäfer 2016, hier wurden jeweils identische Bewehrungsgrade berücksichtigt) voneinander. Vor diesem Hintergrund ist eine direkte Gegenüberstellung der vorliegenden Rissbreitenergebnisse im Hinblick auf den alleinigen Einfluss des

Stabdurchmessers nicht uneingeschränkt möglich. Die Betondeckung der Hauptbewehrung wurde in diesem Zusammenhang für alle Versuche zu 60 mm (bzgl. Bauteiloberfläche) festgelegt, sodass eine unterschiedliche Rissaufweitung entlang der Betondeckung diesbezüglich nicht maßgeblich sein kann. Im Hinblick auf die bezogene Rippenfläche  $f_R$  der verwendeten Stahlbewehrung ist festzustellen, dass für die Stabdurchmesser  $\phi 28$  mm ( $f_R = 0,074$ ) und  $\phi 40$  mm ( $f_R = 0,073$ ) nahezu identische Werte vorliegen. Für den Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm wurde die bezogene Rippenfläche hingegen zu  $f_R = 0,085$  ermittelt und stellt sich demnach um ca. 15 % größer ein als für  $\phi 28$  mm und  $\phi 40$  mm. Gegebenenfalls sind vor diesem Hintergrund die unterschiedlich bezogenen Rippenflächen ursächlich für die Feststellung, dass größere Stabdurchmesser nicht zwingend größere Rissbreiten auf der Bauteiloberfläche bedingen.

Für die Seitenfläche betrug die nominelle Betondeckung jeweils einen Stabdurchmesser ( $\phi_A$ ). An dieser Stelle ist u. U. eine Rissaufweitung infolge unterschiedlich großer Betonüberdeckung möglich (die Betondeckung nimmt für größer werdenden Stabdurchmesser zu), sodass hier eine Zunahme der Rissbreite mit größer werdendem Stabdurchmesser begründet werden kann.

Der auf der Bauteiloberfläche gemessene mittlere Rissabstand (vgl. Abb. 3-31 und folgende) nimmt mit zunehmendem Stabdurchmesser tendenziell ab (bei Gegenüberstellung von  $\phi 20$  mm und  $\phi 28$  mm). Für  $\phi 40$  mm hingegen kann festgestellt werden, dass der mittlere Rissabstand im Vergleich zu den Ergebnissen mit  $\phi 28$  mm wieder zunimmt, dabei jedoch den mittleren Rissabstand für  $\phi 20$  mm nicht übersteigt. Diese Beobachtung ist unabhängig davon, ob eine Querbewehrung vorhanden ist. Nach Rehm et al. 1976 kann erwartet werden, dass der mittlere Rissabstand mit zunehmendem Verhältnis aus Stabdurchmesser zu Bewehrungsgrad ( $\phi/\rho_{p,eff}$ , wie es im vorliegenden Fall erfüllt ist) zunimmt. Die in Rehm et al. 1976 prognostizierte Entwicklung des Rissabstandes kann anhand der vorliegenden Versuchsergebnisse jedoch nicht bestätigt werden.

Der auf der Seitenfläche (Bauteilinneres) gemessene mittlere Rissabstand nimmt mit zunehmendem Stabdurchmesser für die Serien 1 und 2 zu (in Übereinstimmung mit der Prognose nach Rehm et al. 1976). Die Rissabstände stellen sich auch hier unabhängig von der Bewehrungsführung und einer etwaig vorhandenen Querbewehrung ein. Für die Serien 1 (mit Querstäben) und 2 (ohne Querbewehrung) entspricht der mittlere Rissabstand in sehr guter Näherung dem Dreifachen des Stabdurchmessers.

- **Betondruckfestigkeit:** Die Versuchskörper wurden hauptsächlich mit einem Beton der Betondruckfestigkeitsklasse C30/37 hergestellt. Referenzversuche mit einem höherfesten Beton C50/60 dienten der Überprüfung, ob die an praxisüblichen Normalbetonen abgeleiteten Erkenntnisse zum Rissgeschehen auch auf höherfeste Normalbetone ( $\leq$  C50/60), wie sie beispielsweise in Fertigteilwerken zum Einsatz kommen, ohne Einschränkung übertragen



werden können. Für die Rissbildung im Stahlbetonbau sind in diesem Zusammenhang insbesondere die nominell größeren Betonzugfestigkeiten und Verbundfestigkeiten von wesentlicher Bedeutung.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden voranstehend keine Versuchsergebnisse in Verbindung mit Betonen der Betondruckfestigkeitsklasse C50/60 abgedruckt. Diese sind aber vollständig den Anhängen B und C beigelegt.

Bei Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse (s. Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung) fällt auf, dass die mittleren Rissbreiten bei Verwendung höherfester Betone (C50/60) für alle betrachteten Stabdurchmesser in vergleichbarer Größenordnung auftreten wie denjenigen in Verbindung mit niedrigeren Betonen (C30/37). In der Tendenz stellen sich aber wie zu erwarten für C50/60 geringfügig größere mittlere Rissbreiten ein. Dies ist auch bereits auf Erstrissniveau so erkennbar. In gleicher Weise stellt es sich für die mittleren Rissbreiten auf der Bauteilseitenfläche (Bauteilinneres) dar. Grundsätzlich kann die größere Rissbreite in diesem Zusammenhang mit der größeren freiwerdenden Bruchenergie beim Aufreißen des höherfesten Querschnitts begründet werden.

Unter Berücksichtigung der Rissmechanik sollten sich entsprechend für höherfeste Betone damit tendenziell auch größere Rissabstände einstellen. Dies kann vorliegend aber nicht uneingeschränkt beobachtet werden. Auf der Bauteiloberfläche stellen sich bei der Verwendung höherfester Betone tendenziell kleinere (mittlere) Rissabstände ein. Hierbei sei angemerkt, dass die Versuchsergebnisse (mittlere Rissbreite, mittlerer Rissabstand) für Betone der Betondruckfestigkeitsklasse C50/60 an nur wenigen Referenzversuchskörpern abgeleitet wurden. Aufgrund der damit einhergehenden geringeren Datenbasis (geringere Stichprobenanzahl  $n$ ) im Vergleich zu den Referenzversuchen können z. T. mechanisch nicht begründbare Ergebnisse auftreten.

- Verbundstörung durch Rissbleche: Zur Untersuchung eines Einflusses etwaig im Bauteil auftretender, längsrissauslösender Querkzugspannungen (z. B. infolge Zwangbeanspruchung oder Querbiegung) auf das Rissbild wurden in Serie 3 Rissbleche innerhalb der Betondeckung angeordnet (s. Tab. 3-1).

In Abb. 3-16, Abb. 3-20 und Abb. 3-24 ist erkennbar, dass die gemessenen mittleren Rissbreiten im Vergleich zur Referenzserie 1 annähernd gleich oder sogar kleiner ( $\phi 28$  mm s. Abb. 3-20) ausfallen. Eine Beeinflussung des Rissgeschehens kann somit nicht erkannt werden.

Dies kann vermutlich damit begründet werden, dass die mit den Rissblechen initiierten Längsrisse herstellungsbedingt nicht den gesamten Querschnitt

durchdringen, da die Rissbleche nur randnah, d. h. im Bereich der Betonüberdeckung der ober- und unterseitigen Hauptbewehrung angeordnet werden konnten. Demzufolge wird nur der Zugring der äußeren Stäbe gestört und die Längsrisse wirken sich insgesamt nicht wesentlich verbundmindernd aus, sodass das Rissgeschehen dadurch (zumindest bei fehlender zusätzlicher Querkzugspannung, die versuchstechnisch nicht aufgebracht werden konnte) nicht zielgerichtet beeinflusst wird.

Es ist zudem zu vermuten, dass durch die hohen Querbewehrungsgehalte etwaig nachteilige Verbundverhältnisse der Längsbewehrung keinen Einfluss auf die Rissbildung haben. Die auftretende Längsrisse werden weiterhin durch die vorhandene Querbewehrung („Dübelwirkung“) auf eine geringe Breite begrenzt.

Vor diesem Hintergrund ist insgesamt davon auszugehen, dass die durchgeführten Untersuchungen zur Serie 3 in der vorliegenden Form nicht abschließend sind.

- Schwinden des Betons: Der Einfluss des Schwindens ist zunächst im Zusammenhang mit der in den Vergleichsrechnungen anzusetzenden Betonzugfestigkeit  $f_{ct,eff}$  zu berücksichtigen (dies wurde im Abschnitt 3.7.2.1 bereits thematisiert).

Weiterhin ist das Schwinden auf Einwirkungsebene zu erfassen. Das Trag- und Verformungsverhalten eines wie im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Dehnkörpers unterscheidet sich je nach Einwirkung infolge Zwangs oder äußerer Zugbeanspruchung. Dieser Unterschied wird sehr anschaulich wie folgt in Dridiger 2019 dargestellt:

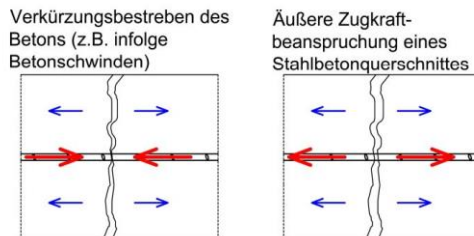


Abb. 3-39: Unterschiedliches Trag- und Verformungsverhalten infolge Zwangs (Schwinden) und äußerer Zugkraft (aus Dridiger 2019)

Vor Versuchsdurchführung wurden die Versuchskörper, welche bis zur eigentlichen Versuchsdurchführung trocken, weitgehend zwangsfrei gelagert und nach dem Ausschalen nicht weiter nachbehandelt wurden, eingehend auf Rissbildungen untersucht, ohne dass dabei aber Risse außerhalb des durch das Rissblech geschwächten Querschnittsbereiches festgestellt werden konnten. Somit ist davon auszugehen, dass vor Prüfbeginn eingeprägte Schwind-

spannungen und die diesbezüglich durch die Bewehrung behinderte Verformung („Aufschrumpfen“, vgl. Abb. 3-39) keine Rissbildung des jungen Betons (Betonalter bei Bauteilprüfung üblicherweise ca. 7 bis 21 d) auf Erstrissniveau indizieren. Der sich infolge Schwindens auf Querschnittsebene einstellende Eigenspannungszustand, im Rahmen dessen für die Bewehrung Druckspannungen resultieren (vgl. Abb. 3-39), wurde im Zuge der weiteren Versuchsdurchführung aufgezehrt. Etwaige Effekte infolge Schwindens wurden somit im Zuge der Auswertung nicht weiter berücksichtigt.

- Wirksamkeit der Oberflächenbewehrung: In Serie 4 wurde der Einfluss einer Oberflächenbewehrung aus dünnen Stabdurchmessern ( $\phi 8$  mm) auf das Rissgeschehen überprüft.

In diesem Zusammenhang ist zwischen einer randnah verlegten Oberflächenbewehrung (Betondeckung planmäßig 30 mm, Serie 4) und einer mit großem Randabstand verlegten Oberflächenbewehrung (Betondeckung 52 mm, Ablegen der Oberflächenbewehrung auf der Hauptbewehrung, Serie 4.1) zu unterscheiden.

Der Oberflächenbewehrungsgrad entsprach dabei den Vorgaben nach DIN EN 1992-1-1 ( $A_{s,surf} = 1$  % von  $A_{ct,ext}$ , parallel und orthogonal zur Hauptbewehrung, damit abweichend zu DIN EN 1992-1-1/NA).

Aufgrund der Anordnung der Oberflächenbewehrung (vgl. hierzu auch Abb. 3-3) ist deren Einfluss lediglich auf die Bauteiloberfläche beschränkt.

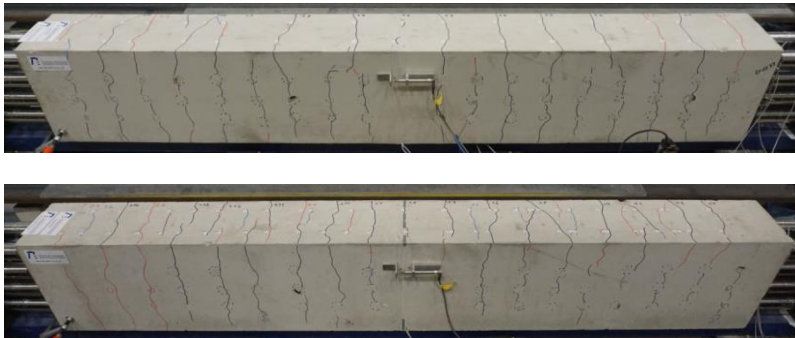


Abb. 3-40: Gegenüberstellung ausgewählter Rissbilder nach Versuchsende, Serie 1 (oben) und Serie 4 (unten), jeweils  $\phi 40$  mm

Insgesamt zeigt sich, dass eine, wie in Serie 4, randnah angeordnete Oberflächenbewehrung ( $c_{v,surf} = 30$  mm) im Hinblick auf die Rissbildung an der Bauteiloberfläche höchst wirksam ist. Die auftretenden Risse werden im vorliegenden Fall durch die parallel zur Hauptbewehrung ausgerichtete Oberflächenbewehrung fein verteilt und in ihrer Breite beschränkt. Vorgenanntes kann anhand einer Gegenüberstellung der nach Versuchsende aufgenommenen Rissbilder der Serie 1 (oben) und Serie 4

### 3 Experimentelle Untersuchungen

(unten) anschaulich verdeutlicht werden (s. Abb. 3-40). Es ist gut zu erkennen, dass für Serie 4 ein insgesamt fein verteiltes Rissbild vorliegt und damit wesentlich mehr Risse aufgetreten sind als in Versuchen ohne Oberflächenbewehrung.

Die mittlere Rissbreite  $w_{m,test}$  auf der Bauteiloberfläche beträgt für alle betrachteten Stabdurchmesser weniger als 0,2 mm (bei einer max. Stahlspannung in Höhe von 360 N/mm<sup>2</sup> für  $\phi 20$  mm und  $\phi 28$  mm sowie 280 N/mm<sup>2</sup> für  $\phi 40$  mm, vgl. Abb. 3-41).

Ob in diesem Zusammenhang die orthogonal zur Hauptbewehrung eingelegte und gegenüber DIN EN 1992-1-1/NA ebenfalls reduzierte Oberflächenbewehrung in gleicher Weise wirksam ist, kann unter Zugrundelegung der hier durchgeführten Bauteilversuche nicht aufgeklärt werden. Eine Änderung der Stahlzugkraft, wodurch Rissbildungen parallel zur Längsbewehrung entstehen können, konnte versuchstechnisch vorliegend nicht erfasst werden. Deshalb muss an dieser Stelle offen bleiben, ob die orthogonal zur Hauptbewehrung verlegte Oberflächenbewehrung mit einem von DIN EN 1992-1-1/NA abweichenden Oberflächenbewehrungsgrad von nur 1 % von  $A_{ct,ext}$  ausreichend ist, um etwaig auftretende Längs-Verbundrisse wirksam zu begrenzen.

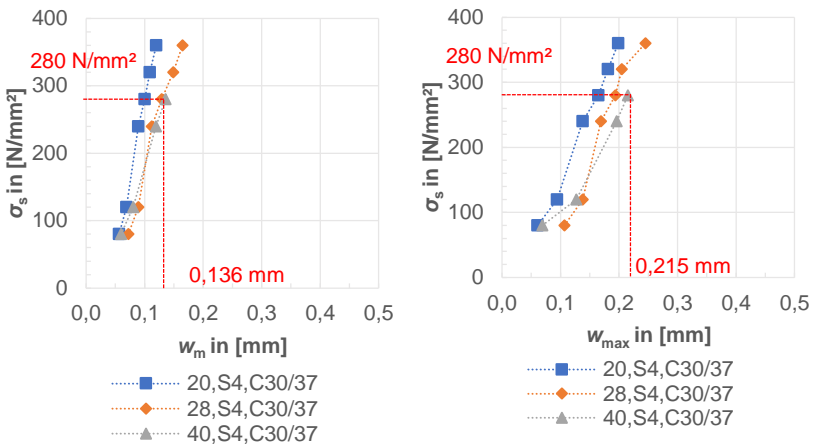


Abb. 3-41: Auswertung der Rissbreite ( $w_m$ ,  $w_{max}$ ) an der Bauteiloberfläche für Serie 4

Wird die Oberflächenbewehrung aus Gründen baupraktischeren Arbeitens wie in Serie 4.1 direkt auf der Hauptbewehrung verlegt und befinden sich die dünnen Stabdurchmesser der Oberflächenbewehrung damit annähernd in der gleichen Lage wie die Hauptbewehrung selbst, so ist deren Wirksamkeit erheblich eingeschränkt. Eine rissverteilende Wirkung der eingelegten Oberflächenbewehrung kann diesbezüglich nicht mehr festgestellt werden. Es ergeben sich annähernd doppelt so große mittlere Rissbreiten im Vergleich zu Serie 4 (vgl. Abb. 3-16, Abb. 3-20 und Abb. 3-24).

- Querbewehrung: Mit Ausnahme der Serie 2 wurden alle Versuchskörper mit einer Querbewehrung zwischen den Längsstablagen versehen, welche innerhalb von Serie 1 nochmals variiert wurde (Serie 1.1 und 1.2, s. Tab. 3-2).

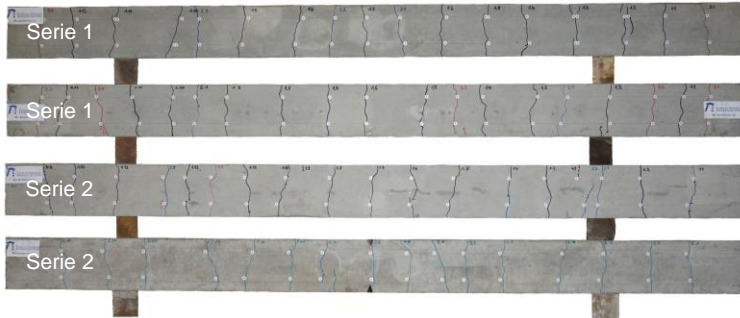


Abb. 3-42: Vergleich der Rissbilder von Serie 1 (oben, ohne Variation des Querstababstandes) und 2 (unten) nach Versuchsende, Bauteiloberfläche, exemplarisch für  $\phi 28$  mm, C30/37

Auf der Bauteiloberfläche (s. Abb. 3-42) kann insgesamt kein Einfluss der Querbewehrung auf das Rissbild festgestellt werden, sodass eine Wirkung der Querbewehrung als „Sollbruchstelle“ und eine damit einhergehende „gerichtete Rissbildung“ somit nicht angezeigt sind. Auch im Hinblick auf die mittlere Rissbreite und den mittleren Rissabstand unterscheiden sich die Ergebnisse der Serien 1 und 2 nur unwesentlich.

Für die vertikalen Seitenflächen (auch in Bezug auf die Zwischenrissbildung) stellt es sich ebenfalls so dar, dass die eingelegte Querbewehrung keine nennenswerte Beeinflussung der Rissbreite und des Rissabstandes bedingt. So beträgt der mittlere Rissabstand für die Serie 1 und die Serie 2 (d. h. unabhängig von einer etwaig vorhandenen Querbewehrung und dem Stabdurchmesser selbst) in sehr guter Näherung das Dreifache des Stabdurchmessers.

Mit der Serie 1.1 (Verdoppelung des Querstababstand) und Serie 1.2 (geringstmöglicher Querstababstand nach DIN EN 1992-1-1) wurde der Querstababstand weiter variiert. Auch in diesem Zusammenhang kann kein entscheidender Einfluss auf das sich einstellende Rissbild erkannt werden.

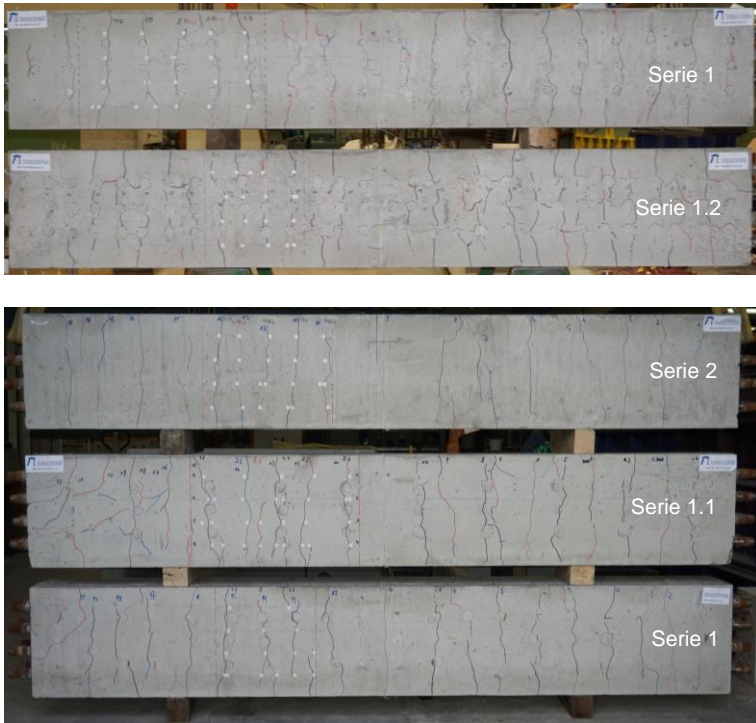


Abb. 3-43: Vergleich der Rissbilder der Serie 1, 1.1, 1.2 und 2 nach Versuchsende, vertikale Seitenflächen (Bauteilinneres), exemplarisch für  $\phi 40$  mm, C30/37

Im Vergleich zu Serie 1 konnte für Serie 1.1 sowohl auf der Bauteiloberfläche als auch auf der Bauteilseitenfläche für alle betrachteten Stabdurchmesser tendenziell eine geringere mittlere Rissbreite festgestellt werden. Diese Beobachtung kann jedoch vor dem Hintergrund eines geringeren Stichprobenumfangs aufgrund des nur jeweils einmalig durchgeführten Bauteilversuchs der Serie 1.1 nicht verallgemeinert werden. Eine wesentliche Beeinflussung des Rissabstandes ist ebenfalls nicht angezeigt. Die Serie 1.2 und damit eine Verkleinerung des Querstababstand wurde alleinig mit dem Stabdurchmesser  $\phi 40$  mm durchgeführt. Es kann hierbei eine Verringerung des mittleren Rissabstandes um ca. 15 % auf der Bauteiloberfläche und um ca. 30 % auf der Seitenfläche gegenüber der Referenzserie 1 festgestellt werden.

Für die Seitenfläche stellt es sich so dar, dass die eingelegte Querbewehrung – im Gegensatz zu den Feststellungen auf der Bauteiloberfläche – in begrenztem Umfang als Sollbruchstelle wirkt und die Lage sowie den Verlauf der zwischen den Trennrissen entstehenden Zwischenrisse beeinflusst. Nachfolgend sind zur Veranschaulichung in diesem Zusammenhang vergrößerte Ausschnitte aus obiger Abb. 3-43 dargestellt.

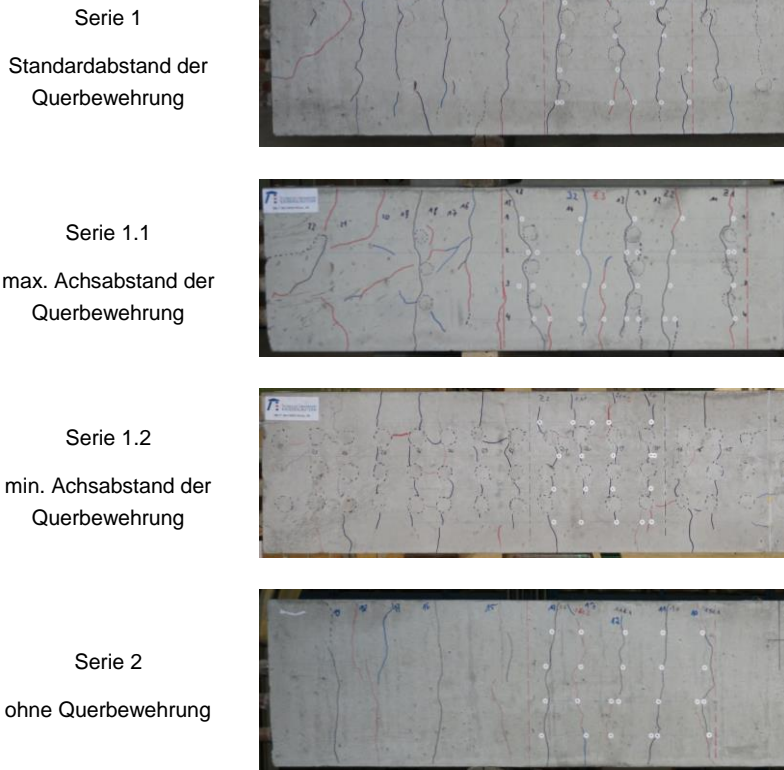


Abb. 3-44: Detailbetrachtung der Serien 1, 1.1, 1.2 und 2,  $\phi 40$  mm, C30/37

In obiger Abb. 3-44 ist für die Serie 1 und die Serie 2 zu erkennen, dass sich jeweils ein unabhängig von einer etwaigen Querbewehrung vergleichbares Rissbild mit näherungsweise identischen Rissabständen einstellt. Insgesamt forciert die eingelegte Querbewehrung darüber hinaus jedoch ein homogenes Rissbild, d. h. Zwischenrisse treten nachweislich ohne größere Verästelungen und Unstetigkeitsstellen im Rissverlauf auf.

Bei Gegenüberstellung der Serien 1, 1.1 und 1.2 ist festzustellen, dass sich für den minimal untersuchten Achsabstand der Querbewehrung in Serie 1.2 auch ein minimaler Rissabstand einstellt. Eine Vergrößerung des Querstababstandes in Serie 1.1 hat dagegen keine erkennbaren Auswirkungen auf den Rissabstand gegenüber der Referenzserie 1.

## 3.8 Statistische Versuchsauswertung

Basierend auf den experimentellen Untersuchungen zum Rissgeschehen von mehrlagig bewehrten Stahlbetonbauteilen mit fallweiser Verwendung einer Bewehrung mit großen Stabdurchmessern  $\phi_{\text{large}}$  (aber auch unter Einbeziehung der praxisüblichen Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm und  $\phi 28$  mm) unter zentrischer Zugbeanspruchung konnte eine Datenbasis mit annähernd 5.800 Einzelrissbreiten und 1.500 Rissabstandswerten zusammengestellt werden.

Nachdem die Versuchsergebnisse voranstehend bereits auf Mittelwertniveau betrachtet und die Häufigkeitsverteilung der Einzelwerte beleuchtet wurden, werden die Untersuchungsgrößen „Rissbreite“ und „Rissabstand“ im vorliegenden Abschnitt statistisch ausgewertet. Hierzu werden charakteristische Werte als Fraktilwerte der Rissbreite und des Rissabstandes entwickelt, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit Rechenwerten ausgewählter Bemessungs- und Ingenieurmodelle gegenübergestellt werden. Diese Gegenüberstellung zielt darauf ab, eine qualifizierte Aussage über die Vorhersagegenauigkeit der betrachteten Bemessungs- und Ingenieurmodelle im Hinblick auf die rechnerische Vorherbestimmung auftretender Risse treffen zu können.

### 3.8.1 Allgemeines und Begriffsklärungen

Bei den zuvor genannten Daten zur Rissbreite (5.800 Einzelwerte) und zum Rissabstand (1.500 Einzelwerte) handelt es sich um univariate (d. h. eindimensionale), stetige Werte, die insgesamt als Stichprobe mit dem Stichprobenumfang  $n$  aufzufassen sind.

Um einen charakteristischen Wert einer zuvor mehrfach als Einzelwert prüftechnisch bestimmten Messgröße (hier Rissbreite und Rissabstand) zu ermitteln, ist zunächst die Kenntnis über die Verteilung der zu untersuchenden Datenmenge, welche sich als Stichprobe darstellt, bezogen auf ihre Grundgesamtheit erforderlich. Unter der Grundgesamtheit versteht man hierbei die Menge aller möglichen Untersuchungseinheiten über die eine Aussage getroffen werden soll. Im Allgemeinen stellt es sich jedoch so dar, dass die Grundgesamtheit nicht als vollumfänglich bekannt vorausgesetzt werden kann, weswegen mittels induktiver statistischer Methoden von einer repräsentativen Stichprobe (mit Stichprobenumfang  $n$ ) als endlicher Auswahl aus der Grundgesamtheit auf eben diese zu schließen ist.

Entscheidend ist in diesem Zusammenhang, wie zutreffend die Grundgesamtheit durch die zur Verfügung stehende Stichprobe wiedergegeben werden kann. Dies wird durch die Begrifflichkeit Konfidenzniveau beschrieben. Unter einem Konfidenzniveau  $(1 - \alpha)$  ist in diesem Zusammenhang die Repräsentativität einer Stichprobe bezogen auf ihre Grundgesamtheit zu verstehen.

Mittels deskriptiver statistischer Methoden können Daten einer Stichprobe anhand von numerischen „Kenngrößen“ konkret beschrieben werden. Hierzu zählen insbesondere die Lagemaße (z. B. arithmetisches Mittel) und Streuungsmaße (z. B. Standardabweichung, Variationskoeffizient). Eine grafische Beschreibung der Stichprobe ist mittels der Darstellung von Häufigkeitsverteilungen (Histogrammen) möglich.



Wesentliche Grundlagen zu den hier verwendeten statistischen Zusammenhängen sind beispielsweise in Weber 2019 zusammengefasst.

### 3.8.2 Festlegungen zur Auswertung der Versuchsergebnisse

#### 3.8.2.1 Verteilung der Rohdaten

Hinsichtlich der Dichtefunktion, die zur Beschreibung der Verteilung der an Stichproben gewonnenen Messergebnissen anzusetzen ist, ist grundsätzlich eine stetige (kontinuierliche) Verteilung angezeigt. Der Ansatz einer diskreten Verteilung (wie sie überwiegend für diverse stochastische Experimente, z. B. „Ziehen einer Kugel aus einer Urne“ verwendet wird) ist insgesamt ungeeignet. Der vorliegende Abschnitt beschäftigt sich intensiv mit der Fragestellung, welche konkrete Häufigkeitsverteilung für die im Folgenden statistisch zu untersuchenden Parameter (Rissbreite, Rissabstand) begründbar herangezogen werden kann.

Im Hinblick auf eine konkrete Verteilung der am Bauwerk messtechnisch erfassten Rissbreiten wird in diesem Zusammenhang in Martin et al. 1980 beschrieben, dass diese weitgehend logarithmisch normalverteilt auftreten. Für die im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit üblicherweise anzutreffende Spannweite der Rissbreiten (bis ca. 0,5 mm) kann näherungsweise auch eine Normalverteilung angenommen werden.

Ausführliche Untersuchungen zur statistischen Verteilung von Rissbreiten und Rissabständen wurden in Bergmeister 1999 vorgenommen. In diesem Zusammenhang wurden Rissbildungen in Hochbaudecken unter Gebrauchslast betrachtet. Zusammenfassend wurde festgestellt, dass die gemessenen Rissbreiten einer Gammaverteilung (s. Bergmeister 1999) folgen. Die Verteilung der Rissabstände kann hingegen hinreichend genau mit einer logarithmischen Normalverteilung abgebildet werden.

Zwecks Überprüfung, ob der Datensatz einer Stichprobe einer konkreten, stetigen Verteilung folgt, sind grundsätzlich verschiedene Vorgehen denkbar. In diesem Zusammenhang kann ein statistischer Signifikanztest (z. B. Shapiro-Wilk-Test, vgl. Weber 2019) oder ein sog. Quantilen-Quantilen-Plot (QQ-Plot, vgl. Eckfeldt 2009) durchgeführt werden. Ebenso ist in diesem Zusammenhang die Entwicklung von Histogrammen als Schätzer der Dichtefunktion oder eine Betrachtung des Variationskoeffizienten der Stichprobe (vgl. Schäper 2010, hinsichtlich etwaiger Unterschiede einer Auswertung unter Zugrundelegung einer Normalverteilung oder logarithmischen Normalverteilung am Beispiel der Druckfestigkeit) möglich. Gemäß Weber 2019 ist ein visueller Vergleich der aus Stichproben entwickelten Histogramme mit der avisierten Verteilung vorliegend insgesamt geeigneter und liefert zutreffendere Ergebnisse als die Durchführung statistischer Signifikanztests. Dies ist insbesondere darin begründet, dass durch statistische Signifikanztests lediglich eine Hypothese (z. B. „die Daten sind normalverteilt“) in definierten Bandbreiten überprüft wird, womit eine gewisse Unschärfe in Bezug auf eine zutreffende Identifikation der tatsächlich vorliegenden Verteilung verbleibt. Weiterhin ist die Aussagekraft solcher Signifikanztests bei kleinen Stichprobenumfängen eingeschränkt.

Die Betrachtung des Variationskoeffizienten  $V_x$  einer Stichprobe als mögliche Schätzgröße für die Wahl der Verteilungsfunktion wird in Schäper 2010 im Zusammenhang

mit der Bestimmung der In-situ-Betondruckfestigkeit thematisiert. Dort wird ausgeführt, dass bei kleinem Stichprobenumfang  $n$  oder bei Variationskoeffizienten der Stichprobe  $V_x$  größer als 0,20 die Bestimmung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit unter Heranziehung einer logarithmischen Normalverteilung zu empfehlen ist, infolgedessen insgesamt keine negativen Ergebniswerte zu erwarten sind. Für Variationskoeffizienten  $V_x$  der Stichprobe kleiner als 0,20 liefern die logarithmische Normalverteilung und die Normalverteilung gemäß Schäper 2010 jeweils weitgehend übereinstimmende Ergebnisse. Für die hier zur statistischen Auswertung herangezogenen experimentellen Versuchsergebnisse stellt es sich so dar, dass der Variationskoeffizient  $V_x$  sowohl für den Rissabstand als auch für die Rissbreite z. T. Werte  $V_x > 0,20$  (bis ca. 0,40) annimmt. Vergleichbare Spannweiten für den Variationskoeffizienten im Rahmen von experimentellen Untersuchungen zur Rissbreite können jedoch auch in der Literatur wiedergefunden werden (z. B. in Martin et al. 1980). Weiterhin liegt für die hier betrachteten Untersuchungsergebnisse jeweils ein verhältnismäßig großer Stichprobenumfang (im Vergleich zu der in Schäper 2010 beschriebenen Auswertung von aus Bestandsbauwerken entnommenen Bohrkernen zur Bestimmung der In-situ-Betondruckfestigkeit) vor. Darüber hinaus besteht im Fall der Rissbreitenauswertung für die vorliegenden Mittelwerte und Streuungen zudem nicht die Gefahr, dass mechanisch unplausible, negative Werte ermittelt werden (so wie es gemäß Schäper 2010 für  $V_x > 0,20$  und dem Ansatz der Normalverteilung erwartbar ist). Somit wird unter Berücksichtigung des Vorgenannten insgesamt auf die Hinzuziehung des Variationskoeffizienten der Stichprobe als Schätzgröße für die Wahl der Verteilungsfunktion im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

In den Abschnitten 3.7.2.2 und 3.7.2.3 wurden die Einzelwerte der Rissbreiten- und Rissabstandsuntersuchungen in Punktwolkendiagrammen mit den jeweils zugehörigen empirischen Dichtefunktionen dargestellt. Unter Berücksichtigung dessen wurde der Versuch unternommen, durch optische Wertung der Häufigkeitsverteilungen auf eine konkrete Verteilung der Rohdaten zu schließen. In diesem Zusammenhang wurden eine Normalverteilung und eine logarithmische Normalverteilung der Rohdaten berücksichtigt. Insbesondere für die Untersuchungsgröße „Rissbreite“ stellt es sich so dar, dass eine konkrete Verteilung nicht uneingeschränkt eindeutig anhand einer optischen Gegenüberstellung identifiziert werden kann. Wie bereits schon im Abschnitt 3.7.2.2 beschrieben, zeigt sich, dass die Häufigkeitsverteilungen lediglich auf Erstrissniveau und darüber hinaus für kleinere Stahlspannungsniveaus ( $\leq 160 \text{ N/mm}^2$ ) hinreichend genau mit einer Normalverteilung angenähert werden können. Dies ist durch eine deutlich sichtbare Symmetrie zum Mittelwert, d. h. auch keine wesentliche Schiefe und einen unimodalen („eingipfligen“) Verlauf begründet.

Jedoch ist auch die Zuordnung zu einer logarithmischen Normalverteilung insgesamt diskussionswürdig. Für größere Spannungsniveaus und der im Zuge dessen einsetzenden sukzessiven Rissbildung weisen die Häufigkeitsverteilungen verstärkt unsymmetrische, „mehrgipflige“ Verläufe (ggf. zusätzlich durch den Einfluss der gewählten Intervallgrenzen und -breiten bedingt) auf. Eine Annäherung an eine Normalverteilung oder eine logarithmische Normalverteilung liegt hierbei fern. Dieser Zusammenhang ist insgesamt für größere Stabdurchmesser (z. B.  $\phi 28 \text{ mm}$  und  $\phi 40 \text{ mm}$ ) im Vergleich zu kleineren Stabdurchmessern (z. B.  $\phi 10 \text{ mm}$ ) stärker ausgeprägt und wurde u. a. auch anhand der in Schäfer 2016 enthaltenen Rissbreitendatenbank überprüft.

Mechanisch können die kleineren Spannweiten der auftretenden Rissbreiten und die damit einhergehende, weniger ausgeprägten „mehrgipfligen“ Verläufe der Häufigkeitsverteilungen bei kleineren Stabdurchmessern auf die kürzere Einleitungslänge zurückgeführt werden. Für den Untersuchungsparameter Rissabstand ist hingegen festzustellen, dass die Häufigkeitsverteilung der Rohwerte überwiegend gute Übereinstimmungen mit einer Normalverteilung zeigen, auch wenn bereichsweise eine (schwach ausgeprägte) positive Schiefe, wie es für eine logarithmische Normalverteilung zutreffend wäre, erkennbar ist.

Voranstehende Betrachtungen zur Verteilung von Einzelwerten in Rissbreitendatenbanken sind üblicherweise in der Literatur nicht wiederzufinden. Dort fehlen auch weitgehend belegbare Annahmen im Hinblick auf gewählte Verteilungsansätze im Zuge der statistischen Auswertung. Oftmals werden lediglich pauschale Annahmen ohne weitergehende Begründungen für die statistische Auswertung zugrunde gelegt. Eine Ausnahme stellt in diesem Zusammenhang das in Eckfeldt 2009 beschriebene Vorgehen dar. Dort wurden sog. frequentistische Versuchsauswertungen vorgenommen, im Rahmen derer die (Häufigkeits-) Verteilungen der experimentell gewonnenen Einzelwerte für den Rissabstand  $s_{r,i}$  und die Rissbreite  $w_i$  aufgetragen wurden. In Abb. 3-45 sind solche Auswertungen exemplarisch dargestellt.

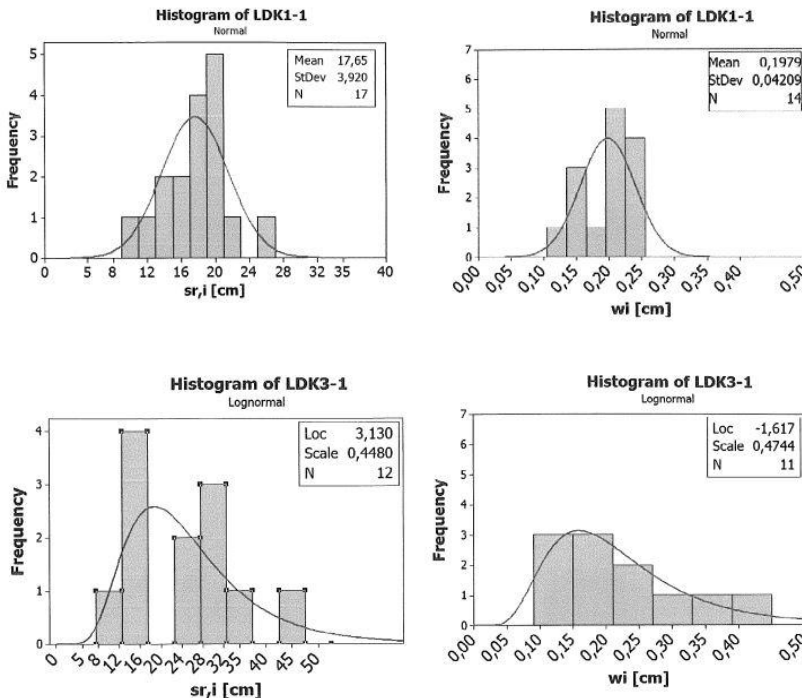


Abb. 3-45: Frequentistische Versuchsauswertungen mit Darstellungen der Verteilungen der Einzelwerte für den Rissabstand  $s_{r,i}$  und die Rissbreite  $w_i$  (aus Eckfeldt 2009)

Die dargestellten Versuchsergebnisse zu  $s_{r,i}$  und  $w_i$  wurden für ein Stahlspannungsniveau in Höhe von ca. 350 N/mm<sup>2</sup> aufgenommen. Gemäß Eckfeldt 2009 kann für den

Zeitpunkt der Aufnahme unterstellt werden, dass annähernd ein abgeschlossenes Rissbild vorliegt und dass über dieses Belastungsniveau hinaus keine weiteren größeren Trennrisse eintreten, obwohl die Rissbildung vollständig noch nicht abgeschlossen ist.

Insgesamt stellen sich die Häufigkeitsverteilungen der Einzelwerte als normal- oder logarithmisch-normalverteilt dar. Darüber hinaus kann gemäß Eckfeldt 2009 weiterhin angenommen werden, dass sich die Verteilungen des Rissabstandes und der Rissbreite in einem Bauteil grundsätzlich ähnlich darstellen.

Dass die Einzelwerte des Rissabstandes und der Rissbreite normalverteilt vorliegen und dass infolgedessen (zwangsläufig) eine Ähnlichkeit im Hinblick auf die Verteilungen der beiden Untersuchungsparameter besteht, kann anhand der eigenen Versuche ebenfalls festgestellt werden. Jedoch stellt es sich so dar, dass eine eindeutige Übereinstimmung der aus den Rohwerten erzeugten Häufigkeitsverteilung mit der Normalverteilung für die Rissbreite nur auf Erstrissniveau gezeigt werden kann. In Eckfeldt 2009 wird dies für ein deutlich größeres Stahlspannungsniveau (ca. 350 N/mm<sup>2</sup>) nachgewiesen. Für die eigenen Versuche sind für größere Stahlspannungsniveaus (und im Zuge der einsetzenden sukzessiven Rissbildung) dagegen unsymmetrische, „mehrgipflige“ Verläufe der Häufigkeitsverteilungen zu beobachten, sodass ein Rückschluss auf eine Normalverteilung nicht uneingeschränkt angezeigt ist.

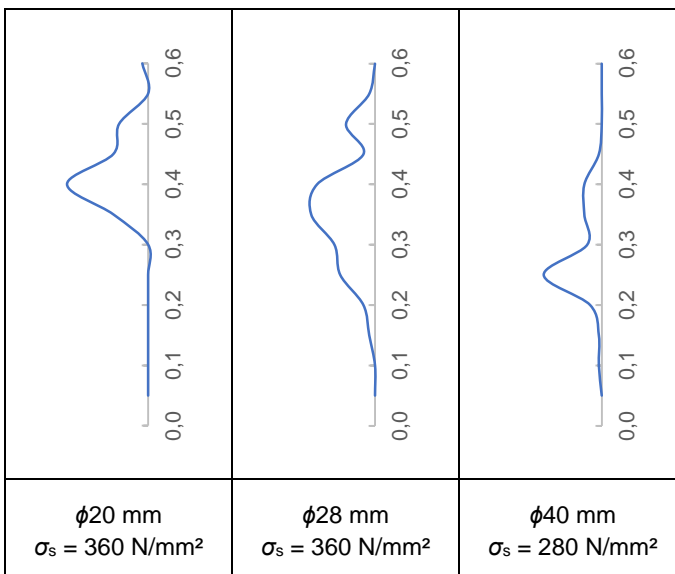
Begründet werden kann dies möglicherweise durch das aufgebrachte Lastregime im Zuge der Versuchsdurchführung. In Eckfeldt 2009 wurden die Dehnkörper sukzessive bis zum Auftreten eines Risses (Erfassung der Rissbildung durch optische Detektion) belastet. Dann wurde die Belastung angehalten und die Rissbildung vermessen und dokumentiert. Dies wurde solange fortgesetzt, bis keine weitere nennenswerte Trennrissbildung verzeichnet werden konnte. Grundsätzlich war die Rissbildung insgesamt zu diesem Zeitpunkt jedoch noch nicht zwingend vollständig abgeschlossen. Weitere Trennrisse kleinerer Breite wurden nicht aufgenommen. Es ist daher möglich, dass in Eckfeldt 2009 weitgehend nur diejenigen Trennrisse (bei einer anliegenden Stahlspannung von ca. 350 N/mm<sup>2</sup>) ausgewertet wurden, die bereits auf Erstrissniveau ausgebildet waren und sich im Zuge der weiteren Belastung entsprechend aufgeweitet haben. Die in Abb. 3-45 erkennbar geringen Spannweiten der Rissbreiten (0,10 mm - 0,25 mm) stützen diese These. In den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Bauteilversuchen wurden definierte Laststufen angefahren. Sämtliche bis dahin vorliegenden Rissbildungen, also neue Rissbildungen und Rissaufweitungen bereits bestehender Risse, wurden in der Auswertung berücksichtigt. Die Bandbreiten der Rissbreiten stellen sich deutlich größer dar und betragen in diesem Zusammenhang für ein vergleichbares Stahlspannungsniveau ca. 0,05 mm bis 0,50 mm.

Einen Einfluss der Versuchskörperkonzeption kann an dieser Stelle weitgehend ausgeschlossen werden, da die Dehnkörperquerschnitte in Eckfeldt 2009 in guter Näherung mit denjenigen in Schäfer 2016 (insbesondere Serie 1) vergleichbar sind. Auch im Hinblick auf den verwendeten Stabdurchmesser ( $\phi$ 16 mm und  $\phi$ 20 mm in Eckfeldt 2009,  $\phi$ 10 mm bis  $\phi$ 40 mm in Schäfer 2016) existieren in Bezug auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse keine Vorbehalte. In den Abb. 3-29 und Abb. 3-30 werden diesbezüglich die Häufigkeitsverteilungen der Einzelwerte aus Schäfer 2016

dargestellt und es kann beobachtet werden, dass diese den Häufigkeitsverteilungen der eigenen Versuche grundsätzlich ähneln (d. h. unabhängig von der Querschnittskonzeption).

Insgesamt ist aber festzustellen, dass der Betrachtung der Häufigkeitsverteilungen im Hinblick auf die Rissbreite unterschiedliche Grenzzustände des Rissbildes zugrunde liegen. Während für die eigenen Versuche das Erstrissniveau herangezogen wird, liegt der Fokus in Eckfeldt 2009 auf dem abgeschlossenen Rissbild. Um in diesem Zusammenhang eine bessere Vergleichbarkeit herzustellen, werden nachfolgend die Häufigkeitsverteilungen der Rissbreiteneinzelwerte wie folgt, modifiziert zu Abschnitt 3.7.2.2 am Beispiel der Serie 1 (C30/37), ausgewertet. Es werden dabei lediglich die Rissbreiten derjenigen Rissstellen auf einem Stahlspannungsniveau von 360 N/mm<sup>2</sup> (für  $\phi 20$  mm und  $\phi 28$  mm) bzw. 280 N/mm<sup>2</sup> (für  $\phi 40$  mm) berücksichtigt, die bereits auf Erstrissniveau vorhanden waren. D. h. es werden ausschließlich Rissaufweitungen, aber keine noch im Zuge der sukzessiven Rissbildung neu entstehende Rissbildungen einbezogen. Die so resultierenden Häufigkeitsverteilungen sind nachfolgend dargestellt.

Tab. 3-6: Modifizierte Häufigkeitsverteilungen der Rissbreite, Serie 1, C30/37



Im Vergleich zu den im Abschnitt 3.7.2.2 dargestellten Häufigkeitsverteilungen ist nun erkennbar, dass die Verläufe insgesamt „geglätteter“ erscheinen und eine geringfügig ausgeprägtere Symmetrie aufweisen. Eine Annäherung des Verlaufs an denjenigen einer Normalverteilung oder logarithmischen Normalverteilung ist jedoch weiterhin nicht erkennbar (ggf. ist auch darüber hinaus ein Einfluss der gewählten Intervallgrenzen und -breiten nicht auszuschließen).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die in Eckfeldt 2009 dargestellten Häufigkeitsverteilungen der Einzelwerte in Bezug auf den Rissabstand anhand der eigenen Versuchsergebnisse bestätigt werden können. Für die Rissbreite stellt es sich so dar,

dass die in Eckfeldt 2009 beschriebenen Verteilungsarten anhand der eigenen Versuche zwar im Grundsatz ebenfalls verifiziert werden konnten, jedoch werden in diesem Zusammenhang insgesamt Rissentwicklungen in unterschiedlichen Grenzzuständen (Erstrissniveau für eigene Versuche und abgeschlossenes Rissbild in Eckfeldt 2009) betrachtet.

Insgesamt muss jedoch befunden werden, dass die als Schätzer entwickelten empirischen Dichtefunktionen nicht uneingeschränkt eindeutig auf eine konkrete Verteilung (hier Normalverteilung oder logarithmische Normalverteilung) schließen lassen. Für die empirischen Dichtefunktionen ist an dieser Stelle kritisch zu hinterfragen, ob die jeweilig resultierenden Verläufe ggf. durch die vorgegebenen Intervallbreiten beeinflusst werden.

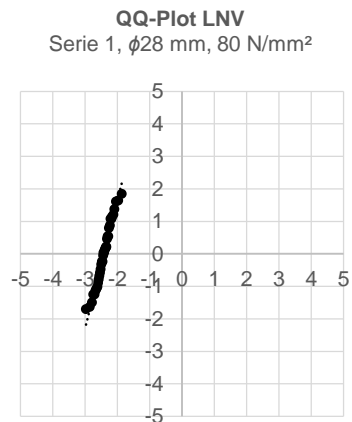
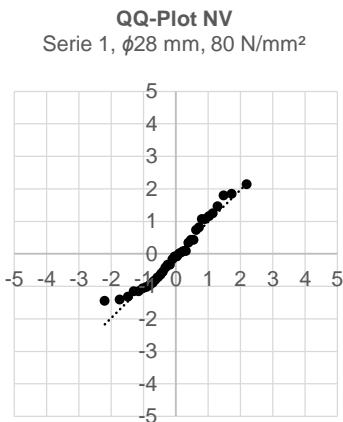
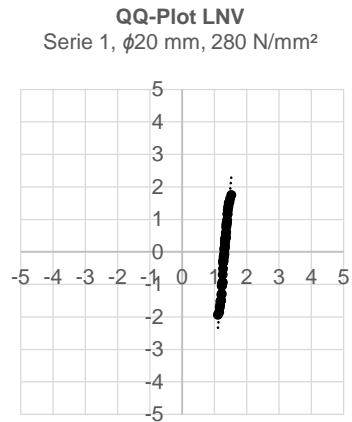
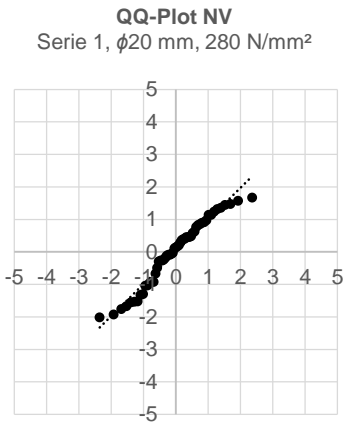
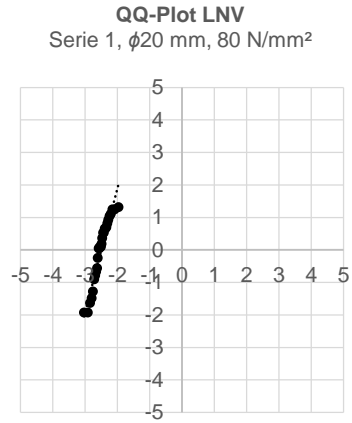
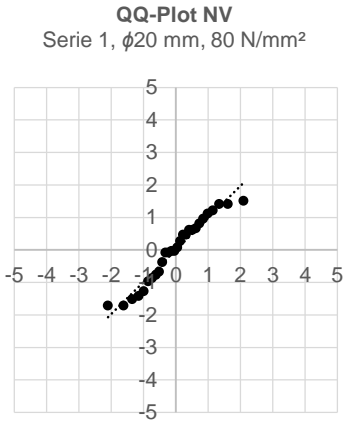
Vor dem Hintergrund eines unklaren Befundes wird nachfolgend eine weitere Möglichkeit der grafischen Überprüfung und der Feststellung, ob einer Stichprobe eine diskrete Verteilung zuzumessen ist, verfolgt. Mit Hilfe der Quantilen-Quantilen-Plots (QQ-Plots) kann im vorliegenden Fall ausschließlich überprüft werden, ob die jeweils zugrunde gelegten Stichproben normalverteilt oder logarithmisch normalverteilt sind. Hierzu werden  $p$ -Quantile des Datensatzes (Stichprobe) den theoretischen Quantilen der avisierten Verteilung gegenübergestellt. Sofern die so resultierenden Datenpunkte linear entlang einer ansteigenden Geraden angeordnet sind, kann die jeweils aufgerufene Hypothese (z. B. „Datensatz ist normalverteilt“) bestätigt werden. Ist hingegen eine beliebige, unstetige Anordnung der Datenpunkte erkennbar und liegen diese nicht auf einer Geraden, ist die Hypothese widerlegt oder es sind zumindest Unschärfen in der Identifikation angezeigt.

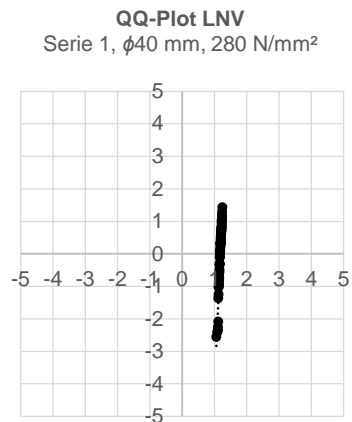
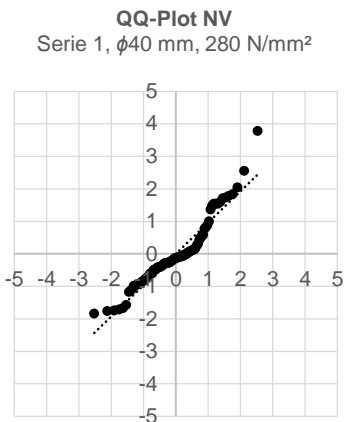
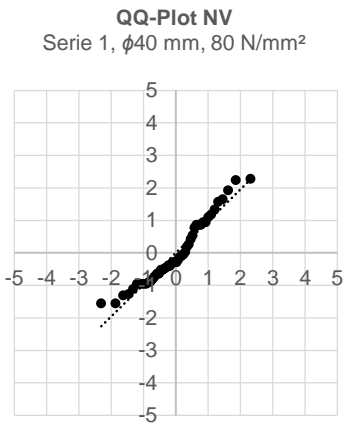
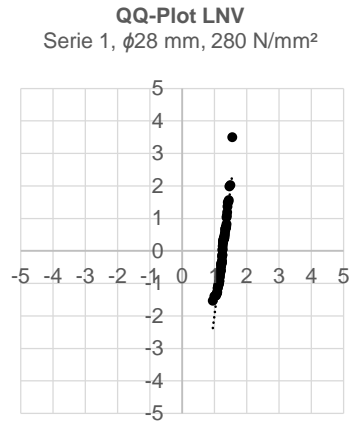
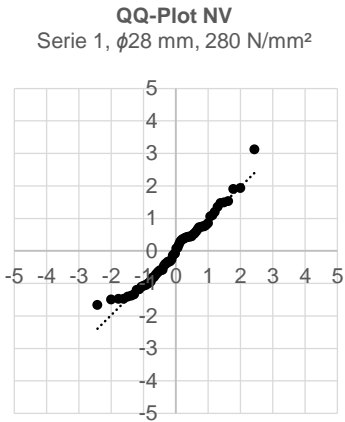
Gemäß Eckfeldt 2009 sind die QQ-Plots jedoch nur dann hinreichend aussagefähig, sofern der zu untersuchende Datensatz einen Stichprobenumfang  $n > 30$  aufweist. Dies zugrunde legend werden vorliegend deshalb nur die Serien 1 und 2 hinsichtlich der Rissbreite und des Rissabstandes ausgewertet. Die QQ-Plots für die übrigen Serien sind der Vollständigkeit halber jedoch den entsprechenden Anhängen beigelegt.

Zur Erfassung etwaiger Einflüsse des Risszustandes werden nachfolgend die Stahlspannungsniveaus  $\sigma_s = 80 \text{ N/mm}^2$  (Erstrissniveau) und  $\sigma_s = 280 \text{ N/mm}^2$  (sukzessive Rissbildung) berücksichtigt. Die ausgewerteten Rissbreiten und Rissabstände wurden jeweils auf der Bauteiloberfläche aufgenommen. Die Ergebnisse zur Bauteilseitenfläche werden vorliegend nicht berücksichtigt.

Es werden nachfolgend die Datensätze auf Normalverteilung (NV) und auf logarithmische Normalverteilung (LNV) hin überprüft. Die zugehörigen Diagramme sind betitelt, sodass eine Zuordnung weitgehend selbsterklärend ist. Die in diesem Zusammenhang dargestellten QQ-Plots wurden u. a. im Rahmen einer Vertieferarbeit (Prinz 2021) am Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion der Technischen Universität Kaiserslautern erarbeitet.

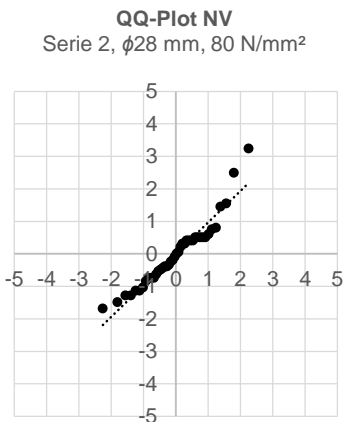
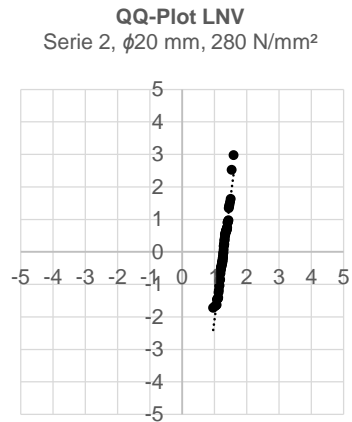
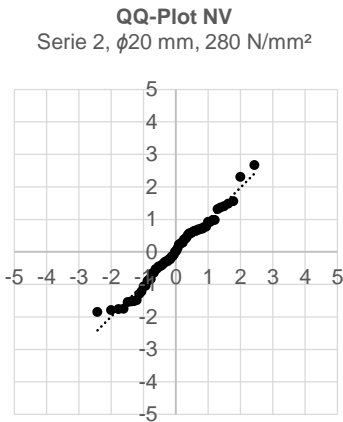
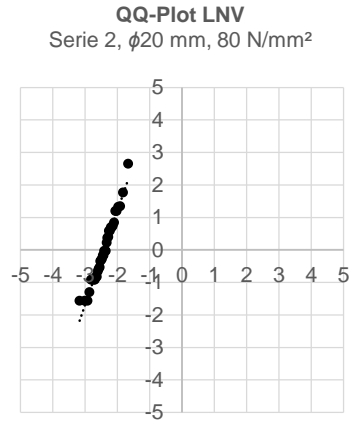
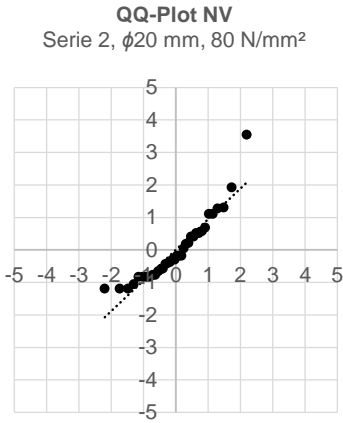
**Rissbreite, Serie1,  $\phi 20$  mm,  $\phi 28$  mm und  $\phi 40$  mm, C30/37**

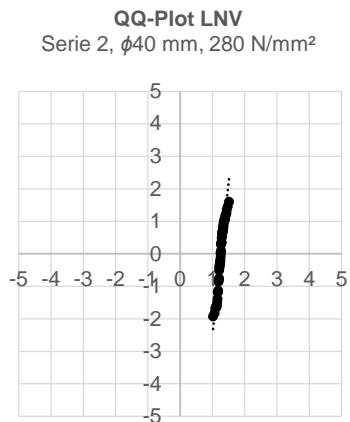
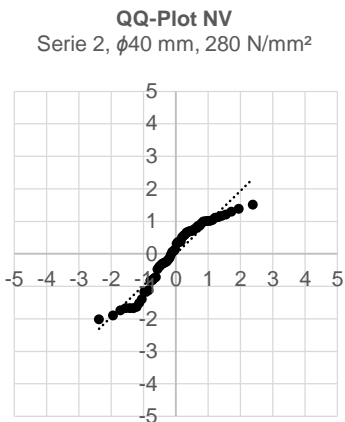
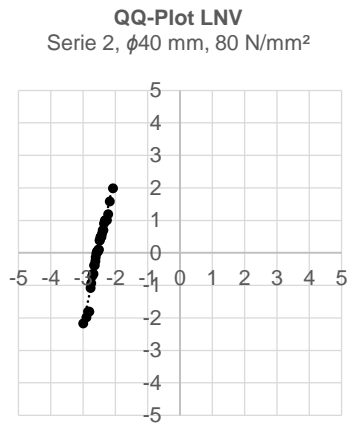
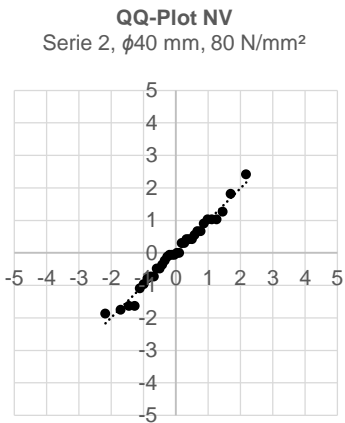
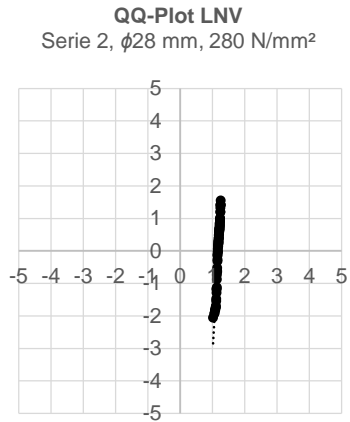
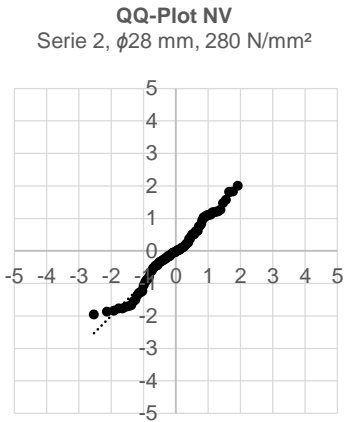






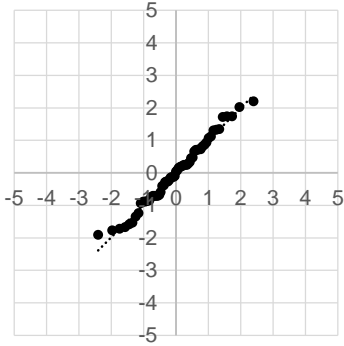
**Rissbreite, Serie 2,  $\phi 20$  mm,  $\phi 28$  mm und  $\phi 40$  mm, C30/37**



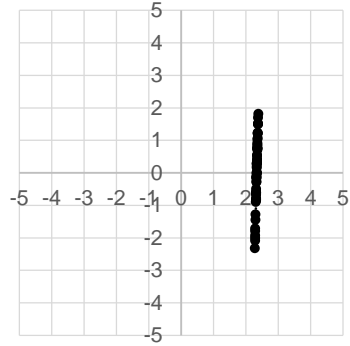


Rissabstand, Serie 1,  $\phi 20$  mm,  $\phi 28$  mm und  $\phi 40$  mm, C30/37

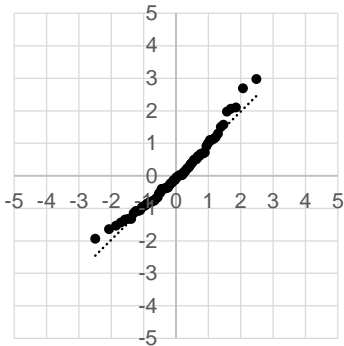
QQ-Plot NV  
Serie 1,  $\phi 20$  mm



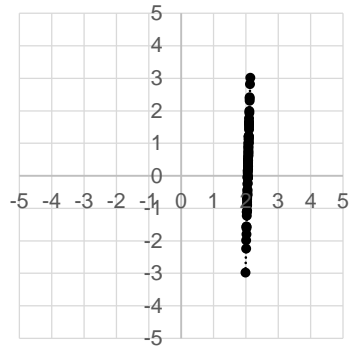
QQ-Plot LNV  
Serie 1,  $\phi 20$  mm



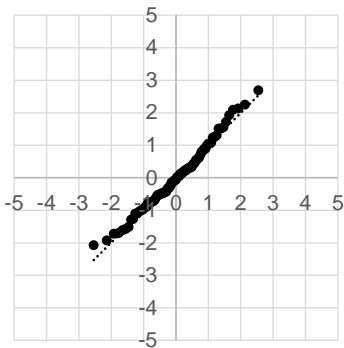
QQ-Plot NV  
Serie 1,  $\phi 28$  mm



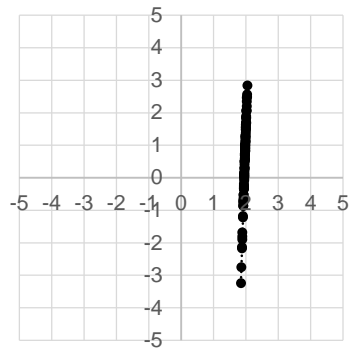
QQ-Plot LNV  
Serie 1,  $\phi 28$  mm



QQ-Plot NV  
Serie 1,  $\phi 40$  mm

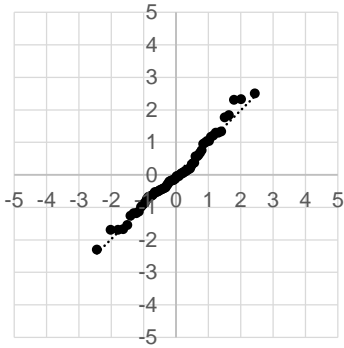


QQ-Plot LNV  
Serie 1,  $\phi 40$  mm

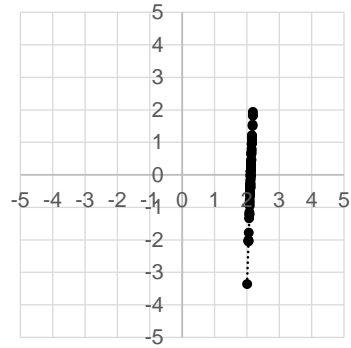


Rissabstand, Serie 2,  $\phi 20$  mm,  $\phi 28$  mm und  $\phi 40$  mm, C30/37

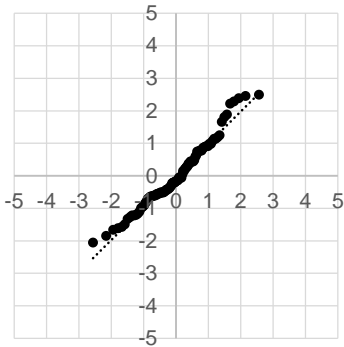
QQ-Plot NV  
Serie 2,  $\phi 20$  mm



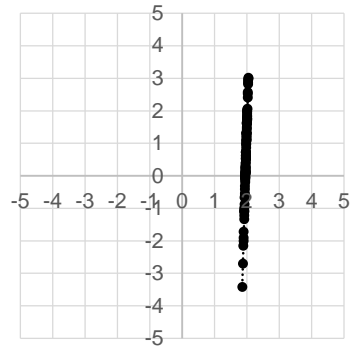
QQ-Plot LNV  
Serie 2,  $\phi 20$  mm



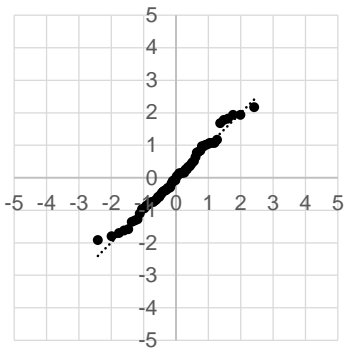
QQ-Plot NV  
Serie 2,  $\phi 28$  mm



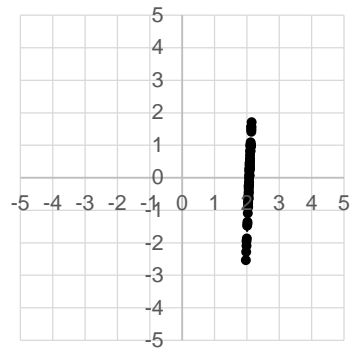
QQ-Plot LNV  
Serie 2,  $\phi 28$  mm



QQ-Plot NV  
Serie 2,  $\phi 40$  mm



QQ-Plot LNV  
Serie 2,  $\phi 40$  mm



Auch anhand der voranstehend erzeugten QQ-Plots ist kein uneingeschränkt eindeutiger, allgemeingültiger Befund im Hinblick auf die Annahme einer Verteilung der Rissbreite möglich.

Bei Betrachtung der Normalverteilung stellt es sich so dar, dass für kleinere Stahlspannungsniveaus ( $80 \text{ N/mm}^2$ ) insgesamt eine bessere Übereinstimmung mit der aufgerufenen Hypothese (NV) zu erkennen ist als für größere Stahlspannungsniveaus ( $280 \text{ N/mm}^2$ ). Hier liegen die Datenpunkte annähernd auf einer Geraden (bei Ausblendung der Größt- und Kleinstwerte). Für größere Stahlspannungen ist hingegen eine beliebige, unstetige Anordnung der Datenpunkte festzustellen. Bei Hypothese logarithmische Normalverteilung (LNV) sind insgesamt bessere Übereinstimmungen zu erkennen, aber auch hier ergeben sich z. T. unstetige Anordnungen.

Für den Rissabstand ist eine Identifikation der logarithmischen Normalverteilung angezeigt, obwohl die aus den Histogrammen erzeugten empirische Dichtefunktionen auch hinreichend eindeutig auf eine Normalverteilung schließen lassen.

Zusammenfassend kann befunden werden, dass sich ausgehend von den aufgezeigten Vorgehensweisen zur Identifikation einer konkreten Verteilung der experimentell ermittelten Rohdaten (Entwicklung von Histogrammen als Schätzer der Dichtefunktion oder QQ-Plots) unterschiedliche Schlussfolgerungen ergeben. Es kann infolgedessen damit sowohl die Annahme einer Normalverteilung als auch die einer logarithmischen Normalverteilung nachweislich fallweise (z. B. je nach betrachtetem Stabdurchmesser oder Serie) begründet werden. Ganz offensichtlich kann vorliegend eine „Mischverteilung“ unterstellt werden (dies wurde vergleichsweise auch in Eckfeldt 2009 postuliert).

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass mit Hilfe der beiden vorgestellten Verfahren lediglich Näherungslösungen möglich sind, die fallweise eine genügend genaue Übereinstimmung mit einer Normalverteilung oder logarithmischen Normalverteilung zeigen.

Vor dem Hintergrund, dass für den Rissabstand fallweise eine annähernd gute Übereinstimmung der aus den Rohwerten erzeugten Häufigkeitsverteilung mit der Normalverteilung gezeigt werden kann (auch wenn anhand der QQ-Plots diesbezüglich ein Rückschluss auf eine logarithmische Normalverteilung angezeigt ist) und dass gemäß Eckfeldt 2009 grundsätzlich eine Ähnlichkeit im Hinblick auf die Verteilungen des Rissabstandes und der Rissbreite im Bauteil begründet ist (auf Erstrissniveau konnte zudem auch für die Häufigkeitsverteilung der Rissbreite näherungsweise festgestellt werden, dass diese einer Normalverteilung folgt), soll insgesamt unterstellt werden, dass die vorliegenden Rohdaten (Rissbreite und Rissabstand) jeweils normalverteilt sind. Es wird im Rahmen dieser Arbeit bewusst davon abgesehen, unterschiedliche Datensätze unter Zugrundelegung verschiedener Verteilungen – so wie es vorliegend für die Rissbreite bei Betrachtung unterschiedlicher Stahlspannungsniveaus ggf. angezeigt wäre – auszuwerten, sondern es wird vielmehr eine „einheitliche Auswertung“ mit identischen Randbedingungen verfolgt.

Im Rahmen der statistischen Auswertungen zur Rissbreite und zum Rissabstand wird daher angenommen, dass die experimentell ermittelten Rohdaten jeweils normalver-

teilt sind. Diese Annahme kann grundsätzlich gemäß den voranstehenden Feststellungen kontrovers und ergebnisoffen diskutiert werden. Der Ansatz einer logarithmischen Normalverteilung, welcher exemplarisch in diesem Zusammenhang für den vorliegenden Datensatz im Abschnitt 3.8.5 dieser Arbeit überprüft wird, führt jedoch zu weitgehend vergleichbaren Fraktilwerten  $w_{0,75}$  mit vernachlässigbaren Abweichungen (vorliegend  $\leq 5\%$ , s. hierzu auch Abb. 3-47; dies wird im Grundsatz ebenfalls so auch in Empelmann et al. 2015a beschrieben), sodass die diesbezügliche Festlegung nicht weiter diskutiert wird. Der Ansatz einer logarithmischen Normalverteilung ist damit auch nicht Gegenstand der statistischen Auswertung in Abschnitt 3.8.3.

Andere, ggf. ebenfalls geeignete stetige Verteilungen (z. B. Gammaverteilung in Anlehnung an Bergmeister 1999) werden vorliegend nicht weiter untersucht.

#### 3.8.2.2 Fraktilwert und Konfidenzniveau

Im Rahmen der statistischen Auswertung der Versuchsergebnisse (Oberflächenrissbreite und Rissabstand) und auch im Hinblick auf eine Gegenüberstellung der Versuchswerte mit Rechenwerten wird gemäß den Feststellungen in Abschnitt 2.7.5 das 75 %-Fraktile  $w_{0,75}$  der Rissbreite sowie das 75 %-Fraktile des Rissabstandes  $s_{0,75}$  angenommen. Damit wird ein unterer Grenzwert für die gemäß DBV 2016 angegebenen Bandbreiten zugrunde gelegt, wonach der Rechenwert  $w_k$  der Rissbreite nach DIN EN 1992-1-1/NA insgesamt als ein 70–90 %-Fraktile für die zu erwartende Rissbreite zu verstehen ist.

Für eine Versuchsnachrechnung nach DIN EN 1992-1-1 (s. Abschnitt 5) wird exemplarisch auch das 95 %-Fraktile  $w_{0,95}$  der Rissbreite herangezogen. Dies ist vor dem Hintergrund der in Abschnitt 2.7.5 beschriebenen Feststellungen im Hinblick auf die Herleitung der Bemessungsgleichung nach DIN EN 1992-1-1 angezeigt.

Weiter wird das 75 %-Konfidenzniveau ( $1 - \alpha = 0,75$ ) herangezogen. Damit wird im vorliegenden Fall unterstellt, dass ein im Zuge der statistischen Auswertung der vorhandenen Stichprobe ermittelter Wert auch mit 75 % Wahrscheinlichkeit für die Grundgesamtheit zutreffend ist. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der vorliegend hohen Variationskoeffizienten ( $V_x > 0,20$ , bis ca. 0,40) statthaft und wird in dieser Form auch vergleichsweise in der Literatur vorgegeben (z. B. Fischer 1995). Ein Ansatz eines größeren Konfidenzniveaus (z. B. 95 %) wird in dieser Arbeit nicht empfohlen.

#### 3.8.2.3 Auswerteverfahren

Die avisierten charakteristischen Größen  $w_{0,75}$  (Rissbreite) und  $s_{0,75}$  (Rissabstand) werden unter Zugrundelegung des Vorgehens nach DIN ISO 16269-6, zur Bestimmung einseitig nach oben begrenzter Anteilsbereiche mit Abdeckung  $p = 75\%$ , bei einem Vertrauensniveau  $(1 - \alpha) = 75\%$  und unbekannter Varianz, berechnet. Die Anwendung des Verfahrens nach DIN ISO 16269-6 und die damit einhergehende Verwendung der dort tabellierten Fraktilefaktoren (vgl. Faktor  $k_3$  in Gl. 3-3) unterstellt eine Normalverteilung. Für den Fall, dass andere konkrete Verteilungen als die Normalverteilung (z. B. logarithmische Normalverteilung) zugrunde liegen oder dass gar verteilungsfreie Datensätze anzunehmen sind, beinhaltet DIN ISO 16269-6 ein alternatives Vorgehen. Gemäß Zupan et al. 2007 kann in diesem Zusammenhang

aber dennoch festgestellt werden, dass die in DIN ISO 16269-6 für eine Normalverteilung tabellierten Fraktilefaktoren auch für eine logarithmische Normalverteilung herangezogen werden können (dies wird auch in Schoening 2018 ohne weitere Begründung so unterstellt).

Die Festlegung eines nach oben begrenzten Anteilsbereichs erfolgt in Anlehnung an das in den Eurocodes integrierte semi-probabilistische Zuverlässigkeitskonzept. Demnach werden sowohl die für die Einwirkungsseite als auch die für Widerstandseite statistische Unter- und Obergrenzen als Fraktile angegeben. Im Hinblick auf die Betrachtungen zum Rissgeschehen können die Rissbreite oder der Rissabstand als obere Fraktilewerte aufgefasst werden. Es sind somit betragsmäßig größere Zahlenwerte als der Mittelwert zu bestimmen. Größere (als die berechneten) am Bauteil auftretende Rissbreiten oder Rissabstände können jedoch grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden.

Das nachfolgend beschriebene, konkrete Vorgehen gemäß der ehemals bauaufsichtlich eingeführten deutschen Norm DIN ISO 16269-6 zur Bestimmung eines charakteristischen Wertes kann als klassisches statistisches Verfahren beschrieben werden. Die dort tabellierten Fraktilefaktoren  $k_3$  (in Abhängigkeit von  $n$ ,  $p$ ,  $(1 - \alpha)$ ) werden im Rahmen der vorliegenden Versuchsauswertung unabhängig vom gegenwärtigen Status der in Rede stehenden Norm angewendet.

Die obere Grenze des einseitig nach oben begrenzten Anteilsbereichs mit Abdeckung  $p$  bei einem Vertrauensniveau  $(1 - \alpha)$  berechnet sich gemäß DIN ISO 16269-6 allgemeingültig zu:

$$x_U = \bar{x} + k_3(n; p; 1 - \alpha) \cdot s \tag{Gl. 3-3}$$

|     |           |   |
|-----|-----------|---|
| mit | $x_U$     | obere Grenze des statistischen Anteilsbereichs  |
|     | $\bar{x}$ | Stichprobenmittelwert   |
|     | $k_3$     | Fraktilefaktor (tabelliert in DIN ISO 16269-6) für einseitig nach oben begrenzten statistischen Anteilsbereich und unbekannte Varianz, in Abhängigkeit des Stichprobenumfangs $n$ , des für den Anteilsbereich gewählten Anteils der Grundgesamtheit $p$ und des Vertrauensniveaus $(1 - \alpha)$ |
|     | $s$       | Stichprobenstandardabweichung   |

Zur besseren Lesbarkeit werden die in Gl. 3-3 genannten Parameter im Hinblick auf die zu ermittelnde charakteristische Rissbreite  $w_{0,75}$  (Rissabstand  $s_{0,75}$  analog) nachfolgend umgeschrieben und in Anlehnung an Gleichung (D.1) aus DIN EN 1990 umgestellt:

$$w_{0,75} = w_m \cdot (1 + k_3(n; p; 1 - \alpha) \cdot V_x) \tag{Gl. 3-4}$$

|     |       |                                      |
|-----|-------|--------------------------------------|
| mit | $w_m$ | Mittelwert der Rissbreite            |
|     | $V_x$ | Variationskoeffizient der Stichprobe |

Der Variationskoeffizient  $V_x$  kann nicht aus Vorinformationen bestimmt werden und ist daher als „unbekannt“ anzusetzen. Er kann wie folgt abgeschätzt werden:

$$V_X = \frac{s_x}{w_m}$$

Gl. 3-5

mit  $s_x$  Standardabweichung der Stichprobe

Eine Berechnung des Variationskoeffizienten nach Gl. 3-5 ist für die Bestimmung der charakteristischen Rissbreite als obere Grenze des Anteilsbereichs nicht zwingend erforderlich (Bestimmung der Standardabweichung der Stichprobe in Gl. 3-3). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll dies aus Gründen der Vergleichbarkeit mit anderen experimentellen Rissbreitenuntersuchungen (z. B. Schäfer 2016) dennoch vorgenommen werden.

Das in DIN EN 1990 beschriebene und im vorliegenden Fall ebenfalls zur Anwendung geeignete Bayes'sche Verfahren basiert nicht auf der Verwendung eines Konfidenzniveaus. Die damit erzielten Ergebnisse entsprechen jedoch ungefähr den mit klassischen statistischen Verfahren und einem Konfidenzniveau von 75 % ermittelten Werten. Zwischen den in DIN ISO 16269-6 tabellierten und den in Anlehnung an DIN EN 1990 (75 %-Quantil, einseitiger Vertrauensbereich,  $t$ -Verteilung) ermittelten Fraktilefaktoren  $k_n$  bestehen geringfügige Unterschiede. Es wird an dieser Stelle aber angemerkt, dass eine direkte Vergleichbarkeit nicht gegeben ist, da beide Verfahren auf grundsätzlich unterschiedlichen Ansätzen beruhen.

Die voranstehenden Berechnungsformeln gelten analog auch für den Rissabstand.

Die o. g. Fraktilwerte  $w_{0,75}$  und  $s_{0,75}$  werden vorliegend exemplarisch auch unter Zugrundelegung einer logarithmischen Normalverteilung gemäß der in DIN EN 1990 in Tab. D.1 angegebenen Zusammenhänge ermittelt.

Die Bestimmung der charakteristischen Größen  $w_{0,75}$  (Rissbreite) und  $s_{0,75}$  (Rissabstand) mit alternativen Auswerteverfahren (z. B. Attributverfahren, exemplarisch dargestellt in DBV 2016) wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter thematisiert.

#### 3.8.3 Ergebnisse der statistischen Versuchsauswertung

Die Ergebnisdarstellung der statistischen Versuchsauswertung hinsichtlich der charakteristischen Rissbreite  $w_{0,75}$  und des charakteristischen Rissabstands  $s_{0,75}$  erfolgt tabellarisch. Diese Tabellen sind entsprechend beschriftet (Serie, Stabdurchmesser), sodass diese weitestgehend selbsterklärend sind. Der jeweilig zugrunde gelegte Beobachtungsbereich (Bauteiloberfläche, Bauteilseitenfläche) ist dabei mit einem Pfeil gekennzeichnet.

In den jeweiligen Tabellen werden die deskriptiven statistischen Kenngrößen wie folgt angegeben:

- $w_{max} / s_{max}$  maximale Einzelmesswerte (Rissbreite / Rissabstand),
- $w_m / s_m$  Mittelwerte (Rissbreite / Rissabstand),
- $s_x$  Standardabweichung der Stichprobe,
- $V_x$  Variationskoeffizient der Stichprobe, gemäß Gl. 3-5,
- $n$  Stichprobenanzahl,



- $k_n$  Fraktilefaktor (entspricht gleichbedeutend  $k_3$  in Gl. 3-4),
- $w_{0,75} / s_{0,75}$  charakteristische Rissbreite / Rissabstand gemäß Gl. 3-4.

Aus Gründen der Übersicht werden die Ergebnisse der statistischen Auswertung ausschließlich in Anhang B und in Anhang C dargestellt.

### 3.8.4 Bewertung der Ergebnisse

#### 3.8.4.1 Vergleich mit anderen Datenbanken

Auf Grundlage der Bauteilversuche konnte eine Datenbank mit ca. 5.800 Rohwerten zur Rissbreite (davon entfallen ca. 2.000 Einzelwerte auf  $\phi 20$  mm, ca. 2.300 Einzelwerte auf  $\phi 28$  mm und ca. 1.500 Einzelwerte auf  $\phi 40$  mm, es wurden jedoch lediglich Rissbreiten  $> 0,05$  mm ausgewertet) und ca. 1.500 Rohwerten zum Rissabstand (ca. 500 Einzelwerte je betrachtetem Stabdurchmesser) erstellt werden. Diese Rohwerte wurden getrennt nach betrachtetem Stabdurchmesser und Versuchsserie für jeweils sechs bzw. vier unterschiedliche Stahlspannungsniveaus statistisch ausgewertet (s. Abschnitt 3.8.3), sodass insgesamt 200 Datensätze für die charakteristische Rissbreite  $w_{0,75}$  (für die Beobachtungsbereiche „Oberfläche“ und „Seitenfläche“ gemäß Abb. 3-13) und 38 Datensätze für den charakteristischen Rissabstand  $s_{0,75}$  (ebenfalls für die Beobachtungsbereiche „Oberfläche“ und „Seitenfläche“ gemäß Abb. 3-13) berücksichtigt werden konnten. Im Vergleich zu DBV 2019 (123 Datensätze) und Schäfer 2016 (204 Datensätze) ist damit festzustellen, dass der eigenen Versuchsdatenbank ebenfalls eine hinreichende Aussagekraft und (statistische) Belastbarkeit zugemessen werden kann.

Die Untersuchungsergebnisse zum Rissgeschehen weisen verhältnismäßig große Streuungen auf. So kann sowohl für die Rissbreite als auch für den Rissabstand der eigenen Versuche festgestellt werden, dass der Variationskoeffizient teilweise bis ca.  $V_x \leq 0,45$  beträgt.

Im Detail ist hier außerdem für die Rissbreite erkennbar, dass der Variationskoeffizient tendenziell mit zunehmendem Stahlspannungsniveau ebenfalls zunimmt. Dies ist auf die festgestellten größeren Spannweiten der Einzelwerte für höhere Stahlspannungsniveaus (als auf Erstrissniveau) zurückzuführen und kann anhand der in Abschnitt 3.7.2.2 dargestellten Punktwolkendiagramme nachvollzogen werden. Für den Beobachtungsbereich „Seitenfläche“ stellt sich im Vergleich zur „Bauteiloberfläche“ zudem ein höherer Variationskoeffizient ( $V_x \leq 0,60$ ) ein. Dies ist vor dem Hintergrund eines deutlich kleineren Stichprobenumfangs und der angetroffenen Größenunterschiede der Rissbreite zwischen „Trennrissen“ und „Zwischenrissen“ so erwartbar.

Insgesamt ist festzustellen, dass die hier vorliegenden Bandbreiten für den Variationskoeffizienten im Rahmen von Untersuchungen zum Rissgeschehen in vergleichbarer Größenordnung so auch in der Literatur wiedergefunden werden können. Es werden beispielsweise in DBV 2019 (bzw. Empelmann et al. 2015b) für den Variationskoeffizienten  $V_x$  Werte zwischen 0,29 und 0,50 angegeben. In Schäfer 2016 sind diesbezüglich Werte für  $V_x$  größer als 0,40 und z. T. bis 0,68 dokumentiert. Auch frühere Untersuchungen in Martin et al. 1980 bestätigen die zuvor genannten Spannweiten des Variationskoeffizienten in guter Näherung.

#### 3.8.4.2 Rissbreite $w_{0,75}$

Bei den 200 Datensätzen zur charakteristischen Rissbreite  $w_{0,75}$  handelt es sich ausnahmslos um auf der Bauteiloberfläche gemessene Rissbreiten.

Im Abschnitt 3.7.2 wurden die Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung bereits ausführlich auf Mittelwertniveau beschrieben. Obwohl der Mittelwert insgesamt keinen robusten Schätzer für die gesuchte charakteristische Rissbreite darstellt und der Fraktilwert der Rissbreite wesentlich durch die deskriptiven Eigenschaften der zugrundeliegenden Stichprobe beeinflusst wird, können die in diesem Zusammenhang getroffenen Feststellungen im Hinblick auf die untersuchten Einflussfaktoren (Stabdurchmesser, Querbewehrung, Betondruckfestigkeitsklasse, Oberflächenbewehrung) auch für die charakteristische Rissbreite  $w_{0,75}$  weitgehend bestätigt werden.

- **Stabdurchmesser:** Auf der Bauteiloberfläche (Oberseite) treten Rissbreiten unabhängig vom betrachteten Stabdurchmesser in annähernd gleicher Größenordnung auf. Es stellt sich also hier nicht wie zunächst erwartet so dar, dass größere Stabdurchmesser bei zunehmender Beanspruchung größere Rissbreiten bedingen (s. auch Feststellungen unter Zugrundelegung mittlerer Rissbreiten). Vielmehr sind für Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm tendenziell sogar größere charakteristische Rissbreiten als für Stabdurchmesser  $\phi 40$  mm erkennbar. An dieser Stelle ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich die Bewehrungsgrade der untersuchten Versuchskörper wesentlich unterscheiden und damit eine direkte quantitative Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse nicht möglich ist. Weiterhin sind die bezogenen Rippenflächen  $f_R$  der verwendeten Bewehrungsstäbe nicht identisch (vgl. Abschnitt 3.7.2.4).

Für den seitlichen Beobachtungsbereich („Bauteilinneres“) lässt sich indessen beobachten, dass größere Stabdurchmesser (bei zunehmender Beanspruchung) tatsächlich größere Rissbreiten erzeugen.

- **Querbewehrung:** Für die Bauteiloberseite ist insgesamt kein nennenswerter Einfluss der Querbewehrung erkennbar. Für die Serie 1 und die Serie 2 (ohne Querbewehrung) werden hier annähernd gleiche Rissbreiten  $w_{0,75}$  erreicht. Im Bereich der vertikalen Bauteilflächen werden die Risse in ihrer Lage durch die Querbewehrung beeinflusst. Für die Serie 1 treten im Vergleich zu der Serie 2 größere Rissbreiten auf. Eine enggestaffelte Querbewehrung (Serie 1.2) forciert hier tendenziell kleinere Rissbreiten und Rissabstände als eine mit größerem Stababstand verlegte Querbewehrung (Serie 1.1).
- **Betondruckfestigkeitsklasse:** Für die betrachteten Stabdurchmesser ist erkennbar, dass – entgegen den Feststellungen auf Mittelwertniveau – die Rissbreite  $w_{0,75}$  auf der Bauteiloberseite für höhere Betondruckfestigkeiten (im Vergleich zu einem niederfesten Beton) tendenziell zunimmt. Für die Bauteilseitenflächen kann diese Tendenz allerdings nicht bestätigt werden und dies ist mechanisch auch nicht begründbar.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Versuchsergebnisse für Betone der Betondruckfestigkeitsklasse C50/60 an nur wenigen Referenzversuchen (nur ein Bauteilversuch für die Serie 1 und die Serie 2 je betrachtetem Stabdurchmesser) abgeleitet wurden. Vor dem Hintergrund der damit einhergehenden geringeren Stichprobenanzahl bei ggf. gleichzeitig größeren Streuungen der Einzelwerte muss davon ausgegangen werden, dass die vorliegenden Versuchsergebnisse nicht uneingeschränkt repräsentativ sind.

- Oberflächenbewehrung:** Gemäß nachstehender Abb. 3-46 ist festzustellen, dass die charakteristische Rissbreite  $w_{0,75}$  deutlich kleinere Werte als 0,3 mm (bei einem max. Spannungsniveau in Höhe von 360 N/mm<sup>2</sup> für  $\phi 20$  mm und  $\phi 28$  mm sowie 280 N/mm<sup>2</sup> für  $\phi 40$  mm) annimmt. Insgesamt treten für Stahlspannungen  $\sigma_s \leq 280$  N/mm<sup>2</sup> bei allen betrachteten Stabdurchmessern Rissbreiten  $w_{0,75} < 0,2$  mm gemessen auf der Bauteiloberfläche auf. Die maximale Rissbreite (Einzelwert) nimmt in diesem Zusammenhang 0,215 mm für  $\phi 40$  mm an.

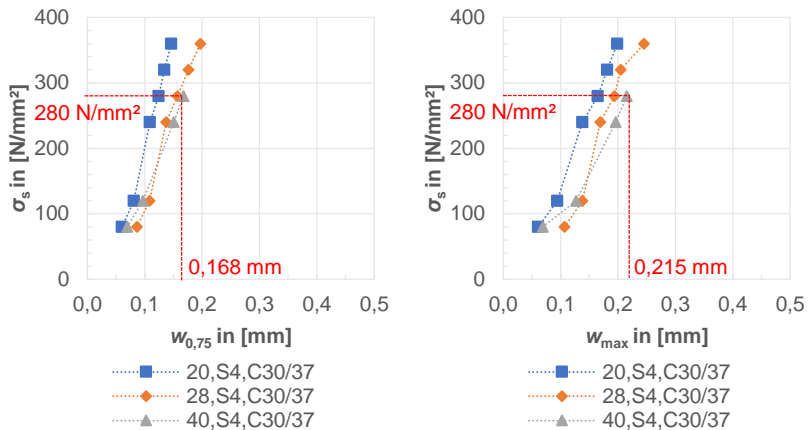


Abb. 3-46: Auswertung der Rissbreite ( $w_{0,75}$ ,  $w_{\max}$ ) an der Bauteiloberfläche für Serie 4

Bei der Serie 4.1 (Oberflächenbewehrung mit größerer Betonüberdeckung) ist ein Einfluss der rissverteilenden Oberflächenbewehrung nicht mehr erkennbar (vgl. Abschnitt 3.7.2.4). Für  $\phi 40$  mm werden in diesem Zusammenhang Rissbreiten  $w_{0,75}$  in annähernd gleicher Größenordnung wie bei der Serie 1 erreicht.

- baupraktische Betrachtung:** Für einen Planer ist es im Zuge der konstruktiven Durchbildung eines Stahlbetonbauteils von Interesse, in etwa die Spannweite der zu erwartenden Rissbreite in Abhängigkeit von der Bauteilkonzeption und der Größe der jeweiligen last-/zwanginduzierten Stahlspannung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit abschätzen zu können (dies kann jedoch grundsätzlich keinen dezidierten Nachweis zur Begrenzung der Rissbreite

### 3 Experimentelle Untersuchungen

ersetzen). Für die im vorliegenden Fall betrachteten Bauteile mit mehrlagig bewehrten Querschnitten und fallweise eingelegten großen Stabdurchmessern wird vor diesem Hintergrund eine „grobe Orientierungshilfe“ für die Baupraxis wie folgt angegeben.

Tab. 3-7: Rissbreite  $w_{0,75}$  in [mm] für eine Stahlspannung  $\sigma_s = 280 \text{ N/mm}^2$ , C30/37

| $\phi$<br>[mm]  | Serie | Rissbreite $w_{0,75}$ bei<br>$\sigma_s = 280 \text{ N/mm}^2$ |                   |
|---|-------|--|-------------------|
|   |       | Bauteil-<br>oberseite  | Seiten-<br>fläche |
| 20  | 1     | 0,326  | 0,108             |
|   | 2     | 0,320  | 0,107             |
|   | 4     | 0,124  | ./.               |
| 28  | 1     | 0,295  | 0,182             |
|   | 2     | 0,301  | 0,179             |
|   | 4     | 0,157  | ./.               |
| 40  | 1     | 0,300  | 0,259             |
|   | 2     | 0,303  | 0,227             |
|   | 4     | 0,168  | ./.               |
| Im Rahmen der Versuche zu Serie 4 wurden keine Rissbreitenmessungen auf der Seitenfläche durchgeführt, da sich die rissverteilende Oberflächenbewehrung nicht auf das dortige Rissgeschehen auswirkt! |       |  |                   |

Es werden in diesem Zusammenhang in voranstehender Tabelle charakteristische Rissbreiten  $w_{0,75}$  (unterschieden nach Bauteiloberseite und Bauteilseitenfläche) für eine im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit üblich anzutreffende Stahlspannung von  $280 \text{ N/mm}^2$  dargestellt.

Insgesamt kann für alle betrachteten Stabdurchmesser befunden werden, dass ohne eine etwaig vorhandene rissverteilende Oberflächenbewehrung bereits bei einer vorliegenden Stahlspannung von  $280 \text{ N/mm}^2$  Rissbreiten  $w_{0,75} \geq 0,3 \text{ mm}$  auf der Bauteiloberfläche angetroffen werden können. Rissbreiten  $w_{0,75} \geq 0,2 \text{ mm}$  auf der Bauteiloberseite werden bei einer Stahlspannung von ca.  $200 \text{ N/mm}^2$  erreicht.

Eine rissverteilende Oberflächenbewehrung ist höchst wirksam (vgl. Abb. 3-46). Für das hier betrachtete Stahlspannungsniveau stellen sich vergleichsweise wesentlich geringere Rissbreiten  $w_{0,75} < 0,2$  mm ein.

Wie bereits mehrfach beschrieben, nehmen die auf der Bauteiloberseite auftretenden Risse deutlich größere Breiten an als im Bereich der vertikalen Bauteilseitenflächen („Bauteilinneres“). Dies ist im vorliegenden Fall zweifelsfrei auf die sehr große Rissöffnung innerhalb der vertikalen Betonüberdeckung der Längsstäbe zurückzuführen (seitliche Rissöffnung ist weniger ausgeprägt). Für das Bauteilinnere sind demnach weitaus größere Stahlspannungen ( $> 280$  N/mm<sup>2</sup>) erforderlich, um Rissbreiten in der Bandbreite von 0,2–0,3 mm zu erzeugen.

### 3.8.4.3 Rissabstand $s_{0,75}$

Die vorliegenden 38 Datensätze zum charakteristischen Rissabstand  $s_{0,75}$  wurden für das abgeschlossene Rissbild nach Erreichen der letzten Laststufe ermittelt. Auch in Bezug auf den Rissabstand können die ausführlich im Abschnitt 3.7.2 auf Mittelwertniveau getroffenen Feststellungen im Hinblick auf die untersuchten Einflussfaktoren (Stabdurchmesser, Querbewehrung, Oberflächenbewehrung) weitgehend wie folgt bestätigt werden:

- **Stabdurchmesser:** Die Rissabstände  $s_{0,75}$  nehmen mit größer werdendem Stabdurchmesser tendenziell zu. Dies ist vor allem für  $\phi 40$  mm in Abgrenzung zu  $\phi 20$  mm und  $\phi 28$  mm so erkennbar und gilt gleichermaßen für die Bauteiloberseite und das Bauteilinnere.
- **Querbewehrung:** Ein Einfluss einer etwaig vorhandenen Querbewehrung auf den Rissabstand  $s_{0,75}$  ist nicht erkennbar. Die Rissabstände für Serie 1 und Serie 2 unterscheiden sich in diesem Zusammenhang nur unwesentlich. Dies gilt gleichermaßen für die Bauteiloberseite und das Bauteilinnere. (Ausnahme:  $\phi 40$  mm, Serie 2; hier wurde bedingt durch die größere Streuung der Einzelwerte ein im Vergleich zu Serie 1 größerer Rissabstand auf der Bauteilseitenfläche festgestellt.)
- **Oberflächenbewehrung:** Der Einfluss einer Oberflächenbewehrung aus dünnen Stabdurchmessern auf den Rissabstand  $s_{0,75}$  auf der Bauteiloberseite ist deutlich erkennbar. Die randnahe angeordnete Oberflächenbewehrung aus dünnen Stabdurchmessern (Serie 4) bedingt ein fein verteiltes Rissbild mit vergleichsweise (sehr) geringen Rissabständen.

### 3.8.5 Nebenbetrachtung zur logarithmischen Normalverteilung

Im Rahmen der statistischen Auswertungen zur Rissbreite und zum Rissabstand wurde voranstehend unterstellt, dass die experimentell ermittelten Rohdaten jeweils normalverteilt sind. Diese Annahme konnte durch eingehende Untersuchungen der aus den Stichproben zur Rissbreite und zum Rissabstand entwickelten Histogramme sowie optischen Vergleichen der zugehörigen empirischen Dichtefunktionen mit der

### 3 Experimentelle Untersuchungen

Normalverteilung hinreichend begründet werden und wurde im Abschnitt 3.8.2.1 ausführlich thematisiert.

Im Zuge dieser Untersuchungen zur Verteilung der Rohdaten musste jedoch ebenfalls befunden werden, dass die Annahme einer Normalverteilung (NV) im vorliegenden Fall durchaus kontrovers diskutiert werden kann und sich nicht widerspruchsfrei darstellt. Fallweise weisen die als Schätzer der Verteilung eines Datensatzes entwickelten empirischen Dichtefunktionen (sowohl für die Rissbreite als auch den Rissabstand) eine ausgeprägtere positive Schiefe auf, sodass die Zuordnung zu einer logarithmischen Normalverteilung ebenfalls naheliegt. Dies konnte in dieser Tendenz auch anhand der erstellten QQ-Plots verifiziert werden.

Zwecks qualitativer Überprüfung, inwieweit ein Ansatz einer logarithmischen Normalverteilung im Vergleich zu der hier zugrunde gelegten Normalverteilung ggf. abweichende Fraktilwerte der Rissbreite  $w_{0,75}$  und des Rissabstandes  $s_{0,75}$  bedingt, wird an dieser Stelle eine grafische Gegenüberstellung in Abb. 3-47 vorgenommen. Es werden hierbei Versuchswerte  $w_{0,75}$  (75 %-Fraktil) der Rissbreite und des Rissabstandes berücksichtigt. Auf der Abszissenachse sind diesbezüglich jeweils die unter Zugrundelegung einer Normalverteilung ausgewerteten Versuchswerte „ $w_{0,75}$  (normalverteilt)“ oder „ $s_{0,75}$  (normalverteilt)“ aufgetragen. Die Versuchswerte „ $w_{0,75}$  (log.-normalverteilt)“ oder „ $s_{0,75}$  (log.-normalverteilt)“, ausgewertet unter Ansatz einer logarithmischen Normalverteilung (in Anlehnung an DIN EN 1990 und DIN ISO 16269-6), sind auf der Ordinatenachse angetragen.

Die nachfolgend in Abb. 3-47 dargestellten Diagramme sind mit einer Legende versehen, sodass eine Zuordnung zu den unterschiedlichen Stabdurchmesser selbst-erklärend ist. Es wird im Folgenden nicht weiter zwischen einzelnen Serien unterschieden, sondern es wird eine ganzheitliche Betrachtung aller Versuchsergebnisse vorgenommen. Die dargestellten Rissbreiten- und Rissabstandsergebnisse entstammen dem Beobachtungsbereich „Bauteiloberseite“ (vgl. Abb. 3-13).

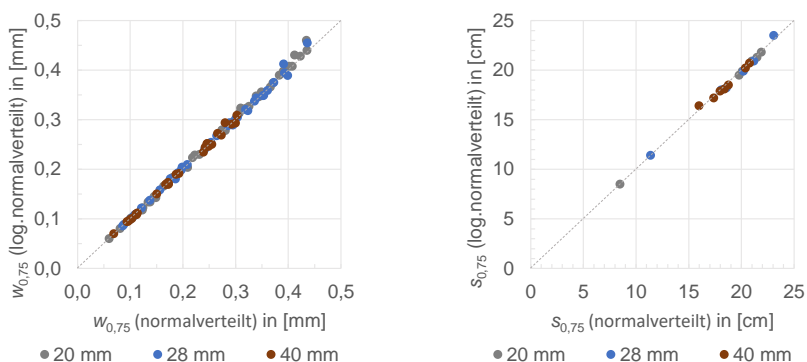


Abb. 3-47: Gegenüberstellung der Fraktilwerte von Rissbreite und Rissabstand (normalverteilt und log.-normalverteilt)

Die Diagramme sind aus Gründen der besseren Lesbarkeit mit einer diagonalen, gestrichelten Hilfslinie („Winkelhalbierenden“) versehen. Für diejenige Datenpunkte,

die rechts d. h. unterhalb dieser Diagonalen liegen, ist festzustellen, dass sich die Fraktilwerte  $w_{0,75}$  (normalverteilt) größer darstellen als diejenigen, die sich unter Zugrundelegung einer logarithmischen Normalverteilung  $w_{0,75}$  (log.-normalverteilt) ergeben (umgekehrt analog, ebenso analog für  $s_{0,75}$ ). Eine ganzheitliche Übereinstimmung der unterschiedlichen Fraktilwerte würde vorliegend dadurch abgebildet werden, dass alle Datenpunkte auf der Winkelhalbierenden liegen.

Anhand der voranstehenden Abb. 3-47 ist zweifelsfrei zu erkennen, dass der Ansatz einer logarithmischen Normalverteilung zu vernachlässigbaren Abweichungen der Fraktilwerte  $w_{0,75}$  und  $s_{0,75}$  im Vergleich zum Ansatz einer Normalverteilung führt (alle Datenpunkte liegen annähernd auf der „Winkelhalbierenden“). Dies ist in gleicherweise auch für das 95 %-Fraktile der Rissbreite festzustellen.

### 3.9 Zusammenfassung und weiteres Vorgehen

Im Zuge des vorliegenden Kapitels 3 wurden die experimentellen Untersuchungen zum Rissgeschehen mehrlagig bewehrter Stahlbetonquerschnitte und einer fallweisen aus großen Stabdurchmessern bestehenden Bewehrung beschrieben. Es wurden die Querschnittskonzeptionen, die Versuchsdurchführung, die Rissbreiten- und Rissabstandsmessungen sowie die versuchsbegleitenden Materialprüfungen dargestellt.

Als Ergebnis der experimentellen Versuchsdurchführung konnte insgesamt eine Datenbank mit 5.800 Einzelrissbreiten und 1.500 Rissabstandswerten zusammengestellt werden. Für die dokumentierten Rissbreiten ist an dieser Stelle nochmals darauf hinzuweisen, dass es sich immer um Oberflächenrissbreiten handelt.

Hiervon ausgehend wurden die Versuchsergebnisse zunächst auf Mittelwertniveau beleuchtet und maßgebende Einflussfaktoren auf das Rissgeschehen identifiziert. Im Wesentlichen konnte in diesem Zusammenhang festgestellt werden, dass eine randnah angeordnete Oberflächenbewehrung höchst wirksam ist. Für eine fallweise eingelegte Querstabbewehrung (Stabdurchmesser identisch zu Hauptbewehrung) ist hingegen nicht zu erkennen, dass diese das Rissbild auf der Bauteiloberseite maßgeblich beeinflusst und somit nicht als „Sollbruchstelle“ fungiert.

Im Anschluss wurden für die Untersuchungsgrößen „Rissbreite“ und „Rissabstand“ im Zuge einer statistischen Versuchsauswertung charakteristische Ergebniswerte entwickelt. Hierbei wurde auf Grundlage theoretischer Untersuchungen festgelegt, dass die Rohdaten (Rissbreite und Rissabstand) jeweils normalverteilt sind. Im Hinblick auf eine Gegenüberstellung der Versuchswerte mit Rechenwerten wird das 75 %-Fraktile der Rissbreite  $w_{0,75}$  als zutreffend angesehen.

Im nachfolgenden Kapitel 4 werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung mit Hilfe exemplarisch durchgeführten Finite-Elemente-Simulationen validiert.

Diese zugrunde legend, werden im Kapitel 5 dieser Arbeit Rechenwerte ausgewählter Bemessungs- und Ingenieurmodelle den statistisch abgesicherten Versuchswerten gegenübergestellt. Dies zielt darauf ab, eine qualifizierte Aussage über die Vorhersagegenauigkeit der betrachteten Bemessungs- und Ingenieurmodelle im Hinblick auf die rechnerische Vorherbestimmung auftretender Risse treffen zu können.





## 4 Numerische Untersuchungen zum Rissgeschehen

### 4.1 Einführung

Im Rahmen der voranstehend beschriebenen experimentellen Untersuchungen zur Rissentstehung und -entwicklung wurden diverse Einflussparameter auf die Rissbildung variiert und deren Auswirkungen auf selbige detailliert erfasst. Auf Grundlage dessen konnte – z. T. auch entgegen der Erwartung – befunden werden, dass bestimmten Parametern für die betrachteten Prüf- und Querschnittskonzeptionen kein nennenswerter Einfluss auf das Rissgeschehen zugemessen werden kann. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die Querbewehrung zu nennen, die angesichts der in Abschnitt 3.7.2.4 dargelegten Feststellungen offenbar nicht in dem vermuteten Umfang als Sollbruchstelle fungiert und damit die Charakteristik des sich einstellenden Rissbildes (d. h. Rissbreite, Rissabstand, Rissverlauf, vgl. Abb. 3-43) nur unwesentlich beeinflusst.

Zwecks Überprüfung, ob im Zuge der experimentellen Untersuchungen gegeben falls Fehler oder Unstimmigkeiten aufgetreten sind, werden im Rahmen der hier vorliegenden Nebenbetrachtung orientierende numerische Untersuchungen zum Rissverhalten zentrisch beanspruchter Stahlbetonzugglieder durchgeführt, um die Ergebnisse der Bauteilversuche und das im Zuge derer festgestellte Trag- und Verformungsverhalten im Grundsatz zu verifizieren. Diesbezüglich werden Versuchskörper verschiedener Querschnittskonzeptionen (nach Tab. 3-1) mit dem nicht linearen Finite-Elemente Programm Atena von Cervenka Consulting mit 2D- und 3D-Elementen modelliert und die resultierenden Simulationsergebnisse werden im Hinblick auf qualitative (z. B. Erscheinungsbild auftretender Risse) und quantitative (z. B. Größe der Rissbreite) Kriterien mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen verglichen.

Die Modellierung der hier betrachteten Stahlbetonzugglieder und die daran anschließende numerische Analyse des Trag- und Verformungsverhaltens können – wie im Zuge numerischer Betrachtungen üblich – in unterschiedlichen Detaillierungsgraden erfolgen. Vor dem Hintergrund der avisierten Gegenüberstellung von experimentell und numerisch gewonnenen Ergebnissen (i. W. Rissbreite, Rissabstand, Rissverlauf) ist es aber zunächst naheliegend, dass die Dehnkörper jeweils ganzheitlich abgebildet werden. Hierzu müssen Geometrie-, Werkstoff- und Systemeigenschaften jedoch unter Zuhilfenahme verallgemeinernder Vereinfachungen dargestellt werden (schon alleine deswegen, um die Modellkomplexität und die Rechenkapazität zu begrenzen), sodass insgesamt Einbußen der Aussagegenauigkeit zu erwarten sind und den Simulationsergebnissen zum Trag- und Verformungsverhalten damit lediglich ein allgemeiner, orientierender Charakter zuzumessen ist. Ebenso ist es aber auch möglich, dass eine lokale Betrachtung eines Stabinkrementes vorgenommen wird und dass dieser Bauteilausschnitt wesentlich detaillierter als im Zuge einer globalen Betrachtung abgebildet wird. In diesem Zusammenhang wäre es beispielsweise im Hinblick auf die Verbundeigenschaften denkbar, die Rippengeometrie eines Bewehrungsstabes und die Zementmatrix einschließlich einer zufälligen Verteilung der Zuschlagskörner darzustellen (vgl. beispielsweise Untersuchungen in Eckfeldt 2009).

Infolgedessen könnten dann lokale Spannungs- und Dehnungszustände präzise erfasst werden.

Im vorliegenden Fall wird eine ganzheitliche, makroskopische Betrachtung des zentrisch beanspruchten Stahlbetonzugglieds vorgenommen. Um dem im Zuge dessen zu erstellenden FE-Modell insgesamt eine möglichst hohe Aussagekraft zumessen zu können, wird davon abgesehen, dieses alleinig an den Ergebnissen der experimentellen Bauteilversuche zu kalibrieren und abzuleiten, sondern es werden vielmehr „unabhängige“ analytische Randbedingungen auf Basis einer unabhängigen Modellierung zugrunde gelegt. Dennoch bleibt ein FE-Modell – wie allgemein üblich – eine Näherungslösung, sodass im Rahmen eines Vergleichs mit experimentellen Untersuchungen ggf. Anpassungen vorgenommen werden müssen (s. diesbezüglich z. B. Abschnitt 4.2.4.7).

Es sei angemerkt, dass sich die Modellierung des Rissgeschehens mit Hilfe Finiter Elemente „hochkomplex“ darstellt, dies bezieht sich im Besonderen auf die Modellierung der Werkstoff- und Verbundeigenschaften. Den im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen numerischen Untersuchungen kann deshalb nur orientierender Charakter zugemessen werden und es kann nicht der Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden. Weitaus detaillierter werden die nachfolgend auszugsweise beschriebenen Modellierungsversuche zum Rissgeschehen beispielsweise in Kattenstedt 2017 beleuchtet.

## **4.2 Vorbemerkungen**

### **4.2.1 Allgemeines**

Die hier beschriebenen Ergebnisse zu den numerischen Untersuchungen des Rissverhaltens von zentrisch beanspruchten Stahlbetonzuggliedern wurden u. a. im Rahmen von Vertieferarbeiten (Alff 2020, Pierzina 2020, Rugero 2020) am Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion der Technischen Universität Kaiserslautern erarbeitet.

### **4.2.2 Programmauswahl**

Die numerischen Untersuchungen wurden mit Hilfe des Finiten-Elemente Programms Atena (Cervenka Consulting) durchgeführt. Im Hinblick auf die ganzheitliche, globale Betrachtung des Trag- und Verformungsverhaltens stellten sich in diesem Zusammenhang insbesondere die Visualisierungsmöglichkeiten zur Rissbildung im Zuge der Ergebnisdarstellung als ein Alleinstellungsmerkmal des verwendeten FE-Programms heraus.

### **4.2.3 Modellierungsaufgabe**

Im Zuge der numerischen Untersuchungen werden insgesamt die nachfolgend in Abb. 4-1 dargestellten Querschnittskonzeptionen der flächenartigen, mehrlagig kreuzweise bewehrten Versuchskörper betrachtet.

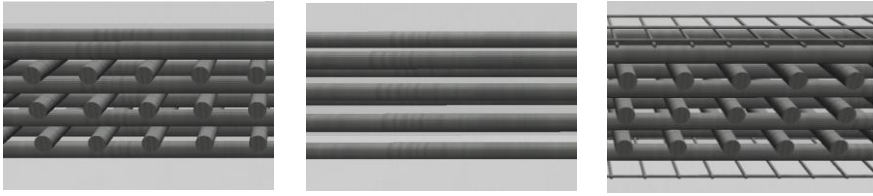


Abb. 4-1: Betrachtete Querschnittskonzeptionen (links: Serie 1 mit Querstäben; Mitte: Serie 2 ohne Querstäbe; rechts: Serie 4 mit Querstäben und Oberflächenbewehrung)

Es werden hierbei die Serien 1, 1.1, 1.2, 2 und 4 gemäß Tab. 3-1 und Tab. 3-2 für den Stabdurchmesser  $\phi 40$  mm berücksichtigt.

## 4.2.4 Modelleigenschaften

### 4.2.4.1 Grundsätzliches zur Beschreibung des Materialverhaltens

Das Aufreißen eines Stahlbetonquerschnitts ist bekanntermaßen durch (lokales) Erreichen der Betonzugtragfähigkeit charakterisiert. Bis zum Auftreten eines ersten Risses kann näherungsweise ein linear-elastisches Materialverhalten unterstellt werden und die Dehnungen des Betons und die des eingelegten Bewehrungsstahls stimmen an jeder Stelle im Hinblick auf jeweils benachbarte Fasern des Betons und des Stahls überein (s. auch Abschnitt 2.2.2).

Bevor sich infolge des (lokalen) Erreichens der Betonzugtragfähigkeit jedoch ein äußerlich sichtbarer (Makro-) Riss ausbildet, setzen gemäß Kattenstedt 2017 zunächst Mikrorissbildungen ein, welche bis zum Erreichen der Betonzugtragfähigkeit annähernd gleichmäßig in der Zugzone verteilt auftreten. Bei weiterer Laststeigerung bis zum Erreichen der Betonzugtragfähigkeit konzentrieren sich die Mikrorissbildungen demnach in einer sog. Rissprozesszone (auch Rissband genannt) an der Stelle der (zufällig) geringsten Betonzugfestigkeit. Dies führt dazu, dass die Betondehnungen – bei gleichzeitigem Spannungsabfall – stark anwachsen (Entfestigung). Ausgehend von den im Rissband konzentrierten Mikrorissen bildet sich gemäß Kattenstedt 2017 letztendlich ein Makroriss aus. Die Rissbildung führt zu einer (lokalen) Dehnungsunverträglichkeit, während der Beton in den daran angrenzenden Bereichen noch ein linear-elastisches Verhalten aufweist (s. auch Abschnitt 2.2.2).

Insgesamt weist der Werkstoff Beton damit gemäß Kattenstedt 2017 ein quasi-sprödes Materialverhalten auf. Dieses gilt es im Zuge der numerischen Untersuchungen im Hinblick auf die Rissbildung möglichst reell abzubilden.

### 4.2.4.2 Verwendetes Rissmodell

In dem hier verwendeten Finite-Elemente Programm Atena wird die Rissprozesszone (und damit die Rissmodellierung insgesamt) mit Hilfe des auf der Bruchmechanik basierenden crack band model (Rissbandmodell gemäß Bazant et. al. 1983) abgebildet. Demnach kann der Rissprozesszone eine Rissbandbreite zugewiesen werden, die gemäß Bazant et. al. 1983 genügend genau mit dem 1,5- bis 4-fachen des Größtkorndurchmessers (jeweils abhängig von den Eigenschaften des Betons) abgeschätzt

werden kann. Für normalfeste Betone, wie sie im Zuge der experimentellen Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit herangezogen wurden, kann die Rissbandbreite mit dem 3-fachen des Größtkorndurchmessers gleichgesetzt werden (s. Bazant et. al. 1983).

Für das Rissbandmodell ist festzustellen, dass die der Rissprozesszone zuzurechnenden Betondehnungen auf die gesamte Rissbandbreite verschmiert (und nicht diskret abgebildet) werden. Das Entfestigungsverhalten wird durch eine nicht lineare Spannungs-Dehnungs-Beziehung beschrieben (vgl. Bazant et. al. 1983). In diesem Zusammenhang kann die Bruchenergie, welche gemäß Bazant et. al. 1983 als das Integral dieser Spannungs-Dehnungs-Funktion verstanden werden kann, demnach als Risskriterium aufgefasst werden.

Die Lokalisierung auftretender Risse erfolgt in Atena (Cervenka Consulting) verschmiert über die jeweils vorhandene Elementlänge, d. h. die Rissbreite selbst stellt die Summe der Dehnungen über die Rissbandbreite auf Elementebene dar. Infolge der Rissbildung wird vorliegend nur die Steifigkeit des zugehörigen Elements reduziert und die vorhandene Netzdiskretisierung beibehalten. Im Gegensatz hierzu wird bei diskreten Rissmodellen die bis zur Rissbildung vorhandene Diskretisierung vollständig umstrukturiert (vgl. Kattenstedt 2017 und nachfolgende Abb. 4-2).

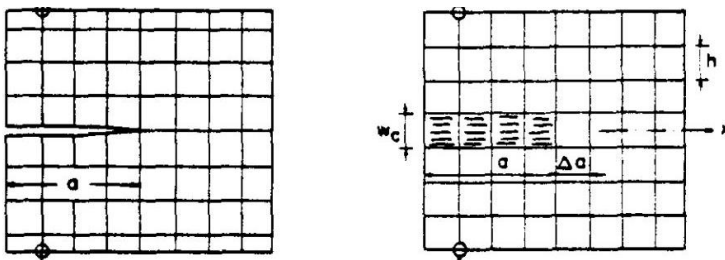


Abb. 4-2: Diskrete Rissbildung (links) und verschmierte Rissbildung (aus Bazant et. al. 1983)

Die Rissbildungen werden in Atena jeweils in Elementmitte dargestellt.

### 4.2.4.3 Materialdefinitionen

Die Festlegungen werden nachfolgend stichpunktartig beschrieben:

#### Modellierung des Betons:

- Auswahl des Modells Cementitious2, welches auf dem Fracture-Plastic-Materialmodell (kombinierte Eigenschaften eines Modells auf Basis der Plastizitätstheorie und eines Modells auf Basis der Schädigungstheorie) basiert. Das Zugverhalten des Betons wird dabei unter Zugrundelegung des Rissbandmodells und des fixierten Rissmodells (Rissinitiierung rechtwinklig zur Hauptspannungsrichtung) abbildet.
- Berücksichtigung der begleitend zur experimentellen Untersuchung ermittelten Festbetoneigenschaften (Würfeldruckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, E-Modul) auf Mittelwertniveau.

- Berücksichtigung der Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen („tension stiffening“).
- Berücksichtigung des vorhandenen Größtkorndurchmessers, um die Kornverzahnung in gerissenen Querschnittsbereichen ansetzen zu können.
- Effekte aus Schwinden und Kriechen wurden im Zuge der hier beschriebenen numerischen Untersuchungen nicht berücksichtigt.
- Ansatz der Bruchenergie als Risskriterium. Im Hinblick auf die Größe der anzusetzenden Bruchenergie wurden programminterne Vorgaben (Cervenka Consulting) und Literaturergebnisse (zusammengestellt in Tran 2018) angewendet. Diesbezüglich konnte festgestellt werden, dass die Größe der Bruchenergie (innerhalb der in Tran 2018 vorgegebenen Bandbreiten) bei ausreichend feiner Diskretisierung keinen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Vor diesem Hintergrund werden Standardvorgaben des Programms verwendet.
- Die Größe der Betonzugfestigkeit ist in einem Stahlbetonbauteil bedingt durch Inhomogenitäten des Betongefüges zufällig verteilt und sie kann in diesem Zusammenhang erfahrungsgemäß Spannweiten von ca.  $\pm 20\text{--}30\%$  (s. auch Abschnitt 5.3.1) annehmen. Diese, in Bezug auf die Rissbildung wesentliche Eigenschaft (die Rissbildung tritt zunächst an der Stelle mit der zufällig geringsten Betonzugfestigkeit auf) wird im Rahmen der vorliegenden numerischen Untersuchungen durch die Definition sog. Zufallsfelder („random fields“) berücksichtigt. Hierzu werden random fields mit der probabilistischen Softwarekomponente Sara (Cervenka Consulting) erstellt.

Die Zufallsfelder werden unter Berücksichtigung der folgenden Randbedingungen erstellt: Die festzulegende Spannweite der erwartbaren Streuung der Betonzugfestigkeit wird durch Vorgabe eines Variationskoeffizienten  $V_x$  der Betonzugfestigkeit zu 20 % (in Anlehnung an Weber 2019, vgl. auch Abschnitte 2.2.3.1 und 5.3.1) angenommen. Es wird jeweils die mittlere zentrische Betonzugfestigkeit gemäß den Ergebnissen der begleitenden Werkstoffprüfungen in Ansatz gebracht. Über die Querschnittshöhe wird eine annähernd konstante Verteilung zugrunde gelegt, sodass die Betonzugfestigkeit lediglich in Versuchskörperlängsrichtung (zufällig) streut. In nachfolgender Abb. 4-3 ist eine solche Verteilung der Betonzugfestigkeit exemplarisch dargestellt.

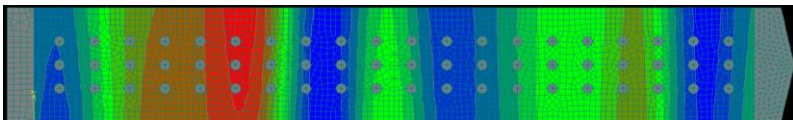


Abb. 4-3: Exemplarische Darstellung von Querschnittsbereichen unterschiedlicher Betonzugfestigkeiten mit random fields für Serie 1 (rot: Minimalwerte der Betonzugfestigkeit, grün: mittlere Betonzugfestigkeit, blau: Maximalwerte der Betonzugfestigkeit)

Für die in obiger Abb. 4-3 dargestellte Verteilung wurde ein Mittelwert der Betonzugfestigkeit in Höhe von  $2,7 \text{ N/mm}^2$  (grüne Bereiche) zugrunde gelegt. Infolge der probabilistischen Simulation ergeben sich in diesem Zusammenhang Maximalwerte der Betonzugfestigkeit zu  $3,5 \text{ N/mm}^2$  (blaue Bereiche) und Minimalwerte zu  $1,8 \text{ N/mm}^2$  (rote Bereiche).

Die Breiten homogener Querschnittsbereiche, d. h. Bereiche mit annähernd konstanter Betonzugfestigkeit stellen sich zufällig ein und diese Bereiche werden dabei nicht zwangsläufig durch die Elementkanten begrenzt (s. Abb. 4-6). Insgesamt ergeben sich für jede Bauteilkonzeption (d. h. Serie) unterschiedliche Zufallsfelder hinsichtlich Lage der Extrema und Breite homogener Querschnittsbereiche.

Würden keine Zufallsfelder in Ansatz gebracht und stattdessen eine homogene Verteilung der Betonzugfestigkeit im Bauteil zugrunde gelegt, würde mit Erreichen der Erstrisschnittgröße die Zugfestigkeit in allen Elementen gleichzeitig erreicht und die Rissbildung würde damit simultan in allen Elementen eintreten. Demzufolge würde eine deutlich größere Anzahl an Rissen mit wesentlich kleinerer Rissbreite resultieren, als es in den Bauteilversuchen zu beobachten war. Eine Gegenüberstellung der Versuchs- und Simulationsergebnisse wäre vor diesem Hintergrund damit nicht zielführend.

Die Verwendung von random fields ist programmbedingt lediglich auf 2D-Untersuchungen begrenzt. Für 3D-Untersuchungen können keine Zufallsfelder berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang führt der Programmhersteller aus, dass bei genügend genauer Diskretisierung (z. B. Wahl der Elementgröße unter Berücksichtigung der Rissbandbreite) ungünstige Einflüsse aus einer homogenen Verteilung der Betonzugfestigkeit reduziert werden können.

#### Modellierung der Bewehrung:

- Auswahl des Modells Reinforcement EC2 (CCReinforcement).
- Abbildung als eindimensionale, diskrete Bewehrung. Fallweise vorhandene Querbewehrungsstäbe (Ausrichtung in Bauteildickenrichtung) müssen für 2D-Betrachtungen als elastische Stahlkreisquerschnitte ohne Verbundeigenschaften modelliert werden, da eine Anordnung eines Bewehrungsstabes in Bauteildickenrichtung hier nicht möglich war. Für 3D-Betrachtungen konnte indes eine Bewehrung analog zur Längsbewehrung dargestellt werden.
- Berücksichtigung der begleitend zur experimentellen Untersuchung ermittelten Materialeigenschaften (Fließgrenze, E-Modul) auf Mittelwertniveau.
- Um das Trag- und Verformungsverhalten möglichst detailliert abzubilden, werden die Verbundeigenschaften der Stahlbewehrung anhand konkreter Verbundspannung-Schlupf-Beziehungen dargestellt. Im Rahmen einer begleitend durchgeführten Parameterstudie wurden diesbezüglich Ansätze nach MC 1990, MC 2010, Tran 2018 und Schoening 2018 untersucht. Hier

zeigte sich, dass unter Verwendung von MC 1990 und MC 2010 insgesamt sehr gute Übereinstimmungen der 2D-Simulationsergebnisse mit den Bauteilversuchen hinsichtlich der Rissbreite und des Rissbildes erreicht werden können. Die zugehörigen Verläufe der hier berücksichtigten Verbundspannung-Schlupf-Beziehungen sind nachfolgend dargestellt:

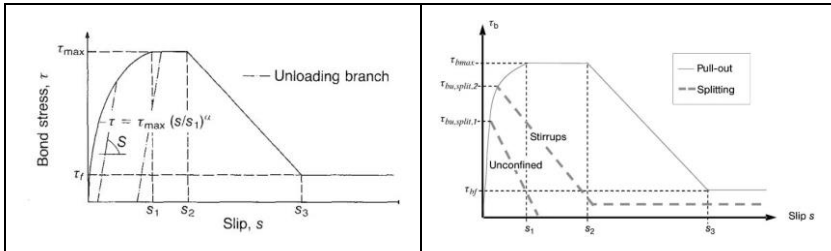


Abb. 4-4: Verbundspannung-Schlupf-Beziehungen nach MC 1990 (links) und MC 2010 (rechts)

Programmintern besteht in diesem Zusammenhang auch die Möglichkeit, „idealisierte“ Verbundeigenschaften (d. h. konstante Verbundspannung, kein Schlupf) zu berücksichtigen. Dieser Ansatz ist gemäß Cervenka Consulting dann ausreichend genau, wenn die Elementgröße in etwa dem betrachteten Stabdurchmesser entspricht und die Netzdiskretisierung ausreichend fein ist. Im vorliegenden Fall werden diese „idealisierten“ Verbundeigenschaften ausschließlich für 3D-Untersuchungen berücksichtigt. Für 2D-Untersuchungen werden beide Verbundspannung-Schlupf-Beziehungen gemäß Abb. 4-4 in Ansatz gebracht.

#### 4.2.4.4 Belastung und Festhaltungen

Die Festlegungen zur Abbildung der Belastungs- und Festhaltungssituation werden nachfolgend stichpunktartig beschrieben:

##### Lasteinleitung:

- Die Lasteinleitung erfolgt analog zu den Bauteilversuchen über Kopfplatten (Material Solid Elastic), die jeweils an die Bewehrung angeschlossen sind. Damit wird insbesondere vermieden, dass die äußere Beanspruchung unmittelbar in ein nicht lineares Material eingeleitet wird (dies dient der Modellstabilität).
- Die Bewehrungsstäbe binden in die Lasteinleitungsplatte ein und sind mit dieser verbunden. Die Ausbildung konkreter Anschlussstellen ist an dieser Stelle nicht erforderlich.
- Pyramidenförmige Ausbildung der lastzugewandten Kopfplatte, um einen punktförmigen Lastangriff zu ermöglichen.
- Die Modellierung der Lasteinleitungsplatte im Hinblick auf eine etwaige Relativbewegung zur Betonstirfläche stellt sich wie folgt dar:

- für 2D-Modelle: Der Lasteinleitungsplatte und der Betonstirnfläche sind jeweils gemeinsame Knoten zugeordnet. Die Kontaktfläche zwischen den beiden Bauteilen kann vorliegend nicht modelliert werden. Die Flächen werden durch Festlegung der jeweiligen Material- und Netzeigenschaften voneinander abgegrenzt. Die Lasteinleitungsplatte und die Betonstirnfläche des Versuchskörpers verschieben sich nicht relativ zueinander.
- für 3D-Modelle: Hier kann die Modellierung mit zwei unterschiedlichen Ansätzen erfolgen. Bei Auswahl „fixed contact for surface“ verschieben sich die Lasteinleitungsplatte und die Betonstirnfläche ohne Relativbewegung zueinander. Ohne diese Auswahl kann eine Relativverschiebung zwischen der Lasteinleitungsplatte und Betonoberfläche zugelassen werden. Diese beiden Modellvarianten werden im Zuge der Ergebnisdarstellung im Abschnitt 4.3.2 weiter thematisiert. (Dieses Vorgehen konnte in diesem Zusammenhang nicht auf die 2D-Untersuchungen erweitert werden.)

### Festhaltungen und Lagerungsbedingungen:

Im Hinblick auf die Festhaltungen ist wie folgt zu unterscheiden:

- Belastungseinrichtung: unverschiebliche Festhaltung der lastabgewandten Kopfplatte; die lastzugewandte Kopfplatte ist in Belastungsrichtung verschieblich gelagert, sonst ebenfalls gehalten (vertikal).
- Versuchskörper: horizontale und vertikale Festhaltung (ausgebildet als Flächenfeder).

### Belastung:

- Aufbringen einer weggesteuerten Verformung.
- Rückschluss auf anliegende Stahlspannung mit Hilfe von Monitoringpunkten. Die Größe der zum gewünschten Stahlspannungsniveau gehörenden Verschiebung muss in diesem Zusammenhang iterativ bestimmt werden.

### Lastintervalle:

- Aufbringung der Verformung in genügend großer Intervallanzahl (hier: 100 Intervalle, dies dient wesentlich der Berechnungsstabilität).

#### **4.2.4.5 Elementdimension, Elementtyp und Netzgenerierung**

##### Beton, 2D:

Der Beton wird mittels viereckiger und bereichsweise dreieckiger Scheibenelemente (vorwiegend im Bereich der Querbewehrung) abgebildet.

Die Elementgröße variiert je nach Randbedingungen (z. B. Vorliegen einer Querstabbewehrung) zwischen 2,0 x 2,0 cm (d. h. ca. 21 Elemente über die Höhe) und 8,0 x 8,0 cm (für die Serie 2, d. h. ca. 6 Elemente über die Höhe). Je Element stehen damit vier (bzw. drei) Knotenpunkte zur Verfügung.



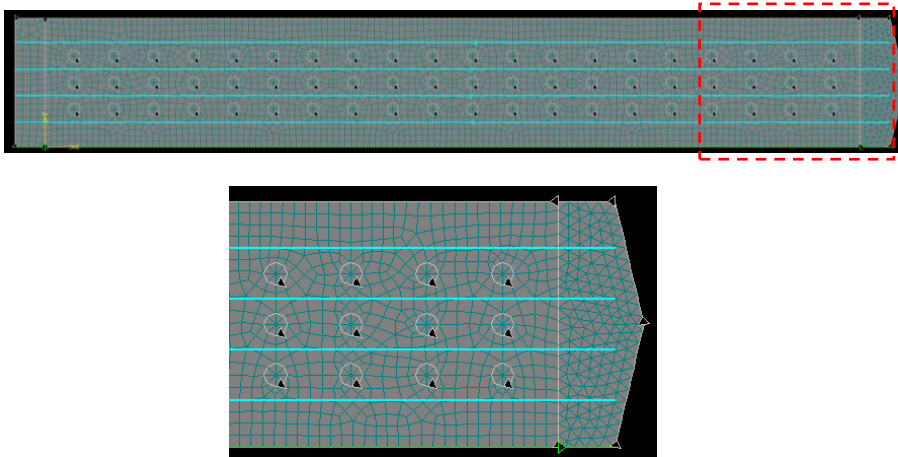


Abb. 4-5. oben: Darstellung des Elementnetzes für 2D-Untersuchungen (Serie 1)  
unten: Lasteinleitungsbereich vergrößert dargestellt

#### Beton, 3D:

Der Beton wird mittels würfelförmiger Hexahedral-Elemente als Kontinuum dargestellt (s. Abb. 4-6). Je Element stehen acht Knotenpunkte zur Verfügung.

Die Elementabmessungen werden unter Berücksichtigung der Rissbandbreite festgelegt, welche gemäß Bazant et. al. 1983 für normalfeste Betone mit dem ca. 3-fachen Größtkorndurchmesser (hier ca.  $3 \cdot 16 \text{ mm} = 48 \text{ mm}$ ) abgeschätzt werden kann, sodass sich die Kantenlänge der würfelförmigen Hexahedral-Elemente zu 48 mm ergibt. Im vorliegenden Fall ergeben sich somit ca. 9 Elemente über die Querschnittshöhe und ca. 6 Elemente über die Querschnittsbreite. In Bauteillängsrichtung sind ca. 57 Elemente angeordnet.

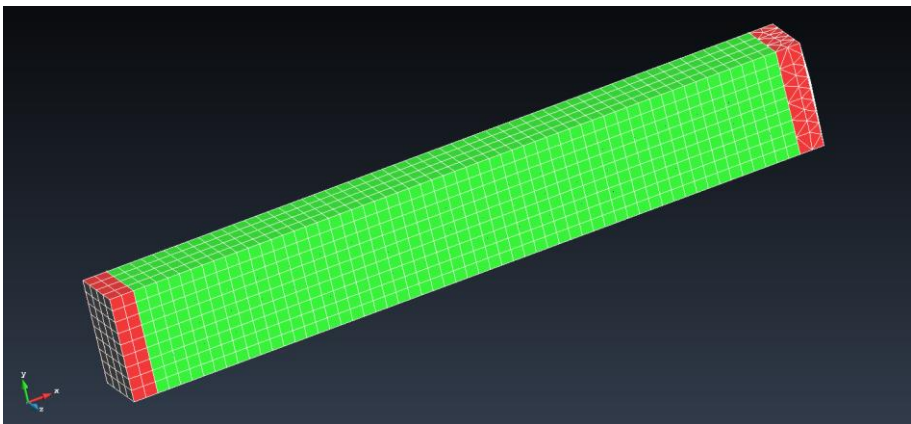


Abb. 4-6: Exemplarische Darstellung des Elementnetzes für 3D-Untersuchungen (Stahlbewehrung vorliegend nicht sichtbar, Lasteinleitungsbauteile nicht dargestellt)

### Stahlbewehrung:

Die Stahlbewehrung wird jeweils als ein einziges (lineares) Stabelement dargestellt. Fallweise vorhandene Querbewehrung (Ausrichtung in Bauteildickenrichtung) wird für 2D-Betrachtungen als ein elastischer Stahlkreisquerschnitt (ohne Verbundeigenschaften) und für 3D-Betrachtungen als Bewehrung (analog zur Längsbewehrung) modelliert (s. o.).

#### **4.2.4.6 Berechnung**

Vor dem Hintergrund, dass im Rahmen der Dehnkörperversuche lediglich Betrachtungen unterhalb des Traglastniveaus vorgenommen werden, wird für die nicht linearen Berechnungen gemäß Programmempfehlung die Newton-Raphson Methode zur iterativen Lösungsfindung gewählt.

#### **4.2.4.7 Crack spacing (min und max)**

Programmintern kann die Rissbandbreite („crack spacing“) voreingestellt werden, sodass die zugrunde liegende Diskretisierung in Versuchskörperlängsrichtung entsprechend modifiziert wird, d. h. die Rissbandbreite wird nicht mehr allein durch die Elementabmessungen charakterisiert.

Für 3D-Untersuchungen kann in diesem Zusammenhang eine untere Grenze für die Rissbandbreite („crack spacing min“) vorgegeben werden. Sobald die Eingabe für „crack spacing min“ größer als die eigentliche Elementgröße ist, wird die Elementgröße mit „crack spacing min“ programmintern gleichgesetzt. Durch Vorgabe einer definierten Rissbandbreite werden die Dehnungen über eine der Vorgabe entsprechenden Anzahl von Elementen (netzunabhängig) hinweg aufsummiert, sodass insgesamt größere Rissbreiten resultieren. In diesem Zusammenhang kann beispielsweise der im Zuge der experimentellen Untersuchungen ermittelte Rissabstand im Rahmen der numerischen Berechnung direkt berücksichtigt werden. Vorliegend wurde die minimale Rissbandbreite für 3D-Untersuchungen zu 16 cm gewählt und damit näherungsweise mit dem Trennrissabstand (s. hierzu auch Abschnitt 3.7.2.3; der mittlere Rissabstand der Serien 1, 1.1, 1.2 und 2 stellt sich auf der Bauteiloberfläche zu ca. 16 cm ein) gleichgesetzt und die Rissbandbreite stellt somit ein Vielfaches der Elementlänge dar (ca. 2- bis 3-fach).

Für 2D-Untersuchungen kann analog hierzu eine obere Grenze („crack spacing max“) für die Rissbandbreite festgelegt werden. Der obere Grenzwert wurde zu 20 cm gewählt sodass einzelne, größere Rissabstände als der in den Bauteilversuchen festgestellte Mittelwert pauschal berücksichtigt werden können.

### **4.3 Simulationsergebnisse und Vergleich mit den Bauteilversuchen**

Die in diesem Abschnitt dargestellten Simulationsergebnisse wurden unter Zugrundelegung der nachfolgenden Festlegungen (in Verbindung mit Abschnitt 4.2.4) wie folgt ermittelt:

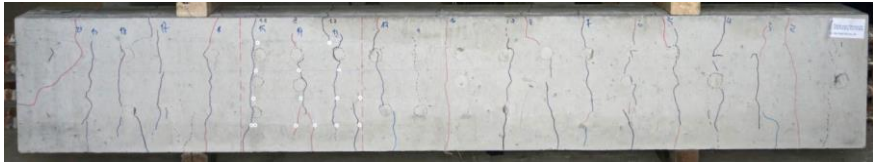

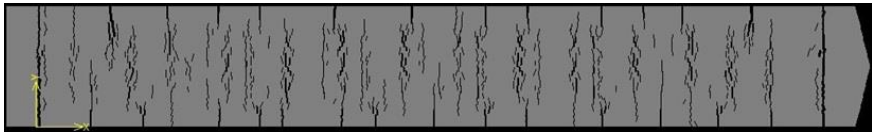
- Es wurden in Anlehnung an die Bauteilversuche nur Trennrisse mit Rissbreiten  $w \geq 0,05$  mm ausgewertet und die angegebenen Rissbreiten  $w_m$  und  $w_{max}$  ergeben sich jeweils für ein Stahlspannungsniveau in Höhe von  $280 \text{ N/mm}^2$ .
- Es werden random fields und damit eine zufällige Streuung der Betonzugfestigkeit entlang der Versuchskörperlänge für 2D-Untersuchungen berücksichtigt.
- Es werden für 2D-Untersuchungen jeweils die Verbundspannung-Schlupf-Beziehungen nach MC 1990 und MC 2010 verwendet. Für 3D-Untersuchungen werden „idealisierte“ Verbundeigenschaften zugrunde gelegt.

Es wird nachfolgend zwischen 2D- und 3D-Untersuchungen unterschieden.

4.3.1 2D-Untersuchungen

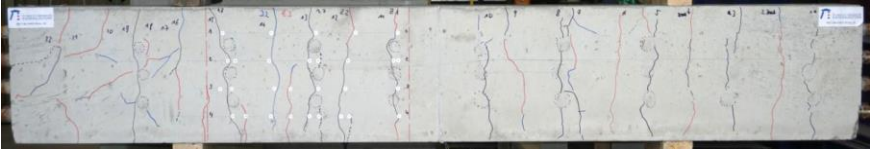
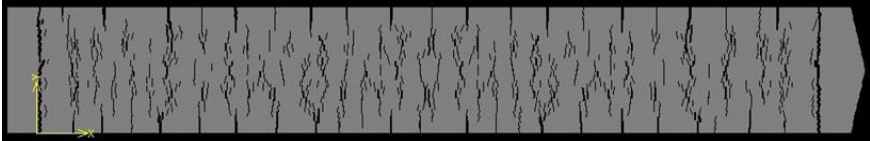
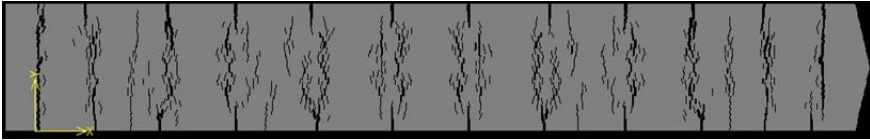
4.3.1.1 Ergebnisdarstellung

Serie 1,  $\phi 40$  mm, C30/37,  $\sigma_s = 280$  N/mm<sup>2</sup>

|  |  |
|--|--|
| Bauteilversuch (hier: Seitenfläche)  |  |
|    |  |
| Bauteiloberseite:<br>$w_m = 0,231$ mm<br>$w_{max} = 0,577$ mm                        | Bauteilseitenfläche:<br>$w_m = 0,193$ mm<br>$w_{max} = 0,462$ mm |
| Atena (MC 1990, hier: Seitenfläche)  |  |
|    |  |
| Bauteiloberseite:<br>$w_m = 0,188$ mm<br>$w_{max} = 0,254$ mm                        | Bauteilseitenfläche:<br>$w_m = 0,138$ mm<br>$w_{max} = 0,215$ mm |
| Atena (MC 2010, hier: Seitenfläche)  |  |
|  |  |
| Bauteiloberseite:<br>$w_m = 0,234$ mm<br>$w_{max} = 0,379$ mm                        | Bauteilseitenfläche:<br>$w_m = 0,131$ mm<br>$w_{max} = 0,256$ mm |


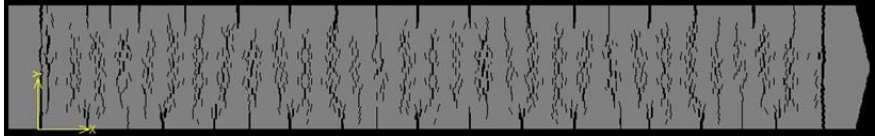
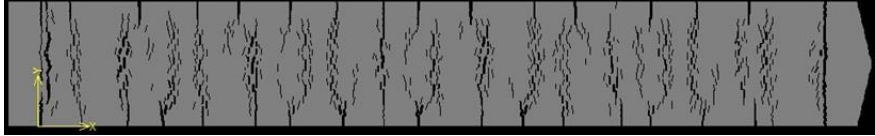
#### 4.3 Simulationsergebnisse und Vergleich mit den Bauteilversuchen

Serie 1.1,  $\phi 40$  mm, C30/37,  $\sigma_s = 280$  N/mm<sup>2</sup>

|  |   |
|--|---|
| Bauteilversuch (hier: Seitenfläche)  |   |
|    |   |
| <b>Bauteiloberseite:</b><br>$w_m = 0,202$ mm<br>$w_{max} = 0,393$ mm                 | <b>Bauteilseitenfläche:</b><br>$w_m = 0,160$ mm<br>$w_{max} = 0,280$ mm |
| Atena (MC 1990, hier: Seitenfläche)  |   |
|    |   |
| <b>Bauteiloberseite:</b><br>$w_m = 0,212$ mm<br>$w_{max} = 0,268$ mm                 | <b>Bauteilseitenfläche:</b><br>$w_m = 0,112$ mm<br>$w_{max} = 0,187$ mm |
| Atena (MC 2010, hier: Seitenfläche)  |   |
|  |   |
| <b>Bauteiloberseite:</b><br>$w_m = 0,319$ mm<br>$w_{max} = 0,362$ mm                 | <b>Bauteilseitenfläche:</b><br>$w_m = 0,172$ mm<br>$w_{max} = 0,268$ mm |


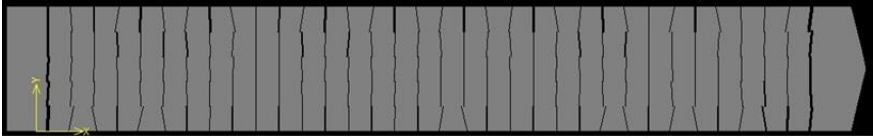
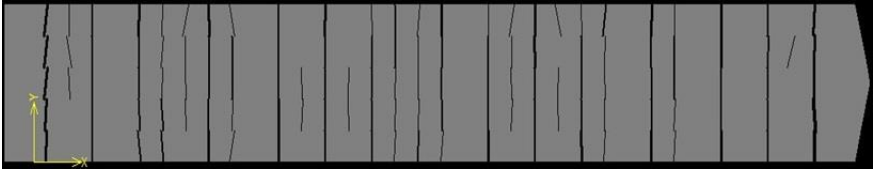
#### 4 Numerische Untersuchungen zum Rissgeschehen

Serie 1.2,  $\phi 40$  mm, C30/37,  $\sigma_s = 280$  N/mm<sup>2</sup>

|  |  |
|--|--|
| Bauteilversuch (hier: Seitenfläche)  |  |
|    |  |
| Bauteiloberseite:<br>$w_m = 0,186$ mm<br>$w_{max} = 0,301$ mm                        | Bauteilseitenfläche:<br>$w_m = 0,137$ mm<br>$w_{max} = 0,197$ mm |
| Atena (MC 1990, hier: Seitenfläche)  |  |
|    |  |
| Bauteiloberseite:<br>$w_m = 0,210$ mm<br>$w_{max} = 0,285$ mm                        | Bauteilseitenfläche:<br>$w_m = 0,122$ mm<br>$w_{max} = 0,195$ mm |
| Atena (MC 2010, hier: Seitenfläche)  |  |
|  |  |
| Bauteiloberseite:<br>$w_m = 0,224$ mm<br>$w_{max} = 0,319$ mm                        | Bauteilseitenfläche:<br>$w_m = 0,133$ mm<br>$w_{max} = 0,210$ mm |

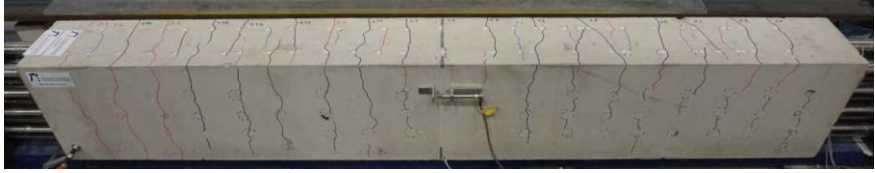
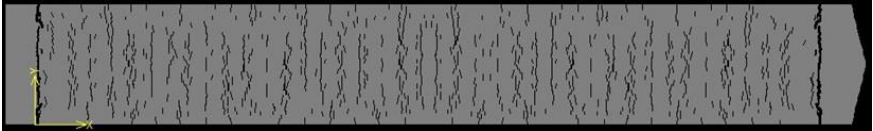
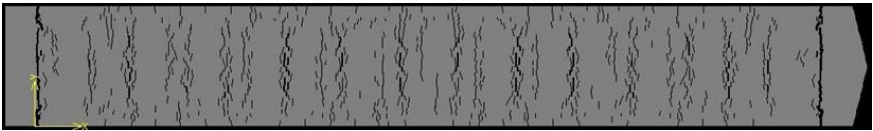
#### 4.3 Simulationsergebnisse und Vergleich mit den Bauteilversuchen

Serie 2,  $\phi 40$  mm, C30/37,  $\sigma_s = 280$  N/mm<sup>2</sup>

|  |  |
|--|--|
| Bauteilversuch (hier: Seitenfläche)  |  |
|    |  |
| Bauteiloberseite:<br>$w_m = 0,237$ mm<br>$w_{max} = 0,364$ mm                        | Bauteilseitenfläche:<br>$w_m = 0,168$ mm<br>$w_{max} = 0,306$ mm |
| Atena (MC 1990, hier: Seitenfläche)  |  |
|    |  |
| Bauteiloberseite:<br>$w_m = 0,233$ mm<br>$w_{max} = 0,300$ mm                        | Bauteilseitenfläche:<br>$w_m = 0,142$ mm<br>$w_{max} = 0,283$ mm |
| Atena (MC 2010, hier: Seitenfläche)  |  |
|  |  |
| Bauteiloberseite:<br>$w_m = 0,250$ mm<br>$w_{max} = 0,300$ mm                        | Bauteilseitenfläche:<br>$w_m = 0,201$ mm<br>$w_{max} = 0,290$ mm |

#### 4 Numerische Untersuchungen zum Rissgeschehen

Serie 4,  $\phi 40$  mm, C30/37,  $\sigma_s = 280$  N/mm<sup>2</sup>

|   |     |
|---|-----|
| Bauteilversuch (hier: Seitenfläche)   |     |
|   |     |
| Bauteiloberseite:<br>$w_m = 0,136$ mm<br>$w_{max} = 0,215$ mm   | ./. |
| Atena (MC 1990, hier: Seitenfläche)   |     |
|   |     |
| Bauteiloberseite:<br>$w_m = 0,135$ mm<br>$w_{max} = 0,274$ mm   | ./. |
| Atena (MC 2010, hier: Seitenfläche)   |     |
|   |     |
| Bauteiloberseite:<br>$w_m = 0,143$ mm<br>$w_{max} = 0,282$ mm   | ./. |
| <p><u>Anmerkung:</u> Die in Serie 4 verwendete Oberflächenbewehrung wurde auf der Bauteiloberseite angeordnet. Ein Einfluss derer kann somit auch lediglich auf der Bauteiloberseite, nicht jedoch auf den vertikalen Seitenflächen (Bauteilinneres) festgestellt werden. Vor diesem Hintergrund sind voranstehend keine Untersuchungsergebnisse für die Bauteilseitenfläche angegeben.</p> |     |



### 4.3.1.2 Erörterung der Untersuchungsergebnisse

Die voranstehenden Ergebnisse der numerischen Untersuchungen können im Hinblick auf qualitative (z. B. Erscheinungsbild auftretender Risse, Rissverlauf) und quantitative (z. B. Größe der Rissbreite) Merkmale wie folgt beschrieben werden.

- Es kann insgesamt festgestellt werden, dass sich auf der Bauteiloberseite Rissbreiten  $w_m$  und  $w_{max}$  in befriedigender Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Bauteilversuche einstellen. Unter Zugrundelegung der Verbundspannung-Schlupf-Beziehung nach MC 1990 (statt MC 2010) sind für  $w_m$  tendenziell zutreffendere Ergebnisse erkennbar. Die Ergebnisse für  $w_{max}$  werden im Vergleich zu den Bauteilversuchen z. T. unterschätzt.

Für die Bauteilseitenflächen (Bauteilinneres) ergeben sich in der Tendenz hingegen für die Verbundspannung-Schlupf-Beziehung nach MC 2010 bessere Übereinstimmungen mit den Versuchswerten. Es ist in diesem Zusammenhang anzumerken, dass die auf den vertikalen Bauteilflächen angetroffenen Rissbreiten lediglich exemplarisch und lokal im Zuge der Bauteilversuche aufgenommen wurden (vgl. Abschnitt 3.8.3).

Konkrete Aussagen zum Rissabstand sind vorliegend nicht möglich.

- Anhand der Simulationsergebnisse (Visualisierungen) ist augenscheinlich eine größere Anzahl an Rissen zu erkennen, als dies bei den Bauteilversuchen (Trennrisse und Zwischenrisse) insgesamt festzustellen war.
- Für eine fallweise vorhandene Querbewehrung werden die auftretenden Risse erkennbar durch diese forciert. Dies konnte im Zuge der Bauteilversuche nicht beobachtet werden (vgl. Abb. 3-43 und Abb. 3-44).

Es stellt sich zudem so dar, dass das Rissbild und damit auch die Wirkung der Querbewehrung als „Sollbruchstelle“ wesentlich durch die jeweils zugrunde gelegte Verbundspannung-Schlupf-Beziehung beeinflusst wird. Es ergeben sich mitunter unterschiedlich ausgeprägte Rissverläufe. Dies ist insbesondere bei Ansatz der Verbundspannung-Schlupf-Beziehung nach MC 2010 erkennbar. Hinsichtlich qualitativer Maßstäbe weist das unter Berücksichtigung der Verbundspannung-Schlupf-Beziehung nach MC 1990 resultierende Rissbild eine insgesamt bessere Übereinstimmung mit den Bauteilversuchen (hier werden analog zu den Bauteilversuchen auch „Zwischenrisse“ zwischen Querstablagen, z. B. bei Serie 1.1, abgebildet) auf.

- Auch anhand der Simulationsergebnisse zeigt sich, dass die Breite eines Trennrisses entlang des Rissverlaufs nicht konstant ist. Tendenziell ist auch hier eine Rissaufweitung zur Bauteiloberfläche hin wahrzunehmen.

- Für die 2D-Untersuchungen wurden die Verbundspannung-Schlupf-Beziehungen gemäß MC 1990 und MC 2010 berücksichtigt. Wie anhand obiger Ergebnisdarstellungen erkennbar, beeinflussen die jeweils zugrunde gelegten Verbundspannung-Schlupf-Beziehungen die Größe der Rissbreite (wenn auch diese nur geringfügig) und das sich einstellende Rissbild.
- Aufgrund der modellbedingten Randbedingung, dass sich die Lasteinleitungsplatte und die Betonstirnfläche ohne Relativverschiebung zueinander bewegen, treten bereits im Lasteinleitungsbereich unmittelbar hinter der Kopfplatte Rissbildungen mit großer Breite (Maximalwert) auf. Dieser Bereich muss als „Störbereich“ analog zu den Bauteilversuchen deklariert werden.

### 4.3.1.3 Plausibilitätsbetrachtungen

Die voranstehenden Simulationsergebnisse können jeweils nur als Näherungslösungen aufgefasst werden. Im hier vorliegenden Abschnitt werden deshalb Plausibilitätsbetrachtungen vorgenommen, um die Aussagequalität obiger Untersuchungsergebnisse verifizieren zu können und um maßgebende Einflussfaktoren der numerischen Untersuchung zu identifizieren.

- Identifikation und Auslesen von Trennrissen: Risse werden in der numerischen Darstellung jeweils elementweise angezeigt, sodass sich demnach keine (eindeutigen) diskreten Verläufe ergeben. Vielmehr setzen sich vermeintliche Trennrisse aus „Risscharen“ (s. o.) zusammen.

Trennrisse können vorliegend nur als solche identifiziert werden, sofern sich „Risscharen“ über die gesamte Querschnittshöhe konzentrieren und insgesamt die Rissbreiten in den betrachteten gerissenen Elementen Breiten gleicher Größenordnung aufweisen.

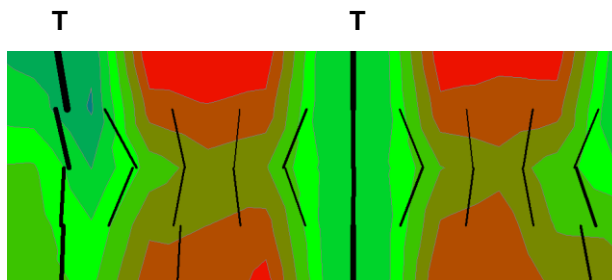


Abb. 4-7: Versuchskörperausschnitt mit Darstellung der Rissverteilung; anhand der Farbskala sind zudem Rückschlüsse auf die Rissbreite möglich (rot: Rissbreite  $w << 0,05$  mm, grün: Rissbreite  $w = 0,10 - 0,15$  mm), (händisch identifizierte Trennrisse sind voranstehend mit **T** gekennzeichnet)

Die im Abschnitt 4.3.1.1 vorgestellten numerischen Untersuchungsergebnisse zur Rissbreite wurden unter Berücksichtigung des Vorgenannten

einzelnen ausgelesen, d. h. es wurden zunächst Trennrisse als solche identifiziert und dann deren Rissbreite auf der Bauteilober- und -seitenfläche aufgenommen und dokumentiert. Etwaige Querschnittsbereiche zwischen zwei Trennrissen, für die in den numerischen Simulationsergebnissen ebenfalls Rissbildungen angezeigt werden (wenn auch Rissbreiten  $\ll 0,05$  mm) wurden im Zuge der Auswertung nicht weiter berücksichtigt. Dieses z. T. stark von der individuellen Wahrnehmung abhängige Vorgehen impliziert, dass das numerisch erzeugte Rissbild nicht ganzheitlich erfasst wird und einzelne kleinere Risse ggf. vernachlässigt werden (s. hierzu die nachstehenden Ausführungen zur Rissanzahl und Verformungskontrolle).

Vor diesem Hintergrund wurde auch von einer weitergehenden statistischen Auswertung der numerisch erzeugten Rissbreiten und einer Validierung dieser im Hinblick auf die Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen abgesehen. Demnach würden sonst mathematische Genauigkeiten im Zuge einer Auswertung vorgetäuscht, die vorliegend nicht einzuhalten sind.

- Rissanzahl und Verformungskontrolle: Zwecks Verifizierung, ob das numerisch erzeugte Rissbild infolge der Festlegung einer minimalen Rissbreite ( $w \geq 0,05$  mm) und infolge der Vorgehensweise bei der Identifikation und dem Auslesen von Trennrissen (näherungsweise) ganzheitlich erfasst werden konnte, wurden Betrachtungen zur Summe der mittleren Rissbreiten  $\Sigma w_m$  und zur Verformung des Zugglieds  $\Delta l$  (als reine Längsdehnung des Versuchskörpers ohne Anteile der Belastungseinrichtung) vorgenommen.

In diesem Zusammenhang konnte festgestellt werden, dass die Summe der mittleren Rissbreiten  $\Sigma w_m$  und die Zugstabdehnung  $\Delta l$  für die Serie 1 unabhängig von der verwendeten Verbundspannung-Schlupf-Beziehung in sehr guter Näherung übereinstimmen (z. B.  $\Sigma w_m = 3,74$  mm für Verbundspannung-Schlupf-Beziehung nach MC 2010 und  $\Delta l = 3,97$  mm; messtechnisch wurde die Zugstabdehnung in den Bauteilversuchen zu ca. 3,60 mm ermittelt).

Für die Serie 2 (ohne Querstäbe) konnte dies hingegen nicht bestätigt werden. Insgesamt wird die Summe der mittleren Rissbreiten  $\Sigma w_m$  durch die Verformung des Zugglieds  $\Delta l$  unterschätzt (z. B.  $\Sigma w_m = 2,50$  mm für Verbundspannung-Schlupf-Beziehung nach MC 2010 und  $\Delta l = 4,05$  mm; messtechnisch wurde die Zugstabdehnung in den Bauteilversuchen zu ca. 3,50 mm ermittelt).

- Rissbild: Das sich in den numerischen Untersuchungen einstellende Rissbild wird erkennbar durch die fallweise vorhandene Querbewehrung und die jeweils zugrunde gelegte Verbundspannung-Schlupf-Beziehung beeinflusst. Diesbezüglich ist für den Ansatz der Verbundspannung-Schlupf-Beziehung nach MC 1990 eine gute Übereinstimmung mit den Bauteilversuchen

festzustellen (s. Ergebnisdarstellung in Abschnitt 4.3.1.1) . Die z. T. ausgeprägte Wirkung der Querbewehrung als „Sollbruchstelle“ kann vorliegend ggf. auf deren Modellierung als elastischer Stahlkreisquerschnitt (die damit u. U. eine „Fehlstelle“ im Gefüge darstellt) zurückgeführt werden.

- Random fields: Eine zufällig stochastisch verteilte Betonzugfestigkeit bewirkt, dass sich Risse auf Erstrissniveau zunächst in Bereichen geringer Zugfestigkeiten (Erstrissniveau) bilden. Dies konnte im vorliegenden Fall der numerischen Untersuchungen ebenfalls so erkannt werden.

Auch mit fortschreitender Beanspruchung setzte die Rissbildung nicht gleichzeitig in allen Elementen ein. Vielmehr verblieben auch für größere Stahlspannungsniveaus einzelne Elemente im ungerissenen Zustand.

Die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung erzeugten Zufallsfelder unterscheiden sich für jede der betrachteten Bauteilkonzeptionen (Serien). Dies ist vor dem Hintergrund des Untersuchungsziels („Einfluss der streuenden Betonzugfestigkeit“) jedoch unerheblich.

- Elementgröße und Netzgenerierung: Die Elementgröße wurde vorliegend in Abhängigkeit einer fallweise vorhandenen Querbewehrung variiert. Für die Serie 2 (ohne Querbewehrung) wurden demnach Scheibenelemente mit einer Kantenlänge von ca. 8 cm verwendet (d. h. 6 Elemente über die Höhe), während die Elementlänge der Serien 1, 1.1 und 1.2 ca. 2 cm betrug (d. h. 21 Elemente über die Höhe).

Im Rahmen einer feineren Diskretisierung bei der Serie 2 (Elementlänge 2 cm) konnte festgestellt werden, dass die resultierende Rissbreite tendenziell mit kleiner werdender Elementlänge abnimmt.

Insgesamt ist damit festzustellen, dass die Simulationsergebnisse netzabhängig sind.

- Crack spacing max: Die Festlegung eines oberen Grenzwertes für die Rissbandbreite (hier 20 cm) ist bei einem ausreichend fein diskretisierten Netz ergebnisunabhängig.
- Erstrissbildung: Für die numerischen Untersuchungen kann die sich im Erstriss einstellende Stahlspannung zu ca. 35 N/mm<sup>2</sup> angegeben werden. Die hier zugehörige Prüflast beträgt ca. 470 kN. Die Erstrissbildung setzt dabei erkennbar in Querschnittsbereichen mit der lokal geringsten Betonzugfestigkeit ein.

Die im Rahmen der Simulation festgestellten Erstrisschnittgrößen stimmen in sehr guter Näherung mit der rechnerischen Risschnittgröße  $N_{cr,cal,m}$  unter

## 4.3 Simulationsergebnisse und Vergleich mit den Bauteilversuchen

Zugrundelegung von Gl. 3-2 überein. In den Bauteilversuchen selbst wurden diesbezüglich z. T. Risschnittgrößen erheblich außerhalb der vermuteten Bandbreiten auf Erstrissniveau (ca. + 30 %, vgl. Tab. 3-4) festgestellt.

- **aufgebrachte Zugkraft:** Das Belastungsregime für die Bauteilversuche wurde anhand der Vorgabe definiert, dass im Bereich des indizierten Erstrisses („reine Stahlspannung“) das jeweilige Zielspannungsniveau vorliegen sollte (s. Abschnitt 3.6.1). Für eine Stahlspannung in Höhe von 280 N/mm<sup>2</sup> ergibt sich die erforderliche Prüfkraft demnach zu ca. 2.815 kN. Aus den Simulationsergebnissen geht hervor, dass eine Stahlspannung in Höhe von 280 N/mm<sup>2</sup> in sehr guter Näherung bei einer äußeren Kraft von ca. 3.000 kN (+ 6 %) vorliegt.

### 4.3.2 3D-Untersuchungen

#### 4.3.2.1 Ergebnisdarstellung

Die Visualisierung des Rissgeschehens stellt sich in den Simulationsergebnissen der 3D-Untersuchungen für ein Stahlspannungsniveau von 280 N/mm<sup>2</sup> exemplarisch wie folgt dar:

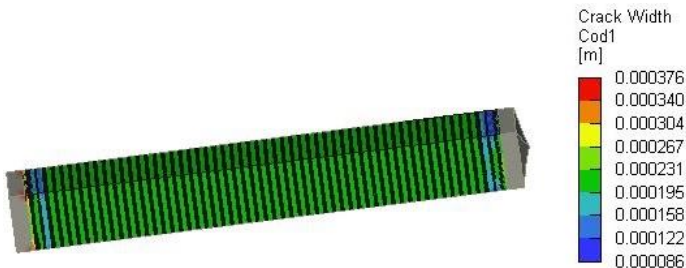


Abb. 4-8: Simulationsergebnis der 3D-Untersuchung (exemplarisch)

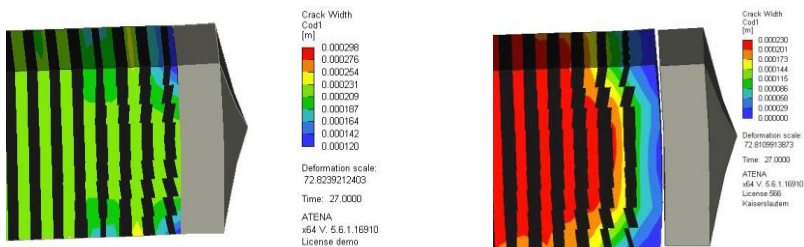


Abb. 4-9: Lasteinleitungsbereich, etwaige Relativverschiebungen und Verlauf der Rissbreite im Lasteinleitungsbereich (links: „fixed contact for surface“ und Spaltbildung zwischen Betonstirfläche und Lasteinleitungsplatte)

Gemäß voranstehender Abb. 4-8 ist insgesamt kein differenzierter Rissverlauf erkennbar. Die Rissbildung setzt in jedem Element ein und dabei weisen die Risse eine

konstante Breite über die Querschnittshöhe auf, sodass zudem auch nicht zwischen Bauteilober- und -seitenfläche unterschieden werden kann.

Wie im Abschnitt 4.2.4.4 bereits angedeutet, werden die numerisch erzeugten Rissbreitenergebnisse der 3D-Untersuchungen im Hinblick auf eine mögliche Relativverschiebung zwischen Lasteinleitungsplatte und Betonstirnfläche unterschieden.

In voranstehender Abb. 4-9 sind die Lasteinleitungsbereiche (links: „fixed contact for surface“, rechts: mit Relativverschiebung zwischen Lasteinleitungsplatte und Betonstirnfläche) dargestellt. Es treten zwar jeweils mittlere Rissbreiten von ca. 0,23 mm auf (die Rissbreitenverläufe sind lediglich unterschiedlich farblich skaliert), es zeigt sich jedoch, dass im linken Modell wiederum unmittelbar hinter der Kopfplatte Rissbildungen mit großer Breite (Maximalwert) auftreten (vgl. 2D-Untersuchungen). Für das rechte Modell ist ein längerer Lasteinleitungsbereich (größere Rissbreiten stellen sich nicht unmittelbar an Lasteinleitungsplatte angrenzend ein) erkennbar.

Eine Bewertung der Ergebnisse der numerischen Untersuchungen ist somit im Hinblick auf qualitative Merkmale (z. B. Erscheinungsbild auftretender Risse, Rissverlauf), wie voranstehend für die 2D-Untersuchungen vorgenommen, an dieser Stelle nicht zielführend möglich. Vor diesem Hintergrund kann die qualitative Ergebnisdarstellung nachfolgend nur tabellarisch erfolgen. Es werden dabei die Rissbreiten  $w_m$  und  $w_{max}$  gegenübergestellt.

Tab. 4-1: Ergebniszusammenstellung der 3D-Untersuchungen

| Serie           | Bauteilversuch<br>(Bauteiloberfläche) | Atena 3D<br>(fixed contact for surface) | Atena 3D<br>(mit Relativverschiebung) |
|-----------------|---------------------------------------|---|---------------------------------------|
| 1               | $w_m = 0,231$ mm                      | $w_m = 0,215$ mm                        | $w_m = 0,204$ mm                      |
|                 | $w_{max} = 0,577$ mm                  | $w_{max} = 0,376$ mm                    | $w_{max} = 0,228$ mm                  |
| 1.1             | $w_m = 0,202$ mm                      | $w_m = 0,218$ mm                        | $w_m = 0,204$ mm                      |
|                 | $w_{max} = 0,393$ mm                  | $w_{max} = 0,298$ mm                    | $w_{max} = 0,230$ mm                  |
| 1.2             | $w_m = 0,186$ mm                      | $w_m = 0,217$ mm                        | $w_m = 0,203$ mm                      |
|                 | $w_{max} = 0,301$ mm                  | $w_{max} = 0,341$ mm                    | $w_{max} = 0,228$ mm                  |
| 2               | $w_m = 0,237$ mm                      | $w_m = 0,216$ mm                        | $w_m = 0,206$ mm                      |
|                 | $w_{max} = 0,364$ mm                  | $w_{max} = 0,377$ mm                    | $w_{max} = 0,378$ mm                  |
| 4 <sup>1)</sup> | $w_m = 0,136$ mm                      | $w_m = 0,195$ mm                        | $w_m = 0,194$ mm                      |
|                 | $w_{max} = 0,215$ mm                  | $w_{max} = 0,354$ mm                    | $w_{max} = 0,428$ mm                  |

zu Tab. 4-1

- 1) Die Oberflächenbewehrung wurde in den Bauteilversuchen lediglich auf der Ober- und Unterseite des Versuchskörpers angeordnet.

Die Auswertungen zur mittleren ( $w_m$ ) und maximalen ( $w_{max}$ ) Rissbreite erfolgen programmintern (post-processing). Für die zwecks Gegenüberstellung mit den numerischen Untersuchungen heranzuziehenden Ergebnisse der Bauteilversuche werden ausschließlich Rissbreiten auf der Bauteiloberfläche berücksichtigt.

### 4.3.2.2 Erörterung der Untersuchungsergebnisse

Die voranstehenden Ergebnisse der numerischen Untersuchungen an 3D-modellierten Versuchskörpern können wie folgt beschrieben werden:

- Wie eingangs bereits dargelegt, ist anhand der Visualisierungen kein differenziertes Rissbild (Unterscheidung zwischen den Beobachtungsbereichen „Bauteiloberseite“ und „Bauteilseitenfläche“) erkennbar. Auch unabhängig von den in Bezug auf „crack spacing min“ gemachten Vorgaben werden Rissbildungen in jedem Element dargestellt und die Risse weisen eine konstante Breite über die Querschnittshöhe auf.
- Die im Zuge der Auswertung programmseitig ausgewiesenen Rissbreiten (im Rahmen des post-processing, d. h. hier erfolgte keine händische Auswertung wie in den 2D-Untersuchungen) stellen gemittelte Werte über alle im Querschnitt auftretenden Risse dar. Folglich kann nicht zwischen den Beobachtungsbereichen Oberseite und Seitenfläche unterschieden werden.
- Die in den Bauteilversuchen auf der Bauteiloberfläche feststellbaren mittleren Rissbreiten  $w_m$  werden anhand der Simulationsergebnisse in guter Näherung bestätigt. Lediglich für Serie 4 ergeben sich im Rahmen der hier durchgeführten numerischen Untersuchung deutlich größere Rissbreiten als im Bauteilversuch.
- Konkrete Aussagen zum Rissabstand sind vorliegend nicht möglich.
- Variationen der Elementabmessungen und Festlegungen zu „crack spacing min“ zeigen, dass die Ergebnisse stark netzabhängig sind. Mit verfeinertem Netz resultieren tendenziell kleinere Rissbreiten (die zugehörigen Untersuchungsergebnisse werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter dargestellt).
- Eine Beeinflussung der Rissbreitenergebnisse durch die zugrunde gelegten Verbundeigenschaften, so wie es sich im Zuge der 2D-Untersuchungen dargestellt hat, ist vorliegend nicht erkennbar. Der Ansatz konkreter Verbundspannung-Schlupf-Beziehungen nach MC 1990 und MC 2010 (statt „idealisierter“ Verbundeigenschaften) verringert die Übereinstimmung von Versuchs- und Simulationswert. Insbesondere  $w_{max}$  wird in diesem Zusammenhang deutlich überschätzt.

- Im Hinblick den Einfluss etwaiger Relativverschiebungen zwischen Lasteinleitungsplatte und Betonstirnfläche (vgl. Abb. 4-9) fällt zunächst auf, dass die Ergebnisse  $w_m$  unabhängig von der jeweiligen Modellvariation in guter Näherung miteinander übereinstimmen (s. Tab. 4-1). In der Tendenz bedingten Modelle mit „fixed contact for surface“ jedoch etwas größere (mittlere) Rissbreiten ( $< 5\%$ ). Ein wesentlicher Unterschied ist bei Betrachtung der Maximalwerte der Rissbreite  $w_{max}$  festzustellen. Für Modelle mit möglicher Relativverschiebung treten kleinere Rissbreiten  $w_{max}$  und in ähnlicher Größenordnung wie  $w_m$  auf (Ausnahme: Serie 2 und Serie 4, mögliche Ursachen hierfür konnten in diesem Zusammenhang vorliegend nicht aufgeklärt werden).

### 4.3.2.3 Plausibilitätsbetrachtung

Im Hinblick auf die Plausibilität der voranstehend beschriebenen Ergebnisse ist Folgendes auszuführen:

- Darstellung Rissgeschehen: In den Visualisierungen werden Risse in jedem Element dargestellt. Summiert man die ausgegebene mittlere Rissbreite über alle Risse auf und vergleicht die entsprechende Summe mit den Bauteilverformungen, so ist eine erhebliche Diskrepanz festzustellen. Betrachtet man dagegen eine reduzierte Rissanzahl, welche sich aus der Gesamtversuchskörperlänge geteilt durch die Vorgabe „crack spacing min“ ergibt, so stimmt diese Summe der mittleren Rissbreiten in der Tendenz zutreffender mit der globalen Bauteilverformung überein (aber geringere Übereinstimmung als in 2D-Untersuchungen).

Vor diesem Hintergrund ist davon auszugehen, dass die Ergebnisvisualisierung und damit auch die Darstellung des Rissgeschehens insgesamt nicht zielführend sind und sich ein Vergleich mit den Bauteilversuchen nicht eignet. Die ausgewiesene mittlere Rissbreite ist dagegen unter Einbezug von „crack spacing min“ plausibel.

- Einfluss Querbewehrung: Anhand der Simulationsergebnisse ist kein Einfluss einer etwaig vorhandenen Querbewehrung zu erkennen. Es stellen sich für die Serien 1, 1.1, 1.2 und 2 jeweils weitgehend identische Rissbreiten  $w_m$  ein. Dies konnte anhand der Bauteilversuche bei Betrachtung der Serie 1 und 2 bestätigt werden.
- aufgebrachte Zugkraft: Analog zu den 2D-Untersuchungen wurde vorliegend auch die angreifende äußere Beanspruchung überprüft. Auch hier zeigt sich anhand der Simulationsergebnisse, dass eine Stahlspannung in Höhe von  $280 \text{ N/mm}^2$  in sehr guter Näherung für eine äußere Kraft von ca.  $3.000 \text{ kN}$  ( $+ 6\%$ ) vorliegt.
- Oberflächenbewehrung: Für die Serie 4 konnte insgesamt keine hinreichende Übereinstimmung zwischen Versuchs- und Simulationswert festgestellt



werden. Dies kann möglicherweise auf die Querschnittskonzeption zurückgeführt werden. Wie bereits dargelegt wurde die Oberflächenbewehrung in den Bauteilversuchen nur auf der Querschnittsober- und -unterseite angeordnet. Im Rahmen der numerischen Untersuchungen werden die Rissbreitenergebnisse programmseitig als gemittelte Werte über alle im Querschnitt auftretende Risse ausgewiesen. Dementsprechend werden die fein verteilten Risse auf der Bauteiloberfläche tendenziell überschätzt.

- Einfluss Lasteinleitung: Wie in Abb. 4-9 anschaulich zu erkennen, beeinflussen etwaige Relativverschiebungen, wie sie im Rahmen der Modellierung der Lasteinleitung festgelegt wurden, die Rissbildung im unmittelbaren Lasteinleitungsbereich hinter der Lasteinleitungsplatte. Der jeweils angetroffene Maximalwert der Rissbreite ist ebenfalls von dieser Festlegung betroffen (vgl. Tab. 4-1). Durch eine sich einstellende Relativverformung bleiben möglicherweise größere Rissbreiten im Lasteinleitungsbereich aus.

Im Hinblick auf eine möglichst realitätsnahe Abbildung der den Bauteilversuchen zugrundeliegenden Verhältnissen in den numerischen Simulationen ist festzustellen, dass eine Mitwirkung der Lasteinleitungsplatte möglichst vollständig auszuschließen ist. Vor diesem Hintergrund erscheint die Festlegung „fixed contact for surface“ an dieser Stelle als nicht uneingeschränkt zutreffend.

### 4.4 Wertung und Zusammenfassung

In dem vorliegenden Kapitel wurden, anknüpfend an die experimentellen Untersuchungen zum Rissgeschehen von mehrlagig bewehrten Stahlbetonquerschnitten, orientierende numerische Untersuchungen mit dem nicht linearen Finite-Elemente Programm Atena durchgeführt, um die Ergebnisse der Bauteilversuche hinsichtlich der Rissbreite und des Rissabstandes und das im Zuge derer festgestellte Trag- und Verformungsverhalten im Grundsatz zu überprüfen. Wie eingangs bereits erklärt, sind die hier vorgestellten numerischen Untersuchungen als Nebenbetrachtung aufzufassen. Diese erheben somit nicht den Anspruch auf Vollständigkeit.

Die im Zuge dieser Untersuchungen entwickelten numerischen Modelle stellen Näherungslösungen dar und bilden das Trag- und Verformungsverhalten der Stahlbetonzugglieder, auch unter Berücksichtigung zwangsläufig erforderlicher Geometrie-, Werkstoff- und Systemvereinfachungen, in einer groben Detaillierungsebene (im Maßstab 1:1) ab.

Es wurden Versuchskörper verschiedener Querschnittskonzeption mit 2D- und 3D-Elementen modelliert und die resultierenden Simulationsergebnisse konnten im Hinblick auf qualitative (z. B. Erscheinungsbild auftretender Risse) und quantitative (z. B. Größe der Rissbreite) Merkmale mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen verglichen werden.

Insgesamt zeigen die Simulationsergebnisse der 2D- und 3D-Untersuchungen, dass die resultierenden Rissbreiten vor dem Hintergrund der nicht gänzlich auszuschließenden Unschärfen der Modellierung in befriedigender Näherung mit den in den Bauteilversuchen angetroffenen Rissbreiten ( $w_m$ ,  $w_{max}$ ) übereinstimmen.

Zudem ist anhand der 2D-Untersuchungen erkennbar, dass sich die Rissufer zu den Bauteilrändern hin aufweiten, während im Bereich der Hauptbewehrung annähernd Rissbreiten gleicher Größenordnungen auftreten.

Weiter konnte auch das wesentliche Trag- und Verformungsverhalten (z. B. Einsetzen der Erstrissbildung, sukzessive Rissbildung, äußerlich angreifende Beanspruchungen, Bauteilverformungen) im Grundsatz hinreichend genau verifiziert werden.

Das Erscheinungsbild auftretender Risse („Rissbild“) konnte vorliegend ausschließlich im Rahmen der 2D-Untersuchungen konkret nachvollzogen werden. Es zeigte sich, dass das in den numerischen Untersuchungen angetroffene Rissbild nicht uneingeschränkt mit den Ergebnissen der Bauteilversuche korreliert. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die vermeintliche Wirkung einer etwaig vorhandenen Querbewehrung als Sollbruchstelle vorzubringen, die sich in den Simulationen deutlich dezidiert, als es in den Bauteilversuchen erkennbar war, darstellte. Es ergeben sich zudem mitunter unterschiedlich ausgeprägte Rissverläufe, die wesentlich durch die jeweils zugrunde gelegte Verbundspannung-Schlupf-Beziehung beeinflusst werden.

Im Hinblick auf die Aussagegenauigkeit der durchgeführten numerischen Untersuchungen ist zu resümieren, dass die Simulationsergebnisse von zahlreichen modell- und werkstoffbezogenen Einflussfaktoren (z. B. Modellierung der Lasteinleitung und ggf. damit einhergehende Unschärfen in der Nachbildung der Bauteilversuche, Netzdiskretisierung, Verbundeigenschaften der Stahlbewehrung, Vorgabe „crack spacing min“) sowie von Wechselbeziehungen untereinander erkennbar abhängig sind, welche die Vorhersagegenauigkeit insgesamt beschneiden. Es können keine „unabhängigen“, von den Bauteilversuchen gänzlich losgelösten Ergebnisse (z. B. durch das Erfordernis des Gleichsetzens der Rissbandbreite mit dem mittleren Rissabstand) erstellt werden. Dies trifft so insbesondere für die 3D-Untersuchungen zu, sodass deren Ergebnisse kritisch zu hinterfragen sind.

Insgesamt konnte jedoch das Ziel der Versuchsnachrechnung mit einem Finite-Elemente-Programm gut erreicht werden. Das im Rahmen der Bauteilversuche erkennbaren Trag- und Verformungsverhalten konnte anhand der weitergehenden theoretischen Betrachtungen unabhängig verifiziert werden.

## 5 Nachrechnung der Versuchsergebnisse mit Ingenieur- und Bemessungsmodellen

### 5.1 Einführung

Das Ziel des vorliegenden Kapitels ist es, die Zuverlässigkeit der rechnerischen Vorhersage ausgewählter Ingenieur- und Bemessungsmodelle (s. hierzu Abschnitte 2.3.3 und 2.4) zur rechnerischen Begrenzung der Rissbreite zu überprüfen und zu validieren.

Vor diesem Hintergrund werden die durchgeführten Bauteilversuche im Hinblick auf die sich einstellenden Rissbreiten und Rissabstände, unter Zugrundelegung der vorhandenen Querschnittskonzeptionen, der Einwirkung und der Materialeigenschaften, nachgerechnet. Ausgehend hiervon kann festgestellt werden, in welchen Spannweiten rechnerische (Oberflächen-) Rissbreiten für die betrachteten Ingenieur- und Bemessungsmodelle zu erwarten sind und inwieweit diese die in der experimentellen Versuchsdurchführung festgestellten Ergebnisse bestätigen können.

Für das derzeit bauaufsichtlich in Deutschland eingeführte Nachweiskonzept zur Begrenzung der Rissbreite nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA kann auf dieser Grundlage außerdem befunden werden, ob gegebenenfalls Modifikationen der Bemessungsgleichungen im Hinblick auf die hier untersuchten Querschnittskonzeptionen (Stahlbetonquerschnitte mit mehrlagig kreuzweise angeordneter Bewehrung und/oder großen Stabdurchmessern) zu empfehlen sind, um eine zielsichere rechnerische Vorhersage der sich am Bauteil einstellenden Rissbreiten zu erreichen. Ein Bemessungsvorschlag, welcher diesbezügliche Modifikationen beinhaltet, wird in Kapitel 6 vorgestellt.

### 5.2 Allgemeines

Im Zuge der Versuchsnachrechnung werden die nachfolgend genannten Ingenieur- und Bemessungsmodelle herangezogen:

- DIN EN 1992-1-1,
- DIN EN 1992-1-1/NA,
- prEN1992-1-1,
- MC 2010,
- Empelmann et al. 2015b,
- Schäfer 2016,
- Tran 2018.

Unter Zugrundelegung dieser Ingenieur- und Bemessungsmodelle werden jeweils charakteristische Rechenwerte der Rissbreite und des Rissabstandes für unterschiedliche Stahlspannungsniveaus bestimmt und den Versuchswerten gegenübergestellt. Wie bereits im Abschnitt 2 dieser Arbeit mehrfach thematisiert, ist in diesem Zusammenhang für den Rechenwert der Rissbreite  $w_{cal}$  des jeweils betrachteten Ingenieur-

## 5 Nachrechnung der Versuchsergebnisse mit Ingenieur- und Bemessungsmodellen

und Bemessungsmodells zunächst festzustellen, ob sich dieser auf den Wirkungsbereich der Bewehrung, auf die Stahloberfläche des Bewehrungsstabes oder auf die Bauteiloberfläche bezieht. Notwendige Modifikationen des Rechenwerts zur Gleichstellung von Versuchs- und Rechenwert für die Bezugsebene „Bauteiloberfläche“ werden im Abschnitt 5.4 erläutert.

Die betrachteten Ingenieur- und Bemessungsmodelle liefern insbesondere für sehr kleine Stahlspannungsniveaus (80 N/mm bis 200 N/mm<sup>2</sup>) z. T. rechnerische Rissbreiten kleiner als 0,10 mm. Dies wird zwar in der Tendenz so auch durch die Versuchsergebnisse bestätigt, Rissbreitenbegrenzungen für Rissbreiten  $\ll 0,10$  mm sind jedoch weitestgehend nicht praxisrelevant und es ist zudem auf derzeitigem Kenntnisstand nicht geklärt, ob die jeweils zur Verfügung stehenden Bemessungsgleichungen für sehr kleine Rissbreiten hinreichend genau sind (s. auch Eckfeldt 2009). DBV 2019 ist in diesem Zusammenhang zu entnehmen, dass das Bemessungsmodell in DIN EN 1992-1-1/NA für die Abschätzung von Rissbreiten  $< 0,10$  mm zu ungenau und damit ungeeignet ist. Die sich etwaig aus der Berechnung ergebenden sehr kleinen Rissbreiten werden aus Gründen der Vollständigkeit aber dennoch nachfolgend ohne weitere Kommentierung angegeben.

Im Zuge der Nachrechnung werden vorliegend Bauteilkonzeptionen mit Bewehrungsstäben  $\phi 40$  mm und ohne Oberflächenbewehrung zugrunde gelegt, die gemäß derzeitigem gültigem Regelwerk in Deutschland so nicht vorgesehen sind. Die betreffenden Bauteile (Serie 1, 2) werden ungeachtet dessen dennoch vollumfänglich in die Nachrechnung mit einbezogen.

Im vorliegenden Abschnitt werden Bezeichnungsweisen allgemein wie folgt verwendet:

- Rechenwerte der Rissbreite  $w_{cal}$  und des Rissabstandes  $s_{cal}$ ,
- Modifizierter Rechenwert der Rissbreite  $w_{cal,surf}$  nach Überführung in eine rechnerische Oberflächenrissbreite (abhängig vom jeweils betrachteten Ingenieur- und Bemessungsmodell),
- Versuchswerte  $w_{max}$ ,  $w_m$ , und  $w_{0,75}$  und  $w_{0,95}$  (vgl. Abschnitte 3.7 und 3.8).

### **5.3 Festlegungen und Randbedingungen**

In einem ersten Schritt werden zunächst Berechnungseingangsgrößen der betrachteten Ingenieur- und Bemessungsmodelle einheitlich festgelegt. Diese Festlegungen beziehen sich vorwiegend auf die Versuchskörperkonzeptionen (Bauteilgeometrie und konstruktive Durchbildung im Hinblick auf die Bewehrungsführung) und die Materialeigenschaften.

Falls explizit nicht anders in den einzelnen Ingenieur- und Bemessungsmodellen vorgegeben, werden die Berechnungsannahmen wie nachfolgend dargelegt definiert und in diesem Zusammenhang kritisch hinterfragt.

### 5.3.1 Materialeigenschaften

In die Berechnung der Rissbreite und des Rissabstandes gehen wesentlich die effektive (zentrische) Zugfestigkeit und der E-Modul des Betons sowie der E-Modul des Betonstahls ein, welche unter Zugrundelegung der versuchsbegleitend durchgeführten Materialprüfungen ermittelt wurden.

Für den Beton wurden zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung die mittlere Spaltzugfestigkeit  $f_{ct,sp}$  und der mittlere E-Modul  $E_{cm}$  an je drei Probekörpern (Zylinder,  $h/d = 150/300$  mm) bestimmt. Der mittlere E-Modul des Betonstahls wurde für jeden Stabdurchmesser der Hauptbewehrung an drei Stahlzugproben ermittelt (s. Anhang A – Materialeigenschaften).

Im Hinblick auf die im Rahmen der rechnerischen Rissbreitenvorhersage anzusetzenden mechanischen Materialeigenschaften ist Folgendes festzustellen:

- Effektive (zentrische) Zugfestigkeit des Betons: Unter der effektiven Zugfestigkeit  $f_{ct,eff}$  ist gemäß DIN EN 1992-1-1 ein zeitabhängiger Mittelwert der Zugfestigkeit  $f_{ctm}(t)$  zu verstehen, der beim Aufreißen des Querschnitts zu erwarten ist. Im vorliegenden Fall kann die mittlere Zugfestigkeit  $f_{ctm}$  zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung somit als die (mittlere) Zugfestigkeit zum Zeitpunkt der (lastinduzierten) Rissbildung aufgefasst werden. Die Zugfestigkeit des Betons wird im Rahmen dieser Arbeit näherungsweise gemäß Gl. 3-1 aus der (mittleren) Spaltzugfestigkeit berechnet. In diesem Zusammenhang wird weiterhin unterstellt, dass kein Unterschied zwischen Bauteil- und Normprobekörperfestigkeit besteht und dass sich die Streuung der Betonzugfestigkeit im Bauteil und in den Normprobekörpern identisch einstellt.
- E-Modul des Betons: Der E-Modul  $E_{cm}$  des Betons wird in den Bemessungs- und Ingenieurmodellen, im Rahmen der Berechnung der Verhältniszahl  $\alpha_e$  der Elastizitätsmoduln, als Mittelwert in Ansatz gebracht. Im Zuge der Materialprüfungen konnte diesbezüglich festgestellt werden, dass die versuchsbegleitend geprüften E-Moduln des Betons (als Mittelwerte einer Charge) sehr stark streuen (selbst bei gleicher Betonzusammensetzung) und die in DIN EN 1992-1-1 angegebenen Rechenwerte z. T. nennenswert unterschreiten (um bis zu 20 %). Dies ist vermutlich überwiegend der verwendeten Gesteinskörnung mit gedrungener Kornform (Rheinkies, Quarzit mit einem Größtkorndurchmesser von 16 mm) zuzumessen. Im Zuge dieser Arbeit wurden diesbezüglich keine weiteren Untersuchungen angestrengt, um diesen Umstand aufzuklären.
- E-Modul des Betonstahls: Auch der E-Modul  $E_s$  der verwendeten Stahlbewehrung wird auf Mittelwertniveau berücksichtigt. Als Rechenwert wird in DIN EN 1992-1-1  $E_s = 200.000$  N/mm<sup>2</sup> angegeben, welcher im Zuge der Materialprüfungen in guter Näherung bestätigt werden konnte. Grundsätzlich ist in diesem Zusammenhang festzustellen, dass die Einzelwerte der Materialprüfergebnisse bedingt durch die hohen, gleichbleibenden Fertigungsqualitäten der Stahlproduktion wesentlich weniger streuen als die des Betons. Für Versuche mit einer Oberflächenbewehrung (Serie 4) wird ein

## 5 Nachrechnung der Versuchsergebnisse mit Ingenieur- und Bemessungsmodellen

gewichteter E-Modul  $E_s'$  der Bewehrung durch anteilige Berücksichtigung der Haupt- und Oberflächenbewehrung in Ansatz gebracht.

Insgesamt werden für die Nachrechnung der Versuchsergebnisse Mittelwerte der mechanischen Eigenschaften herangezogen. Eine Überführung dieser Werte in charakteristische Festigkeiten (Fraktilwerte) ist an dieser Stelle definitionsgemäß nicht angezeigt. Lediglich in den Ingenieurmodellen nach Tran 2018 und Schäfer 2016 wird die charakteristische Betondruckfestigkeit gemäß DIN EN 1992-1-1 in der Berechnung der Rissbreite in Ansatz gebracht. Anhand der parallel zu den Bauteilversuchen durchgeführten Festbetonuntersuchungen konnte festgestellt werden, dass die verwendeten Betone der Betonfestigkeitsklassen C30/37 und C50/60 keine übermäßigen Über- oder Unterfestigkeiten aufweisen (s. Abschnitt 3.7.1.1). Vor diesem Hintergrund wird die charakteristische Betondruckfestigkeit gemäß DIN EN 1992-1-1 für die Nachrechnung zugrunde gelegt, ohne dass weitergehende statistische Auswertungen der Materialprüfergebnisse vorgenommen werden.

Folgende Problemstellungen sind im Hinblick auf die Materialeigenschaften für die Nachrechnung der Versuchsergebnisse kritisch zu beleuchten:

- Festigkeit am Normprobekörper – Ist-Festigkeit am Bauteil: In Leonhardt 1985 heißt es, dass die Zugfestigkeit am Bauwerk infolge Mikrorissbildung in etwa 20–30 % niedriger ist, als zugehörige, an Normprobekörpern ermittelte Laborwerte. Diese Diskrepanz zwischen Labor- und Bauwerksfestigkeit (In-situ-Festigkeit) wird auch ausführlich in Weber 2019 (hauptsächlich in Bezug auf die Druckfestigkeit historischer Betone) thematisiert. Nach Weber 2019 kann für ein Bauteilalter bis 28 Tage festgestellt werden, dass die sich an Bohrkernen bestimmten In-situ-Zugfestigkeiten geringer einstellen als parallel hierzu an Normprobekörpern ermittelte Zugfestigkeiten. Die in Leonhardt 1985 genannte Tendenz kann somit bestätigt werden. Insgesamt liegen aber bisher noch keine belastbaren Untersuchungen oder Erkenntnisse vor, anhand derer ein Unterschied zwischen der am Laborprobekörper und am Bauwerk ermittelten Betonzugfestigkeit quantifiziert werden kann.

Infolgedessen kann aber geschlussfolgert werden, dass der Ansatz einer an Laborprobekörpern abgeleiteten mechanischen Eigenschaft grundsätzlich nicht uneingeschränkt die „tatsächlich im Bauteil vorhandenen Festigkeiten“ widerspiegelt. Festigkeitsmindernde Effekte, welche wesentlich durch die Ausbildung des Bauteils selbst (Mikrorissbildungen infolge behinderten Schwindens des Betons durch eingelegte Bewehrung), dessen Lagerungsbedingungen (verformungsbehindert) und ggf. vorherrschende Umwelteinflüsse bestimmt werden, können mit Hilfe der Laborprobekörper nicht erfasst werden. Tendenziell werden die mechanischen Eigenschaften somit überschätzt, d. h. die Rissbildung tritt ggf. bereits zu einem früheren Belastungszeitpunkt ein.

Erschwerend kommt außerdem hinzu, dass sich die (zentrische) Zugfestigkeit des Betons in Laborversuchen nicht zuverlässig bestimmen lässt. Problematisch sind hierbei insbesondere die Sicherstellung einer

zentrischen Lasteinleitung und der kraftschlüssige Anschluss des Prüfkörpers an die Prüfmaschine. Man bedient sich deshalb der Spaltzugfestigkeit als Hilfsgröße, ausgehend davon man auf die (zentrische) Zugfestigkeit zurückrechnet. Dies implementiert zusätzliche Unschärfen in der Berechnung.

Mangels Alternativen werden nachfolgend trotz aller Vorbehalte mittlere, mechanische Festbetoneigenschaften wie beschrieben in Ansatz gebracht.

- „Streuung“ der Materialfestigkeiten entlang des Bauteils: Die Erstrissbildung und auch die sukzessive Rissbildung setzen bekanntermaßen an der „zufällig schwächsten Stelle“ mit der geringsten Betonzugfestigkeit ein. An dieser Stelle kann die Zugfestigkeit in den erwartbaren Spannweiten zufällig so verteilt sein, dass im Bereich der Rissstelle gerade die minimale Festigkeit vorliegt oder aber auch dass dort eine Unstetigkeitsstelle (z. B. Betonierfehlerstelle oder vorangegangene Mikrorissbildung infolge Schwindens) vorhanden ist, welche dann als „Sollrissstelle“ wirkt.

Angaben zur erwartbaren Verteilung der Zugfestigkeit in einem Bauteil, mit Hilfe derer potentielle Rissstellen und damit auch Rissabstände vorhergesagt werden könnten, liegen nicht vor. In Eckfeldt 2009 wird der Zusammenhang zwischen Rissbildung, Betonhärte (gemessen als Rückprallzahl mit dem Rückprallhammer) und Festigkeit beschrieben. Nach Eckfeldt 2009 ist die Verteilung der Betonzugfestigkeit entlang eines Bauteils (in Belastungsrichtung) nicht trivial messtechnisch zu erfassen. Vor diesem Hintergrund wird eine alternative Herangehensweise beschrieben, indem orientierend durch Rückprallhammerprüfungen auf die Betondruckfestigkeit an der Oberfläche und unter Zugrundelegung des bekannten Zusammenhangs zwischen Betondruckfestigkeit und -zugfestigkeit schließlich qualitativ auf die Betonzugfestigkeit selbst geschlossen werden kann. In Eckfeldt 2009 werden zugehörige Versuchsergebnisse wie folgt beschrieben: *„Interessant ist dabei einerseits, dass die Risse oft die lokalen Fehlstellen der Festigkeit zu treffen scheinen, oft jedoch auch in der Nähe ziemlich hoher Festigkeiten anzutreffen sind. Möglicherweise fallen Risse viel eher mit einem steilen Abfall der Festigkeit zusammen als mit dem eigentlichen lokalen Minimum.“* Zusammenfassend wird festgestellt, dass durchaus fundierte Angaben zur Verteilung der Betonzugfestigkeit mit Hilfe stochastischer Verteilungsfunktionen gelingen können, die jedoch begleitende und z. T. umfangreiche Festigkeitsprüfungen als Eingangsgröße voraussetzen.

Allgemeingültige Aussagen zur Verteilung von Materialfestigkeiten in einem Bauteil können, insbesondere vor dem Hintergrund unterschiedlicher Bauteilgeometrien, Herstellverfahren und -qualitäten, erwartungsgemäß nicht getroffen werden. Eine im Zuge der Rissbreitenbegrenzung vorzunehmende Abschätzung potentieller Rissstellen entlang der Bauteilausdehnung ist damit praxisgerecht nicht umsetzbar.

### 5.3.2 Dauer der Lasteinwirkung

Die Dauer der Lasteinwirkung wurde vor dem Hintergrund der sehr kurzen Versuchsdauer von nur wenigen Stunden und eines quasi-statischen Belastungsregimes (keine wiederholte Belastung) als „kurzzeitig“ eingestuft. Durch diese Festlegung wird die Größe der Abminderung der Verbundfestigkeit (Verbundkriechen) berücksichtigt, welche wesentlich von der Dauer der Lasteinwirkung abhängt und exemplarisch in DIN EN 1992-1-1 mit dem Faktor  $k_t$  in die Berechnung eingeht.

### 5.3.3 Wirkungsbereich der Bewehrung (Längsbewehrung)

Der Wirkungsbereich der Bewehrung  $A_{c,eff}$  beschreibt im Wesentlichen die begrenzt rissverteilende Wirkung der eingelegten Bewehrung.

Für das abgeschlossene Rissbild eines zentrischen Zugstabes (Biegebalken analog) stellt es sich so dar, dass fallweise Risse auftreten, die nicht den gesamten Querschnitt durchtrennen, sondern auf Querschnittsbereiche nahe der eingelegten Bewehrung begrenzt sind (Sekundärrisse). Gemäß Zilch et al. 2010 kann sich hier des Modells des „Ersatzstabes“ mit der Querschnittsfläche  $A_{c,eff}$  bedient werden, welcher gerade diejenige Risschnittgröße aufweist, die zur Sekundärrissbildung führt. Nach Zilch et al. 2010 ist der Wirkungsbereich der Bewehrung dabei von folgenden Randbedingungen abhängig:

- Rissbild (Primär-, Sekundärrissbildung),
- Lastniveau (Erstrissbild, abgeschlossenes Rissbild),
- Anordnung der Bewehrung,
- Spannungszustand (Zug- und/oder Biegebeanspruchung).

Gemäß DIN EN 1992-1-1 (und DIN EN 1992-1-1/NA) ist die Höhe  $h_{c,ef}$  des Wirkungsbereichs der Bewehrung  $A_{c,eff}$  für zugbeanspruchte Bauteile bei konzentrierter Bewehrungsanordnung und dünnen Bauteilen) wie folgt zu bestimmen:

$$h_{c,ef} = 2,5 \cdot d_1 \leq \frac{h}{2} \quad \text{Gl. 5-1}$$

mit  $d_1$  (Achs-)Abstand der Bewehrung vom gezogenen Querschnittsrand  
 $h$  Höhe des Bauteilquerschnitts

Für dicke Bauteile (d. h.  $h / (h - d) > 5$  bei zentrischem Zug) stellen sich ausgedehntere Wirkungsbereiche ein.

In Schäfer 2016 wurde unter Zugrundelegung der Versuchsergebnisse festgestellt, dass die Berechnung des Wirkungsbereichs  $A_{c,eff}$  der Bewehrung auch für Stäbe mit einem Stabdurchmesser größer als  $\phi_{large}$  gemäß DIN EN 1992-1-1 hinreichend genau ist.

Im vorliegenden Fall werden nun zentrische Zugversuche an Querschnitten mit mehrlagiger Bewehrungsanordnung betrachtet. Der Wirkungsbereich der Bewehrung wird im Weiteren nicht auf die einzelnen Bewehrungslagen, sondern auf den gesamten Querschnitt bezogen. Es kann dabei angenommen werden, dass der Wirkungsbereich



der Bewehrung den gesamten Betonquerschnitt erfasst und demnach die Nettoquerschnittsfläche (reine Gesamtquerschnittsfläche abzüglich des Bewehrungsquerschnitts) anzusetzen ist. Begründet werden kann dies mit dem ausnahmslosen Auftreten von Primärrissen (Trennrissen) im Beobachtungsbereich auf der Bauteiloberseite (vgl. Abb. 3-13). Für die Bauteilseitenfläche (Bauteilinneres) konnten hingegen auch Sekundärrisse („Zwischenrisse“, vgl. Abschnitt 3.7.2.4) festgestellt werden.

#### 5.3.4 Berücksichtigung der Querbewehrung

Gemäß den Versuchsbeobachtungen (vgl. Abschnitt 3.7.2.4) ist festzustellen, dass die eingelegte Querbewehrung die Rissbreite und den Rissabstand auf der Bauteiloberfläche nicht nennenswert beeinflusst, auch wenn zunächst die Vermutung naheliegt, dass die Querbewehrung als „Sollbruchstelle“ wirkt. Es konnte nicht beobachtet werden, dass Trennrissbildungen an jeder Querstablage auftreten. Insgesamt forciert die eingelegte Querbewehrung auf der Bauteilseitenfläche aber ein homogenes Rissbild (d. h. ohne Verästelungen und Unstetigkeitsstellen im Rissverlauf). Eine pauschale Berücksichtigung der Querbewehrung durch Gleichsetzen des Rissabstandes mit dem Querstababstand ist vor dem Hintergrund der Untersuchungsergebnisse deshalb nicht angezeigt.

Der Einfluss einer Querbewehrung (Serie 1, 1.1, 1.2 und 4.1) wird im Zuge der Nachrechnung deshalb bei der Ermittlung der effektiven Betonbruttoquerschnittsfläche  $A_{c,ef}$  berücksichtigt. Es werden dazu die diskreten Bewehrungsquerschnitte auf ein Betonvolumeninkrement „verschmiert“, sodass eine Reduzierung der unter Zugbeanspruchung stehenden Betonquerschnittsfläche durch die eingelegte Querbewehrung rechnerisch erfasst werden kann. Die unter Berücksichtigung einer etwaig vorhandenen Querbewehrung resultierende effektive Betonbruttoquerschnittsfläche wird wie folgt berechnet.

$$A_{c,ef,red} = \frac{A_{c,ef} \cdot a_{s,x} - V_{quer}}{a_{s,x}} \quad \text{Gl. 5-2}$$

mit  $A_{c,ef}$  Betonbruttoquerschnittsfläche abzgl. des vorhandenen Längsbewehrungsquerschnitts  
 $a_{s,x}$  (Achs-) Abstand der Querbewehrung  
 $V_{quer}$  (Kreiszyylinder-)Volumen der eingelegten Querbewehrung im betrachteten Schnitt

#### 5.3.5 Berücksichtigung einer gemischten Bewehrung

Die Bauteile der Serie 4 sind mit einer randnahen Oberflächenbewehrung aus dünnen Stabdurchmessern ausgestattet. Zur Berücksichtigung einer gemischten Bewehrung aus unterschiedlichen Stabdurchmessern (Hauptbewehrung und Oberflächenbewehrung) wird der Vergleichsstabdurchmesser herangezogen. Dieser wird nachfolgend gemäß den Festlegungen in DIN EN 1992-1-1 bestimmt. Es soll jedoch auch der Vorschlag in Schäfer 2016 (s. Abschnitt 2.3.3.4) Beachtung finden, wonach der Oberflächenbewehrung grundsätzlich eine „größere Gewichtung“ zuzumessen ist. Hierauf wird nochmals dezidiert in Kapitel 6 eingegangen.

### **5.3.6 Berücksichtigung der Betondeckung**

Die Betonüberdeckung der Bewehrung ist im Zuge der Rissabstandsberechnung nach DIN EN 1992-1-1, MC 2010 und prEN1992-1-1 zu berücksichtigen.

Es wird aber in diesem Zusammenhang jeweils nicht weiter spezifiziert, ob die Betondeckung stets auf die Hauptbewehrung oder ggf. (sofern vorhanden) auf eine randnahe angeordnete Oberflächenbewehrung anzuwenden ist. In prEN1992-1-1, Abschnitt 9.2.4, Abs. 5 heißt dort hinsichtlich der in Ansatz zu bringenden Betondeckung  $c$ : „*c is the clear cover, i. e., the distance between the tensioned concrete surface and the outer edge of the longitudinal reinforcement closest to the concrete surface.*“ Demnach bezieht sich die Betondeckung  $c$  auf die äußere (Längs-) Bewehrungslage.

Für die Nachrechnung der Versuchsergebnisse mit den Bemessungsgleichungen nach DIN EN 1992-1-1, MC 2010 und prEN1992-1-1 wird für die Versuchsserie 4 einheitlich die Betondeckung der Oberflächenbewehrung ( $c_{\text{nom}} = 30 \text{ mm}$ ) in Ansatz gebracht. In allen anderen Fällen wird die Betondeckung der Hauptbewehrung ( $c_{\text{nom}} = 60 \text{ mm}$ ) berücksichtigt.

### **5.3.7 Berücksichtigung der Rissphasen**

In Anlehnung an den Abschnitt 3.7.2.1 ist festzustellen, dass die Erstrissbildung in den Bauteilversuchen bereits schon vor der Vollendung der ersten Belastungsstufe (Stahlspannung bis  $80 \text{ N/mm}^2$ ) eintrat. Im Zuge der weiteren Belastung setzte dann die sukzessive Rissbildung bis zum Erreichen des abgeschlossenen Rissbildes ein.

## **5.4 Korrelation von Versuchs- und Rechenwerten**

Im Abschnitt 2.7.7 wird ausführlich thematisiert, dass der Rechenwert der Rissbreite nach DIN EN 1992-1-1 (und DIN EN 1992-1-1/NA) definitionsgemäß nicht der am Bauteil messbaren Oberflächenrissbreite entspricht. Um einen Vergleich zwischen Rechenwerten und Versuchswerten anstrengen zu können, ist demnach zwingend eine gemeinsame „Betrachtungsbasis“ (z. B. Bauteiloberfläche) festzulegen.

Vor diesem Hintergrund werden im vorliegenden Abschnitt ausgewählte Ansätze vorgestellt, anhand derer der Rechenwert der Rissbreite  $w_k$  in eine rechnerische Oberflächenrissbreite  $w_{k,\text{surf}}$  überführt werden kann. In diesem Zusammenhang muss aber dezidiert unterschieden werden, an welcher Querschnittsstelle (im Wirkungsbereich der Bewehrung, z. B. DIN EN 1992-1-1/NA; auf Höhe der Stahlbewehrung, z. B. Empelmann et al. 2015b; auf der Bauteiloberfläche, z. B. prEN1992-1-1) die rechnerische Rissbreite des jeweils betrachteten Bemessungs- und Ingenieurmodells bestimmt wird. Von einer solchen Überführung sind diejenigen Bemessungs- oder Ingenieurmodelle ausgenommen, die definitionsgemäß bereits eine rechnerische Oberflächenrissbreite ausweisen (z. B. MC 2010, prEN1992-1-1).

Ungeachtet des Erfordernisses einer gemeinsamen „Betrachtungsbasis“ wird zusätzlich auch eine unmittelbare Gegenüberstellung der Oberflächenrissbreite (Versuchswert) und des entsprechend nicht modifizierten Rechenwerts der Rissbreite vorge-

nommen. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass empirische Anteile der Bemessungsmodelle mutmaßlich mittels an der Bauteiloberfläche gewonnenen Rissbreitenergebnissen hergeleitet wurden (ggf. jedoch unter Zugrundelegung definierter Anforderungen an die Querschnittskonzeption, z. B. einheitliche Betondeckung, wie es in Schäfer 2016 thematisiert wird), sodass ein Vergleich der rechnerischen Rissbreite mit an der Oberfläche gewonnenen Messwerten nicht gänzlich unbegründet erscheint. Auch ist naheliegend, dass die in DBV 2016 thematisierte Aussagegenauigkeit des nationalen Bemessungsansatzes nach DIN EN 1992-1-1/NA auf Grundlage von Erfahrungswerten durch eine direkte Gegenüberstellung von Rechenwerten und Oberflächenrissbreiten abgeleitet wurden. Weiterhin stellt es sich in diesem Zusammenhang auch so dar, dass aktuelle Untersuchungen zur Vorhersagequalität von Rechenmodellen (z. B. DBV 2019) eine Gegenüberstellung von Rechenwert und Oberflächenrissbreite ungeachtet der Rissaufweitung hin zur Bauteiloberfläche beinhalten, obwohl diese Diskrepanz allgemein sehr wohl bekannt ist (z. B. DAfStb 630). Um an dieser Stelle eine Verifizierung und weitergehende Diskussion der Ergebnisse zu ermöglichen, ist es erforderlich, dass eine Gegenüberstellung in gleicher Weise vorgenommen wird.

Auffassungen, wonach die infolge zentrischer Zugbeanspruchung resultierenden Trennrisse – wie sie vorliegend auch für die beschriebenen Bauteilversuche zu beobachten sind – eine entlang der Betondeckung weitgehend konstante Rissbreite aufweisen (vgl. DBV 1996, als eine Vorversion von DBV 2016), sodass etwaige Unterscheidungen zwischen Rissbreiten an verschiedenen Querschnittsstellen entfallen können, werden mit den Untersuchungsergebnissen in Schäfer 2016 nachweislich widerlegt.

### 5.4.1 Ansatz aus Eckfeldt 2005

In Eckfeldt 2005 wird die Aufweitung der Rissbreite, ausgehend von der Oberfläche des Bewehrungsstabes hin zur Bauteiloberfläche (also entlang der Betonüberdeckung), durch einen parabelförmigen Verlauf beschrieben (s. auch Abschnitt 2.3.2.4 und Gl. 2-10). Dies zugrunde legend wird ein analytischer Ansatz zur Bestimmung der Oberflächenrissbreite vorgestellt. Es wird an dieser Stelle jedoch vorausgesetzt, dass sowohl die rechnerische Rissbreite an der Stahloberfläche  $w_s$  als auch der Rechenwert der Rissbreite  $w_{cal,th}$ , welcher sich in Abhängigkeit der Dehnungsverteilung in einer bestimmten Querschnittshöhe einstellt, jedoch näherungsweise in der Mitte der Betonüberdeckung angenommen werden kann, bekannt sind. Der analytische Ansatz zeichnet sich wesentlich dadurch aus, dass die gesuchte Rissbreite an der Bauteiloberfläche durch Ausnutzung geometrischer Zusammenhänge zwischen einem „Startwert“ (Rissbreite an der Stahloberfläche  $w_s$ ) und einem „Zwischenwert entlang des Kurvenverlaufs“ (Rechenwert der Rissbreite  $w_{cal,th}$ ) gefunden werden kann.

In Eckfeldt 2005 wird darüber hinaus auch noch ein weiterer Ansatz zur Beschreibung des Rissbreitenverlaufs in Form einer multivariaten Regression thematisiert, d. h. eine quantitative Beschreibung eines Zusammenhangs unter Berücksichtigung mehrerer, voneinander abhängiger Variablen. Der hier in Rede stehende Zusammenhang zwischen dem Rechenwert der Rissbreite und der Oberflächenrissbreite basiert dabei u. a. auf historischen Untersuchungsergebnissen aus Husain et al. 1968, welche

## 5 Nachrechnung der Versuchsergebnisse mit Ingenieur- und Bemessungsmodellen

einen zur Bauteiloberfläche hin nicht linear ansteigende Rissbreite ausweisen und auch in DBV 1996 veröffentlicht wurden (vgl. nachfolgende Abb. 5-1).

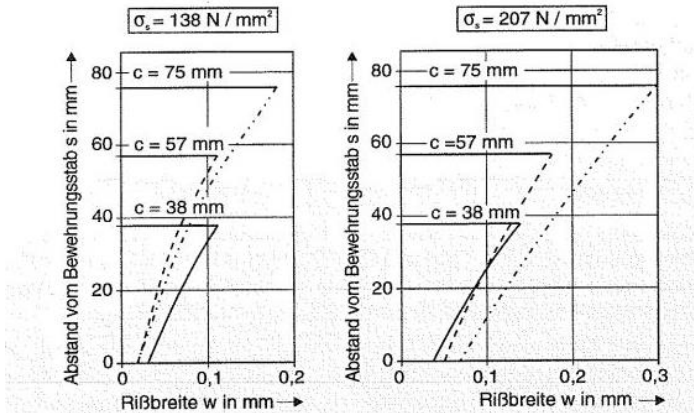


Abb. 5-1: Darstellungen zum Rissverlauf entlang der Betondeckung aus DBV 1996

Der zugehörige Ansatz stellt sich in Eckfeldt 2005 wie folgt dar:

$$w_{\text{surface}} = 1,4707 \cdot w_{\text{cal,th}} + 0,000962 \cdot c + 0,000188 \cdot \sigma_s \quad \text{Gl. 5-3}$$

- mit  $w_{\text{cal,th}}$  Rechenwert der Rissbreite; in Eckfeldt 2005 wird angenommen, dass sich diese Rissbreite in etwa im Abstand von  $c/2$  von der Stahloberfläche einstellt
- $c$  Betondeckung der Bewehrung
- $\sigma_s$  Stahlspannung

Für die Ingenieurmodelle nach Empelmann et al. 2015b und Tran 2018 gilt zu berücksichtigen, dass die rechnerische Rissbreite definitionsgemäß auf Höhe der Stahlbewehrung ausgewiesen wird. Vor diesem Hintergrund ist Gl. 5-4 wie folgt modifiziert zu Gl. 5-3 aus Eckfeldt 2005 zu verwenden:

$$w_{\text{surface}} = 1,555 \cdot w_s + 0,001628 \cdot c + 0,0001384 \cdot \sigma_s - 0,029046 \quad \text{Gl. 5-4}$$

- mit  $w_s$  Rissbreite an der Stahloberfläche

### 5.4.2 Ansatz aus DAfStb 630

In DAfStb 630 (s. auch Empelmann et al. 2015b) wird vorgeschlagen, dass im Hinblick auf den Rechenwert der Rissbreite nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA eine etwaige Rissaufweitung bei großen Betondeckungen ( $c > 50 \text{ mm}$ ) hin zur Oberfläche durch einen pauschalen Additionsterm  $\Delta w$  berücksichtigt werden kann. Demnach soll für die Rissbreite an der Bauteiloberfläche gelten:

$$w_{k,c} = w_k + \Delta w \quad \text{Gl. 5-5}$$

Für eine Stahlspannung  $\sigma_s = 250 \text{ N/mm}^2$  kann  $\Delta w$  gemäß DAfStb 630 zu  $0,10 \text{ mm}$  angenommen werden. Diese Festlegung basiert auf Untersuchungen nach

Empelmann et al. 2015b, wonach sich die Oberflächenrissbreite bei großen Betondeckungen (50 mm bis 80 mm) um bis zu 0,15 mm größer darstellte, als in der Umgebung der Stahlbewehrung gemessen.

Inwieweit der pauschale Erhöhungsfaktor  $\Delta w$  ggf. im Hinblick auf weitere Einflussfaktoren (z. B. Stabdurchmesser, unterschiedliche Stahlspannungsniveaus) variiert, ist vorliegend nicht beschrieben und muss offenbleiben.

### 5.4.3 Ansatz aus Schäfer 2016

In Schäfer 2016 wurden zahlreiche Versuche zur Ermittlung eines Zusammenhangs zwischen der Oberflächenrissbreite  $w_{\text{surf}}$  und dem Rechenwert der Rissbreite  $w_k$  (nach DIN EN 1992-1-1/NA) durchgeführt (s. auch Abschnitt 2.3.2.6). Es wird in diesem Zusammenhang ein linearer Rissverlauf unterstellt. Die Oberflächenrissbreite  $w_{\text{surf}}$  berechnet sich gemäß Schäfer 2016 wie folgt:

$$w_{\text{surf}} = w_k \cdot k_{\text{surf}} \quad \text{Gl. 5-6}$$

Der Vergrößerungsfaktor  $k_{\text{surf}}$  zur Abschätzung der Rissaufweitung an der Oberfläche für praxisübliche Betondeckungen (35 mm–45 mm) wird in Schäfer 2016 in den Spannweiten 1,21–1,36 angenommen. Für eine Betondeckung von 60 mm (wie sie in den hier betrachteten Bauteilversuchen verwendet wurde) wird  $k_{\text{surf}}$  in Schäfer 2016 zu 1,54 bis 1,69 angegeben (für eine Betondeckung von 30 mm, Serie 4:  $k_{\text{surf}} = 1,11$ –1,13). Für die Nachrechnung wird  $k_{\text{surf}}$  wie folgt gemäß Schäfer 2016 festgelegt:

- Betondeckung 30 mm:  $k_{\text{surf}} = 1,12$
- Betondeckung 60 mm:  $k_{\text{surf}} = 1,61$

Gemäß den Ingenieurmodellen nach Empelmann et al. 2015b und Tran 2018 stellt sich die berechnete Rissbreite auf Höhe der Stahlbewehrung ein. Der Zusammenhang zwischen der Rissbreite am Bewehrungsstab  $w_s$  und der Bauteiloberfläche  $w_{\text{surf}}$  wird in Schäfer 2016 durch den Faktor  $k_w$  beschrieben.

$$w_s = w_{\text{surf}} \cdot k_w \quad \text{Gl. 5-7}$$

In Schäfer 2016 wird der Faktor  $k_w$  lediglich mit einer Bandbreite von 0,3 bis 0,4 – unabhängig von der vorhandenen Betonüberdeckung – angegeben, sodass für die Nachrechnung Einfachheit halber  $k_w = 0,35$  festgelegt wird.

### 5.4.4 Diskussion und kritische Wertung

Nachfolgend werden die voranstehend beschriebenen Berechnungsansätze zur Bestimmung der Oberflächenrissbreite diskutiert und im Hinblick auf ihren mechanischen Hintergrund sowie eine praxisgerechte Anwendung kritisch beleuchtet.

zum Ansatz aus Eckfeldt 2005:

- Der analytische Ansatz unter Zugrundelegung eines parabelförmigen Rissverlaufs zur Berechnung der Oberflächenrissbreite erfordert die Bestimmung der Rissbreite an zwei verschiedenen Querschnittsstellen des betrachteten

## 5 Nachrechnung der Versuchsergebnisse mit Ingenieur- und Bemessungsmodellen

Bauteils (an der Stahloberfläche und im Wirkungsbereich der Bewehrung). Dies ist aus Sicht des Verfassers nicht praxisüblich und kann mit den hier betrachteten Berechnungsmodellen und den nun mehrfach thematisierten Unsicherheiten im Hinblick auf die Definition der Rissbreite unter Berücksichtigung baupraktischer Erwägungen insgesamt nicht gelingen.

- Der multivariate Regressionsansatz wird in Eckfeldt 2005 selbst als „vage“ aufgefasst und wurde auch nur für konkrete Anwendungsgrenzen (Rissbreite  $< 0,30$  mm, Stahlspannung  $< 300$  N/mm<sup>2</sup>) überprüft. Ob in diesem Zusammenhang noch weitere Einschränkungen im Hinblick auf die Anwendbarkeit (z. B. Begrenzung des Stabdurchmessers, Begrenzung der Größe der Betondeckung) zu berücksichtigen sind, ist nicht bekannt. Dennoch kann mit den Gleichungen Gl. 5-3 und Gl. 5-4 eine Überführung des Rechenwerts der Rissbreite in eine (rechnerische) Oberflächenrissbreite für verschiedene Nachweisstellen (Wirkungsbereich der Bewehrung, Oberfläche des Bewehrungsstabes) gelingen.

### zum Ansatz aus DAfStb 630:

- Der pauschale Additionsterms  $\Delta w$  nach DAfStb 630 zur Berücksichtigung einer Rissaufweitung zur Bauteiloberfläche hin stellt insgesamt einen praxistauglichen Ansatz dar.
- Die Anwendung des Additionsterms ist nach DAfStb 630 auf den Rechenwert der Rissbreite nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA beschränkt.
- Ob vor diesem Hintergrund auch eine Beaufschlagung des Rechenwerts der Rissbreite auf Höhe der Stahlbewehrung in gleicher Größenordnung möglich ist, kann nicht aufgeklärt werden (obwohl in den hier zugrundeliegenden Untersuchungen Rissbreiten auf Höhe der Bewehrung ausgewertet wurden). Der Ansatz eines gleichgroßen Additionsterms erscheint in diesem Zusammenhang aber in jedem Fall nicht angezeigt.
- Nach dem Verständnis des Verfassers ist die Rissaufweitung zur Bauteiloberfläche hin grundsätzlich bauteil- und belastungsabhängig (Stahlspannungsniveau). Eine pauschale Festlegung ist somit mechanisch nicht begründbar.

### zum Ansatz aus Schäfer 2016:

- Dem in Schäfer 2016 beschriebenen Ansatz zum Erhöhungsfaktor  $k_{\text{surf}}$  (vgl. Gl. 5-6) liegen experimentelle Untersuchungen zum Verhältnis  $k_w$  der Rissbreite  $w_s$  am Bewehrungsstab und der Rissbreite  $w_{\text{surf}}$  an der Bauteiloberfläche ( $k_w = 0,30-0,40$ ) zugrunde. Im Rahmen der Herleitung des Erhöhungsfaktors  $k_{\text{surf}}$  wurde angenommen, dass der Rechenwert der Rissbreite  $w_k$  nach DIN EN 1992-1-1/NA im Abstand von 25 mm zum Bewehrungsstab zu verorten ist. Dies wird in Schäfer 2016 damit begründet, dass das Bemessungsmodell nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA teilempirische Ansätze beinhaltet, die an Bauteilversuchen mit jeweils einheitlicher Betondeckung von 25 mm abgeleitet wurden. Vor diesem Hintergrund kann unter Bezug auf Schäfer 2016 festgestellt werden, dass die rechnerische Rissbreite  $w_k$  nach DIN EN 1992-1-1/NA für eine Betondeckung

in Höhe von 25 mm mit der sich auf der Bauteiloberfläche einstellenden Oberflächenrissbreite (ungeachtet einer etwaigen Rissaufweitung) gleichgesetzt werden kann.

- Aus Sicht des Verfassers kann die Lage des Wirkungsbereichs der Bewehrung nicht pauschal festgelegt werden, da diese von verschiedenen äußeren Randbedingungen abhängig ist (s. hierzu auch Abschnitt 5.3.3). In Eckfeldt 2005 wird diesbezüglich angenommen, dass sich der Rechenwert der Rissbreite näherungsweise im Abstand der halben Betondeckung von der Stahloberfläche einstellt, sodass demnach die jeweils tatsächlich vorliegende Betonüberdeckung zu berücksichtigen ist.
- Die experimentellen Untersuchungen wurden an Querschnitten mit großen Bewehrungsstäben, Betondeckungen bis 75 mm und Stahlspannungen bis ca. 300 N/mm<sup>2</sup> hergeleitet. Vor diesem Hintergrund erscheint eine Anwendung der in Schäfer 2016 zur Verfügung gestellten Ansätze für die eigenen Versuche grundsätzlich möglich.
- Mit dem Ziel der Eingrenzung und Konkretisierung des in Abschnitt 5.4.3 angegebenen Faktors  $k_{\text{surf}}$  im Hinblick auf die eigenen Bauteilversuche wurde das Verhältnis der auf der Bauteiloberfläche (Betondeckung 60 mm, für Serie 4: 30 mm) und auf der Bauteilseitenfläche (Betondeckung entspricht dem Nenndurchmesser der Hauptbewehrung) gemessenen Rissbreiten exemplarisch ausgewertet. Unter Zugrundelegung eines linearen Rissverlaufs stellt sich das in Schäfer 2016 als  $k_w$  bezeichnete Verhältnis aus der Rissbreite  $w_s$  (auf Höhe der Stahlbewehrung) und der Oberflächenrissbreite  $w_{\text{surf}}$  für die eigenen Versuche im Mittel zu 0,10 ein und ist damit geringer, als in Schäfer 2016 mit  $k_w = 0,30\text{--}0,40$  angegeben. Als Vergrößerungsfaktor  $k_{\text{surf}}$  würden sich demnach dann auch deutlich größere Werte (Betondeckung 30 mm:  $k_{\text{surf}} = 1,18$ , Betondeckung 60 mm:  $k_{\text{surf}} = 2,11$ ) einstellen. Für die hier vorliegenden Versuche gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass sich auf der Bauteilseitenfläche z. T. Sekundärrisse mit deutlich kleineren Rissbreiten als die Primärrisse (Trennrisse) einstellen. Daher und vor dem Hintergrund, dass für die Rissbreiten auf der Bauteilseitenfläche nur eine Datenbank geringen Umfangs vorliegt, sollte aus Sicht des Verfassers den Empfehlungen in Schäfer 2016 für  $k_{\text{surf}}$  gefolgt werden.
- Der Erhöhungsfaktor  $k_{\text{surf}}$  bezieht sich gemäß Schäfer 2016 nachweislich auf den Rechenwert der Rissbreite im Wirkungsbereich der Bewehrung. Für Bemessungs- und Ingenieurmodelle, die eine Rissbreite auf Höhe der Stahlbewehrung ausgeben, kann eine Überführung in eine Oberflächenrissbreite aber mit Hilfe des Verhältniswertes  $k_w$  gelingen.

Trotz der beschriebenen Vorbehalte und mangels fundierter Alternativen werden für die Überführung der rechnerischen Rissbreite in eine (rechnerische) Oberflächenrissbreite nachfolgend die Berechnungsansätze nach Eckfeldt 2005 und Schäfer 2016 herangezogen. Es sei an dieser Stelle jedoch angemerkt, dass die Anwendung der

vorgenannten Ansätze nur orientierend erfolgen kann, da die Modelle z. T. enge Anwendungsgrenzen aufweisen, sodass keine Allgemeingültigkeit vorausgesetzt werden kann.

### 5.5 Gegenüberstellung von Versuchs- und Rechenwerten

Nachfolgend werden die Versuchswerte (Oberflächenrissbreiten auf Bauteiloberseite) den jeweiligen Ergebnissen der Nachrechnung gegenübergestellt. In diesem Zusammenhang wurden alle zur Verfügung stehenden Versuchs- und Nachrechnungsergebnisse zusammengefasst, sodass insgesamt 100 Datenpaare zur Verfügung stehen. Es wird somit im Folgenden nicht weiter zwischen einzelnen Serien unterschieden.

#### 5.5.1 Bewertungsmaßstäbe

Die Ergebnisdarstellung erfolgt grafisch, sodass qualitativ befunden werden kann, ob die in den Versuchen auftretenden Rissbreiten durch die Rechenergebnisse  $w_{k,cal}$  (und  $w_{k,cal,surf}$  mit Modifizierung gemäß den in Abschnitt 5.4 vorgestellten Ansätzen) unter- oder überschätzt werden. Auf der Abszissenachse sind diesbezüglich jeweils die Rechenwerte  $w_{k,cal}$  der ausgewählten Bemessungs- und Ingenieurmodelle aufgetragen. Die Versuchswerte  $w_{test}$  (ausgewertet als charakteristische Rissbreite  $w_{0,75}$ ; fallweise werden zusätzlich auch mittlere Rissbreiten  $w_m$  und charakteristische Rissbreiten  $w_{0,95}$  berücksichtigt) befinden sich auf der Ordinatenachse. Jedes Diagramm ist aus Gründen der besseren Lesbarkeit mit einer diagonalen, gestrichelten Hilfslinie („Winkelhalbierenden“) versehen. Für diejenigen Datenpunkte, die rechts bzw. unterhalb dieser Diagonalen liegen, ist festzustellen, dass die in den Versuchen auftretenden Rissbreiten durch das jeweilige Bemessungs- oder Ingenieurmodell überschätzt werden (konservativ), d. h. dass die Rechenwerte der Rissbreiten die Versuchsergebnisse überschreiten ( $w_{k,cal} > w_{0,75}$ ). Für Datenpunkte die links bzw. oberhalb der Diagonalen liegen, stellt es sich hingegen so dar, dass im Zuge der Bauteilversuche größere Rissbreiten auftreten ( $w_{k,cal} < w_{0,75}$ ), als anhand der Bemessungs- oder Ingenieurmodelle vorhergesagt (progressiv).

Zwecks objektiver, quantitativer Einschätzung der Vorhersagegenauigkeit wird der Faktor  $\gamma_{mod}$  in Anlehnung an DBV 2019 wie folgt eingeführt:

$$\gamma_{mod} = \frac{w_{k,cal}}{w_{test}} \quad \text{Gl. 5-8}$$

mit  $w_{k,cal}$  Rechenwert der Rissbreite  
 $w_{test}$  Versuchswerte  $w_{0,75}$  (fallweise auch  $w_m$  und  $w_{0,95}$ )

Der Faktor  $\gamma_{mod}$  ist gemäß DBV 2019 als Indikator im Hinblick auf die Genauigkeit der rechnerischen Vorhersage des Bemessungs- oder Ingenieurmodells aufzufassen, sodass eine Aussage über die Größe der Modellsicherheit getroffen werden kann. Der Faktor  $\gamma_{mod}$  wird vor diesem Hintergrund daher im weiteren Verlauf auch als „Modellsicherheit“ bezeichnet. Werte  $\gamma_{mod} < 1,0$  liegen in diesem Zusammenhang auf der unsi-



cheren Seite, wohingegen Werte  $\gamma_{\text{mod}} > 1,0$  bedeuten, dass die in den Versuchen auftretenden Rissbreiten auf der sicheren Seite liegend durch die Rechenwerte überschätzt werden.

Es drängt sich nun zwangsläufig die Frage auf, wie der Faktor  $\gamma_{\text{mod}}$  auszuwerten und hinsichtlich der Aussage zur Vorhersagegenauigkeit insgesamt einzuordnen ist (auch im Hinblick auf das ggf. noch festzustellende Erfordernis eines modifizierten Bemessungsvorschlags). Zur tiefergehenden Bewertung der Güte eines Bemessungsmodells bedarf es bezüglich des Faktors  $\gamma_{\text{mod}}$  somit einer Formulierung definierter Anforderungskriterien, die für eine sichere, wirtschaftliche und „ausreichend genaue“ Vorhersage der sich am Bauwerk einstellenden Rissbreiten zu erfüllen sind. In DBV 2019 heißt es hierzu: *„In diesem Zusammenhang sind weniger die Charakteristika einer „klassischen Sicherheitsbetrachtung“ zugrunde zu legen, sondern eher eine Beurteilung im Hinblick auf die „Vorhersagegenauigkeit des Modells“.* Vor diesem Hintergrund werden im vorliegenden Fall zunächst die folgenden Parameter im Zusammenhang mit der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  beleuchtet und im Zuge der Gegenüberstellung von Rechen- und Versuchswerten als Vergleichsgrößen herangezogen:

- Mittelwert  $m_x$  der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$ ,
- Variationskoeffizient  $V_x$  der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$ .

Der Idealfall würde dadurch abgebildet werden, dass der Mittelwert  $m_x$  der Modellsicherheit gerade einen Wert 1,0 (bei gleichzeitig möglichst minimalem Variationskoeffizienten  $V_x$ ) annimmt. Dies ist im vorliegenden Fall der Rissbreitenberechnung vor dem Hintergrund der Vielzahl der Einflussfaktoren aber nicht erwartbar.

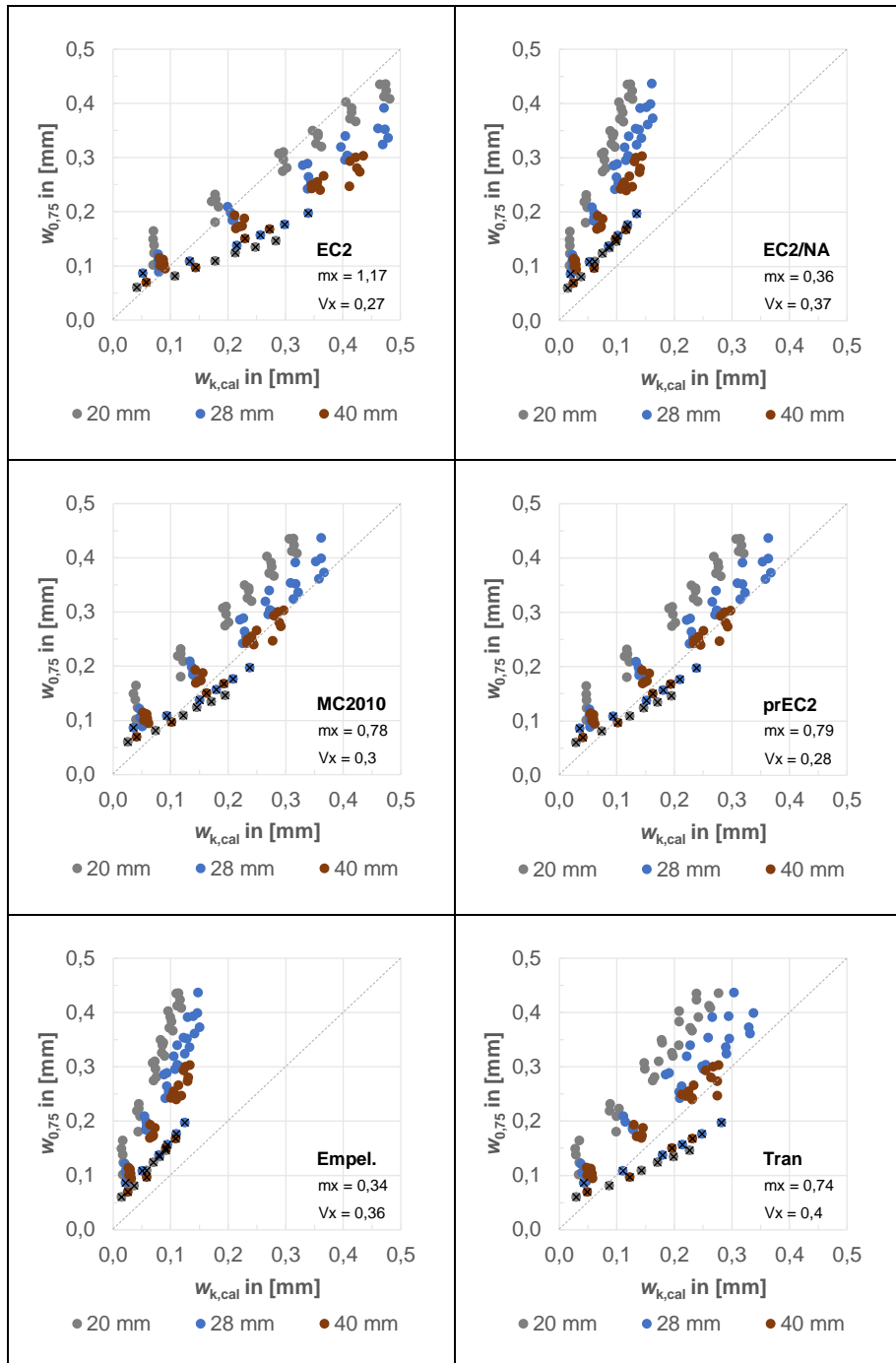
Im Abschnitt 5.5.5 werden die zunächst auf Grundlage der Vergleichsgrößen  $m_x$  und  $V_x$  der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  als zutreffend befundenen Ingenieur- und Bemessungsmodelle hinsichtlich bis dahin noch zusätzlich zu konkretisierenden Anforderungskriterien weiter ausgewertet.

Die nachfolgend dargestellten Diagramme sind betitelt und mit einer Legende versehen, sodass eine Zuordnung zu den jeweiligen Bemessungs- und Ingenieurmodellen selbsterklärend ist. Zur besseren Lesbarkeit sind die Datenpunkte im Hinblick auf die unterschiedlichen Stabdurchmesser farbig markiert. Ergebnisse im Zusammenhang mit einer etwaig vorhandenen Oberflächenbewehrung sind zusätzlich gekennzeichnet (Kreuz).

Für jedes der betrachteten Bemessungs- oder Ingenieurmodelle werden der Mittelwert  $m_x$  und der Variationskoeffizient  $V_x$  der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  angegeben, und zwar jeweils unter Berücksichtigung des gesamten Datensatzes. Eingehende Betrachtungen u. a. mit fallweiser Unterscheidung nach Stabdurchmessern und Bauteilkonzeption folgen in Tabellenform am Ende eines entsprechenden Teilabschnitts.

Die nachfolgend dargestellten Diagramme der Nachrechnung beinhalten die charakteristische Rissbreite  $w_{0,75}$ . Im vorliegenden Text wird in Einzelfällen auch auf die mittlere Rissbreite  $w_m$  als Bezugsgröße zur Bestimmung der Vorhersagegenauigkeit verwiesen.

5.5.2 Rechenwerte  $w_{k,cal}$  ohne Modifikation



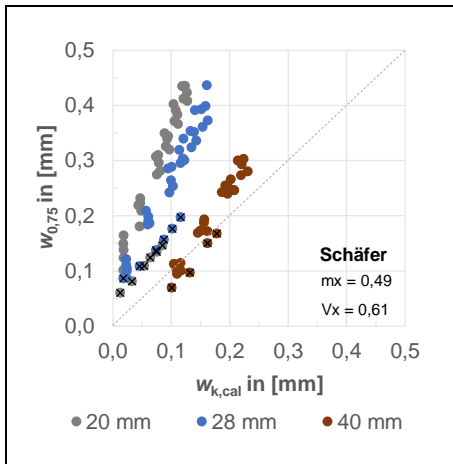


Abb. 5-2: Modellvergleich, Rechenwerte  $w_{k,cal}$  ohne Modifikation

Bezugnehmend auf die voranstehenden Diagramme ist Folgendes festzustellen:

- DIN EN 1992-1-1:
  - Die Bemessungsgleichungen nach DIN EN 1992-1-1 liefern für alle betrachteten Stabdurchmesser überwiegend konservative Rechenwerte und überschätzen die in den experimentellen Untersuchungen erzielten Rissbreiten  $w_m$  und  $w_{0,75}$  unabhängig von einer etwaig vorhandenen Oberflächenbewehrung. Lediglich für sehr kleine Spannungsniveaus (ca. 80 bis 100 N/mm<sup>2</sup>) werden die Versuchsergebnisse in der Tendenz unterschätzt (unsichere Seite).
  - Für  $\phi 20$  mm (ohne Oberflächenbewehrung) kann entgegen voranstehender Gesamteinschätzung eine gute Übereinstimmung zwischen den Rechenwerten und den Versuchswerten befunden werden. Der Mittelwert  $m_x$  der Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  beträgt 0,94 (mit  $V_x = 0,23$ , unter Zugrundelegung der charakteristischen Versuchswerte  $w_{0,75}$ ).
  - Insgesamt ist aber festzustellen, dass sich nach DIN EN 1992-1-1 unwirtschaftliche, z. T. sehr weit auf der sicheren Seite liegende Bemessungsergebnisse ergeben.
- DIN EN 1992-1-1/NA:
  - Das Bemessungsmodell gemäß DIN EN 1992-1-1/NA erlaubt vor dem Hintergrund, dass die Rechenwerte der Rissbreite  $w_{k,cal}$  die Versuchsergebnisse  $w_m$  und  $w_{0,75}$  unabhängig vom betrachteten Stabdurchmesser z. T. deutlich unterschreiten, keine zuverlässige Berechnung der Rissbreiten bei fehlender Oberflächenbewehrung auf der Bauteiloberseite. Die Divergenz zwischen Rechenwert und Versuchswert nimmt für größer werdende Stahlspannungsniveaus tendenziell zu.
  - Auch für eine etwaig vorhandene Oberflächenbewehrung stellt es sich so dar, dass die Rechenwerte der Rissbreite  $w_{k,cal}$  die Versuchsergebnisse

## 5 Nachrechnung der Versuchsergebnisse mit Ingenieur- und Bemessungsmodellen

$w_m$  und  $w_{0,75}$  unterschätzen. Jedoch stellt sich für Serie 4 (unabhängig vom Stabdurchmesser) erwartungsgemäß eine größere Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  ein ( $m_x = 0,56$  und  $V_x = 0,28$ , statt  $m_x = 0,33$  und  $V_x = 0,29$  ohne Oberflächenbewehrung, jeweils bei Betrachtung von  $w_{0,75}$ ).

- Für die im Bereich der vertikalen Bauteilflächen vorgefundenen Rissbreiten kann dagegen festgestellt werden, dass diese in den nach DIN EN 1992-1-1/NA zu erwartenden Größenordnungen auftreten. Die diesbezüglich zugehörige Gegenüberstellung von Versuchs- und Rechenwerten ist in Abschnitt 5.5.2.1 dargestellt
- MC 2010:
  - Die Rechenwerte nach MC 2010, welche definitionsgemäß Oberflächenrissbreiten beschreiben, bestätigen die Versuchswerte  $w_m$  für  $\phi 40$  mm (ohne Oberflächenbewehrung) in guter Näherung ( $m_x = 0,84$ ,  $V_x = 0,23$ ). Für  $\phi 28$  mm und  $\phi 20$  mm ist in diesem Zusammenhang eine größere Divergenz zwischen Rechenwert und Versuchswert festzustellen.
  - Für Bauteile mit Oberflächenbewehrung stellt sich für alle betrachteten Stabdurchmesser eine sehr gute Übereinstimmung der Rechenwerte mit den Versuchswerten auf Mittelwertniveau ein. Hier beträgt der Mittelwert  $m_x$  der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  1,00 ( $V_x = 0,29$ ).
- prEN1992-1-1:
  - Das Bemessungsmodell nach prEN1992-1-1 (Rechenwerte stellen Oberflächenrissbreiten dar) zeigt bei Verwendung großer Stabdurchmesser ( $\phi 40$  mm, ohne Oberflächenbewehrung) eine gute Übereinstimmung mit den Versuchswerten  $w_{0,75}$  ( $m_x = 0,85$ ,  $V_x = 0,23$ ). Für kleinere Stabdurchmesser ( $\phi 20$  mm und  $\phi 28$  mm) liegen die Ergebnisse z. T. auf der unsicheren Seite. Bei Betrachtung mittlerer Rissbreiten  $w_m$  beträgt der Mittelwert der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  unter Zugrundelegung aller Daten 1,01 ( $V_x = 0,29$ ). Die Vorhersagegenauigkeiten für prEN1992-1-1 und MC 2010 sind annähernd identisch.
  - Für eine etwaig vorhandene Oberflächenbewehrung stimmen die Bemessungsergebnisse für alle betrachteten Stabdurchmesser in sehr guter Näherung mit den Versuchswerten überein ( $m_x = 1,01$ ,  $V_x = 0,28$  bei Betrachtung von  $w_{0,75}$ ).
- Empelmann et al. 2015b:
  - Das Ingenieurmodell nach Empelmann et al. 2015b liefert Ergebnisse (annähernd) identisch zu DIN EN 1992-1-1/NA. Die Rechenwerte stellen jedoch die Rissbreite an der Stahloberfläche dar. Infolge Rissaufweitung ist davon auszugehen, dass die rechnerische Rissbreite an der Oberfläche  $w_{k,\text{cal,surf}}$  größer ist.
- Tran 2018:
  - Für das Ingenieurmodell nach Tran 2018 waren an dieser Stelle zunächst größere Diskrepanzen zwischen der Oberflächenrissbreite und dem

Rechenwert der Rissbreite zu erwarten, da der sich hier ausgewiesene Rechenwert ebenfalls definitionsgemäß an der Stahloberfläche einstellt. Tatsächlich ist jedoch festzustellen, dass die Versuchsergebnisse  $w_m$  für  $\phi 40$  mm bei fehlender Oberflächenbewehrung in sehr guter Näherung nachgerechnet werden können (Modellsicherheit,  $m_x = 1,02$  und  $V_x = 0,26$ ). Auch unter Zugrundelegung von  $w_{0,75}$  kann die Vorhersagegenauigkeit für  $\phi 40$  mm bestätigt werden. Für kleiner werdende Stabdurchmesser nimmt die Vorhersagegenauigkeit ab.

- Für Bauteile mit Oberflächenbewehrung überschätzen die Rechenwerte die sich einstellenden Rissbreiten auf der Bauteiloberseite.
- Schäfer 2016:
  - Das Ingenieurmodell nach Schäfer 2016 ist weitgehend identisch zu DIN EN 1992-1-1/NA, jedoch wird für Bewehrungsstäbe mit  $\phi > \phi_{large}$  (hier:  $\phi 40$  mm) ein additiver Anteil  $\Delta w$  berücksichtigt und es ist weiterhin ein optimierter Ansatz zur Berücksichtigung einer gemischten Bewehrung mit unterschiedlichen Stabdurchmessern, bestehend aus Haupt- und Oberflächenbewehrung, implementiert (dieser wurde vorliegend im Übrigen auch für  $\phi 20$  mm und  $\phi 28$  mm in Ansatz gebracht.)
  - Bei fehlender Oberflächenbewehrung zeigen die Rechenwerte  $w_{k,cal}$  für  $\phi 40$  mm insgesamt eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen  $w_m$  auf Mittelwertniveau. Der Mittelwert  $m_x$  der Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  beträgt in diesem Zusammenhang 1,11 (mit  $V_x = 0,17$ ) und liegt somit auf der sicheren Seite. Unter Zugrundelegung charakteristischer Versuchswerte  $w_{0,75}$  beträgt der Mittelwert der Modellsicherheit 0,87 (mit  $V_x = 0,14$ ), sodass die Vorhersagegenauigkeit insgesamt auf der unsicheren Seite liegt. Die Ergebnisse der Nachrechnung für  $\phi 20$  mm und  $\phi 28$  mm (ohne Oberflächenbewehrung) entsprechen denjenigen nach DIN EN 1992-1-1/NA.
  - Für die Serie 4 stellt es sich für die Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm und  $\phi 28$  mm so dar, dass die in den experimentellen Untersuchungen erzielten Rissbreiten  $w_{0,75}$  und  $w_m$  durch die Rechenergebnisse  $w_{k,cal}$  unterschätzt werden (unsichere Seite, analog zu DIN EN 1992-1-1/NA, jedoch mit größerer Modellsicherheit). Der modifizierte Vergleichsstabdurchmesser für eine Hauptbewehrung  $\phi < \phi_{large}$  verbessert nicht die Vorhersagegenauigkeit gegenüber DIN EN 1992-1-1/NA (für  $\phi < \phi_{large}$  wird ein Ansatz des modifizierten Vergleichsstabdurchmessers in Schäfer 2016 selbst nicht vorgeschlagen). Vielmehr verschlechtert sich die Vorhersagegenauigkeit infolge des betrachteten geringeren Stabdurchmessers  $\phi_{eq}$ . Für  $\phi 40$  mm liegen die Ergebnisse der Nachrechnung bei einer etwaig vorhandenen Oberflächenbewehrung hingegen auf der sicheren Seite und der Mittelwert der Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  beträgt bei Betrachtung von  $w_{0,75}$  1,24.

In Tab. 5-1 wird die Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  zusätzlich wie folgt ausgewertet:

## 5 Nachrechnung der Versuchsergebnisse mit Ingenieur- und Bemessungsmodellen

Tab. 5-1: Auswertung der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  für Bemessungswerte ohne Modifikation

| Kriterium |       | $\phi \geq \phi_{\text{large}}$<br>(ohne $A_{s,\text{surf}}$ ) |            | $\phi < \phi_{\text{large}}$<br>(ohne $A_{s,\text{surf}}$ ) |            | $\phi \geq \phi_{\text{large}}$<br>(mit $A_{s,\text{surf}}$ ) |            | $\phi < \phi_{\text{large}}$<br>(mit $A_{s,\text{surf}}$ ) |            |
|-----------|-------|--|------------|---|------------|---|------------|--|------------|
|           |       | $W_m$  | $W_{0,75}$ | $W_m$   | $W_{0,75}$ | $W_m$   | $W_{0,75}$ | $W_m$  | $W_{0,75}$ |
| EC2       | $m_x$ | 1,59   | 1,24       | 1,37  | 1,07       | 1,67  | 1,37       | 1,78   | 1,47       |
|           | $V_x$ | 0,25   | 0,23       | 0,25  | 0,24       | 0,28  | 0,26       | 0,31   | 0,29       |
| EC2/NA    | $m_x$ | 0,51   | 0,40       | 0,38  | 0,30       | 0,71  | 0,58       | 0,66   | 0,55       |
|           | $V_x$ | 0,25   | 0,23       | 0,28  | 0,27       | 0,28  | 0,26       | 0,30   | 0,29       |
| MC2010    | $m_x$ | 1,08   | 0,84       | 0,90  | 0,70       | 1,18  | 0,97       | 1,23   | 1,01       |
|           | $V_x$ | 0,26   | 0,23       | 0,28  | 0,26       | 0,28  | 0,26       | 0,32   | 0,30       |
| prEC2     | $m_x$ | 1,08   | 0,85       | 0,92  | 0,71       | 1,19  | 0,97       | 1,23   | 1,02       |
|           | $V_x$ | 0,25   | 0,23       | 0,26  | 0,24       | 0,29  | 0,26       | 0,31   | 0,29       |
| Empel.    | $m_x$ | 0,49   | 0,39       | 0,36  | 0,28       | 0,68  | 0,56       | 0,63   | 0,52       |
|           | $V_x$ | 0,21   | 0,19       | 0,28  | 0,27       | 0,25  | 0,22       | 0,28   | 0,26       |
| Tran      | $m_x$ | 1,02   | 0,79       | 0,77  | 0,60       | 1,42  | 1,17       | 1,44   | 1,19       |
|           | $V_x$ | 0,26   | 0,24       | 0,31  | 0,30       | 0,29  | 0,27       | 0,31   | 0,30       |
| Schä.     | $m_x$ | 1,11   | 0,87       | 0,38  | 0,30       | 1,50  | 1,24       | 0,57   | 0,47       |
|           | $V_x$ | 0,11   | 0,14       | 0,28  | 0,27       | 0,13  | 0,16       | 0,30   | 0,29       |

Zur besseren Lesbarkeit ist der Mittelwert  $m_x$  der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  in obiger Tabelle unter Berücksichtigung der jeweiligen Vorhersagegenauigkeit wie folgt farblich hervorgehoben:

- grün:  $0,90 \leq m_x \leq 1,10$ , d. h.  $\pm 10$  % Abweichung vom „Idealfall“  $m_x = 1,00$ ,
- orange:  $0,70 \leq m_x \leq 1,30$ , d. h.  $\pm 30$  % Abweichung vom „Idealfall“  $m_x = 1,00$ ,
- rot:  $m_x < 0,70$  oder  $m_x > 1,30$ , d. h.  $> \pm 30$  % Abweichung vom „Idealfall“  $m_x = 1,00$ .

Unter Zugrundelegung der in obiger Tabelle genannten Unterscheidungskriterien sowie und Berücksichtigung der farblichen Hervorhebungen (als Übereinstimmungskriterium) ist dem Bemessungsmodell nach prEN1992-1-1 die beste (mittlere) Vorhersagegenauigkeit (Zahlenwerte fettgedruckt) zuzumessen.

**5.5.2.1 Exkurs zum „Bauteilinneren“**

Ergänzend werden nachfolgend die im Bereich der vertikalen Bauteilflächen („Bauteilinneres“) auftretenden Rissbreiten (nur Serie 1 und Serie 2) den Ergebnissen der Nachrechnung nach DIN EN 1992-1-1/NA gegenübergestellt.

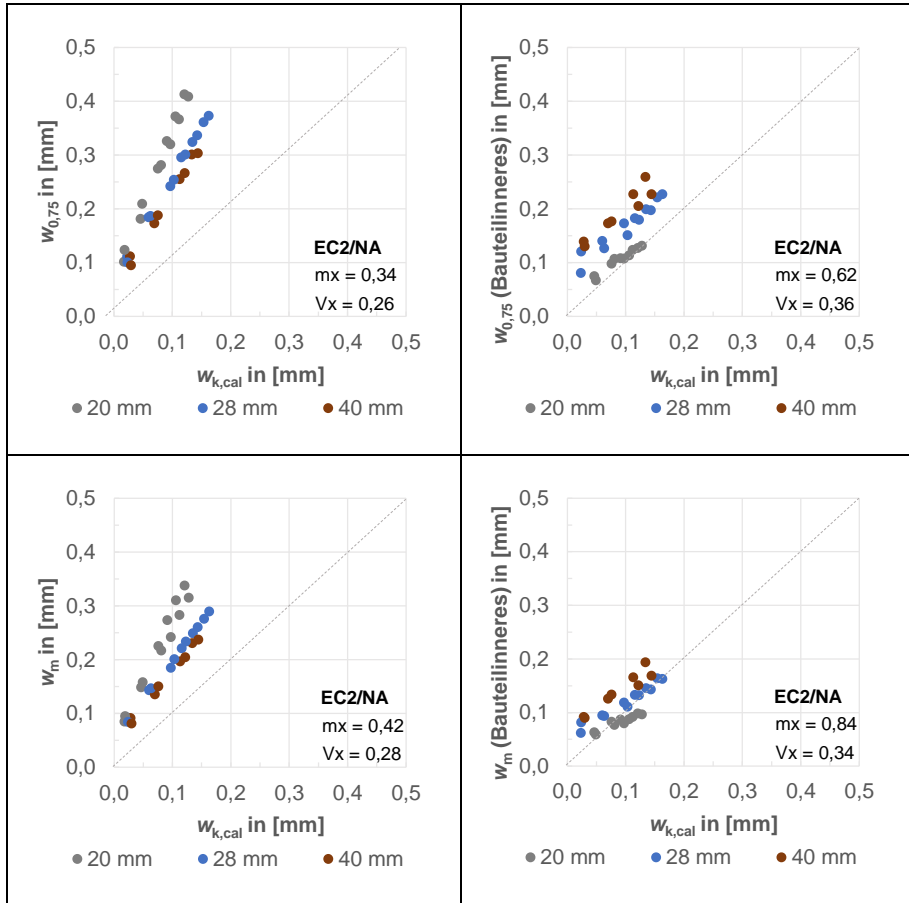


Abb. 5-3: Modellvergleich für Bauteilober- und -seitenfläche, Rechenwerte  $w_{k,cal}$  ohne Modifikation

Für die im Bereich des Bauteilinneren aufgenommenen Rissbreiten kann befunden werden, dass diese (insbesondere auf Mittelwertniveau) näherungsweise in den nach DIN EN 1992-1-1/NA zu erwartenden Größenordnungen auftreten. In diesem Zusammenhang ergibt sich für  $\phi 20$  mm tendenziell die größte Übereinstimmung.

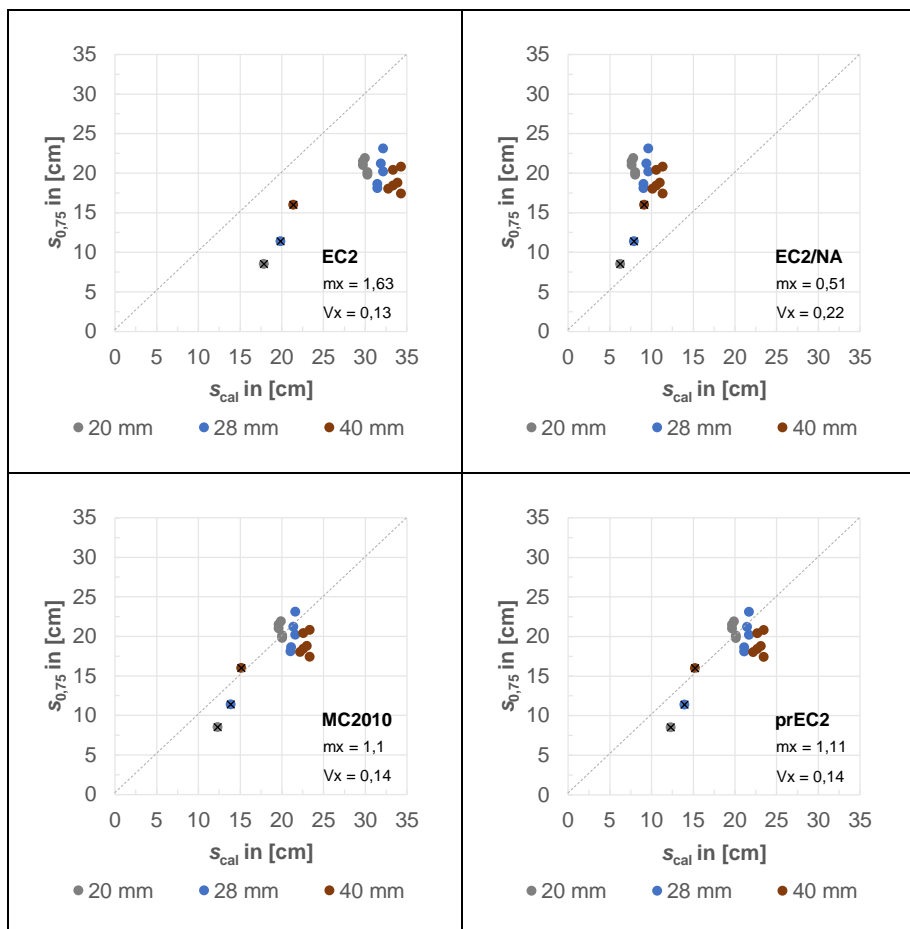
## 5 Nachrechnung der Versuchsergebnisse mit Ingenieur- und Bemessungsmodellen

Es ist an dieser Stelle jedoch unbedingt anzumerken, dass für die auf den vertikalen Bauteilflächen ausgewerteten Rissbreiten ein deutlich geringerer Stichprobenumfang, bei gleichzeitig größerer Streubreite vorliegt (als für diejenigen auf der Bauteiloberfläche ausgewerteten Rissbreiten), da die Rissbreiten dort lediglich exemplarisch aufgenommen wurden (vgl. Abschnitt 3.6.4.3). Vor diesem Hintergrund ergeben sich in der statistischen Auswertung somit dennoch Ergebnisse  $w_{0,75}$ , die größer als die gemäß DIN EN 1992-1-1/NA zu erwartenden Rissbreiten sind, sodass Ergebnisse auf der unsicheren Seite resultieren. Für die mittlere Rissbreite  $w_m$  kann hingegen insgesamt eine gute Übereinstimmung mit den Rechenwerten angetroffen werden.

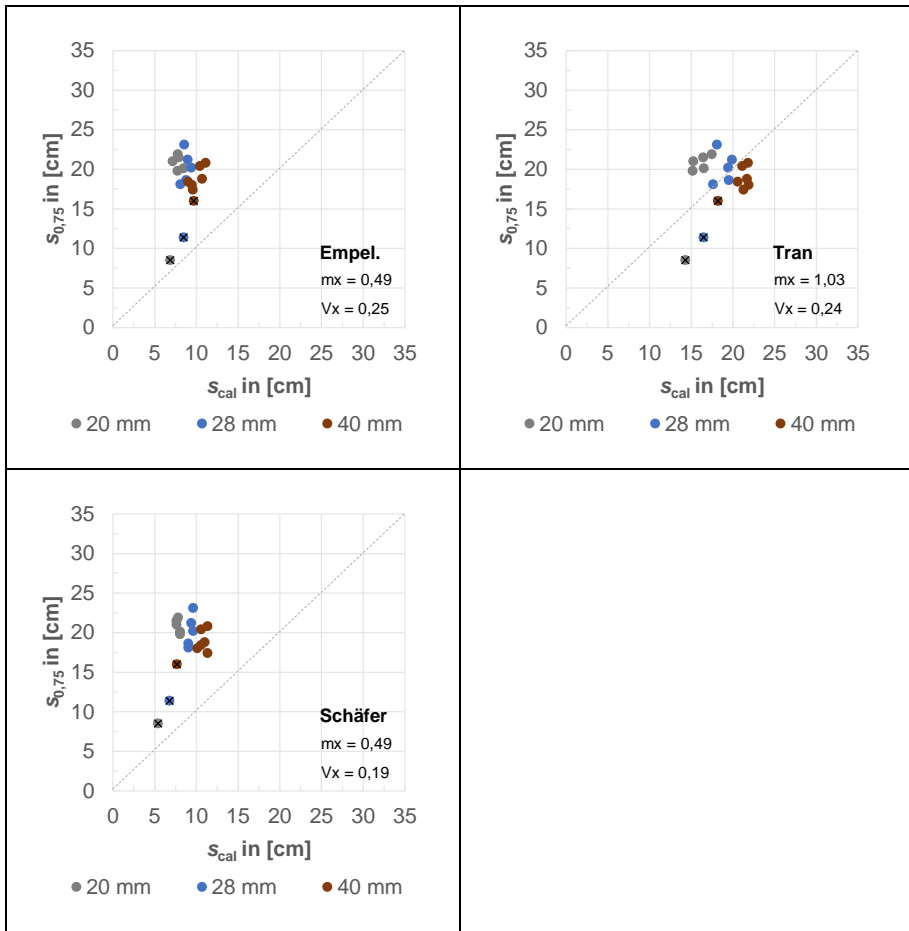
Vorliegender Exkurs zum Rissgeschehen im „Bauteilinneren“ ist vor dem Hintergrund des zugehörig geringen Datensatzes nicht uneingeschränkt belastbar und hat deshalb orientierenden Charakter. Eine Tendenz ist jedoch hier bereits klar erkennbar.

### 5.5.2.2 Exkurs zum rechnerischen Rissabstand

Die Bemessungsmodelle von DIN EN 1992-1-1, DIN EN 1992-1-1/NA, MC 2010 und prEN1992-1-1 unterscheiden sich untereinander wesentlich in der Berechnung des Rissabstandes und der damit einhergehenden Berücksichtigung der Betondeckung.





Abb. 5-4: Modellvergleich, Rechenwerte  $s_{k,cal}$ 

Der Rissabstand ist als „Steuerungsterm“ aufzufassen. Es werden voranstehend die auf der Bauteiloberseite angetroffenen Rissabstände  $s_{0,75}$  mit den jeweiligen Ergebnissen der Nachrechnung  $s_{cal}$  gegenübergestellt.

Bezugnehmend auf die voranstehenden Diagramme kann zunächst festgestellt werden, dass sich die für die rechnerische Rissbreite bereits erkannten Tendenzen auch bei Betrachtung des Rissabstandes vergleichsweise einstellen.

Die Bemessungsgleichungen nach DIN EN 1992-1-1 überschätzen den Rissabstand  $s_{0,75}$  für alle betrachteten Stabdurchmesser deutlich. Dies kann vorliegend ganz offensichtlich auf die nicht realitätsnahe Berücksichtigung der Verbundstörung als ein Vielfaches der Betondeckung (vgl. Abb. 2-10), welche vorliegend 60 mm für die Hauptbewehrung beträgt, im Zuge der Ermittlung des Rissabstandes zurückgeführt werden.

Das Bemessungsmodell gemäß DIN EN 1992-1-1/NA erlaubt keine zuverlässige Berechnung des Rissabstandes. Im Gegensatz zu DIN EN 1992-1-1 wird die Betonüberdeckung der Hauptbewehrung nicht in Ansatz gebracht. Die auf der Bauteiloberseite anzutreffenden Rissabstände werden durch die Rechenwerte unterschätzt.

## 5 Nachrechnung der Versuchsergebnisse mit Ingenieur- und Bemessungsmodellen

Gute Übereinstimmungen der Rechenwerte  $s_{cal}$  mit den Versuchswerten  $s_{0,75}$  sind für MC 2010, prEN1992-1-1 und Tran 2018 festzustellen. Hierbei zeigen die Rechenwerte gemäß prEN1992-1-1 und MC 2010 insgesamt die beste Vorhersagegenauigkeit (Mittelwert  $m_x$  der Modellsicherheit 1,14,  $V_x = 0,14$ ).

Die Ingenieurmodelle gemäß Empelmann et al. 2015b und Schäfer 2016 liefern annähernd identische Ergebnisse zu DIN EN 1992-1-1/NA.

### 5.5.2.3 Exkurs zur Querschnittskonzeption

Dieser Exkurs dient der Überprüfung, in wie weit die im Abschnitt 5.5.2 ermittelten rechnerischen Vorhersagegenauigkeiten für ausgewählte Bemessungs- und Ingenieurmodelle durch die hier betrachtete Bauteilkonzeption (mehrlagige Bewehrungsanordnung, fallweise Verwendung großer Stabdurchmesser) beeinflusst werden.

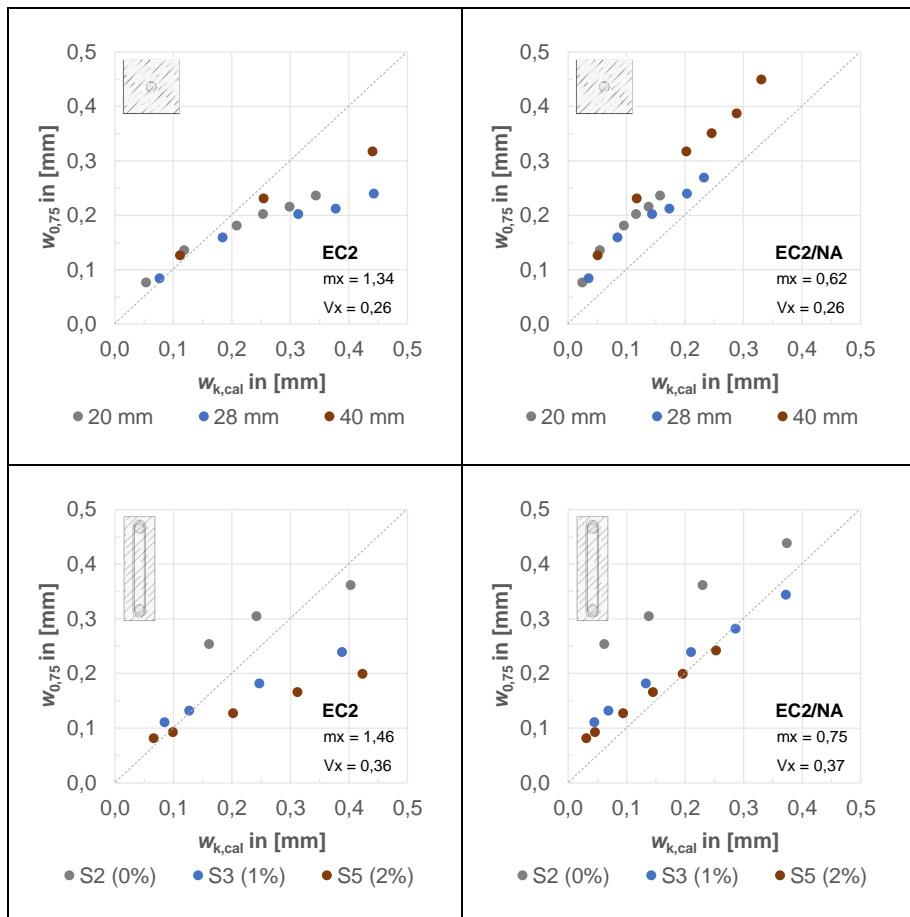


Abb. 5-5: Modellvergleich für unterschiedliche Querschnittskonzeptionen, Rechenwerte  $w_{k,cal}$

Voranstehend sind die Einzelwerte der Rissbreitenuntersuchung nach Schäfer 2016 (ausgewertet als 75 %-Fraktile  $w_{0,75}$ , Konzeption gem. Abschnitt 2.3.2.6) den

Ergebnissen einer Nachrechnung gemäß DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA exemplarisch gegenübergestellt.

Es werden hierzu die im Abschnitt 2.3.2.6 bereits zusammenfassend beschriebenen „stabförmigen“ Versuchskörper mit einem zentrisch eingelegten Bewehrungsstab ( $\phi 20$  mm,  $\phi 28$  mm,  $\phi 40$  mm) und „flächenartige“ Bauteile, welche jeweils mit zwei Bewehrungsstäben  $\phi 40$  mm und fallweise mit einer Oberflächenbewehrung (zwischen 1 % und 2 % von  $A_{ct,ext}$ ) ausgestattet sind, betrachtet.

Die Versuchsergebnisse  $w_{0,75}$  wurden ohne Änderung aus Schäfer 2016 übernommen und werden in diesem Zusammenhang als zutreffend angenommen. Die Nachrechnung der Versuchsergebnisse wurde unter Berücksichtigung der in Abschnitt 5.3 definierten Festlegungen durchgeführt, um diesbezüglich identische Randbedingungen zu schaffen. Die Diagramme sind betitelt und mit einer Legende versehen, sodass eine Zuordnung zu dem jeweils betrachteten Bemessungsmodell und der Querschnittskonzeption selbsterklärend ist.

Bezugnehmend auf voranstehende Diagramme kann wie folgt befunden werden:

- DIN EN 1992-1-1:
  - Die Bemessungsgleichungen nach DIN EN 1992-1-1 liefern für die im Zusammenhang mit den stabförmigen Versuchskörpern betrachteten Stabdurchmesser weitgehend konservative Rechenwerte. Lediglich für sehr kleine Stahlspannungsniveaus (ca. 80 bis 160 N/mm<sup>2</sup>) kann augenscheinlich eine näherungsweise gute Übereinstimmung von Rechen- und Versuchswert festgestellt werden, wenn auch die Rechenwerte die Versuchswerte tendenziell unterschätzen. Insgesamt beträgt der Mittelwert der Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  bei Betrachtung aller untersuchten Stabdurchmesser für  $w_{0,75}$  1,34 (bei einem Variationskoeffizienten von 0,26).
  - Für die flächenartigen Versuchskörper stellt es sich so dar, dass sich bei einer etwaig vorhandenen Oberflächenbewehrung (S3 mit  $A_{s,surf} = 0,01 A_{ct,ext}$  und S5 mit  $A_{s,surf} = 0,02 A_{ct,ext}$ ) weit auf der sicheren Seite liegende, unwirtschaftliche Bemessungsergebnisse ergeben. Jedoch ist auch hier für sehr kleine Stahlspannungsniveaus festzustellen, dass die Versuchswerte tendenziell unterschätzt werden. Der Mittelwert der Modellsicherheit bei Betrachtung von  $w_{0,75}$  beträgt für S3 1,43 (bei einem Variationskoeffizienten von 0,35) und für S5 1,63 (bei einem Variationskoeffizienten von 0,36). Bei fehlender Oberflächenbewehrung (S2) werden die Versuchswerte  $w_{0,75}$  zunächst auf der unsicheren Seite liegend unterschätzt. Erst ab einem Stahlspannungsniveau in Höhe von ca. 200 N/mm<sup>2</sup> ist eine „Trendwende“ erkennbar und es ergeben sich wieder konservative Rechenwerte. Im Zusammenhang mit den Feststellungen zu S2 (flächenartige Bauteile, ohne Oberflächenbewehrung) ist anzumerken, dass die Datenbank in Schäfer 2016 diesbezüglich verhältnismäßig große Rissbreiten ausweist. Für eine Stahlspannung in Höhe von 80 N/mm<sup>2</sup> wird bereits eine mittlere Rissbreite von 0,176 mm angegeben.

## 5 Nachrechnung der Versuchsergebnisse mit Ingenieur- und Bemessungsmodellen

- DIN EN 1992-1-1/NA:
  - Die Bemessungswerte nach DIN EN 1992-1-1/NA unterschreiten die Rissbreitenergebnisse  $w_{0,75}$  für die stabförmigen Versuchskörper unabhängig vom betrachteten Stabdurchmesser deutlich. Der Mittelwert der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  beträgt nur 0,62 (bei einem Variationskoeffizienten von 0,26). Für  $\phi 40$  mm ist insgesamt eine größere Divergenz zwischen Versuchs- und Rechenwert zu erkennen als für die „konventionellen“ Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm und  $\phi 28$  mm.
  - Für Bauteile mit Oberflächenbewehrung (S3 und S5) kann augenscheinlich eine gute Übereinstimmung zwischen Versuchs- und Rechenwert festgestellt werden. Bei Betrachtung der Rissbreitenergebnisse auf Mittelwertniveau  $w_m$  (in voranstehender Abbildung nicht dargestellt) beträgt der Mittelwert der Modellsicherheit für S3 1,01 (bei einem Variationskoeffizient von 0,34) und für S5 0,98 (bei einem Variationskoeffizient von 0,36). Für  $w_{0,75}$  ergibt sich der Mittelwert der Modellsicherheit für S3 zu jeweils 0,77, (bei  $V_x = 0,35$ ) und für S5 zu 0,75 (bei  $V_x = 0,35$ ). Bei fehlender Oberflächenberechnung (S2) ist keine zuverlässige Berechnung der Rissbreiten auf der Bauteiloberseite möglich.

Zur besseren Übersicht und zur Überprüfung des Einflusses der Querschnittskonzeption wird die Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  zusätzlich in Tab. 5-2 ausgewertet.

Tab. 5-2: Auswertung der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  im Hinblick auf die Querschnittskonzeption

| Kriterium                     |       | $\phi \geq \phi_{\text{large}}$<br>(ohne $A_{s,\text{surf}}$ ) |            | $\phi < \phi_{\text{large}}$<br>(ohne $A_{s,\text{surf}}$ ) |            | $\phi \geq \phi_{\text{large}}$<br>(mit $A_{s,\text{surf}}$ ) |            |
|-------------------------------|-------|--|------------|---|------------|---|------------|
|                               |       | $w_m$  | $w_{0,75}$ | $w_m$   | $w_{0,75}$ | $w_m$   | $w_{0,75}$ |
| EC2<br>„stab-<br>förmig“      | $m_x$ | 1,86   | 1,35       | 1,85  | 1,33       | ./.   | ./.        |
|                               | $V_x$ | 0,18   | 0,22       | 0,29  | 0,29       | ./.   | ./.        |
| EC2/NA<br>„stab-<br>förmig“   | $m_x$ | 0,85   | 0,62       | 0,85  | 0,61       | ./.   | ./.        |
|                               | $V_x$ | 0,18   | 0,22       | 0,29  | 0,29       | ./.   | ./.        |
| EC2<br>„flächen-<br>artig“    | $m_x$ | 1,81   | 1,31       | ./.   | ./.        | 2,00  | 1,53       |
|                               | $V_x$ | 0,39   | 0,42       | ./.   | ./.        | 0,34  | 0,34       |
| EC2/NA<br>„flächen-<br>artig“ | $m_x$ | 1,01   | 0,73       | ./.   | ./.        | 1,00  | 0,76       |
|                               | $V_x$ | 0,45   | 0,47       | ./.   | ./.        | 0,33  | 0,34       |

Fortsetzung der Tab. 5-2

|                            |       |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|
| EC2<br>„mehr-<br>lagig“    | $m_x$ | 1,59 | 1,24 | 1,37 | 1,07 | 1,67 | 1,37 |
|                            | $V_x$ | 0,25 | 0,23 | 0,25 | 0,24 | 0,28 | 0,26 |
| EC2/NA<br>„mehr-<br>lagig“ | $m_x$ | 0,51 | 0,40 | 0,38 | 0,30 | 0,71 | 0,58 |
|                            | $V_x$ | 0,25 | 0,23 | 0,28 | 0,27 | 0,28 | 0,26 |

Anhand der voranstehenden Tabelle kann zunächst festgestellt werden, dass die (mittlere) Vorhersagegenauigkeit  $\gamma_{\text{mod}}$  der zugrunde gelegten Bemessungsmodelle nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA für „mehrlagige Querschnittskonzeptionen“ im Vergleich zu den in Schäfer 2016 untersuchten Querschnittskonzeptionen („stabförmig“ und „flächenartig“) insgesamt tendenziell abnimmt.

Für  $\phi 40$  mm stellt es sich so dar – hier ist eine direkte Gegenüberstellung der Untersuchungsergebnisse für „stabförmige“, „flächenartige“ (gem. Schäfer 2016) und „mehrlagige“ (gem. vorliegender Arbeit) Querschnittskonzeptionen vor dem Hintergrund identischer Betondeckungen der Hauptbewehrung möglich – dass aber insgesamt vergleichbare Größenordnungen der Vorhersagegenauigkeit auftreten und dass nach DIN EN 1992-1-1/NA bei fehlender Oberflächenbewehrung keine zuverlässige Berechnung der Rissbreiten möglich ist.

#### 5.5.2.4 Exkurs zum Einfluss der statistischen Auswertung

Im vorliegenden Abschnitt wird der Einfluss des gewählten Fraktilwerts der Rissbreite auf die Vorhersagegenauigkeit des Bemessungsmodells am Beispiel von DIN EN 1992-1-1 näher beleuchtet und es werden, wie in Abschnitt 3.8.2.2 bereits angekündigt, nachfolgend die Rechenwerte  $w_{k,\text{cal}}$  zusätzlich auch mit Versuchswerten  $w_{0,95}$  der Rissbreite verglichen.

Die Wahl des 95 %-Fraktils ist vor dem Hintergrund des zugrundeliegenden empirischen Modells von DIN EN 1992-1-1 angezeigt, wonach die rechnerisch resultierenden Rissbreiten hier insgesamt als „kritische“ Rissbreiten aufzufassen sind (s. Abschnitt 2.7.5).

Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit der sich nun ergebenden rechnerischen Vorhersagegenauigkeiten im Hinblick auf unterschiedliche Fraktilwerte der Versuchsergebnisse wird – neben der Darstellung von  $w_{0,95}$  (rechte Spalte) – auch nochmals das aus Abschnitt 5.5.2 bereits bekannte Diagramm mit  $w_{0,75}$  (linke Spalte) abgedruckt.

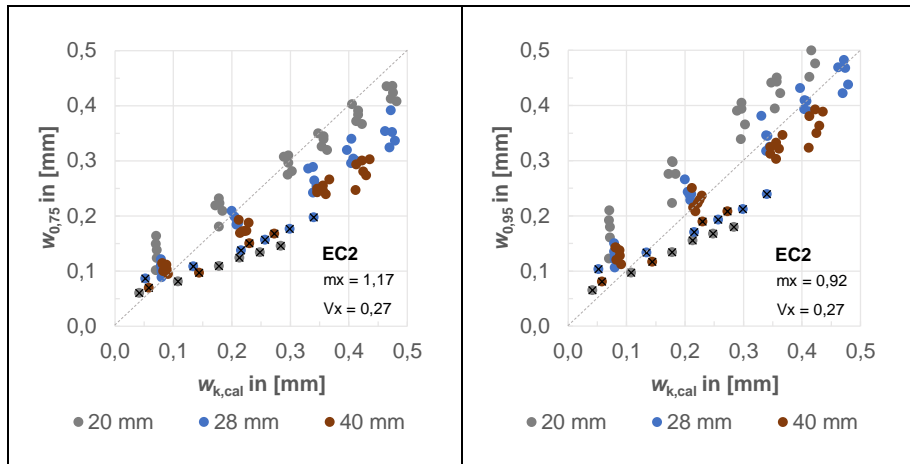


Abb. 5-6: Modellvergleich, Rechenwerte  $w_{k,cal}$  und Versuchswerte  $w_{0,75}$  bzw.  $w_{0,95}$

Erwartungsgemäß zeigt sich, dass die Datenpunkte bei Betrachtung von  $w_{0,95}$  (statt  $w_{0,75}$ ) insgesamt näher an der Winkelhalbierenden liegen. Tendenziell stellt sich eine „bessere“ (d. h. wirtschaftlichere) Vorhersagegenauigkeit als bei Zugrundelegung von  $w_{0,75}$  (vgl. Mittelwert  $m_x$  und Variationskoeffizient  $V_x$  der Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$ ) ein. Für den Stabdurchmesser 20 mm werden die Versuchsergebnisse leicht auf der unsicheren Seite liegend durch die Rechenwerte  $w_k$  nach DIN EN 1992-1-1 unterschätzt. Für kleine Stahlspannungsniveaus ( $\sigma_s \leq 80 \text{ N/mm}^2$ ) werden die Versuchswerte  $w_{0,95}$  durch die Rechenwerte  $w_{k,cal}$  für alle untersuchten Stabdurchmesser unterschätzt. Für  $\phi 40 \text{ mm}$  kann insgesamt eine hinreichend gute Vorhersagegenauigkeit befunden werden. Für eine etwaig vorhandene Oberflächenbewehrung liegen die Ergebnisse der Nachrechnung weiterhin (weit) auf der sicheren Seite.

Insgesamt kann somit festgestellt werden, dass sich bei Zugrundelegung von  $w_{0,95}$  (statt  $w_{0,75}$ ) eine bessere Übereinstimmung der Versuchsergebnisse mit den Bemessungsergebnisse für DIN EN 1992-1-1 einstellt. Diese, in Anlehnung an Abschnitt 3.8.2.2 vorgenommene Nebenbetrachtung verdeutlicht somit eingehend, dass die Vorhersagegenauigkeit eines Rechenmodells wesentlich von den Festlegungen der statistischen Auswertung abhängt und der eingangs in Abschnitt 2.7.5 aufgeworfenen Frage im Hinblick auf geeignete Fraktilwerte im Zuge der Versuchsauswertung ein besonderes Augenmerk zuzumessen ist.

Neben der Größe des Fraktilwerts ist in diesem Zusammenhang auch das Auswerteverfahren selbst (z. B. Verfahren in Anlehnung an DIN ISO 16269-6 oder DBV 2016), wodurch fallweise voneinander abweichende Fraktilwerte der Untersuchungsgrößen generiert werden, als Einflussfaktor auf die Güten der rechnerischen Vorhersagegenauigkeit auszumachen. Dagegen kann der Einfluss der jeweils unterstellten Verteilung des Datensatzes – anders als beispielsweise in Schäper 2010 für die Auswertung der In-situ-Betondruckfestigkeit beschrieben – vorliegend für die Betrachtung der Rissbreite und des Rissabstandes vernachlässigt werden (vgl. Abschnitt 3.8.5).

Für die unter Zugrundelegung unterschiedlicher Ansätze hergeleiteten Fraktilwerte der Rissbreite können sich im Rahmen einer Gegenüberstellung mit Rechenwerten folglich

gänzlich unterschiedliche Modellsicherheiten einstellen (s. hierzu auch Abschnitt 5.5.2.5).

Es ist daher zwingend notwendig und erforderlich, dass es für die Validierung von Bemessungsmodellen vorab allgemeingültiger Festlegungen zur statistischen Auswertung bedarf. Abweichend hiervon werden Aussagen zur Vorhersagegenauigkeit unter Umständen divergierend gewertet.

**5.5.2.5 Exkurs zu anderen Literaturdatenbanken**

In der einschlägigen Literatur sind zahlreiche Gegenüberstellungen von Rechen- und Versuchswerten der Rissbreite dokumentiert. In DBV 2019 werden beispielsweise Modellvergleiche zur Vorhersagegenauigkeit  $\gamma_{mod}$  der Bemessungs- und Ingenieurmodelle nach DIN EN 1992-1-1, DIN EN 1992-1-1/NA und MC 2010 vorgestellt. Die Ergebnisse der Rissbreitenuntersuchungen (aus unterschiedlichen, teils historischen Datenbanken zusammengetragen; diese Rissbreiten stellen jeweils Oberflächenrissbreiten dar) werden dort als Mittelwerte  $w_m$  und als charakteristische Werte  $w_{0,95}$  (95 %-Fraktil) angegeben.

Tab. 5-3: Auswertung der Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  gemäß DBV 2019 und Gegenüberstellung mit eigenen Untersuchungsergebnissen

| Datenbasis   |       | DBV 2019 |            | s. Abs. 5.5.2 <sup>1)</sup> |            |
|--|-------|----------|------------|-----------------------------|------------|
|  |       | $w_m$    | $w_{0,95}$ | $w_m$                       | $w_{0,75}$ |
| EC2  | $m_x$ | 2,50     | 1,69       | 1,48                        | 1,17       |
|  | $V_x$ | 0,40     | 0,29       | 0,28                        | 0,27       |
| EC2/NA   | $m_x$ | 1,34     | 0,89       | 0,46                        | 0,36       |
|  | $V_x$ | 0,50     | 0,38       | 0,37                        | 0,37       |
| MC2010   | $m_x$ | 1,74     | 1,19       | 0,77                        | 0,60       |
|  | $V_x$ | 0,43     | 0,31       | 0,29                        | 0,28       |
| <sup>1)</sup> Berücksichtigung des gesamten, vorliegenden Datensatzes, für detaillierte Betrachtung s. Tab. 5-1. |       |          |            |                             |            |

Die Ergebnisse zur Auswertung der Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  gemäß DBV 2019 können wie folgt zusammengefasst werden. In Anlehnung an Abschnitt 5.5.2 sind jeweils der Mittelwert  $m_x$  und der Variationskoeffizient  $V_x$  der Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  angegeben. In DBV 2019 selbst werden der Medianwert, die Standardabweichung und der Variationskoeffizient der Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  ausgewiesen. Der in nachfolgender Tab. 5-3 angegebene Mittelwert  $m_x$  der Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  wurde vor diesem Hintergrund aus

## 5 Nachrechnung der Versuchsergebnisse mit Ingenieur- und Bemessungsmodellen

der Standardabweichung und dem Variationskoeffizienten in Anlehnung an Gl. 3-5 zurückgerechnet.

Eine direkte Gegenüberstellung der in DBV 2019 ausgewerteten Vorhersagegenauigkeiten mit den eigenen Feststellungen zur Modellsicherheit, wie in voranstehender Tab. 5-3 angedeutet, kann nur orientierend erfolgen.

Grundsätzlich unterscheiden sich vorliegend das jeweils zugrunde gelegte statistische Auswerteverfahren (Attributverfahren vs. „klassisches statistisches Verfahren“, s. Abschnitt 3.8.2.3), der Fraktilwert (75 %-Fraktile vs. 95 %-Fraktile) und es liegen darüber hinaus keine weitergehenden Angaben zu den jeweils betrachteten Querschnittskonzeptionen (z. B. Stabdurchmesser, Bewehrungskonzeption, Querschnittskonzeption) in DBV 2019 vor.

Betrachtet man die in DBV 2019 ausgewerteten Modellsicherheiten  $\gamma_{\text{mod}}$ , so kann insgesamt für alle untersuchten Bemessungsmodelle (DIN EN 1992-1-1, DIN EN 1992-1-1/NA und MC 2010) eine wesentlich bessere rechnerische Vorhersagegenauigkeit festgestellt werden (sowohl unter Einbeziehung mittlerer Rissbreiten  $w_m$ , als auch für charakteristische Rissbreiten  $w_{0,95}$ ), als dies anhand der eigenen Datenbank und auch anhand derjenigen aus Schäfer 2016 voranstehend zu erwarten wäre (s. Abschnitte 5.5.2, 5.5.2.1 und 5.5.2.3).

Die Auswertung der Rissbreite mit einem höheren Fraktilwert (vorliegend für DBV 2019 als 95 %-Fraktile) lässt im Allgemeinen zunächst vermuten, dass sich infolge kleinerer (zulässiger) Überschreitungsmengen auch kleinere Modellsicherheiten ergeben (s. auch voranstehende Nebenbetrachtung zum 95 %-Fraktile, Abschnitt 5.5.2.4). Tatsächlich ergeben sich vorliegend gemäß DBV 2019 jedoch optimistischere Modellsicherheiten, d. h. es stellen sich betragsmäßig größere, auf der sicheren Seite liegende Mittelwerte  $m_x$  der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  ein. Diese Feststellung wirft insbesondere für die Einschätzung der rechnerischen Vorhersagegenauigkeit der Bemessungsgleichung nach DIN EN 1992-1-1/NA Zweifel auf. Die in DBV 2019 beschriebenen Ergebnisse können in diesem Zusammenhang selbst unter Zugrundelegung der „einfachen“ stabförmigen Versuchskörper mit einem zentrisch eingelegten Bewehrungsstab und  $\phi < \phi_{\text{large}}$  aus Schäfer 2016 nicht bestätigt werden (vgl. Abschnitt 5.5.2.3). Betrachtet man hierzu die in Schäfer 2016 für eine im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit übliche Stahlspannung von 280 N/mm<sup>2</sup> konkret ausgewerteten charakteristischen Rissbreiten  $w_{0,75}$  der „stabförmigen“ Bauteile, so ergibt sich die Spannweite der mittleren Vorhersagegenauigkeit  $\gamma_{\text{mod}}$  (als Quotient aus Rechenwert und Versuchswert gemäß Gl. 5-8) für die betrachteten Stabdurchmesser  $\phi 10$  mm bis  $\phi 50$  mm gerade einmal „nur“ zu 0,53 bis 0,70 (für DIN EN 1992-1-1/NA, statt beispielsweise 0,89 für  $w_{0,95}$  gemäß DBV 2019, s. Tab. 5-3).

Ähnliche Auswertungen lassen sich u. a. auch in Empelmann et al. 2015a finden. Weiterführende Untersuchungen zur Aufklärung der voranstehend festgestellten Diskrepanz im Hinblick auf die rechnerischen Modellsicherheiten für DIN EN 1992-1-1/NA sind nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.



5.5.3 Rechenwerte  $w_{k,cal,surf}$  mit Modifizierung nach Eckfeldt 2005

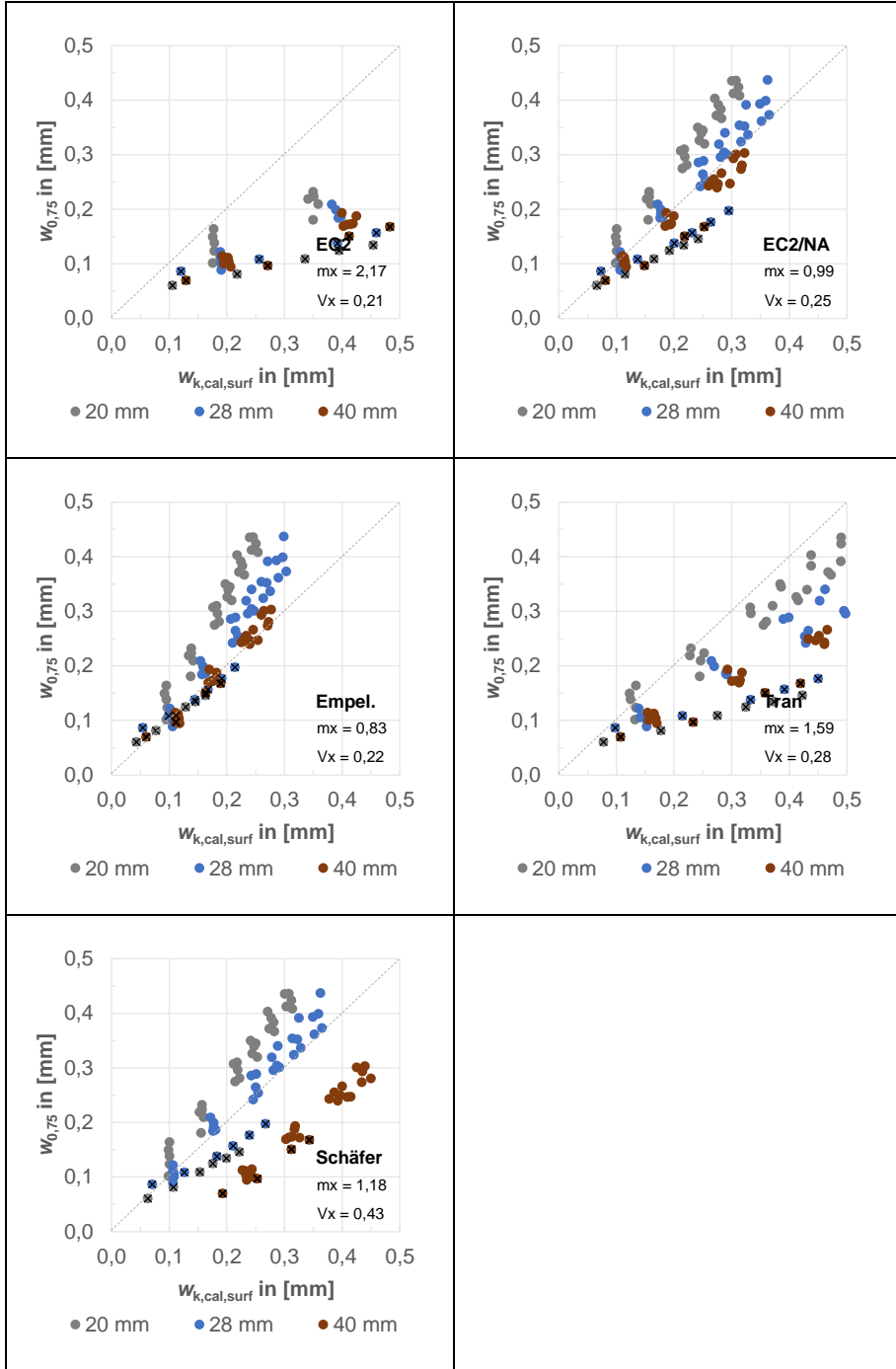


Abb. 5-7: Modellvergleich, Rechenwerte  $w_{k,cal}$  mit Modifikation nach Eckfeldt 2005

## 5 Nachrechnung der Versuchsergebnisse mit Ingenieur- und Bemessungsmodellen

Für den modifizierten Rechenwert  $w_{k,cal,surf}$  ist Folgendes festzustellen:

- Die modifizierten Bemessungswerte nach DIN EN 1992-1-1 und Tran 2018 überschätzen die Versuchswerte sehr deutlich. Eine Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit gegenüber den Bemessungswerten ohne Modifikation ist damit nicht angezeigt.
- Für die modifizierten Bemessungswerte nach DIN EN 1992-1-1/NA stellt es sich insgesamt so dar, dass eine deutlich verbesserte Vorhersagegenauigkeit gegenüber den Bemessungswerten ohne Modifikation erzielt werden kann. Für Versuchskörper ohne Oberflächenbewehrung beträgt der Mittelwert der Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  1,16 ( $V_x = 0,17$  für mittlere Rissbreiten  $w_m$ ) und 0,91 ( $V_x = 0,17$  für charakteristische Rissbreiten  $w_{0,75}$ ). Bei vorliegender Oberflächenbewehrung (Serie 4) liegen die modifizierten Bemessungswerte weit auf der sicheren Seite.
- Die modifizierten Bemessungswerte nach Empelmann et al. 2015b weisen im Vergleich zu DIN EN 1992-1-1/NA (modifiziert) eine geringere Vorhersagegenauigkeit auf. Für Bauteile ohne Oberflächenbewehrung ergibt sich der Mittelwert der Modellsicherheit zu 1,02 ( $V_x = 0,21$  für mittlere Rissbreiten  $w_m$ ) und zu 0,80 ( $V_x = 0,22$  für charakteristische Rissbreiten  $w_{0,75}$ ). Für Serie 4 ergibt sich der Mittelwert der Modellsicherheit zu 1,00 ( $V_x = 0,15$  für charakteristische Rissbreiten  $w_{0,75}$ ). Für  $\phi 40$  mm kann insgesamt eine gute Übereinstimmung der Versuchswerte mit den modifizierten Rechenwerten festgestellt werden.
- Die Modifizierung der Bemessungswerte nach Schäfer 2016 bewirkt insgesamt eine Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit, wenn auch die Bemessungswerte für  $\phi 40$  mm (mit/ohne Oberflächenbewehrung) weit auf der sicheren Seite liegen. Für  $\phi 28$  mm kann bei fehlender Oberflächenbewehrung eine gute Übereinstimmung der Versuchswerte mit den modifizierten Rechenwerten beobachtet werden.
- Die Bemessungs- und Ingenieurmodelle nach MC 2010 und prEN1992-1-1 werden voranstehend nicht berücksichtigt. Dies liegt darin begründet, dass es sich bei den resultierenden Rechenwerten bereits definitionsgemäß um (rechnerische) Oberflächenrissbreiten handelt.

In Tab. 5-4 wird die Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  zusätzlich wie folgt ausgewertet:

Tab. 5-4: Auswertung der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  für Bemessungswerte mit Modifikation nach Eckfeldt 2005

| Kriterium |       | $\phi \geq \phi_{\text{large}}$<br>(ohne $A_{\text{s,surf}}$ ) |            | $\phi < \phi_{\text{large}}$<br>(ohne $A_{\text{s,surf}}$ ) |            | $\phi \geq \phi_{\text{large}}$<br>(mit $A_{\text{s,surf}}$ ) |            | $\phi < \phi_{\text{large}}$<br>(mit $A_{\text{s,surf}}$ ) |            |
|-----------|-------|--|------------|---|------------|---|------------|--|------------|
|           |       | $W_m$  | $W_{0,75}$ | $W_m$   | $W_{0,75}$ | $W_m$   | $W_{0,75}$ | $W_m$  | $W_{0,75}$ |
| EC2       | $m_x$ | 2,97   | 2,33       | 2,61  | 2,04       | 3,13  | 2,57       | 3,33   | 2,76       |
|           | $V_x$ | 0,16   | 0,21       | 0,22  | 0,22       | 0,21  | 0,18       | 0,25   | 0,23       |
| EC2/NA    | $m_x$ | 1,38   | 1,09       | 1,07  | 0,84       | 1,72  | 1,41       | 1,69   | 1,41       |
|           | $V_x$ | 0,07   | 0,06       | 0,15  | 0,15       | 0,14  | 0,12       | 0,18   | 0,16       |
| Empel.    | $m_x$ | 1,26   | 0,99       | 0,95  | 0,75       | 1,29  | 1,06       | 1,18   | 0,98       |
|           | $V_x$ | 0,07   | 0,09       | 0,20  | 0,22       | 0,17  | 0,12       | 0,18   | 0,16       |
| Tran      | $m_x$ | 2,22   | 1,74       | 1,83  | 1,44       | 2,69  | 2,21       | 2,76   | 2,29       |
|           | $V_x$ | 0,13   | 0,10       | 0,28  | 0,29       | 0,22  | 0,20       | 0,26   | 0,24       |
| Schä.     | $m_x$ | 2,26   | 1,78       | 1,07  | 0,84       | 2,88  | 2,38       | 1,56   | 1,30       |
|           | $V_x$ | 0,14   | 0,17       | 0,15  | 0,15       | 0,13  | 0,16       | 0,17   | 0,15       |

Auch hier ist der Mittelwert  $m_x$  der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  unter Berücksichtigung der jeweiligen Vorhersagegenauigkeit wiederum wie folgt farbig hervorgehoben:

- grün:  $0,90 \leq m_x \leq 1,10$ , d. h.  $\pm 10\%$  Abweichung vom „Idealfall“  $m_x = 1,00$ ,
- orange:  $0,70 \leq m_x \leq 1,30$ , d. h.  $\pm 30\%$  Abweichung vom „Idealfall“  $m_x = 1,00$ ,
- rot:  $m_x < 0,70$  oder  $m_x > 1,30$ , d. h.  $> \pm 30\%$  Abweichung vom „Idealfall“  $m_x = 1,00$ .

Unter Zugrundelegung der in obiger Tabelle genannten Unterscheidungskriterien ist dem modifizierten Ingenieurmodellen nach Empelmann et al. 2015b die jeweils beste (mittlere) Vorhersagegenauigkeit (Zahlenwerte fettgedruckt) zuzumessen.

5.5.4 Rechenwerte  $w_{k,cal,surf}$  mit Modifizierung gemäß Schäfer 2016

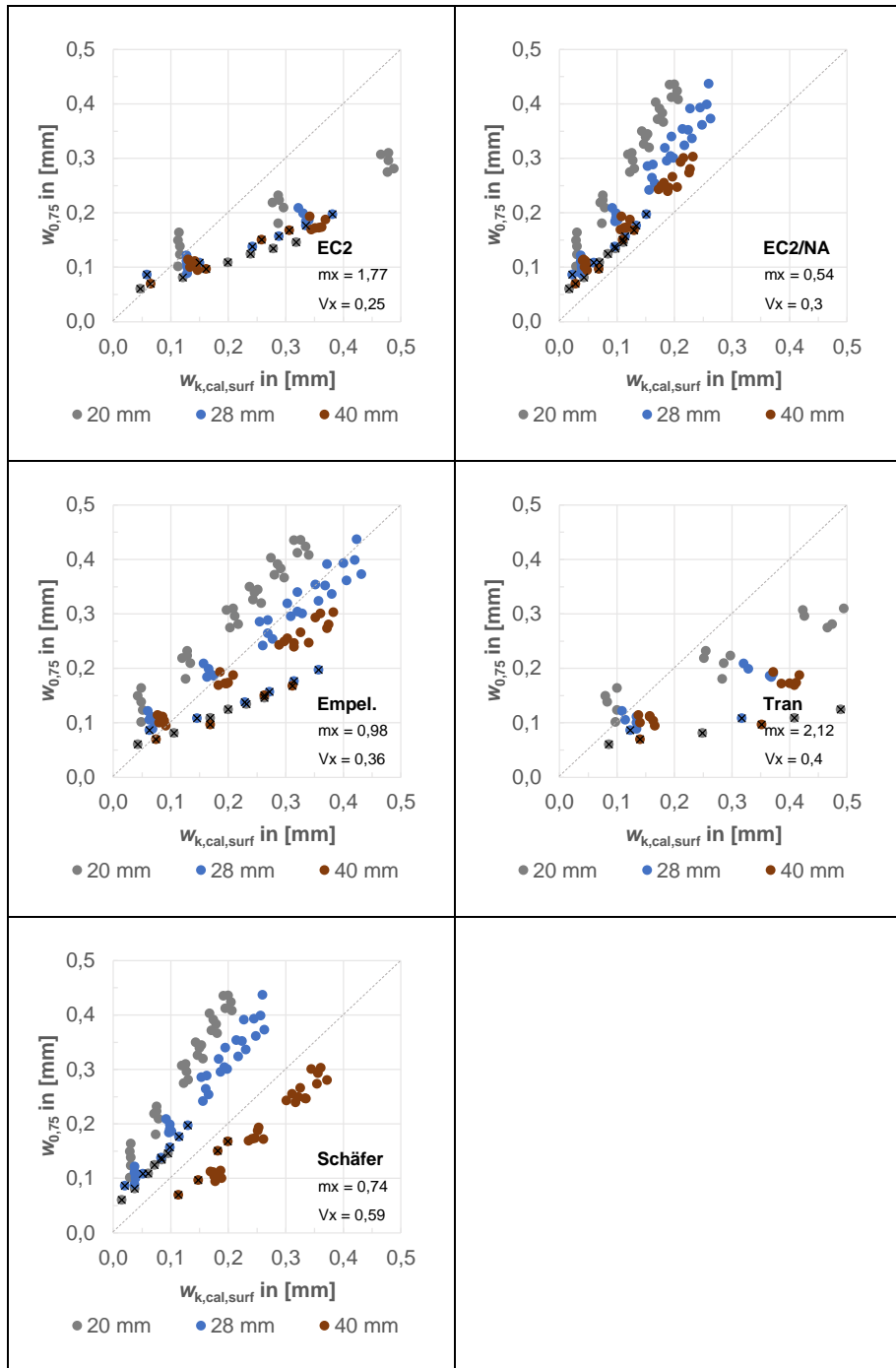


Abb. 5-8: Modellvergleich, Rechenwerte  $w_{k,cal}$  mit Modifikation nach Schäfer 2016

Für den nach Schäfer 2016 modifizierten Rechenwert der Oberflächenrissbreite  $w_{k,cal,surf}$  (s. Abschnitt 5.4.3) kann wie folgt befunden werden:

- Die modifizierten Bemessungswerte nach DIN EN 1992-1-1 und Tran 2018 überschätzen die Versuchswerte ( $w_{0,75}$  und  $w_m$ ) stark. Eine zielsichere und wirtschaftliche rechnerische Vorhersage der sich einstellenden Oberflächenrissbreite ist damit nicht möglich.
- Für die modifizierten Bemessungswerte nach DIN EN 1992-1-1/NA ist festzustellen, dass die Vorhersagegenauigkeit gegenüber dem Modifikationsansatz nach Eckfeldt 2005 abnimmt. Insgesamt ergibt sich der Mittelwert der Modellsicherheit nur zu 0,69 ( $V_x = 0,30$  für mittlere Rissbreiten  $w_m$ ) und 0,54 ( $V_x = 0,30$  für charakteristische Rissbreiten  $w_{0,75}$ ). Die Ergebnisse der Nachrechnung liegen damit tendenziell für alle betrachteten Stabdurchmesser auf der unsicheren Seite. Betrachtet man Bauteile ohne Oberflächenbewehrung, so beträgt der Mittelwert der Modellsicherheit 0,67 ( $V_x = 0,31$  für mittlere Rissbreiten  $w_m$ ) und 0,53 ( $V_x = 0,29$  für charakteristische Rissbreiten  $w_{0,75}$ ). Für Bauteile mit Oberflächenbewehrung stellt sich demgegenüber eine geringfügig bessere Vorhersagegenauigkeit ein.
- Der Mittelwert der Modellsicherheit der modifizierten Bemessungswerte nach Empelmann et al. 2015b beträgt insgesamt für  $w_m$  1,24 ( $V_x = 0,36$ ) und für  $w_{0,75}$  0,98 ( $V_x = 0,36$ ). Auf Mittelwertniveau ( $w_m$ ) und für charakteristische Werte ( $w_{0,75}$ ) kann für  $\phi 28$  mm und  $\phi 40$  mm (ohne Oberflächenbewehrung) eine gute Übereinstimmung der Versuchswerte mit den modifizierten Rechenwerten erkannt werden. Die Ergebnisse für  $\phi 20$  mm (ohne Oberflächenbewehrung) liegen geringfügig auf der unsicheren Seite. Für eine etwaig vorhandene Oberflächenbewehrung (Serie 4) werden die Versuchswerte auf der sicheren Seite überschätzt.
- Die Modifikation nach Schäfer 2016 liefert unter Zugrundelegung desselbigen Bemessungsmodells weit auf der sicheren Seite liegende Rechenwerte für  $\phi 40$  mm (mit/ohne Oberflächenbewehrung). Die Bemessungswerte für  $\phi 20$  mm und  $\phi 28$  mm liegen weit auf der unsicheren Seite. Dies kann für  $w_m$  und  $w_{0,75}$  gleichermaßen befunden werden.
- Die Bemessungs- und Ingenieurmodelle nach MC 2010 und prEN1992-1-1 werden analog zu Abschnitt 5.5.3 voranstehend nicht berücksichtigt.

In Tab. 5-5 wird die Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  für Bemessungswerte mit Modifikation nach Schäfer 2016 zusätzlich wie folgt ausgewertet:

## 5 Nachrechnung der Versuchsergebnisse mit Ingenieur- und Bemessungsmodellen

Tab. 5-5: Auswertung der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  für Bemessungswerte mit Modifikation nach Schäfer 2016

| Kriterium |       | $\phi \geq \phi_{\text{large}}$<br>(ohne $A_{\text{s,surf}}$ ) |            | $\phi < \phi_{\text{large}}$<br>(ohne $A_{\text{s,surf}}$ ) |            | $\phi \geq \phi_{\text{large}}$<br>(mit $A_{\text{s,surf}}$ ) |            | $\phi < \phi_{\text{large}}$<br>(mit $A_{\text{s,surf}}$ ) |            |
|-----------|-------|--|------------|---|------------|---|------------|--|------------|
|           |       | $W_m$  | $W_{0,75}$ | $W_m$   | $W_{0,75}$ | $W_m$   | $W_{0,75}$ | $W_m$  | $W_{0,75}$ |
| EC2       | $m_x$ | 2,57   | 2,00       | 2,20  | 1,72       | 1,87  | 1,53       | 1,99   | 1,65       |
|           | $V_x$ | 0,27   | 0,23       | 0,25  | 0,24       | 0,28  | 0,26       | 0,31   | 0,29       |
| EC2/NA    | $m_x$ | 0,82   | 0,64       | 0,61  | 0,48       | 0,80  | 0,65       | 0,74   | 0,61       |
|           | $V_x$ | 0,25   | 0,23       | 0,28  | 0,27       | 0,28  | 0,26       | 0,30   | 0,29       |
| Empel.    | $m_x$ | 1,41   | 1,10       | 1,02  | 0,80       | 1,96  | 1,60       | 1,79   | 1,48       |
|           | $V_x$ | 0,21   | 0,19       | 0,28  | 0,27       | 0,25  | 0,22       | 0,28   | 0,26       |
| Tran      | $m_x$ | 2,89   | 2,26       | 2,21  | 1,72       | 4,07  | 3,33       | 4,12   | 3,41       |
|           | $V_x$ | 0,26   | 0,24       | 0,31  | 0,30       | 0,29  | 0,27       | 0,31   | 0,30       |
| Schä.     | $m_x$ | 1,78   | 1,40       | 0,61  | 0,48       | 1,68  | 1,39       | 0,64   | 0,53       |
|           | $V_x$ | 0,11   | 0,14       | 0,28  | 0,27       | 0,13  | 0,16       | 0,30   | 0,29       |

Auch hier ist der Mittelwert  $m_x$  der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  unter Berücksichtigung der jeweiligen Vorhersagegenauigkeit wiederum wie folgt farbig hervorgehoben:

- grün:  $0,90 \leq m_x \leq 1,10$ , d. h.  $\pm 10$  % Abweichung vom „Idealfall“  $m_x = 1,00$ ,
- orange:  $0,70 \leq m_x \leq 1,30$ , d. h.  $\pm 30$  % Abweichung vom „Idealfall“  $m_x = 1,00$ ,
- rot:  $m_x < 0,70$  oder  $m_x > 1,30$ , d. h.  $> \pm 30$  % Abweichung vom „Idealfall“  $m_x = 1,00$ .

Unter Zugrundelegung der in obiger Tabelle genannten Unterscheidungskriterien ist dem modifizierten Ingenieurmodell nach Empelmann et al. 2015b die beste (mittlere) Vorhersagegenauigkeit (Zahlenwerte fettgedruckt) zuzumessen. Weiterhin weist das modifizierte Ingenieurmodell nach Schäfer 2016 für  $\phi 40$  mm gute Übereinstimmungen auf und es resultieren insgesamt auf der sicheren Seite liegende Bemessungswerte.

### 5.5.5 Zusammenstellung und abschließende Bewertung

Unter Bezug auf die Abschnitte 5.5.2, 5.5.3 und 5.5.4 kann befunden werden, dass den folgenden Ingenieur- und Bemessungsmodellen die beste rechnerische Vorhersagegenauigkeit (bei Betrachtung von  $m_x$  und  $V_x$  der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  für den gesamten Datensatz) der am Bauteil auftretenden Rissbreite zugemessen werden kann:

- prEN1992-1-1 (annähernd identisch mit MC 2010),
- DIN EN 1992-1-1/NA (mit Modifikation nach Eckfeldt 2005).

Diese zuvor genannten Berechnungsmodelle sollen nun nachfolgend hinsichtlich ihrer rechnerischen Vorhersagegenauigkeit nochmals detailliert untersucht werden (zu Vergleichszwecken wird auch DIN EN 1992-1-1/NA zusätzlich mit aufgenommen). In diesem Zusammenhang werden wiederum die Gruppierungen der Datensätze aus Tab. 5-1 ff. herangezogen. Als Untersuchungs- und Bewertungsparameter werden zusätzlich neu eingeführt:

- Medianwert (*Med.*) der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$ ,
- Maximal- (*Max.*) und Minimalwerte (*Min.*) der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$ ,
- Quantilwert  $Q_{0,05}$  der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  (in Anlehnung an DBV 2019) im Hinblick auf die ungünstigste zu erwartende Aussagegenauigkeit. Es wird in diesem Zusammenhang angenommen, dass Einzelwerte der Modellsicherheit normalverteilt sind (analog zur Annahme der Verteilung der Versuchsdaten  $w_{\text{test}}$ ; in DBV 2019 wird eine logarithmische Normalverteilung zugrunde gelegt).

Mit Bezug auf Tab. 5-6 kann zusammenfassend wie folgt befunden werden:

- Die größten Werte für  $Q_{0,05}$  (und damit die beste zu erwartende Vorhersagegenauigkeit) ergeben sich für die nach Eckfeldt 2005 modifizierten Bemessungswerte nach DIN EN 1992-1-1/NA (s. fett gedruckte Werte).
- Die sich für prEN1992-1-1 ergebenden Medianwerte sind tendenziell kleiner als diejenigen für das modifizierte Bemessungsmodell nach DIN EN 1992-1-1/NA (für  $w_m$  und  $w_{0,75}$ ). Für eine etwaig vorhandene Oberflächenbewehrung stellt es sich jedoch so dar, dass prEN1992-1-1 zutreffendere Übereinstimmungen (näher am Idealwert 1,0 liegend) zwischen Rechen- und Versuchswerten liefert. Dies kann auch für den Mittelwert  $m_x$  der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  so festgestellt werden.
- Insgesamt ergeben sich für prEN1992-1-1 größere Streubreiten der Einzelwerte (größere Werte für  $V_x$ ) als für das modifizierte Bemessungsmodell nach DIN EN 1992-1-1/NA.
- Das Bemessungsmodell gemäß DIN EN 1992-1-1/NA erlaubt keine zuverlässige Berechnung der Rissbreite auf der Bauteiloberseite. Es ergeben sich insgesamt auf der unsicheren Seite liegende Bewertungsergebnisse.

## 5 Nachrechnung der Versuchsergebnisse mit Ingenieur- und Bemessungsmodellen

Tab. 5-6: Detaillierte Auswertung der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  für ausgewählte Bemessungsmodelle

| Kriterium      |             | $\phi \geq \phi_{\text{large}}$<br>(ohne $A_{\text{s,surf}}$ ) |             | $\phi < \phi_{\text{large}}$<br>(ohne $A_{\text{s,surf}}$ ) |             | $\phi \geq \phi_{\text{large}}$<br>(mit $A_{\text{s,surf}}$ ) |             | $\phi < \phi_{\text{large}}$<br>(mit $A_{\text{s,surf}}$ ) |             |
|----------------|-------------|--|-------------|---|-------------|---|-------------|--|-------------|
|                |             | $W_m$  | $W_{0,75}$  | $W_m$   | $W_{0,75}$  | $W_m$   | $W_{0,75}$  | $W_m$  | $W_{0,75}$  |
| EC2/NA         | $m_x$       | 0,51   | 0,40        | 0,38  | 0,30        | 0,71  | 0,58        | 0,66   | 0,55        |
|                | $V_x$       | 0,25   | 0,23        | 0,28  | 0,27        | 0,28  | 0,26        | 0,30   | 0,26        |
|                | <i>Med.</i> | 0,57   | 0,43        | 0,37  | 0,29        | 0,79  | 0,64        | 0,76   | 0,64        |
|                | <i>Max.</i> | 0,69   | 0,51        | 0,56  | 0,44        | 0,85  | 0,69        | 0,82   | 0,69        |
|                | <i>Min.</i> | 0,28   | 0,22        | 0,15  | 0,12        | 0,42  | 0,36        | 0,27   | 0,36        |
|                | $Q_{0,05}$  | 0,27   | 0,23        | 0,19  | 0,15        | 0,18  | 0,18        | 0,25   | 0,22        |
| EC2/NA<br>mod. | $m_x$       | 1,38   | 1,09        | 1,07  | 0,84        | 1,72  | 1,41        | 1,69   | 1,41        |
|                | $V_x$       | 0,07   | 0,06        | 0,15  | 0,15        | 0,14  | 0,12        | 0,18   | 0,16        |
|                | <i>Med.</i> | 1,37   | 1,08        | 1,04  | 0,83        | 1,83  | 1,48        | 1,79   | 1,49        |
|                | <i>Max.</i> | 1,60   | 1,24        | 1,44  | 1,20        | 1,86  | 1,54        | 2,02   | 1,65        |
|                | <i>Min.</i> | 1,21   | 0,96        | 0,80  | 0,61        | 1,36  | 1,16        | 1,02   | 0,85        |
|                | $Q_{0,05}$  | 1,19   | <b>0,95</b> | 0,79  | <b>0,61</b> | 1,07  | <b>0,96</b> | 1,06   | <b>0,93</b> |
| prEC2          | $m_x$       | 1,08   | 0,85        | 0,92  | 0,71        | 1,19  | 0,97        | 1,23   | 1,02        |
|                | $V_x$       | 0,25   | 0,23        | 0,26  | 0,24        | 0,29  | 0,26        | 0,31   | 0,29        |
|                | <i>Med.</i> | 1,20   | 0,91        | 0,93  | 0,72        | 1,31  | 1,07        | 1,39   | 1,14        |
|                | <i>Max.</i> | 1,50   | 1,13        | 1,30  | 0,99        | 1,43  | 1,16        | 1,62   | 1,34        |
|                | <i>Min.</i> | 0,60   | 0,48        | 0,38  | 0,29        | 0,69  | 0,59        | 0,50   | 0,42        |
|                | $Q_{0,05}$  | 0,57   | 0,48        | 0,49  | 0,40        | 0,28  | 0,28        | 0,46   | 0,41        |

In Erweiterung zu o. g. tabellarischer Gegenüberstellung der rechnerischen Vorhersagegenauigkeiten hinsichtlich des Faktors  $\gamma_{\text{mod}}$  werden nun nachfolgend die auf



Martin et al. 1980 zurückgehenden und u. a. in Eckfeldt 2009 als „Modellperformance“ bezeichneten Zielsetzungen für „eine gute Vorhersagenqualität“ untersucht. Diese können gemäß Eckfeldt 2009 wie folgt zusammengefasst werden:

- für 95 % der Testdaten soll gelten:  $w_m < w_{k,cal}$ ,
- für 75 % der Testdaten soll gelten:  $w_{max} < w_{k,cal}$ ,
- für 95 % der Testdaten soll gelten:  $w_{max} < 1,25 \cdot w_{k,cal}$ .

Die Auswertung der „Modellperformance“ für das modifizierte Bemessungsmodell nach DIN EN 1992-1-1/NA und für prEN1992-1-1 liefert die folgenden Übereinstimmungsprozentsätze.

Tab. 5-7: Auswertung der Übereinstimmungsprozentsätze („Modellperformance“) in Anlehnung an Eckfeldt 2009

| Bemessungsmodell          | $w_m < w_{k,cal}$ | $w_{max} < w_{k,cal}$ | $w_{max} < 1,25 \cdot w_{k,cal}$ |
|---------------------------|-------------------|-----------------------|----------------------------------|
| DIN EN 1992-1-1/NA (mod.) | 76 %              | 15 %                  | 28 %                             |
| prEN1992-1-1              | 48 %              | 1 %                   | 14 %                             |

Wie anhand der vorstehenden Tab. 5-7 leicht festzustellen ist, werden die in Anlehnung an Martin et al. 1980 formulierten Zielsetzungen hinsichtlich der Vorhersagegenauigkeit von den beiden hier betrachteten Bemessungsmodellen nicht erreicht. In der Tendenz liefert das modifizierte Modell nach DIN EN 1992-1-1/NA jedoch die zutreffendere Vorhersagegenauigkeit.

## 5.6 Zusammenfassung und weiteres Vorgehen

Im vorliegenden Kapitel wurde die rechnerische Vorhersagegenauigkeit ausgewählter Ingenieur- und Bemessungsmodelle zur Begrenzung der Rissbreite überprüft.

Es wurden diesbezüglich die durchgeführten Bauteilversuche unter Zugrundelegung der vorhandenen Querschnittskonzeptionen, der Einwirkung und der Materialeigenschaften mit verschiedenen Ingenieur- und Bemessungsmodellen zur Begrenzung der Rissbreite nachgerechnet. Die Ergebnisse dieser Nachrechnung wurden den experimentell gewonnenen Versuchsergebnissen gegenübergestellt, welche fallweise als mittlere Rissbreite  $w_m$  oder als charakteristische Rissbreite  $w_{0,75}$  (und auch  $w_{0,95}$ ) ausgewertet wurden. Auf Grundlage dieser Gegenüberstellung konnte schließlich befunden werden, wie zutreffend die hier betrachteten Ingenieur- und Bemessungsmodelle die in der experimentellen Versuchsdurchführung festgestellten Ergebnisse rechnerisch vorausbestimmen. Zwecks objektiver, quantitativer Einschätzung der rechnerischen Vorhersagegenauigkeit wurde in diesem Zusammenhang die Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  (definiert als Quotient aus  $w_{k,cal}$  und  $w_{est}$ ) eingeführt.

Vor dem Hintergrund der nachweislich vorhandenen Rissaufweitung hin zur Bauteiloberfläche wurden zudem verschiedene Modifikationsansätze berücksichtigt, um den

## 5 Nachrechnung der Versuchsergebnisse mit Ingenieur- und Bemessungsmodellen

jeweils betrachteten Rechenwert der Rissbreite  $w_{k,cal}$  in eine rechnerische Oberflächenrissbreite  $w_{k,cal,surf}$  zu überführen. Auch die rechnerische Vorhersagegenauigkeit dieser Rechenwerte  $w_{k,cal,surf}$  wurde eingehend untersucht.

Insgesamt kann für das bauaufsichtlich in Deutschland eingeführte Bemessungskonzept zur Begrenzung der Rissbreite nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA befunden werden, dass bei fehlender Oberflächenbewehrung derzeit keine zuverlässige Berechnung der Rissbreiten auf der Bauteiloberseite möglich ist. Im Zuge der Überprüfung wurden charakteristische Versuchswerte der Rissbreite überwiegend als 75 %-Fraktilwert  $w_{0,75}$  zugrunde gelegt. Eine Auswertung der Rissbreite mit größeren Fraktilwerten (z. B. 95 %) bedingt dahingehend größere charakteristische Werte, sodass sich die Vorhersagegenauigkeit im vorliegenden Fall von DIN EN 1992-1-1/NA weiter reduziert. Im Hinblick auf wirtschaftliche Belange wären demnach dann größere Bewehrungsmengen einzubauen, um die Rissbreite in engeren Grenzen zu beschränken, ohne dabei jedoch größere Rissbreiten sicher ausschließen zu können.

Obige Feststellung, dass keine zuverlässige Berechnung der Rissbreiten auf der Bauteiloberseite mit DIN EN 1992-1-1/NA möglich ist, ist für die hier intensiv untersuchten „flächenartigen“ Querschnittskonzeptionen (mehrlagig kreuzweise angeordnete Bewehrung, fallweise Verwendung großer Stabdurchmesser), aber auch für „einfache“ stabförmige Bauteile (s. Schäfer 2016) zutreffend. Dies ist insbesondere für diejenigen Querschnittskonzeptionen kritisch, die mit Bewehrungsstäben eines „konventionellen“ Stabdurchmessers ( $\phi 20$  mm und  $\phi 28$  mm) bewehrt sind und für die – anders als für große Stabdurchmesser  $\phi_{arge}$  – gegenwärtig auch keine zusätzlichen Konstruktionsregeln (Oberflächenbewehrung) zu beachten sind, mit Hilfe derer auftretende Rissbreiten auf der Bauteiloberfläche nachweislich konstruktiv begrenzt werden können.

Mit Hilfe des Modifikationsansatzes nach Eckfeldt 2005 können rechnerische Rissbreiten  $w_{k,cal}$  in rechnerische Oberflächenrissbreiten  $w_{k,cal,surf}$  überführt werden. Zwar gelingt es im vorliegenden Fall von DIN EN 1992-1-1/NA, damit die Modellsicherheit wesentlich zu verbessern, jedoch ist dieser Überführungsansatz insgesamt vage und nicht hinreichend abgesichert (Anwendungsgrenzen: Rissbreite  $< 0,30$  mm, Stahlspannung  $\sigma_s < 300$  N/mm<sup>2</sup>) und darüber hinaus im Hinblick auf die Anwendung mit dem zugrundeliegenden Formelapparat nicht praxistauglich. Der Modifikationsansatz nach Schäfer 2016 liefert – im Vergleich zu dem aus Eckfeldt 2005 entnommenen Vorgehen – insgesamt keine wesentliche Verbesserung der rechnerischen Vorhersagegenauigkeit.

Vor dem Hintergrund dieser Feststellungen sind somit grundsätzlich Modifikationen der bestehenden Bemessungsgleichung nach DIN EN 1992-1-1/NA zur Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit zwingend angezeigt. Unter Bezug auf die neue Eurocode-generation kann außerdem befunden werden, dass das Bemessungsmodell nach prEN1992-1-1, welches definitionsgemäß bereits Oberflächenrissbreiten ausweist, insgesamt sehr gute Übereinstimmungen der Rechenwerte mit den Versuchswerten liefert (nahezu identisch mit MC 2010). Diesbezüglich gilt es zu überprüfen, ob anstelle ganzheitlicher empirischer Modifikationen des derzeit gültigen Bemessungsansatzes auch der Bemessungsvorschlag nach prEN1992-1-1 hinreichend für eine zukünftige Anwendung verifiziert werden kann.

Ein Bemessungsvorschlag, welcher gegenüber DIN EN 1992-1-1/NA insgesamt eine zielsicherere Berechnung der Rissbreite auf der Bauteiloberfläche infolge zentrischen Zugs ermöglichen soll, gleichzeitig aber auch wirtschaftlichen Aspekten im Zuge der Rissbreitenbeschränkung genügt, wird in Kapitel 6 vorgestellt.



## 6 Umsetzung der Rissbreitenbegrenzung in der Praxis

### 6.1 Vorbemerkungen

In dem voranstehenden Kapitel wurden ausgewählte Ingenieur- und Bemessungsmodelle zur Begrenzung der Rissbreite hinsichtlich deren rechnerischer Vorhersagegenauigkeit überprüft. Ein wesentliches Augenmerk lag in diesem Zusammenhang auf den derzeit in Deutschland bauaufsichtlich eingeführten Regelwerken DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA.

Als ein maßgebendes Ergebnis der Gegenüberstellung von Versuchswerten mit den Ergebnissen einer Nachrechnung musste dabei festgestellt werden, dass für die mehrlagig bewehrten, fallweise auch mit großen Stabdurchmessern belegten Bauteilquerschnitten mit den in DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA angegebenen Bemessungsgleichungen keine zuverlässige Berechnung der Rissbreiten auf der Bauteiloberseite gelingt. Insgesamt stellt es sich auch so dar, dass die in Rede stehenden Bemessungsmodelle keinen Vergleich des Rechenwerts mit einer an der Bauteiloberfläche messbaren Rissbreite vorsehen. Vor diesem Hintergrund sind insgesamt Modifikationen der Bemessungsgleichungen zur Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit notwendig und erforderlich.

Die voranstehende Feststellung zur Notwendigkeit von Modellmodifikationen muss insoweit relativiert werden, als dass sich bei einer etwaig vorhandenen randnahen Oberflächenbewehrung zutreffendere Vorhersagegenauigkeiten für nach DIN EN 1992-1-1/NA auf der Bauteiloberfläche auftretende Rissbreiten ergeben, und auch für das „Bauteilinnere“ konnten Rissbreiten in den nach DIN EN 1992-1-1/NA zu erwartenden Größenordnungen angetroffen werden.

Für die hier betrachteten Querschnittskonzeptionen mit mehrlagig, kreuzweise angeordneter Bewehrung konnte – vorbehaltlich der Tatsache, dass die untersuchten Versuchskörper mit  $\phi 20$  mm,  $\phi 28$  mm und  $\phi 40$  mm keine identischen Bewehrungsgrade aufweisen – nicht befunden werden, dass große Stabdurchmesser ( $\phi > \phi_{\text{large}}$ ) im Vergleich zu den hier ebenfalls überprüften, praxisüblichen Stabdurchmessern ( $\phi 20$  mm und  $\phi 28$  mm) zwangsläufig größere Rissbreiten bedingen. Somit erscheint eine Modifikation der Bemessungsgleichung durch Vergrößerung der rechnerischen Rissbreite – wie es zum Beispiel in Schäfer 2016 mit einem additiven Anteil  $\Delta w$  beschrieben ist – für ebendiese Stabdurchmesser  $\phi_{\text{large}}$  nicht erforderlich.

Als eine zielführende Modifikation der Bemessungsgleichungen zur Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit (bei einer Gegenüberstellung mit an der Bauteiloberfläche gewonnenen Messwerten) kann vorliegend die direkte Bestimmung einer rechnerischen Oberflächenrissbreite, d. h. die Berücksichtigung einer Rissaufweitung zur Bauteiloberfläche hin unter Einbeziehung der jeweils vorhandenen Betonüberdeckung der Hauptbewehrung erkannt werden. Dies kann durch Ansatz eines modifizierten rechnerischen Rissabstandes gelingen, der voranstehend im Zuge der Versuchsnachrechnung bereits als „Steuerungsterm“ identifiziert wurde.

### 6.2 Vorgehensweisen zur Modellfindung

Insgesamt sind grundsätzlich verschiedene Herangehensweisen zur Formulierung eines Bemessungsvorschlags im vorliegenden Fall denkbar.

Eine Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit des Bemessungsmodells nach DIN EN 1992-1-1/NA kann durch Formulierung eines empirischen Korrekturfaktors gelingen, welcher unter Einbeziehung der experimentell gewonnenen Versuchsergebnisse zu ermitteln und zu kalibrieren ist. Im Hinblick auf die Wahrnehmung in der Praxis könnte damit sichergestellt werden, dass der derzeit vorhandene mechanische Ansatz (Berechnung des Bemessungswertes der Rissbreite aus den Faktoren der Dehnungsdifferenz zwischen Beton und Bewehrung und dem Rissabstand) entsprechend erhalten bleibt. Dieser Ansatz müsste mit Bezug auf die im Rahmen dieser Arbeit erlangten Erkenntnisse eine Vergrößerung der rechnerischen Rissbreite  $w_k$  gegenüber DIN EN 1992-1-1/NA infolge einer Rissaufweitung zur Bauteiloberfläche hin sowie der besonderen Bauteilkonzeption, bestehend aus einer mehrlagig, kreuzweise angeordneten Bewehrung, beinhalten. Eine alleinige Vergrößerung der rechnerischen Rissbreite für große Stabdurchmesser  $\phi_{\text{large}}$  in Form eines additiven Terms (vgl. Schäfer 2016) ist anhand der vorliegenden Versuchsergebnisse nicht angezeigt.

Ein solches Vorgehen soll an dieser Stelle aber nicht weiterverfolgt werden, da der Ansatz empirischer Korrekturfaktoren insgesamt vage erscheint. Diese sind im großen Maß von den Randbedingungen der zugrunde gelegten Bauteilversuche (und deren konzeptioneller Festlegungen) sowie der zwingend einzubeziehenden (statistischen) Auswertung der Versuchsergebnisse (u. a. Auswerteverfahren, angenommener Fraktilwert) abhängig, auf Basis derer schließlich eine Anpassung der Bemessungswerte erfolgt.

Weiter stellt es sich im Hinblick auf die neue Eurocodegeneration prEN1992-1-1 und die damit verbundenen absehbar anstehenden Neufassungen der Bemessungsregeln so dar, dass auch die derzeit gültigen nationalen Bemessungsmodelle zur Rissbreitenbegrenzung entfallen. Vor dem Hintergrund, dass zukünftig zudem keine NDPs in der bisherigen Form weiter vorgesehen sind, um nationale Unterschiede in Bezug auf Bauarten, Sicherheitsanforderungen und klimatische Bedingungen individuell zu berücksichtigen, erscheint eine Fokussierung auf das bestehende nationale Bemessungskonzept gemäß DIN EN 1992-1-1/NA ohnehin nicht zielführend.

Die Bemessungsmodelle gemäß prEN1992-1-1, DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA verfolgen einen vergleichbaren mechanischen Ansatz in Bezug auf die Berechnung der resultierenden Rissbreite. Die rechnerische Bestimmung der Dehnungsdifferenz zwischen dem Beton und der Bewehrung ist weitgehend identisch (ebenso vergleichbar zu MC 2010), Unterschiede sind im Zuge der Berechnung des Rissabstandes und der damit einhergehenden Berücksichtigung der Betondeckung zu erkennen. Für prEN1992-1-1 (Stand Oktober 2017) konnte in diesem Zusammenhang anhand der Versuchsnachrechnung erkannt werden, dass der in den Bauteilversuchen anzutreffende Rissabstand auf der Bauteiloberseite hinreichend genau und auf der sicheren Seite liegend abgebildet werden kann, sodass auch von einer realitätsnahen Berücksichtigung der Betonüberdeckung der Hauptbewehrung ausgegangen werden kann. Weiter stellen die Rechenwerte der Rissbreite nach prEN1992-1-1

definitionsgemäß (rechnerische) Oberflächenrissbreiten (entgegen der Definition der Rissbreite nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA) dar.

Im Hinblick auf die Vorhersagegenauigkeit auftretender Rissbreiten  $w_{k,cal}$  für die Querschnittskonzeptionen mit mehrlagig, kreuzweise angeordneter Bewehrung kann unter Einbeziehung der Ergebnisse aus Abschnitt 5.5.2 eindeutig befunden werden, dass dem Bemessungsmodell nach prEN1992-1-1 eine deutlich bessere Vorhersagegenauigkeit als denjenigen gemäß DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA zugemessen werden kann. Dies trifft insbesondere bei Zugrundelegung mittlerer Versuchswerte  $w_m$  zu (jeweils unabhängig vom Stabdurchmesser oder einer etwaig vorhandenen Oberflächenbewehrung). Hier ergibt sich der Mittelwert  $m_x$  der Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  zu 1,01 (bei  $V_x = 0,29$ ). Bei der Berücksichtigung von Fraktilwerten  $w_{0,75}$  der Rissbreite kann besonders für großer Stabdurchmesser ( $\phi 40$  mm, mit und ohne Oberflächenbewehrung) eine gute Übereinstimmung mit den Rechenwerten befunden werden. Aber auch für Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm und  $\phi 28$  mm ergeben sich hinreichend gute Vorhersagegenauigkeiten, die jedoch tendenziell auf der unsicheren Seite liegen. Für eine etwaig vorhandene Oberflächenbewehrung ergeben sich insgesamt sehr gute Übereinstimmungen (bezüglich der Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$ :  $m_x = 0,97$  und  $V_x = 0,26$  für  $\phi 40$  mm,  $m_x = 1,02$  und  $V_x = 0,29$  für die gemeinsame Betrachtung von  $\phi 20$  mm und  $\phi 28$  mm).

Unter Zugrundelegung der rechnerischen Untersuchungen kann somit nachvollziehbar begründet werden, dass das Bemessungsmodell gemäß prEN1992-1-1 ohne Modifikationen grundsätzlich zur zielsicheren und praxisgerechten Begrenzung der Rissbreite angewandt werden kann. Deshalb wird vorliegend das Rechenmodell nach prEN1992-1-1 zur Begrenzung der Rissbreite für Querschnittskonzeptionen mit mehrlagig, kreuzweise angeordneter Hauptbewehrung (fallweise bestehend aus großen Stabdurchmessern  $\phi_{large}$ ) unter zentrischer Zugbeanspruchung vorgeschlagen. Für große Stabdurchmesser  $\phi_{large}$  werden zusätzliche (aber gegenüber DIN EN 1992-1-1 wesentlich abgeschwächte) Konstruktionsregeln hinsichtlich der Rissbreitenbegrenzung empfohlen, die in gleicher Weise jedoch auch für konventionelle Stabdurchmesser herangezogen werden können.

### 6.3 Vorschlag zur weiteren Verfahrensweise

Der im Nachfolgenden beschriebenen Vorschlag zur weiteren Verfahrensweise hinsichtlich der Rissbreitenbegrenzung kann ausschließlich zur Bestimmung der Rissbreiten auf der Bauteiloberfläche herangezogen werden und weicht damit zu Festlegungen gemäß DIN EN 1992-1-1/NA ab. Der Vorschlag wurde weiterhin auf Grundlage von experimentellen Untersuchungen unter Kurzzeitbelastung kalibriert. In diesem Zusammenhang sind zudem die folgenden Anwendungsgrenzen zu berücksichtigen:

- zentrischer Zug,
- Betondruckfestigkeitsklasse C30/37 bis C50/60,
- Stabdurchmesser der Hauptbewehrung  $\leq \phi 40$  mm,
- (vertikales) Verlegemaß der Hauptbewehrung  $c_v \leq 60$  mm,

- Stabdurchmesser der Oberflächenbewehrung  $\phi_{\text{surf}} = 8 \text{ mm}$ ,
- Verlegemaß der Oberflächenbewehrung  $c_{v,\text{surf}} = 30 \text{ mm}$  (es wird vorliegend akzeptiert, dass die planmäßig vorzusehende Betondeckung für die Expositionsklassen XC2 und XC3 geringfügig unterschritten wird).

### 6.3.1 Rechnerischer Rissbreitennachweis auf der Bauteiloberfläche

Der rechnerische Nachweis der auf der Bauteiloberfläche zu erwartenden Rissbreite kann für Querschnittskonzeptionen mit mehrlagig, kreuzweise angeordneter Bewehrung und beliebigem Stabdurchmesser ( $\phi \leq 40 \text{ mm}$ ) unter zentrischer Zugbeanspruchung wie folgt gemäß prEN1992-1-1 vorgenommen werden.

#### 6.3.1.1 Nachweis zum Zeitpunkt $t = 0$

Für kurzzeitige Beanspruchungen infolge Last können Zwangseinwirkungen (Kriechen, Schwinden) vernachlässigt werden. Es wird zunächst vorausgesetzt, dass keine Oberflächenbewehrung vorhanden ist.

$$w_{k,\text{cal}} = s_{r,\text{max,cal}} \cdot (\epsilon_{\text{sm}} - \epsilon_{\text{cm}}) \quad \text{Gl. 6-1}$$

|     |                        |  |
|-----|------------------------|--|
| mit | $s_{r,\text{max,cal}}$ | max. Rissabstand im abgeschlossenen Rissbild oder max. „Schlupflänge“ im Erstrisszustand |
|     | $\epsilon_{\text{sm}}$ | mittlere Stahldehnung (einschl. tension stiffening)                                      |
|     | $\epsilon_{\text{cm}}$ | mittlere Betondehnung  |

Die mittlere Dehnungsdifferenz  $\epsilon_{\text{sm}} - \epsilon_{\text{cm}}$  ergibt sich in diesem Zusammenhang zu:

$$\epsilon_{\text{sm}} - \epsilon_{\text{cm}} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{\text{ct,ef}}}{\rho_{\text{p,ef}}} (1 + \alpha_e \cdot \rho_{\text{p,ef}})}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \quad \text{Gl. 6-2}$$

|     |                      |  |
|-----|----------------------|--|
| mit | $\sigma_s$           | Spannung in der Zugbewehrung unter Annahme eines gerissenen Querschnitts                             |
|     | $k_t$                | Faktor, der von der Dauer der Lasteinwirkung abhängt:<br>$k_t = 0,6$ bei kurzzeitiger Lasteinwirkung |
|     | $f_{\text{ct,ef}}$   | wirksame Betonzugfestigkeit zum betrachteten Zeitpunkt   |
|     | $\rho_{\text{p,ef}}$ | effektiver Bewehrungsgrad ( $\rho_{\text{p,ef}} = A_s/A_{\text{c,ef}}$ )                             |
|     | $A_s$                | Querschnittsfläche der (Haupt-)Bewehrung   |
|     | $A_{\text{c,ef}}$    | Wirkungsbereich der Bewehrung  |
|     | $\alpha_e$           | Verhältnis der E-Moduln ( $\alpha_e = E_s/E_{\text{cm}}$ )   |
|     | $E_s$                | E-Modul der Betonstahlbewehrung  |
|     | $E_{\text{cm}}$      | mittlerer E-Modul des Betons   |

Der maximale, rechnerische Rissabstand  $s_{r,\text{max,cal}}$  ist wie folgt zu berechnen:

$$s_{r,\text{max,cal}} = 2 \cdot c + 0,35 \cdot k_b \cdot \frac{\phi}{\rho_{\text{p,ef}}} \quad \text{Gl. 6-3}$$



|     |        |   |
|-----|--------|---|
| mit | $c$    | Betondeckung der äußeren Längsbewehrung (bzgl. Staboberfläche)  |
|     | $k_b$  | Beiwert zur Berücksichtigung der Verbundeigenschaften der Bewehrung:<br>$k_b = 0,8$ für Stäbe mit guten Verbundeigenschaften<br>$(k_b = 1,6$ für Stäbe mit nahezu glatter Oberfläche) |
|     | $\phi$ | Stabdurchmesser der Betonstahlbewehrung   |

Dieser Bemessungsvorschlag erlaubt weiterhin die Begrenzung der Rissbreite bei Vorhandensein einer Oberflächenbewehrung (mit  $A_{s,surf} = 0,01 \cdot A_{ct,ext}$ , parallel und orthogonal zur Hauptbewehrung,  $\phi_{surf} = 8$  mm und  $c_v = 30$  mm). Für eine etwaige „gemischte“ Bewehrung aus unterschiedlichen Stabdurchmessern (Haupt- und Oberflächenbewehrung) ist gemäß Gl. 6-3 nach prEN1992-1-1 der Vergleichsstadtdurchmesser  $\phi_{eq}$  (identisch zu DIN EN 1992-1-1) zu berücksichtigen. Die Querschnittsfläche der Bewehrung ist dann als Summe aus der Haupt- und Oberflächenbewehrung zu bilden.

### 6.3.1.2 Nachweis zum Zeitpunkt $t = \infty$

Im Zuge der durchgeführten Bauteilversuche wurde ausschließlich kurzzeitige Einwirkungen (Betrachtung zum Zeitpunkt  $t = 0$ ) erfasst. Einflüsse infolge Kriechens und Schwindens des Betons zum Zeitpunkt  $t = \infty$  konnten vorliegend versuchstechnisch abgebildet werden.

Zwecks Überprüfung, inwieweit die auf der Oberfläche auftretenden Rissbreiten zum Zeitpunkt  $t = \infty$  für die vorliegenden hohen Bewehrungsgrade durch etwaige (zusätzliche) Zwangeinwirkungen infolge Kriechen und Schwinden vergrößert werden, wird hierzu nachfolgend eine Abschätzung vorgenommen. In diesem Zusammenhang werden die Serie 1 (mit Querstäben), 2 (ohne Querstäbe) und 4 (mit Querstäben und Oberflächenbewehrung) für  $\phi 40$  mm herangezogen. Es wird jeweils eine Stahlspannung  $\sigma_s$  in Höhe von 280 N/mm<sup>2</sup> angesetzt. Der Faktor  $k_t$  wird für eine langandauernde Einwirkung gemäß prEN1992-1-1 zu 0,4 (für die Nachrechnung zuvor  $k_t = 0,6$ ) festgelegt. Weiterhin werden die parallel zu den bauteilversuchen ermittelten Werkstoffeigenschaften (wie auch zuvor) berücksichtigt.

Die Berechnung der Dehnungsdifferenz erfolgt gemäß nachstehender Gleichung.

$$w_{k,cal} = s_{r,max,cal} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} + \eta_r \cdot \epsilon_{cs}) \quad \text{Gl. 6-4}$$

Die Schwinddehnung des Betons wird vereinfachend zu  $\epsilon_{cs} = 0,5$  ‰ festgelegt. Der Faktor  $\eta_r$  ist im vorliegenden Fall gemäß prEN1992-1-1 mit dem Faktor  $R_{ax}$  (beschreibt die Verformungsbehinderung) gleichzusetzen. Für das abgeschlossene Rissbild kann hier demnach  $R_{ax} = 0,75$  bei Betrachtung eines Wandfußes (verformungsbehinderte Wand auf zuvor erstellter Bodenplatte) angenommen werden. Inwieweit diese Annahme auch im vorliegend untersuchten zentrisch beanspruchten Zugstabes zutreffend ist, kann unter Zugrundelegung von prEN1992-1-1 nicht aufgeklärt werden. Vor diesem Hintergrund wird für die nachfolgende Vergleichsbetrachtung  $R_{ax}$  vereinfachend zu 0,50, 0,75 und 1,00 gewählt.

Vorliegend werden Betrachtungen für das abgeschlossene Rissbild vorgenommen. Eine Berechnung des Terms  $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} + \eta_r \cdot \varepsilon_{cs}$  für gezwängte Bauteile mit Rissbildung auf Erstrissniveau, wie sie auch in Gl. 2-16 dieser Arbeit dargelegt ist, wird daher nicht weiter verfolgt.

Einflüsse infolge Kriechens des Betons werden gemäß prEN1992-1-1 durch Ansatz des Faktors  $k_t$  zu 0,4 pauschal berücksichtigt.

Tab. 6-1: Vergleichsbetrachtung für die resultierende Rissbreite auf der Bauteiloberseite zu den Zeitpunkten  $t = 0$  und  $t \neq 0$

| t                             | Serie 1, $\phi 40$ mm | Serie 2, $\phi 40$ mm | Serie 4, $\phi 40$ mm |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| t = 0                         | 0,288 mm              | 0,298 mm              | 0,194 mm              |
| t $\neq$ 0<br>$R_{ax} = 0,50$ | 0,355 mm<br>(+ 23 %)  | 0,368 mm<br>(+ 23 %)  | 0,239 mm<br>(+ 23 %)  |
| t $\neq$ 0<br>$R_{ax} = 0,75$ | 0,383 mm<br>(+ 33 %)  | 0,397 mm<br>(+ 33 %)  | 0,258 mm<br>(+ 33 %)  |
| t $\neq$ 0<br>$R_{ax} = 1,00$ | 0,412 mm<br>(+ 43 %)  | 0,426 mm<br>(+ 43 %)  | 0,277 mm<br>(+ 43 %)  |

In voranstehender Tabelle sind die prozentualen Vergrößerungen der Oberflächenrissbreite bei Betrachtung von Einflüssen infolge Kriechen und Schwinden zum Zeitpunkt  $t = \infty$  in Klammern angegebenen.

Es ist zu erkennen, dass sich die Oberflächenrissbreite unter Berücksichtigung der o. g. Randbedingungen wesentlich vergrößert. Die Gültigkeit des an Versuchswerten (zum Zeitpunkt  $t = 0$ ) kalibrierten Modells kann demnach nicht uneingeschränkt auf Betrachtungen zum Zeitpunkt  $t \neq 0$  übertragen werden. Einflüsse infolge Kriechen und Schwinden sind demnach zu berücksichtigen. Inwieweit hier die getroffenen Annahmen zur Größe des Faktors  $R_{ax}$  zutreffend sind, muss offen bleiben und können anhand der vorliegenden Untersuchungsergebnisse nicht verifiziert werden.

### 6.3.2 Anordnung einer Oberflächenbewehrung ohne konkreten Nachweis

In prEN1992-1-1 sind auf derzeitigem Erkenntnisstand (Stand Oktober 2017) keine konkreten zusätzlichen Konstruktionsregeln für große Stabdurchmesser im Zusammenhang mit der rechnerischen Begrenzung der Rissbreite vorgesehen. Insgesamt wird auch die Begrifflichkeit „große Stabdurchmesser“ und damit eine Abgrenzung zu praxisüblichen Stabdurchmessern (in Anlehnung an DIN EN 1992-1-1) vorliegend in prEN1992-1-1 nicht weiter verfolgt.

Auf Grundlage der durchgeführten Versuche an mehrlagig, kreuzweise bewehrten Querschnitten mit einer randnah verlegten Oberflächenbewehrung ( $c_{v,surf} = 30$  mm,

$\phi_{\text{surf}} = 8 \text{ mm}$ , zugehörige Ergebnisse sind in Abb. 3-46 dargestellt) konnte nachgewiesen werden, dass ein Oberflächenbewehrungsgrad  $A_{\text{s,surf}} \geq 0,01 \cdot A_{\text{ct,ext}}$  (mit  $A_{\text{s,surf}}$  und  $A_{\text{ct,ext}}$  gemäß DIN EN 1992-1-1) parallel zur Hauptbewehrung ausreichend ist, um die sich auf der Bauteiloberfläche einstellenden Risse im Allgemeinen auf unschädliche Breiten ( $w_{\text{max}} < 0,30 \text{ mm}$ ) zu begrenzen. Dies konnte jeweils in gleicher Weise für die untersuchten Stabdurchmesser  $\phi 20 \text{ mm}$ ,  $\phi 28 \text{ mm}$  und  $\phi 40 \text{ mm}$  sowie für ein Stahlspannungsniveau bis  $360 \text{ N/mm}^2$  (bis  $280 \text{ N/mm}^2$  für  $\phi 40 \text{ mm}$ ) festgestellt werden.

Auf einen rechnerischen Nachweis der Rissbreite könnte vor diesem Hintergrund somit unabhängig vom betrachteten Stabdurchmesser verzichtet werden, wenn eine randnahe verlegte Oberflächenbewehrung mit  $A_{\text{s,surf}} \geq 0,01 \cdot A_{\text{ct,ext}}$  vorgesehen ist und der Rechenwert der Rissbreite  $w_{\text{max}} \geq 0,3 \text{ mm}$  beträgt. Die geforderte Oberflächenbewehrung  $A_{\text{s,surf}}$  ist dann jeweils parallel und orthogonal zur Hauptbewehrung (vgl. DIN EN 1992-1-1, Anhang J) einzulegen. Sofern ein höherer Oberflächenbewehrungsgrad mit  $A_{\text{s,surf}} \geq 0,02 \cdot A_{\text{ct,ext}}$  vorgesehen und der Rechenwert der Rissbreite  $w_{\text{max}} \geq 0,2 \text{ mm}$  ist, dürfte gemäß Schäfer 2016 ebenfalls auf einen rechnerischen Nachweis der Rissbreite verzichtet werden.

Durch die eingelegte Oberflächenbewehrung sind ebenfalls Risse parallel zur Hauptbewehrung zu begrenzen, welche in Bereichen großer Verbundspannungen (z. B. infolge einer Änderung der Stahlzugkraft, Vorzeichenwechsel des Biegemoments) und – im Vergleich zur Hauptbewehrung – sehr niedrigen Querbewehrungsgraden entstehen können. Diesbezüglich weist DIN EN 1992-1-1 einen Oberflächenbewehrungsgrad  $A_{\text{s,surf}} \geq 0,01 \cdot A_{\text{ct,ext}}$  orthogonal zur Hauptbewehrung aus, während in DIN EN 1992-1-1/NA  $A_{\text{s,surf}} \geq 0,02 \cdot A_{\text{ct,ext}}$  gefordert werden. In Schäfer 2016 konnte in diesem Zusammenhang jedoch gezeigt werden, dass die Festlegung in DIN EN 1992-1-1/NA diesbezüglich sehr konservativ ist. Anhand der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zum Einfluss etwaig vorhandener Längsrisse (Serie 3) konnte in diesem Zusammenhang festgestellt werden, dass auftretende Längsrisse durch die vorhandene Querbewehrung auf eine geringe Breite begrenzt werden.

### 6.4 Validierung und Aussage zur Modellzuverlässigkeit

Für den hier in Rede stehenden Bemessungsvorschlag zur rechnerischen Begrenzung der Rissbreite nach prEN1992-1-1 liegen bisher keine fundierten allgemeingültigen Erfahrungswerte zur Vorhersagegenauigkeit vor.

Eine vorläufige Validierung des Bemessungsvorschlags kann nachfolgend lediglich durch eine grafische Gegenüberstellung der im Zuge dieser Arbeit experimentell bestimmten Versuchswerte  $w_{0,75}$ ,  $w_m$  und  $w_{\text{max}}$  mit den Rechenwerten  $w_{\text{k,cal}}$  (in Ergänzung zu Abschnitt 5.5) erfolgen.

Wie der nachstehenden Abbildung nochmals prägnant zu entnehmen ist, werden insgesamt mit dem Berechnungsansatz nach prEN1992-1-1 hinreichend gute Vorhersagegenauigkeiten der sich an der Bauteiloberfläche einstellenden Rissbreiten ermöglicht.

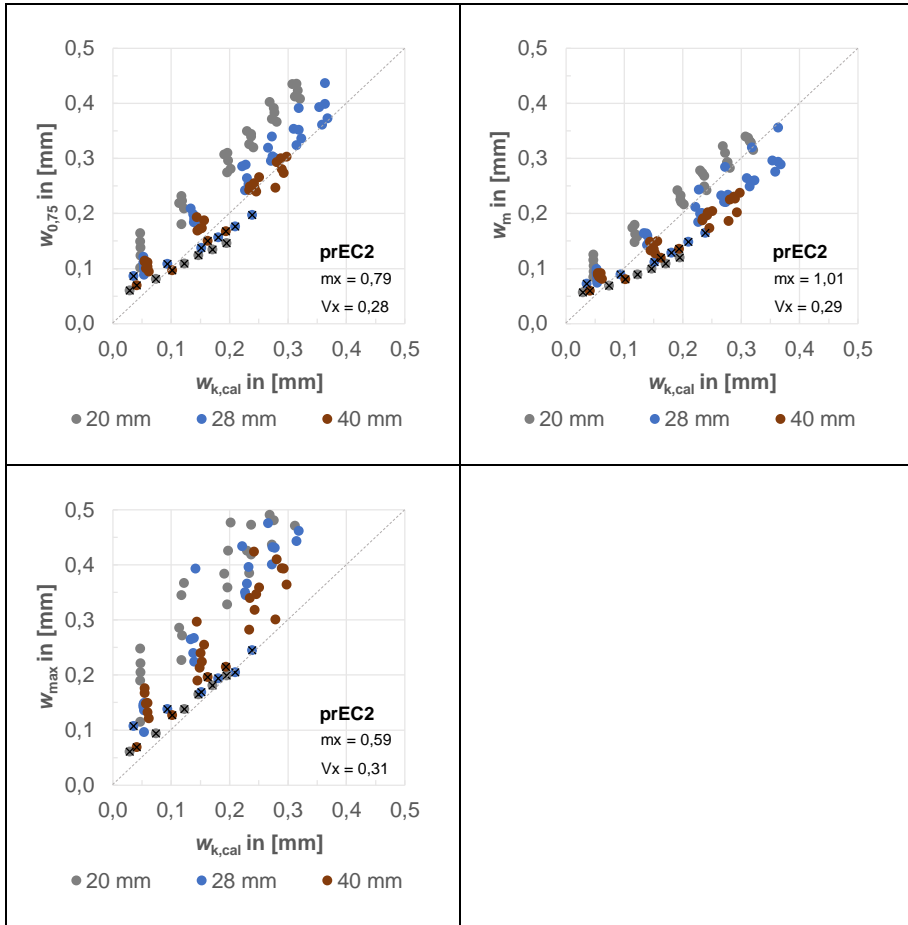


Abb. 6-1: Gegenüberstellung von Versuchswerten  $w_{0,75}$ ,  $w_m$  und  $w_{max}$  mit Rechenwerten  $w_{k,cal}$

## 6.5 Zusammenfassung

Unter Einbezug der Ergebnisse der Nachrechnung muss festgestellt werden, dass Modifikationen der Bemessungsgleichungen gemäß den derzeit bauaufsichtlich eingeführten Regelwerken DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA für die hier untersuchten Querschnittskonzeptionen mit mehrlagig, kreuzweise angeordneter Bewehrung zu empfehlen sind, um eine realitätsnähere rechnerische Vorhersage der zu erwartenden Rissbreiten sicherzustellen.

Auf Grundlage der eigenen, sehr umfangreichen Versuchsnachrechnung und den hieraus abgeleiteten Ergebnissen zur Vorhersagegenauigkeit unterschiedlicher Ingenieur- und Bemessungsmodelle kann befunden werden, dass der Bemessungsansatz gemäß prEN1992-1-1 hinreichend gute Übereinstimmungen mit den Versuchsergebnissen liefert. Es kann nachvollziehbar begründet werden, dass das Verfahren zum Zeitpunkt  $t = 0$  angewendet werden kann und es zudem keine Anpassung diesbezüglich bedarf.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung der Vorgehensweise

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgenommenen theoretischen und experimentellen Untersuchungen zum Rissverhalten von mehrlagig bewehrten Stahlbetonbauteilen werden nachfolgend im gebotenen Umfang und in Anlehnung an Abb. 1-2 nochmals wie folgt stichpunktartig zusammengefasst:

- Theoretische Überlegungen und kritische Beleuchtung des Standes von Wissenschaft und Technik:
  - Definition der (rechnerischen) Rissbreite  $w_k$  gemäß DIN EN 1992-1-1 und Verortung im Querschnitt. Darlegung der Kontroversen im Hinblick auf die rechnerische Rissbreite und die am Bauteil baupraktisch üblich zu messende Oberflächenrissbreite.
  - Kritische Auseinandersetzung mit der Fragestellung, ob etwaig auftretende Risse mehrlagig kreuzweise bewehrter Massivbauteile mit großen Stabdurchmessern mit den derzeit zur Verfügung stehenden Bemessungskonzepten näherungsweise rechnerisch vorausbestimmt werden können. Dies insbesondere vor dem Hintergrund, dass aktuelle normative Nachweise vorwiegend an einfach zentrisch bewehrten Versuchsquerschnitten mit „kleinen“ Stabdurchmessern (üblicherweise  $\phi 6$  mm bis  $\phi 14$  mm) hergeleitet wurden.
  - Gegenüberstellung von Berechnungskonzepten ausgewählter Bemessungs- und Ingenieurmodelle zur (rechnerischen) Begrenzung der Rissbreite und Stellungnahme zu deren Vorhersagegenauigkeit. Zusammenstellung notwendiger und erforderlicher Vorgehensweisen zur Umsetzung des angestrebten Vergleichs zwischen Rechenwert der Rissbreite und einer am Bauteil gemessenen Oberflächenrissbreite.
  - Zusammenstellung der gegenwärtig gemäß DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA zu berücksichtigenden zusätzlichen Regeln für große Stabdurchmesser ( $\phi_{\text{large}} > \phi 32$  mm).
  - Darlegungen zur Herleitung von Berechnungsgleichungen ausgewählter Bemessungs- und Ingenieurmodelle und deren Vorhersagegenauigkeit zwecks Festlegung geeigneter Fraktilwerte und Verteilungsformen im Rahmen statistischer Auswertungen zur Rissbreite und Rissabstand.
- Durchführung experimenteller Untersuchungen in Form von zentrischen Dehnkörperversuchen zum Rissverhalten mehrlagig bewehrter Bauteile und systematische Erfassung der Rissbreite, des Rissabstandes sowie der Eintrittsreihenfolge und des Rissverlaufs. In diesem Zusammenhang wurden die folgenden Einflussfaktoren auf die Rissbildung variiert:
  - Stabdurchmesser ( $\phi 20$  mm,  $\phi 28$  mm und  $\phi 40$  mm),
  - Querbewehrung (einschl. Variation des Querstababstandes),

- Oberflächenbewehrung (einschl. Variation des Randabstandes),
- Betondruckfestigkeit (C30/37 und C50/60).
- Statistische Auswertung der Versuchsergebnisse (Rissbreite, Rissabstand) und Zusammenstellung dieser Ergebnisse in einer Versuchsdatenbank (dieser Arbeit als Anhang B und C beigelegt).
- Orientierende numerische Untersuchungen mit dem nicht linearen Finite-Elemente Programm Atena zwecks Validierung des in den Bauteilversuchen erkennbaren Trag- und Verformungsverhaltens.
- Nachrechnung der Versuchsergebnisse mit ausgewählten Ingenieur- und Bemessungsmodellen zwecks Abschätzung der jeweiligen Güte der rechnerischen Vorhersagegenauigkeit.
- Formulierung von Empfehlungen zur Modifikation der Bemessungsgleichungen nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA, um eine realitätsnähere rechnerische Vorhersage der zu erwartenden Rissbreiten für Querschnittskonzeptionen mit mehrlagig, kreuzweise angeordneter Bewehrung sicherzustellen.

### 7.2 Fazit

Als Fazit dieser Arbeit können die insgesamt festgestellten theoretischen und experimentellen Ergebnisse wie folgt zusammenfassend wiedergegeben werden:

- Ergebnisse der theoretischen Überlegungen:
  - Der Rechenwert der Rissbreite  $w_k$  nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA stellt einen charakteristischen Wert dar, der nachweislich nicht der Rissbreite an der Bauteiloberfläche, sondern einem Mittelwert über den Wirkungsbereich der Bewehrung entspricht. Vor diesem Hintergrund ist es angezeigt, dass für einen direkten Vergleich von Mess- und Rechenwerten im Zuge der Kalibrierung und Validierung von Bemessungsgleichungen zunächst eine gemeinsame „Betrachtungsbasis“ zu schaffen ist, um die bekanntermaßen vorhandene Rissaufweitung zur Oberfläche hin (bei Biegebeanspruchung ist dieser Effekt im Vergleich zu zentrischem Zug wesentlich ausgeprägter) entsprechend zu berücksichtigen.
  - Der Rechenwert  $w_k$  der Rissbreite nach DIN EN 1992-1-1/NA kann insgesamt als ein 70–90 %-Fraktilewert (je nach betrachteter Größenordnung der Rissbreite) für die am Bauwerk auftretende Rissbreite aufgefasst werden.
  - Im Zuge der statistischen Auswertung wird insgesamt unterstellt, dass die vorliegend experimentell ermittelten Rohdaten (Rissbreite und Rissabstand) jeweils normalverteilt sind. Im Hinblick auf eine Gegenüberstellung der Versuchswerte mit Rechenwerten wird das 75 %-Fraktile der Rissbreite  $w_{0,75}$  als zutreffend angesehen.

- Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen:
  - Insgesamt ist festzustellen, dass eine randnah angeordnete Oberflächenbewehrung ( $c_{\text{nom,surf}} = 30 \text{ mm}$ ) aus dünnen Stabdurchmessern (hier  $\phi 8 \text{ mm}$ ) unabhängig vom jeweils betrachteten Stabdurchmesser der Hauptbewehrung höchst wirksam ist. Anhand der Bauteilversuche der Serie 4 konnten für alle betrachteten Stabdurchmesser (auch für diejenigen mit  $\phi < \phi_{\text{large}}$ ) für Stahlspannungen  $\sigma_s \leq 280 \text{ N/mm}^2$  Rissbreiten  $w_{0,75} < 0,20 \text{ mm}$  (gemessen auf der Bauteiloberfläche) aufgenommen werden.
  - Wird die Oberflächenbewehrung dagegen in der gleichen Ebene wie die Hauptbewehrung angeordnet ( $c_{\text{nom,surf}} = 60 \text{ mm}$ ), so ist deren rissbreitenbeschränkende Wirkung nicht mehr feststellbar. Es ergeben sich annähernd doppelt so große (mittlere) Rissbreiten als bei einer randnah angeordneten Oberflächenbewehrung. Vor diesem Hintergrund sollten – sofern die Oberflächenbewehrung nicht direkt auf der Hauptbewehrung abgelegt werden kann – zwischen Hauptbewehrung und Oberflächenbewehrung Montagestäbe (als Abstandhalter) angeordnet werden, um deren Wirkungsweise sicherzustellen.
  - Im Hinblick auf eine normativ für große Stabdurchmesser  $\phi_{\text{large}}$  vorzusehende Oberflächenbewehrung konnte befunden werden, dass auch ein gegenüber DIN EN 1992-1-1/NA reduzierter Oberflächenbewehrungsgrad  $A_{s,\text{surf}} = 1 \%$  von  $A_{\text{ct,ext}}$ , (für  $\phi > \phi_{\text{large}}$ ) parallel und orthogonal zur Hauptbewehrung ausreichend ist, um auftretende Risse auf der Bauteiloberfläche fein zu verteilen und in ihrer Breite zu beschränken.
  - Im Hinblick auf eine fallweise eingelegte Querstabbewehrung ist nicht zu erkennen, dass diese das Rissbild auf der Bauteiloberfläche beeinflusst und diesbezüglich somit als „Sollbruchstelle“ fungiert. Auch werden für Serie 1 und Serie 2 (ohne Querbewehrung) annähernd gleiche Rissbreiten  $w_{0,75}$  auf der Bauteiloberseite erreicht. Eine enggestaffelte Querbewehrung (Serie 1.2) forciert tendenziell kleinere Rissbreiten als eine mit größerem Stababstand verlegte Querbewehrung (Serie 1.1). Ein zusätzlicher Einfluss des Stabdurchmessers kann vorliegend nicht erkannt werden.
  - Auf der Bauteiloberfläche treten unabhängig vom Stabdurchmesser und für jeweils gleiche Stahlspannungen Rissbreiten in annähernd gleicher Größenordnung auf, sodass an dieser Stelle die Erwartung nicht bestätigt werden kann, wonach sich für größere Stabdurchmesser auch tendenziell größere Rissbreiten einstellen. Es ist jedoch in diesem Zusammenhang anzumerken, dass sich die Bewehrungsgrade der hier untersuchten Versuchskörper mit den Stabdurchmessern  $\phi 20 \text{ mm}$ ,  $\phi 28 \text{ mm}$  und  $\phi 40 \text{ mm}$  der Hauptbewehrung jeweils deutlich unterscheiden, sodass eine direkte Vergleichbarkeit vorliegend nicht uneingeschränkt möglich ist und hierdurch auch die obige Feststellung nicht pauschaliert werden kann. Im Hinblick auf die bezogene Rippenfläche  $f_R$  der verwendeten Stahlbewehrung, welche als etwaiger Einflussfaktor in dem obigen Befund ebenfalls

miteinzubeziehen ist, stellt es sich so dar, dass für die Stabdurchmesser  $\phi 28$  mm und  $\phi 40$  mm nahezu identische Werte für  $f_R$  vorliegen. Für den Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm wurde mit der verwendeten Bewehrung dagegen eine um ca. 15 % größere bezogene Rippenfläche  $f_R$  einbezogen. Gegebenenfalls ist somit auch die Geometrie der Bewehrungsoberfläche ursächlich für die hier formulierte Beobachtung, wonach größere Stabdurchmesser nicht zwingend größere Rissbreiten auf der Bauteiloberfläche bedingen. Für die seitlichen Bauteilflächen („Bauteilinneres“) kann indes beobachtet werden, dass die Rissbreiten mit zunehmendem Stabdurchmesser erwartungsgemäß anwachsen.

- Ergebnisse der numerischen Untersuchungen: Das Trag- und Verformungsverhalten der unter zentrischer Zugeinwirkung stehenden Stahlbetonbauteile wurde vorliegend mit 2D- und 3D-Elementen nachvollzogen. Die vorliegenden Simulationsergebnisse wurden im Hinblick auf qualitative (z. B. Erscheinungsbild und Verlauf auftretender Risse) und quantitative (z. B. Größe der Rissbreite) Merkmale den Ergebnissen der Bauteilversuche gegenübergestellt.
  - Insgesamt kann festgestellt werden, dass sich im Zuge der numerischen Untersuchungen Rissbreiten ( $w_m$  und  $w_{max}$ ) in befriedigender Übereinstimmung mit den Bauteilversuchen einstellen.
  - Das sich in den Simulationen einstellende Rissbild (Bauteiloberfläche und Bauteilseitenfläche) entspricht nicht uneingeschränkt demjenigen der Bauteilversuche. Insgesamt ist eine größere Rissanzahl festzustellen und durch eine fallweise vorhandene Querbewehrung werden die auftretenden Risse erkennbar durch diese forciert.
  - Das Trag- und Verformungsverhalten wurde in einer groben Detaillierungsebene abgebildet und es mussten im Zuge dessen zwangsläufig Geometrie-, Werkstoff- und Systemvereinfachungen vorgenommen werden. Es konnte festgestellt werden, dass die Simulationsergebnisse von zahlreichen modell- und werkstoffbezogenen Einflussfaktoren abhängig sind, sodass die Aussagegenauigkeit des hier zugrunde gelegten FE-Modells kritisch zu hinterfragen ist.
  - Das im Rahmen der Bauteilversuche erkennbaren Trag- und Verformungsverhalten konnte anhand der theoretischen Betrachtungen verifiziert werden.
- Ergebnisse der Nachrechnung: Die Güte der rechnerischen Vorhersagegenauigkeit ausgewählter Ingenieur- und Bemessungsmodelle wurde auf Grundlage einer Gegenüberstellung von Versuchswerten mit den Ergebnissen einer Nachrechnung überprüft.
  - Die Bemessungsgleichungen nach DIN EN 1992-1-1 liefern für alle betrachteten Stabdurchmesser überwiegend konservative Rechenwerte und überschätzen somit die in den experimentellen Untersuchungen erzielten Rissbreiten  $w_m$  und  $w_{0,75}$ .



- Das Bemessungsmodell gemäß DIN EN 1992-1-1/NA erlaubt vor dem Hintergrund, dass die Rechenwerte der Rissbreite  $w_{k,cal}$  die Versuchsergebnisse  $w_m$  und  $w_{0,75}$  unabhängig vom betrachteten Stabdurchmesser deutlich unterschreiten, keine zuverlässige Berechnung der Rissbreiten auf der Bauteiloberfläche bei fehlender Oberflächenbewehrung. Für das Bauteilinnere konnte dagegen festgestellt werden, dass die Versuchsergebnisse in den nach EC2/NA zu erwartenden Größenordnungen liegen.
- Das Bemessungsmodell nach prEN1992-1-1 (die Rechenwerte stellen hier definitionsgemäß rechnerische Oberflächenrissbreiten dar) zeigt insbesondere bei Zugrundelegung mittlerer Versuchswerte  $w_m$ , unabhängig vom verwendeten Stabdurchmesser oder einer etwaig vorhandenen Oberflächenbewehrung, eine hinreichend gute Übereinstimmung. Bei der Berücksichtigung von Fraktilwerten  $w_{0,75}$  der Rissbreite kann besonders für große Stabdurchmesser  $\phi 40$  mm (ohne Oberflächenbewehrung) eine gute Übereinstimmung mit den Rechenwerten befunden werden. Nachrechnungen unter Einbeziehung von Bauteilen mit einer Oberflächenbewehrung liegen stets auf der sicheren Seite.
- Mit dem Modifikationsansatz nach Eckfeldt 2005 gelingt es, rechnerische Rissbreiten  $w_k$  nach DIN EN 1992-1-1/NA in rechnerische Oberflächenrissbreiten  $w_{k,surf}$  zu überführen und somit eine entsprechende Rissaufweitung zu berücksichtigen und eine „gemeinsame“ Betrachtungsbasis für den Vergleich von Mess- und Rechenwert zu schaffen. In der Folge wird die Vorhersagegenauigkeit des Bemessungsmodells nach DIN EN 1992-1-1/NA erheblich verbessert. Jedoch ist der in Rede stehende Überführungsansatz vage und insgesamt nur bedingt praxistauglich.
- Vorschlag zur Umsetzung der Rissbreitenbegrenzung in der Praxis: Unter Einbezug der Ergebnisse der Nachrechnung muss festgestellt werden, dass Modifikationen der Bemessungsgleichungen gemäß DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA für Querschnittskonzeptionen mit mehrlagig, kreuzweise angeordneter Bewehrung zu empfehlen sind, um eine realitätsnähere rechnerische Vorhersage der zu erwartenden Rissbreiten sicherzustellen. Hinsichtlich der auf Grundlage der eigenen Versuchsnachrechnung zum Zeitpunkt  $t = 0$  gewonnenen Erkenntnisse zur Vorhersagegenauigkeit konnte befunden werden, dass sich insgesamt das Bemessungsmodell nach prEN1992-1-1 hinreichend gut eignet. Die Gültigkeit des an Versuchswerten (zum Zeitpunkt  $t = 0$ ) kalibrierten Modells kann jedoch nicht uneingeschränkt auf Betrachtungen zum Zeitpunkt  $t \neq 0$  übertragen werden. Einflüsse infolge Kriechen und Schwinden sind hier zu berücksichtigen. Festlegungen zum Faktor  $R_{ax}$  gemäß prEN1992-1-1 sind in diesem Zusammenhang noch zu konkretisieren. An dieser Stelle sei auch darauf hingewiesen, dass der Entwurf zur Neufassung des Eurocodes 2 bisweilen weiter fortgeschrieben wurde.

### 7.3 Ausblick und offene Fragen

Auf derzeitigem Erkenntnisstand verbleiben u. a. noch die nachfolgenden offenen Fragen, die Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter aufgeklärt werden konnten:

- Wie können Ergebnisse der Rissbreitenuntersuchungen systematisch statistisch ausgewertet werden?

Um eine qualifizierte Aussage über die rechnerische Vorhersagegenauigkeit eines Bemessungsmodells treffen zu können, müssen charakteristische Werte (Fraktile) der Rissbreite mit Rechenwerten der Rissbreite gegenübergestellt werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde in diesem Zusammenhang aufgezeigt, dass die entwickelten Fraktile in hohem Maße von den Randbedingungen der statistischen Auswertung (u. a. Auswerteverfahren, Fraktile, Verteilung der Rohdaten) abhängen und dadurch insgesamt große Ergebnisspannweiten resultieren. Vor diesem Hintergrund sind Versuchsnachrechnungen zur Validierung von Rechenmodellen oder etwaige Bemessungsvorschläge jeweils nur ganzheitlich im Zusammenhang mit den Bauteilversuchen und deren zugehörigen Auswertung zu betrachten. Um konkrete, allgemeingültige Vorschläge für die statistische Auswertung von Rissbreiten formulieren zu können, sind jedoch weitergehende Untersuchungen unter Einbeziehung entsprechender Datenbanken angezeigt.

- Welcher konkrete Fraktile kann dem Rechenwert der Rissbreite  $w_k$  gemäß prEN1992-1-1 zugemessen werden?

Bisher fehlen diesbezüglich fundierte Erfahrungswerte in Anlehnung an Abb. 2-20. In diesem Zusammenhang ist es daher erforderlich, dass vorhandene Rissbreitendatenbanken unter Berücksichtigung des Bemessungsansatzes ausgewertet werden und die im Rahmen dieser Arbeit getroffene Annahme (75 %-Fraktile  $w_{0,75}$ ) verifiziert wird. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der Entwurf zur Neufassung des Eurocodes 2 bisweilen weiter fortgeschrieben wurde. Demnach wurde nun ein Erhöhungsfaktor  $\beta_w$  eingeführt, mithilfe dessen der Rechenwert dann einem konkreten Fraktile zugeordnet werden kann. Unter Berücksichtigung eines Faktors  $\beta_w=1,25$  (für das 75 %-Fraktile) würde die rechnerische Vorhersagegenauigkeit einen Mittelwert  $m_x = 0,99$  (zuvor  $m_x = 0,79$ ) unter Zugrundelegung des vorliegenden Datensatz annehmen.

- Welchen Einfluss hat die Betondeckung der großen Stabdurchmesser auf das Rissgeschehen?

Im vorliegenden Fall wurde für eine Hauptbewehrung bestehend aus  $\phi 40$  mm eine praxisübliche Betondeckung in Höhe von 60 mm vorgesehen. Es sind weitere Bauteilversuche notwendig, in denen die Betondeckung der Haupt-

bewehrung variiert (d. h. vergrößert und verkleinert) wird. Dies ist insbesondere deshalb notwendig, da die Betondeckung in den Bemessungsgleichungen nach prEN1992-1-1 im Rahmen der Berechnung des Rissabstandes direkt berücksichtigt wird.

- Wie wird das Rissgeschehen durch eine Variation des Bewehrungsgrades beeinflusst?

In diesem Zusammenhang sind Bauteilversuche mit gleichen Querschnittsabmessungen und variierenden Bewehrungsgraden durchzuführen. Für die hier untersuchten Querschnittskonzeptionen (mit jeweils unterschiedlichen Bewehrungsgraden) konnte befunden werden, dass große Stabdurchmesser ( $\phi 40$  mm) im Vergleich zu den praxisüblichen Stabdurchmessern ( $\phi 20$  mm und  $\phi 28$  mm) nicht zwangsläufig größere Rissbreiten bedingen. Um einen etwaigen Einfluss der Oberfläche des Bewehrungsstabes hierbei auszuschalten, sollten nach Möglichkeit zunächst Bewehrungsstäbe verschiedenen Stabdurchmessers mit vergleichbarer bezogener Rippenfläche verwendet werden.

- Zwecks Überprüfung, inwieweit die festgestellten Ergebnisse durch die Rippengeometrie der Stahlbewehrung beeinflusst werden und inwieweit eine Übertragbarkeit auf Stähle anderer Rippengeometrie (ggf. auch außerhalb der DIN 488-1 und DIN 488-2) möglich ist, sind entsprechende Verifizierungsversuche durchzuführen.
- Wie stellt sich der Trennrissverlauf eines mehrlagig, kreuzweise bewehrten Stahlbetonquerschnitts dar und wie kann die Rissaufweitung hin zur Bauteiloberfläche geometrisch erfasst werden?

Insgesamt ist es vor dem Hintergrund einer diesbezüglich nur sporadisch vorhandenen Literaturliteraturdatenbank angezeigt, dass der Rissverlauf entlang der Betonüberdeckung bei unterschiedlichen Stahlspannungsniveaus noch weiter zu untersuchen ist.

- Welchen Einfluss kann einer kombinierten Beanspruchung aus Biegung mit Längszugkraft auf das Rissgeschehen zugemessen werden?

Im Zuge einer Biegebeanspruchung stellt sich eine Rissaufweitung zur Oberfläche hin (verstärkt bei großen Betonüberdeckungen) wesentlich ausgeprägter dar.

- Wie beeinflussen Effekte aus zweiachsender Plattentragwirkung infolge Querzugspannungen das Rissgeschehen mehrlagig, kreuzweise bewehrter Stahlbetonquerschnitte?

Etwaig im Bauteil auftretende, längsrissauslösende Querzugspannungen konnten im Rahmen der hier betrachteten Serie 3 mit innerhalb der Betondeckung angeordneten Rissblechen nicht aussagekräftig erfasst werden.

- Wie beeinflussen Effekte aus langeinwirkender Wechselbeanspruchung das Rissgeschehen mehrlagig, kreuzweise bewehrter Stahlbetonquerschnitte?

In Schäfer 2016 wurden bereits die Auswirkung einer zyklischen Beanspruchung auf einlagig bewehrte Bauteile untersucht und es wurde in diesem Zusammenhang festgestellt, dass eine Wechselbeanspruchung eine (mittlere) Riss-auf-weiterung in Höhe von ca. 30 % bedingt. Ob eine Rissaufweiterung in gleicher Größenordnung auch für mehrlagig, kreuzweise bewehrter Stahlbetonquerschnitte zutrifft, gilt es zu überprüfen.

## Schriftum

- Alff 2020** Alff, K.: Numerische Simulationen zum Trag- und Verformungsverhalten eines Stahlbetonzugstabes; Studienarbeit am Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion der TU Kaiserslautern, unveröffentlicht, betreut durch Breit, F., Kaiserslautern, 2020.
- ACI 318-14** American Concrete Institute, ACI 318-14: Building Code Requirements for Structural Concrete, 09.2014.
- Bazant et. al. 1983** Bazant, Z. P.; Oh B. H.: Crack band theory for fracture of concrete, in: Materials and Structures 93, 1983, 16, S. 155–177.
- Beeby 1978** Beeby, A. W.: Cracking: what are cracks width limits for?, in: Concrete, 1978, S. 31–33.
- Bergmeister 1999** Bergmeister, K.: Risse im Konstruktionsbeton, in: Beton- und Stahlbetonbau 94, 1999, 6, S. 245–253.
- Borosnyói et al. 2010** Borosnyói, A.; Snóbli, I.: Crack width variation within the concrete cover of reinforced concrete members; Budapest University of Technology and Economics, Dept. of Construction Materials and Engineering Geology, in: Építőanyag, 62. évf. 3. szám 3/2010, 2010, S. 70–74.
- Breit et al. 2018** Breit, F.; Schnell, J.: Große Stabdurchmesser und hohe Bewehrungsgrade; Teil 2: Rissbreitenbeschränkung und erforderliche Oberflächenbewehrung, in: Beton- und Stahlbetonbau 113, 2018, H. 11, S. 768–778.
- CSA-A23.3** Canadian Standards Association, A23.3-04: Design of concrete structures; einschl. Update No. 2, 07.2004.

- prEN1992-1-1** CEN/TC 250, prEn1992-1-1:2017-10: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures; Second complete interim draft of October 2017 by the Project Team SC2.T1 working on Phase 1 of the CEN/TC 250 work programme under Mandate M/515, 10.2017.
- Cervenka Consulting** Cervenka Consulting: Atena Programm Documentation; Part 1, 2-2, 4-6, 6, 8, 11, 2018 (u. a.).
- MC 2010** Comité Euro-International du Béton, CEB-FIB Model Code 2010: fib Model Code for Concrete Structures 2010, Lausanne, Schweiz, Ernst & Sohn, 2010.
- MC 1990** Comité Euro-International du Béton, CEB-FIB Model Code 1990: CEB-FIB Model Code 1990, London, Großbritannien, Thomas Telford Services Ltd, 1990.
- DAfStb 400 1994** Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. - Heft 400: Erläuterungen zu DIN 1045 Beton und Stahlbeton, Ausgabe 07.88, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 1994.
- DAfStb 466 1996** Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. - Heft 466: Grundlagen und Bemessungshilfen für die Rißbreitenbeschränkung im Stahlbeton und Spannbeton; Kommentare, Hintergrundinformationen und Anwendungsbeispiele zu den Regelungen nach DIN 1045, EC2 und Model Code 90, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 1996.
- DAfStb 525 2003** Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. - Heft 525: Erläuterungen zu DIN 1045-1, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 2003.
- DAfStb 600** Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. - Heft 600: Erläuterungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-

1/NA (Eurocode 2), Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 2012.

- DAfStb 630** Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. - Heft 630: Bemessung nach DIN EN 1992 in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 2018.
- DBV 2019** Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.: DBV-Heft 38; Begrenzung der Rissbildung im Stahlbeton- und Spannbetonbau - Hintergründe und Erläuterungen zum DBV-Merkblatt, Eigenverlag, 2019.
- DBV 1996** Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.: DBV-Merkblatt; Begrenzung der Rissbildung im Stahlbeton- und Spannbetonbau, Eigenverlag, 09.1996.
- DBV 2006** Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.: DBV-Merkblatt; Begrenzung der Rissbildung im Stahlbeton- und Spannbetonbau, Eigenverlag, 01.2006.
- DBV 2016** Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.: DBV-Merkblatt; Begrenzung der Rissbildung im Stahlbeton- und Spannbetonbau, Eigenverlag, 05.2016.
- Rundschreiben 242** Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.: Rundschreiben 242; Was hat die Festlegung  $f_{cteff} \leq 0,5 f_{ctm}$  mit Rissen in Betonbauteilen zu tun?, Eigenverlag, 09.2014.
- DIN 488-1** Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 488-1:2009-08: DIN 488-1:2009-08: Betonstahl - Teil 1: Stahlsorten, Eigenschaften, Kennzeichnungen, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 08.2009.

- DIN EN 12390-13** Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 12390-13:2014-06: DIN EN 12390-13:2014-09: Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul); Deutsche Fassung EN 12390-13:2013, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 06.2014.
- DIN 1045-1 2001** Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 1045-1:2001-07: DIN 1045-1:2001-07: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 07.2001.
- DIN ISO 16269-6** Deutsches Institut für Normung e. V., DIN ISO 16269-6: DIN ISO 16269-6: Statistische Auswertungen von Daten - Teil 6: Ermittlung von statistischen Anteilsbereichen (ISO 16269-6:2005); (zurückgezogen), Berlin, Beuth Verlag GmbH, 10.2009.
- DIN EN 12390-3** Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 12390-3:2009-07: DIN EN 12390-3:2009-07: Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2009 mit Berichtigung zu DIN EN 12390-3:2009-07, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 07.2009.
- DIN EN 1992-1-1** Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 1992-1-1:2011-01: 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 A1-Änderung:2015-03, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 01.2011.
- DIN EN 12390-6** Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 12390-6:2010-09: DIN EN 12390-6:2010-09: Prüfung von Festbeton - Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-6:2009, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 09.2010.



- DIN 488-2** Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 488-2:2009-08: DIN 488-2:2009-08: Betonstahl - Betonstabstahl, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 08.2009.
- DIN EN 1990** Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 1990:2010-12: Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 +A1:2005/AC:2010, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 12.2010.
- DIN 1045 1988** Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 1045:1988-07: DIN 1045:1988-07: Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 07.1988.
- DIN 1045-1 2008** Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 1045-1:2008-08: DIN 1045-1:2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 08.2008.
- DIN 1045 1959** Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 1045:1959-11: DIN 1045:1959-11: Bauwerke aus Stahlbeton, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 11.1959.
- DIN 1045 1972** Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 1045:1972-01: DIN 1045:1972-01: Beton- und Stahlbetonbau, Bemessung und Ausführung - DIN 1045, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 01.1972.
- DIN EN 1992-1-1/NA** Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; mit A1-Änderung:2015-12, Berlin, Beuth Verlag GmbH, 04.2013.
- abZ Z-1.5-200** DIBt: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-1.5-200, Mechanische Verbindungen und Verankerungen von

Betonstabstahl B500B mittels Schraubmuffen,  
Nenndurchmesser: 10 bis 40 mm; "System Lenton World  
wide" und "System Lenton", 01.04.2019.

**Eckfeldt 2009** Eckfeldt, L.: Verbesserung der Vorhersage-qualität von sehr  
kleinen Rissbreiten; Schlussbericht des  
Forschungsvorhabens im Auftrag des DIBt, Fraunhofer-IRB-  
Verlag, Stuttgart, 2009.

**Eckfeldt 2003** Eckfeldt, L.: Der Fraktilwert von Rissbreitenberechnungs-  
modellen (und andere Mysterien), in: 1. Dresdner  
Probabilistik-Symposium - Sicherheit und Risiko im  
Bauwesen, 2003, 1, S. 139–186.

**Empelmann et al. 2018a** Empelmann, M.; Busse, D.: Vergleich von  
normativen Modellen zur Berechnung der Rissbreite, in:  
Beton- und Stahlbetonbau 113, 2018, H. 4, S. 298-306.

**Empelmann et al. 2015b** Empelmann, M.; Krakowski, W.: Erweitertes  
Modell zur Berechnung der Rissbreite, in: Beton- und  
Stahlbetonbau 110, 2015, H. 7, S. 458–467.

**Empelmann et al. 2015a** Empelmann, M.; Sawicki, P.; Busse, D.:  
Vergleich der Nachweiskonzepte zur  
Rissbreitenbegrenzung nach EN 1992-1-1, DIN EN 1992-1-  
1/NA sowie Model Code 2010 (Deutsche Fassung); Bericht  
Nr. P02-19-1, 2015.

**Lenton 2005** Erico: Produktkatalog Lenton, Stand 2005.

**Fingerloos et al. 2016** Fingerloos, F.; Hegger, J.; Zilch, K.: Eurocode 2 für  
Deutschland; DIN EN 1992-1-1 Bemessung und  
Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken -  
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den  
Hochbau mit Nationalem Anhang, 2., überarbeitete Auflage  
2016, Beuth; Ernst & Sohn, Berlin, Wien, Zürich, Berlin,  
2016.

- Fischer 1995** Fischer, L.: Bestimmung des 5%-Quantils im Zuge der Bauwerksprüfung; Bezugnahme auf DIN-Normen und Eurocodes, in: Bautechnik 72, 1995, 11, S. 712–722.
- Grübl et al. 2001** Grübl, P.; Weigler, H.; Karl, S.: Beton; Arten, Herstellung und Eigenschaften, 2. Aufl., Ernst, Berlin, 2001.
- Hegger et al. 1994** Hegger, J.; Pullmann, H.: Bauausführung des Hochhauses "Trianon" in Frankfurt am Main, in: Beton- und Stahlbetonbau 98, 1994, H. 6, S. 159–165.
- Schlussbericht 2018** Hegger, J.; Schoening, J.; Schnell, J.; Breit, F.; Empelmann, M.; Held, F.: Schlussbericht zum IGF-Vorhaben 18821 N; Bemessungs- und Konstruktionsregeln bei großen Stabdurchmessern und hohen Bewehrungsgraden, Aachen, 2018.
- Hegger et al. 2010** Hegger, J.; Will, N.; Bertram, G.: Stahlbetonbau aktuell 2010: Praxishandbuch; Rissbreitenbegrenzung und Zwang - Grundlagen, Konstruktionsregeln, Nachweise in besonderen Fällen, Bauwerk-Verlag, 09.2009.
- Husain et al. 1968** Husain, S. I.; Ferguson, P. M.: Flexural crack width at the bars in reinforced splices or deformed bars; Research Report, Projekt 3-5-66-102, Texas, 06.1968.
- Ignatiadis et al. 2014** Ignatiadis, A.; Fingerloos, F.; Hegger, J.; Teworte, F.: Auswertung der Europäischen Nationalen Anhänge zum Eurocode 2, in: Beton- und Stahlbetonbau 109, 2014, H. 12, S. 860-873.
- Jungwirth 1985** Jungwirth, D.: Begrenzung der Rißbreite im Stahlbeton- und Spannbetonbau aus der Sicht der Praxis, in: Beton- und Stahlbetonbau 80, 1985, H. 7, S. 173-178.

- Jungwirth et al. 1977** Jungwirth, D.; Kern, G.: Verwendung von Bewehrungsstäben mit großen Durchmessern bzw. hohen Festigkeiten am Beispiel des Dywidag-Gewindestabs, in: Beton- und Stahlbetonbau 72, 1977, H. 10, S. 237-243, 277-282.
- Krips et al. 1985** Krips, M.: Rißbreitenbeschränkung im Stahlbeton und Spannbeton, Ernst & Sohn, Berlin, 1985.
- Leonhardt 1985** Leonhardt, F.: Zur Behandlung von Rissen im Beton in den deutschen Vorschriften, in: Beton- und Stahlbetonbau 80, 1985, H. 7, S. 179–184.
- Leonhardt 1978** Leonhardt, F.: Vorlesungen über Massivbau; Vierter Teil - Nachweis der Gebrauchsfähigkeit, Rissebeschränkung, Formänderungen, Momentenumlagerung und Bruchlinientheorie im Stahlbetonbau, Springer-Verlag, Berlin, New York, 1978.
- Martin et al. 1980** Martin, H.; Schießl, P.; Schwarzkopf, M.: Berechnungsverfahren für Rißbreiten aus Lastbeanspruchungen; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, H. 309, 1980.
- Meichsner et al. 2018** Meichsner, H.; Röhling, S.: Rechen- und Messwerte der Rissbreite im Stahlbetonbau; Eine differenzierte Sicht auf die Messung und Definition der Rissbreite im Stahlbetonbau, in: Beton- und Stahlbetonbau 113, 2018, H. 4, S. 307–317.
- Metric PE Plus** M-Service & Geräte Peter Müller e.K.: Metric PE Plus; Mess-Software Version 8.10, 2011.
- Noakowski 1985** Noakowski, P.: Verbundorientierte, kontinuierliche Theorie zur Ermittlung der Rißbreite; Wirklichkeitsnaher und einfacher Nachweis unter Berücksichtigung der Verbundgesetzte und der Betonzugfestigkeit sowie unter

Verknüpfung des Ertriß- und Endrißzustands, in: Beton- und Stahlbetonbau 80, 1985, H. 7, S. 185-190.

- Pierzina 2020** Pierzina, S.: Numerische Simulationen zum Rissverhalten von zentrisch beanspruchten Stahlbetonzuggliedern und Überprüfung des Einflusses der Betonzugfestigkeit; Masterarbeit am Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion der TU Kaiserslautern, unveröffentlicht, betreut durch Breit, F., Kaiserslautern, 2020.
- Prinz 2021** Prinz, S.: Weitergehende statistische Untersuchungen zur Rissbreite im Rahmen von Dehnkörperversuchen; Studienarbeit am Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion der TU Kaiserslautern, unveröffentlicht, betreut durch Breit, F., Kaiserslautern, 2021.
- Rehm 2004** Rehm, G.: Bericht zum Forschungsvorhaben; Ermittlung der Bemessungs- und Konstruktionsregeln für Betonstähle mit Nenndurchmesser 32 bis 40 mm nach DIN 1045-1:2001-07, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 14.10.2004.
- Rehm et al. 1976** Rehm, G.; Eligehausen, R.; Mallée, R.: Untersuchungsbericht Nr. 76/4; Rißverhalten von Stahlbetonkörpern bei Zugbeanspruchung, Stuttgart, 02.02.1976.
- Rehm et al. 1975** Rehm, G.; Eligehausen, R.; Neubert, B.: Gutachterliche Stellungnahme im Auftrag der Fa. Dyckerhoff und Widmann; Rippenstäbe mit  $d_s = 50$  mm als Bewehrung in Stahlbetonbauteilen, Stuttgart, 16.12.1975.
- Rehm et al. 1968** Rehm, G.; Martin, H.: Zur Frage der Rissbegrenzung im Stahlbetonbau, in: Beton- und Stahlbetonbau 63, 1968, H. 8, S. 175–182.
- Rugero 2020** Rugero, O.: Numerische Simulationen zum Rissverhalten von zentrisch beanspruchten Stahlbetonzuggliedern mit

Atena; Masterarbeit am Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion der TU Kaiserslautern, unveröffentlicht, betreut durch Breit, F., Kaiserslautern, 2020.

- 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.
- SIA 262** Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, SIA 262:2013: SIA 262 Betonbau; einschl. Korrigenda SIA 262-C1:2017, 01.2013.
- Tepfers et al. 1968** Tepfers, R.: A theory of bond applied to overlapped tensile reinforcement splices or deformed bars; Publication 73:2, Göteborg, Schweden, 1973.
- Tran 2018** Tran, N. L.: Shear strength of slender reinforced concrete members without shear reinforcement; A mechanical model, Institut für Massivbau, Darmstadt, 2018.
- Zilch et al. 2010** Zilch, K.; Zehetmaier, G.: Bemessung im konstruktiven Betonbau; nach DIN 1045-1 und DIN EN 1992-1-1, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
- Zupan et al. 2007** Zupan, D.; Srpcic, J.; Turk, G.: Characteristic value determination from small samples, in: Structural Safety 29, 2007, S. 268–278.
- Dridiger 2019** Dridiger, A.: Zur Ermittlung von Zwangsschnittgrößen in Hochbaudecken aus Stahlbeton. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, Massivbau und Baukonstruktion. Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell; Prof. Dr.-Ing. Christian Glock; Prof. Dr.-Ing. Andrej Albert, 2019.

- Schäfer 2016** Schäfer, M.: Zur Rissbreitenentwicklung bei Verwendung großer Stabdurchmesser im Stahlbetonbau. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, Massivbau und Baukonstruktion. Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell; Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger, 2016.
- Weber 2019** Weber, M.: Zur Ermittlung mechanischer Kennwerte von Bestandsbetonen. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, Massivbau und Baukonstruktion. Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell; Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx; Prof. Dr.-Ing. Christian Glock, 2019.
- Schoening 2018** Schoening, J.: Anchorages and Laps in Reinforced Concrete Members under Monotonic Loading. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Lehrstuhl und Institut für Massivbau. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger; Prof. Dr.-Ing. Rolf Eligehausen; Prof. Dr. John Cairns, 2018.
- Eckfeldt 2005** Eckfeldt, L.: Möglichkeiten und Grenzen der Berechnung von Rissbreiten in veränderlichen Verbundsituationen. Dissertation, Technische Universität Dresden, Institut für Massivbau. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach; Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing E.h. Konrad Zilch; Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe, 2005.
- Kattenstedt 2017** Kattenstedt, S.: Untersuchungen zur Modellierung und numerischen Simulation des Querkraftverhaltens von Stahlbetonbalken. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Architektur und Bauingenieurwesen. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer; Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Häußler-Combe, 2017.





## Lebenslauf

### Persönliche Daten

Name: Felix Breit  
Geburtsjahr: 1990  
Geburtsort: Neunkirchen/Saar  
Staatsangehörigkeit: deutsch

### Schul- und Hochschulausbildung

07/2000 – 06/2009 Gymnasium am Krebsberg in Neunkirchen/Saar, Abschluss Abitur  
10/2010 – 09/2015 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Kaiserslautern, Abschluss als Dipl.-Ing.

### Beruflicher Werdegang

10/2015 – 12/2020 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Jürgen Schnell (bis 2018) und Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Glock (seit 2017) an der Technischen Universität Kaiserslautern  
seit 03/2016 Mitarbeiter der BORAPA Ingenieurgesellschaft mbh, Kaiserslautern



## Anhang A – Materialeigenschaften

| Abs. | Inhalt  | Seite        |
|------|---|--------------|
| A.1  | Zusammensetzungen des verwendeten Betons  | A-2          |
| A.2  | Eigenschaften des Festbetons  | A-3 bis A-5  |
| A.3  | Eigenschaften des Bewehrungsstahls und zugehörige Prüfprotokolle der Materialprüfanstalt der Technischen Universität Braunschweig | A-6 bis A-12 |

Der Anhang A umfasst insgesamt 12 Seiten.



## **Anhang A – Materialeigenschaften**

- A.1 Zusammensetzungen des verwendeten Betons
- A.2 Eigenschaften des Festbetons
- A.3 Eigenschaften des Bewehrungsstahls

**A.1 Zusammensetzungen des verwendeten Betons**

**C30/37**

| Ausgangsstoffe | Art             | Gehalt in [kg/m <sup>3</sup> ] |
|----------------|-----------------|--------------------------------|
| Zuschlag       | Rheinsand 0/2   | 570                            |
|                | Rheinkies 2/8   | 570                            |
|                | Rheinkies 8/16  | 644                            |
| Zement         | CEM III A 42,5N | 327                            |
| Wasser         | Trinkwasser     | 196                            |

**C50/60**

| Ausgangsstoffe | Art              | Gehalt in [kg/m <sup>3</sup> ] |
|----------------|------------------|--------------------------------|
| Zuschlag       | Rheinsand 0/2    | 667                            |
|                | Rheinkies 2/8    | 431                            |
|                | Rheinkies 8/16   | 703                            |
| Zement         | CEM II A-S 52,5N | 380                            |
| Wasser         | Trinkwasser      | 180                            |
| Zusatzmittel   | FM Sky 641       | 2,3                            |

**A.2 Eigenschaften des Festbetons**A.2.1 Versuchskörper mit Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm**C30/37**

| Serie | Versuch   | $f_{cm,cube}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{ct,sp}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $E_{cm}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Probenalter<br>[d] |
|-------|-----------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| 1     | V1        | 44,5                                  | 3,1                                 | 26.075,5                         | 29                 |
|       | V2        | 46,5                                  | 3,3                                 | 23.984,5                         | 17                 |
|       | V3        | 46,0                                  | 3,4                                 | 28.337,0                         | 72                 |
|       | <b>MW</b> | <b>45,7</b>                           | <b>3,3</b>                          | <b>26.132,3</b>                  | -                  |
| 1.1   | V1        | 58,0                                  | 3,5                                 | 31.485,1                         | 72                 |
| 2     | V1        | 43,0                                  | 3,3                                 | 25.217,4                         | 31                 |
|       | V2        | 44,5                                  | 3,0                                 | 27.073,7                         | 15                 |
|       | V3        | 46,0                                  | 3,0                                 | 29.362,7                         | 67                 |
|       | <b>MW</b> | <b>44,5</b>                           | <b>3,1</b>                          | <b>27.217,9</b>                  | -                  |
| 3     | V1        | 50,5                                  | 3,3                                 | 28.085,3                         | 15                 |
| 4     | V1        | 53,5                                  | 3,3                                 | 24.642,7                         | 22                 |
| 4.1   | V1        | 47,0                                  | 3,4                                 | 29.878,0                         | 66                 |

**C50/60**

| Serie | Versuch   | $f_{cm,cube}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{ct,sp}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $E_{cm}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Probenalter<br>[d] |
|-------|-----------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| 1     | V1        | 79,0                                  | 4,1                                 | 36.188,0                         | 15                 |
|       | V2        | 65,0                                  | 3,8                                 | 30.255,4                         | 20                 |
|       | <b>MW</b> | <b>72,0</b>                           | <b>4,0</b>                          | <b>33.521,7</b>                  | -                  |
| 2     | V1        | 79,0                                  | 3,6                                 | 35.965,5                         | 13                 |
|       | V2        | 64,0                                  | 3,7                                 | 31.730,5                         | 21                 |
|       | <b>MW</b> | <b>71,5</b>                           | <b>3,7</b>                          | <b>33.848,0</b>                  | -                  |

A.2.2 Versuchskörper mit Stabdurchmesser  $\phi 28$  mm

**C30/37**

| Serie | Versuch   | $f_{cm,cube}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{ct,sp}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $E_{cm}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Probenalter<br>[d] |
|-------|-----------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| 1     | V1        | 48,0                                  | 3,2                                 | 31.376,2                         | 60                 |
|       | V2        | 50,5                                  | 3,5                                 | 29.429,2                         | 49                 |
|       | V3        | 45,0                                  | 3,4                                 | 27.090,2                         | 51                 |
|       | <b>MW</b> | <b>47,8</b>                           | <b>3,4</b>                          | <b>29.289,5</b>                  | -                  |
| 1.1   | V1        | 51,5                                  | 3,4                                 | 28.887,9                         | 24                 |
| 2     | V1        | 46,5                                  | 3,1                                 | 25.450,6                         | 25                 |
|       | V2        | 48,5                                  | 3,3                                 | 26.898,4                         | 34                 |
|       | V3        | 48,0                                  | 3,3                                 | 25.900,0                         | 116                |
|       | V4        | 43,5                                  | 3,1                                 | 27.236,3                         | 43                 |
|       | <b>MW</b> | <b>46,6</b>                           | <b>3,2</b>                          | <b>26.371,3</b>                  | -                  |
| 3     | V1        | 43,5                                  | 2,9                                 | 26.060,9                         | 86                 |
| 4     | V1        | 42,0                                  | 3,0                                 | 26.402,8                         | 27                 |
| 4.1   | V1        | 46,5                                  | 2,5                                 | 28.203,6                         | 17                 |

**C50/60**

| Serie | Versuch   | $f_{cm,cube}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{ct,sp}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $E_{cm}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Probenalter<br>[d] |
|-------|-----------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| 1     | V1        | 72,0                                  | 3,9                                 | 29.384,0                         | 24                 |
|       | V2        | 73,0                                  | 4,1                                 | 34.750,0                         | 91                 |
|       | <b>MW</b> | <b>72,5</b>                           | <b>4,0</b>                          | <b>32.065,5</b>                  | -                  |
| 2     | V1        | 68,5                                  | 4,2                                 | 32.849,8                         | 32                 |
|       | V2        | 74,5                                  | 3,6                                 | 35.500,0                         | 106                |
|       | <b>MW</b> | <b>71,5</b>                           | <b>3,9</b>                          | <b>34.174,9</b>                  | -                  |



A.2.2 Versuchskörper mit Stabdurchmesser  $\phi 40$  mm**C30/37**

| Serie | Versuch   | $f_{cm,cube}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{ct,sp}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $E_{cm}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Probenalter<br>[d] |
|-------|-----------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| 1     | V1        | 37,0                                  | 2,8                                 | 24.462,9                         | 16                 |
|       | V2        | 49,0                                  | 3,0                                 | 29.855,6                         | 35                 |
|       | V3        | 40,5                                  | 2,7                                 | 24.430,3                         | 15                 |
|       | V4        | 52,0                                  | 3,5                                 | 25.172,1                         | 110                |
|       | <b>MW</b> | <b>44,6</b>                           | <b>3,0</b>                          | <b>25.980,2</b>                  | -                  |
| 1.1   | V1        | 41,5                                  | 3,0                                 | 26.812,1                         | 12                 |
| 1.2   | V1        | 53,0                                  | 3,4                                 | 26.648,6                         | 158                |
| 2     | V1        | 41,5                                  | 2,9                                 | 28.981,7                         | 34                 |
|       | V2        | 45,5                                  | 3,1                                 | 29.874,8                         | 21                 |
|       | V3        | 41,5                                  | 2,7                                 | 24.607,1                         | 12                 |
|       | <b>MW</b> | <b>42,8</b>                           | <b>2,9</b>                          | <b>27.821,2</b>                  | -                  |
| 3     | V1        | 37,0                                  | 2,6                                 | 25.709,5                         | 15                 |
| 4     | V1        | 36,0                                  | 2,8                                 | 24.456,1                         | 12                 |
| 4.1   | V1        | 44,5                                  | 3,2                                 | 27.432,3                         | 14                 |

**C50/60**

| Serie | Versuch   | $f_{cm,cube}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{ct,sp}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $E_{cm}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Probenalter<br>[d] |
|-------|-----------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| 1     | V1        | 66,5                                  | 3,9                                 | 31.433,1                         | 58                 |
|       | V2        | 67,7                                  | 4,0                                 | 32.478,0                         | 44                 |
|       | <b>MW</b> | <b>66,6</b>                           | <b>4,0</b>                          | <b>31.955,6</b>                  | -                  |
| 2     | V1        | 75,0                                  | 4,0                                 | 34.341,1                         | 57                 |
|       | V2        | 66,0                                  | 3,7                                 | 33.589,6                         | 51                 |
|       | <b>MW</b> | <b>70,5</b>                           | <b>3,9</b>                          | <b>33.965,5</b>                  | -                  |

### A.3 Eigenschaften des Bewehrungsstahls

| $\phi$<br>[mm]   | $R_{p0,2}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_R$<br>[-] | $E_s$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--|------------------------------------|--------------|-------------------------------|
| 8 <sup>1)</sup>  | -                                  | -            | -                             |
| 20   | 565                                | 0,085        | 202.800                       |
| 28   | 562                                | 0,074        | 192.000                       |
| 40   | 573                                | 0,073        | 198.600                       |
| <sup>1)</sup> Zur verwendeten Oberflächenbewehrung $\phi 8$ mm wurden keine Werkstoffprüfungen durchgeführt. |                                    |              |                               |

Die zugehörigen Prüfprotokolle der Materialprüfanstalt der Technischen Universität Braunschweig sind nachfolgend beigefügt.

### Rippenabmessungen

Auftrags-Nr.: --- Ident. - Nr.: ---  
 WZ-Charge: --- Betonstahlsorte: B500B  
 Bemerk.: SP-KI-Nr.1-F-Ø20

| Reihe           | Abm.<br>[mm] | Rippenhöhe    |                  |                  | Rippen-<br>abstd. c<br>[mm] | Winkel       |             | Reihen-<br>abstd. e<br>[mm] | Kopf-<br>breite<br>[mm] | Rippen-<br>länge<br>[mm] | bezogene<br>Rippenfl.<br>fR |
|-----------------|--------------|---------------|------------------|------------------|-----------------------------|--------------|-------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|
|                 |              | Mitte<br>[mm] | 1/4 Pkt.<br>[mm] | 3/4 Pkt.<br>[mm] |                             | Alpha<br>[°] | Beta<br>[°] |                             |                         |                          |                             |
| 1               | 20.0         | 1.53          | 1.29             | 1.09             | 11.4                        | 41           | 54          | 2.13                        | 2.4                     | 36.2                     | 0.087                       |
| 2               |              | 1.49          | 1.25             | 1.13             | 11.0                        | 37           | 66 / 53     | 2.18                        | 2.4                     | 32.0                     |                             |
| <b>Mittelw.</b> |              | 1.51          | 1.27             | 1.11             | 11.2                        | 39           | 58          | Σ: 4.31                     | 2.40                    | 34.1                     | +55.4 %                     |

Auftrags-Nr.: --- Ident. - Nr.: ---  
 WZ-Charge: --- Betonstahlsorte: B500B  
 Bemerk.: SP-KI-Nr.2-F-Ø20

| Reihe           | Abm.<br>[mm] | Rippenhöhe    |                  |                  | Rippen-<br>abstd. c<br>[mm] | Winkel       |             | Reihen-<br>abstd. e<br>[mm] | Kopf-<br>breite<br>[mm] | Rippen-<br>länge<br>[mm] | bezogene<br>Rippenfl.<br>fR |
|-----------------|--------------|---------------|------------------|------------------|-----------------------------|--------------|-------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|
|                 |              | Mitte<br>[mm] | 1/4 Pkt.<br>[mm] | 3/4 Pkt.<br>[mm] |                             | Alpha<br>[°] | Beta<br>[°] |                             |                         |                          |                             |
| 1               | 20.0         | 1.63          | 1.24             | 1.17             | 12.6                        | 48           | 58          | 2.14                        | 2.6                     | 34.5                     | 0.082                       |
| 2               |              | 1.53          | 1.30             | 1.23             | 12.1                        | 40           | 65 / 61     | 2.10                        | 2.3                     | 32.3                     |                             |
| <b>Mittelw.</b> |              | 1.58          | 1.27             | 1.20             | 12.4                        | 44           | 61          | Σ: 4.24                     | 2.45                    | 33.4                     | +46.4 %                     |

Auftrags-Nr.: --- Ident. - Nr.: ---  
 WZ-Charge: --- Betonstahlsorte: B500B  
 Bemerk.: SP-KI-Nr.3-F-Ø20

| Reihe           | Abm.<br>[mm] | Rippenhöhe    |                  |                  | Rippen-<br>abstd. c<br>[mm] | Winkel       |             | Reihen-<br>abstd. e<br>[mm] | Kopf-<br>breite<br>[mm] | Rippen-<br>länge<br>[mm] | bezogene<br>Rippenfl.<br>fR |
|-----------------|--------------|---------------|------------------|------------------|-----------------------------|--------------|-------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|
|                 |              | Mitte<br>[mm] | 1/4 Pkt.<br>[mm] | 3/4 Pkt.<br>[mm] |                             | Alpha<br>[°] | Beta<br>[°] |                             |                         |                          |                             |
| 1               | 20.0         | 1.59          | 1.32             | 1.20             | 12.3                        | 38           | 52          | 2.20                        | 2.3                     | 37.1                     | 0.086                       |
| 2               |              | 1.63          | 1.35             | 1.23             | 11.9                        | 44           | 63 / 51     | 2.14                        | 2.1                     | 32.8                     |                             |
| <b>Mittelw.</b> |              | 1.61          | 1.34             | 1.22             | 12.1                        | 41           | 55          | Σ: 4.34                     | 2.20                    | 35.0                     | +53.6 %                     |

**Rippenabmessungen**

Auftrags-Nr.: --- Ident. - Nr.: ---  
 WZ-Charge: --- Betonstahlsorte: B500B  
 Bemerk.: SP-KI-Nr. 1-F-Ø28

| Reihe    | Abm.<br>[mm] | Rippenhöhe    |                  |                  | Rippen-<br>abstd. c<br>[mm] | Winkel       |             | Reihen-<br>abstd. e<br>[mm] | Kopf-<br>breite<br>[mm] | Rippen-<br>länge<br>[mm] | bezogene<br>Rippenfl.<br>f <sub>R</sub> |
|----------|--------------|---------------|------------------|------------------|-----------------------------|--------------|-------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|---|
|          |              | Mitte<br>[mm] | 1/4 Pkt.<br>[mm] | 3/4 Pkt.<br>[mm] |                             | Alpha<br>[°] | Beta<br>[°] |                             |                         |                          |   |
| 1        | 28.0         | 1.92          | 1.83             | 1.39             | 18.9                        | 49           | 59          | 2.68                        | 3.5                     | 48.3                     | 0.072                                   |
| 2        |              | 2.13          | 1.92             | 1.29             | 18.2                        | 46           | 69 / 61     | 2.52                        | 3.3                     | 44.3                     |   |
| Mittelw. |              | 2.03          | 1.88             | 1.34             | 18.6                        | 48           | 63          | Σ: 5.20                     | 3.40                    | 46.3                     |   |

Auftrags-Nr.: --- Ident. - Nr.: ---  
 WZ-Charge: --- Betonstahlsorte: B500B  
 Bemerk.: SP-KI-Nr. 2-F-Ø28

| Reihe    | Abm.<br>[mm] | Rippenhöhe    |                  |                  | Rippen-<br>abstd. c<br>[mm] | Winkel       |             | Reihen-<br>abstd. e<br>[mm] | Kopf-<br>breite<br>[mm] | Rippen-<br>länge<br>[mm] | bezogene<br>Rippenfl.<br>f <sub>R</sub> |
|----------|--------------|---------------|------------------|------------------|-----------------------------|--------------|-------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|---|
|          |              | Mitte<br>[mm] | 1/4 Pkt.<br>[mm] | 3/4 Pkt.<br>[mm] |                             | Alpha<br>[°] | Beta<br>[°] |                             |                         |                          |   |
| 1        | 28.0         | 2.18          | 1.70             | 1.66             | 18.7                        | 51           | 55          | 2.61                        | 3.8                     | 50.7                     | 0.076                                   |
| 2        |              | 2.13          | 1.76             | 1.55             | 18.0                        | 47           | 65 / 60     | 2.33                        | 3.3                     | 45.8                     |   |
| Mittelw. |              | 2.16          | 1.73             | 1.61             | 18.4                        | 49           | 60          | Σ: 4.94                     | 3.55                    | 48.2                     |   |

Auftrags-Nr.: --- Ident. - Nr.: ---  
 WZ-Charge: --- Betonstahlsorte: B500B  
 Bemerk.: SP-KI-Nr. 3-F-Ø28

| Reihe    | Abm.<br>[mm] | Rippenhöhe    |                  |                  | Rippen-<br>abstd. c<br>[mm] | Winkel       |             | Reihen-<br>abstd. e<br>[mm] | Kopf-<br>breite<br>[mm] | Rippen-<br>länge<br>[mm] | bezogene<br>Rippenfl.<br>f <sub>R</sub> |
|----------|--------------|---------------|------------------|------------------|-----------------------------|--------------|-------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|---|
|          |              | Mitte<br>[mm] | 1/4 Pkt.<br>[mm] | 3/4 Pkt.<br>[mm] |                             | Alpha<br>[°] | Beta<br>[°] |                             |                         |                          |   |
| 1        | 28.0         | 2.10          | 1.76             | 1.46             | 18.5                        | 46           | 53          | 2.55                        | 3.5                     | 52.1                     | 0.074                                   |
| 2        |              | 1.95          | 1.75             | 1.53             | 17.8                        | 47           | 65 / 62     | 2.18                        | 3.1                     | 45.9                     |   |
| Mittelw. |              | 2.03          | 1.76             | 1.50             | 18.2                        | 47           | 60          | Σ: 4.73                     | 3.30                    | 49.0                     |   |

### Rippenabmessungen

Auftrags-Nr.: --- Ident. - Nr.: ---  
 WZ-Charge: --- Betonstahlsorte: B500B  
 Bemerk.: SP-KL-Nr.1-F-Ø40

| Reihe           | Abm.<br>[mm] | Rippenhöhe    |                  |                  | Rippen-<br>abstd. c<br>[mm] | Winkel       |             | Reihen-<br>abstd. e<br>[mm] | Kopf-<br>breite<br>[mm] | Rippen-<br>länge<br>[mm] | bezogene<br>Rippenfl.<br>f <sub>R</sub> |
|-----------------|--------------|---------------|------------------|------------------|-----------------------------|--------------|-------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|---|
|                 |              | Mitte<br>[mm] | 1/4 Pkt.<br>[mm] | 3/4 Pkt.<br>[mm] |                             | Alpha<br>[°] | Beta<br>[°] |                             |                         |                          |   |
| 1               | 40.0         | 2.80          | 2.35             | 2.05             | 27.8                        | 53           | 55          | 2.98                        | 4.1                     | 73.0                     | 0.070                                   |
| 2               |              | 3.15          | 2.59             | 2.11             | 27.2                        | 52           | 56 / 48     | 3.13                        | 4.2                     | 72.1                     |   |
| <b>Mittelw.</b> |              | 2.98          | 2.47             | 2.08             | 27.5                        | 53           | 53          | Σ: 6.11                     | 4.15                    | 72.5                     |   |

Auftrags-Nr.: --- Ident. - Nr.: ---  
 WZ-Charge: --- Betonstahlsorte: B500B  
 Bemerk.: SP-KL-Nr.2-F-Ø40

| Reihe           | Abm.<br>[mm] | Rippenhöhe    |                  |                  | Rippen-<br>abstd. c<br>[mm] | Winkel       |             | Reihen-<br>abstd. e<br>[mm] | Kopf-<br>breite<br>[mm] | Rippen-<br>länge<br>[mm] | bezogene<br>Rippenfl.<br>f <sub>R</sub> |
|-----------------|--------------|---------------|------------------|------------------|-----------------------------|--------------|-------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|---|
|                 |              | Mitte<br>[mm] | 1/4 Pkt.<br>[mm] | 3/4 Pkt.<br>[mm] |                             | Alpha<br>[°] | Beta<br>[°] |                             |                         |                          |   |
| 1               | 40.0         | 2.70          | 2.45             | 2.19             | 26.8                        | 54           | 62          | 3.11                        | 4.7                     | 67.8                     | 0.075                                   |
| 2               |              | 3.06          | 2.70             | 2.32             | 26.2                        | 58           | 57 / 50     | 2.90                        | 4.4                     | 71.3                     |   |
| <b>Mittelw.</b> |              | 2.88          | 2.58             | 2.26             | 26.5                        | 56           | 56          | Σ: 6.01                     | 4.55                    | 69.5                     |   |

Auftrags-Nr.: --- Ident. - Nr.: ---  
 WZ-Charge: --- Betonstahlsorte: B500B  
 Bemerk.: SP-KL-Nr.3-F-Ø40

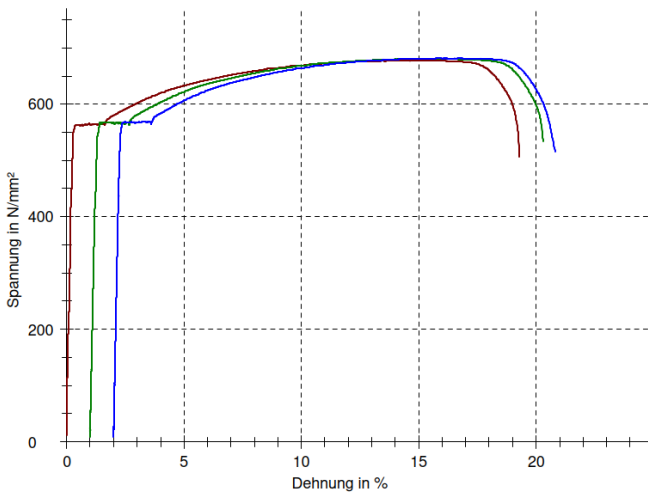
| Reihe           | Abm.<br>[mm] | Rippenhöhe    |                  |                  | Rippen-<br>abstd. c<br>[mm] | Winkel       |             | Reihen-<br>abstd. e<br>[mm] | Kopf-<br>breite<br>[mm] | Rippen-<br>länge<br>[mm] | bezogene<br>Rippenfl.<br>f <sub>R</sub> |
|-----------------|--------------|---------------|------------------|------------------|-----------------------------|--------------|-------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|---|
|                 |              | Mitte<br>[mm] | 1/4 Pkt.<br>[mm] | 3/4 Pkt.<br>[mm] |                             | Alpha<br>[°] | Beta<br>[°] |                             |                         |                          |   |
| 1               | 40.0         | 2.85          | 2.66             | 1.92             | 25.9                        | 56           | 60          | 3.06                        | 4.3                     | 69.2                     | 0.073                                   |
| 2               |              | 3.22          | 2.55             | 1.97             | 26.6                        | 53           | 58 / 47     | 2.75                        | 4.0                     | 70.7                     |   |
| <b>Mittelw.</b> |              | 3.04          | 2.61             | 1.95             | 26.3                        | 55           | 55          | Σ: 5.81                     | 4.15                    | 69.9                     |   |

Sachbearbeiter: F. Breit  
 Prüfdatum : 13.09.2018  
 Prüfnorm : DIN EN ISO 15630 - 1  
 Prüfer : B.Schiedung  
 Prüfmaschine : Zwick 1236  
 Material : B500B Ø20mm  
 Bemerkungen : Probenbeschriftung:  
 SP-KL-1 bis 3-F-Ø20mm

**Ergebnisse:**

| Probe | $\Delta A$<br>ist<br>% | $A_{nenn}$<br>mm <sup>2</sup> | $F_{p0,2}$<br>kN | $R_{p0,2}$<br>MPa | $R_{p0,2,ist}$<br>MPa | $F_m$<br>kN | $R_m$<br>MPa | $R_{m,ist}$<br>MPa | $R_m/R_{p0,2}$ | $R_{p0,2,ist}/R_{p0,2,nenn}$ | $A_{gt}$<br>% | E<br>kN/mm <sup>2</sup> |
|-------|------------------------|-------------------------------|------------------|-------------------|-----------------------|-------------|--------------|--------------------|----------------|------------------------------|---------------|-------------------------|
| 1     | 0,01                   | 314,16                        | 177,1            | 564               | 564                   | 212,8       | 677          | 677                | 1,20           | 1,13                         | 14,8          | 208,4                   |
| 2     | -0,24                  | 314,16                        | 177,2            | 564               | 565                   | 213,2       | 679          | 680                | 1,20           | 1,13                         | 14,1          | 195,2                   |
| 3     | -0,24                  | 314,16                        | 177,9            | 566               | 568                   | 213,5       | 680          | 681                | 1,20           | 1,14                         | 13,8          | 204,9                   |

**Seriengrafik:**

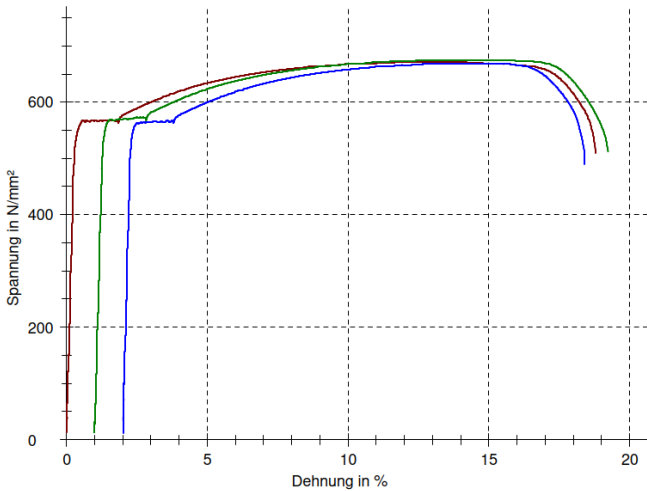


Sachbearbeiter: F. Breit  
 Prüfdatum : 13.09.2018  
 Prüfnorm : DIN EN ISO 15630 - 1  
 Prüfer : B. Schiedung  
 Prüfmaschine : Zwick 1236  
 Material : B500B Ø28mm  
 Bemerkungen : Probenbeschriftung:  
 SP-KL-1 bis 3-F-Ø28mm

**Ergebnisse:**

| Probe | $\Delta A$<br>% | $A_{nenn}$<br>mm <sup>2</sup> | $F_{p0,2}$<br>kN | $R_{p0,2}$<br>MPa | $R_{p0,2\ ist}$<br>MPa | $F_m$<br>kN | $R_m$<br>MPa | $R_{m\ ist}$<br>MPa | $R_m/R_{p0,2}$ | $R_{p0,2\ ist}/R_{p0,2\ nenn}$ | $A_{gt}$<br>% | $E$<br>kN/mm <sup>2</sup> |
|-------|-----------------|-------------------------------|------------------|-------------------|------------------------|-------------|--------------|---------------------|----------------|--------------------------------|---------------|---------------------------|
| 1     | -0,43           | 615,75                        | 344,3            | 559               | 562                    | 411,4       | 668          | 671                 | 1,19           | 1,12                           | 13,1          | 192,3                     |
| 2     | -0,13           | 615,75                        | 348,4            | 566               | 567                    | 414,8       | 674          | 675                 | 1,19           | 1,13                           | 13,3          | 190,9                     |
| 3     | -0,05           | 615,75                        | 346,3            | 562               | 563                    | 411,5       | 668          | 669                 | 1,19           | 1,13                           | 12,4          | 192,9                     |

**Seriengrafik:**

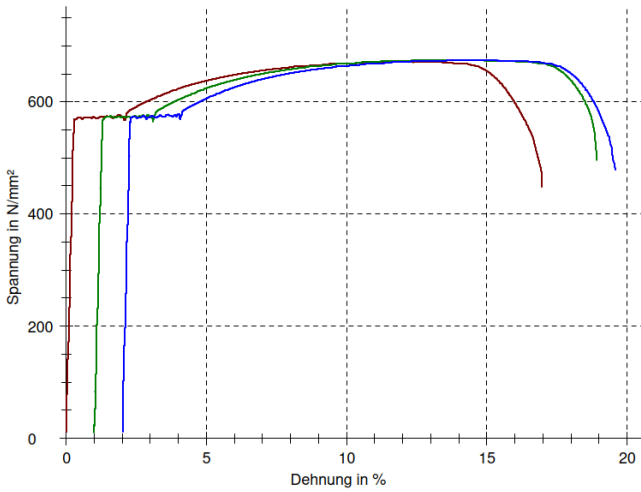


Sachbearbeiter: F. Breit  
 Prüfdatum : 13.09.2018  
 Prüfnorm : DIN EN ISO 15630 - 1  
 Prüfer : B.Schledung  
 Prüfmaschine : Zwick 1236  
 Material : B500B Ø40mm  
 Bemerkungen : Probenbeschriftung:  
 SP-KL-1 bis 3-F-Ø40mm

**Ergebnisse:**

| Probe | $\Delta A_{ist}$<br>% | $A_{nenn}$<br>mm <sup>2</sup> | $F_{p0,2}$<br>kN | $R_{p0,2}$<br>MPa | $R_{p0,2,ist}$<br>MPa | $F_m$<br>kN | $R_m$<br>MPa | $R_{m,ist}$<br>MPa | $R_m/R_{p0,2}$ | $R_{p0,2,ist}/R_{p0,2,nenn}$ | $A_{gt}$<br>% | E<br>kN/mm <sup>2</sup> |
|-------|-----------------------|-------------------------------|------------------|-------------------|-----------------------|-------------|--------------|--------------------|----------------|------------------------------|---------------|-------------------------|
| 1     | -0,78                 | 1256,64                       | 713,7            | 568               | 572                   | 836,8       | 666          | 671                | 1,17           | 1,14                         | 12,1          | 201,3                   |
| 2     | -0,60                 | 1256,64                       | 716,7            | 570               | 574                   | 841,9       | 670          | 674                | 1,17           | 1,15                         | 12,8          | 195,2                   |
| 3     | -0,52                 | 1256,64                       | 715,7            | 570               | 573                   | 842,2       | 670          | 674                | 1,18           | 1,15                         | 12,7          | 199,3                   |

**Seriengrafik:**





## Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Abs. | Inhalt                                | Seite           |
|------|---------------------------------------|-----------------|
| B.1  | Einzelwerte der Rissbreitenmessungen  | B-2 bis B-69    |
| B.2  | Punktwolken und emp. Dichtefunktionen | B-70 bis B-82   |
| B.3  | QQ-Plots                              | B-83 bis B-107  |
| B.4  | Statistische Auswertung               | B-108 bis B-119 |

Der Anhang B umfasst insgesamt 119 Seiten.

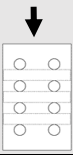


## **Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung**

- B.1.1 – B.1.3 Einzelwerte der Rissbreitenmessungen,  $\phi 20$  mm,  $\phi 28$  mm,  $\phi 40$  mm
- B.2.1 – B.2.3 Punktwolken, emp. Dichtefunktionen,  $\phi 20$  mm,  $\phi 28$  mm,  $\phi 40$  mm
- B.3.1 – B.3.3 QQ-Plots,  $\phi 20$  mm,  $\phi 28$  mm,  $\phi 40$  mm
- B.4.1 – B.4.3 Statistische Auswertung,  $\phi 20$  mm,  $\phi 28$  mm,  $\phi 40$  mm

**B.1 Einzelwerte der Rissbreitenmessungen**

B.1.1 Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm

| Serie 1, $\phi 20$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche  |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                               |      |  |                          |                          |                          |                          |                          |
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$  |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>   | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,059   | 0,159                    | 0,226                    | 0,257                    | 0,288                    | 0,322                    |
| 2                             | [mm] | 0,050   | 0,154                    | 0,233                    | 0,267                    | 0,306                    | 0,356                    |
| 3                             | [mm] | 0,109   | 0,067                    | 0,142                    | 0,170                    | 0,211                    | 0,249                    |
| 4                             | [mm] | 0,050   | 0,209                    | 0,309                    | 0,349                    | 0,395                    | 0,439                    |
| 5                             | [mm] | 0,097   | 0,227                    | 0,196                    | 0,240                    | 0,272                    | 0,361                    |
| 6                             | [mm] | 0,113   | 0,203                    | 0,318                    | 0,370                    | 0,399                    | 0,455                    |
| 7                             | [mm] | 0,094   | 0,180                    | 0,307                    | 0,361                    | 0,407                    | 0,456                    |
| 8                             | [mm] | 0,094   | 0,165                    | 0,277                    | 0,312                    | 0,351                    | 0,386                    |
| 9                             | [mm] | 0,104   | 0,205                    | 0,247                    | 0,287                    | 0,320                    | 0,359                    |
| 10                            | [mm] | 0,065   | 0,165                    | 0,132                    | 0,186                    | 0,222                    | 0,253                    |
| 11                            | [mm] | 0,083   | 0,204                    | 0,318                    | 0,372                    | 0,418                    | 0,453                    |
| 12                            | [mm] | 0,115   | 0,224                    | 0,243                    | 0,284                    | 0,322                    | 0,358                    |
| 13                            | [mm] | 0,090   | 0,178                    | 0,326                    | 0,385                    | 0,434                    | 0,471                    |
| 14                            | [mm] | 0,113   | 0,092                    | 0,292                    | 0,330                    | 0,414                    | 0,441                    |
| 15                            | [mm] | 0,067   | 0,186                    | 0,299                    | 0,349                    | 0,401                    | 0,451                    |
| 16                            | [mm] | 0,084   | 0,144                    | 0,175                    | 0,209                    | 0,249                    | 0,295                    |
| 17                            | [mm] | 0,069   | 0,130                    | 0,259                    | 0,300                    | 0,337                    | 0,370                    |
| 18                            | [mm] | 0,086   | 0,178                    | 0,245                    | 0,303                    | 0,334                    | 0,397                    |
| 19                            | [mm] | 0,107   | 0,138                    | 0,215                    | 0,255                    | 0,304                    | 0,317                    |
| 20                            | [mm] | 0,097   | 0,155                    | 0,286                    | 0,364                    | 0,368                    | 0,420                    |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

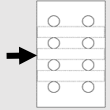
|    |      |       |       |       |       |       |       |
|----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 21 | [mm] | 0,101 | 0,121 | 0,247 | 0,315 | 0,332 | 0,368 |
| 22 | [mm] | 0,071 | 0,084 | 0,236 | 0,333 | 0,394 | 0,414 |
| 23 | [mm] | 0,077 | 0,104 | 0,163 | 0,161 | 0,207 | 0,221 |
| 24 | [mm] | 0,098 | 0,157 | 0,144 | 0,171 | 0,228 | 0,232 |
| 25 | [mm] | 0,056 | 0,155 | 0,192 | 0,203 | 0,241 | 0,278 |
| 26 | [mm] | 0,084 | 0,184 | 0,276 | 0,338 | 0,401 | 0,468 |
| 27 | [mm] | 0,054 | 0,124 | 0,227 | 0,261 | 0,301 | 0,322 |
| 28 | [mm] | 0,083 | 0,146 | 0,288 | 0,328 | 0,374 | 0,393 |
| 29 | [mm] |       | 0,159 | 0,198 | 0,271 | 0,308 | 0,324 |
| 30 | [mm] |       | 0,090 | 0,214 | 0,282 | 0,334 | 0,355 |
| 31 | [mm] |       | 0,054 | 0,253 | 0,305 | 0,345 | 0,375 |
| 32 | [mm] |       | 0,124 | 0,151 | 0,169 | 0,191 | 0,228 |
| 33 | [mm] |       | 0,096 | 0,115 | 0,138 | 0,172 | 0,201 |
| 34 | [mm] |       | 0,174 | 0,203 | 0,228 | 0,269 | 0,307 |
| 35 | [mm] |       | 0,157 | 0,153 | 0,184 | 0,205 | 0,257 |
| 36 | [mm] |       | 0,171 | 0,301 | 0,356 | 0,407 | 0,452 |
| 37 | [mm] |       | 0,205 | 0,228 | 0,267 | 0,301 | 0,326 |
| 38 | [mm] |       | 0,159 | 0,263 | 0,304 | 0,354 | 0,401 |
| 39 | [mm] |       | 0,117 | 0,328 | 0,378 | 0,437 | 0,471 |
| 40 | [mm] |       | 0,152 | 0,240 | 0,292 | 0,343 | 0,384 |
| 41 | [mm] |       | 0,113 | 0,182 | 0,211 | 0,253 | 0,278 |
| 42 | [mm] |       | 0,050 | 0,244 | 0,299 | 0,343 | 0,130 |
| 43 | [mm] |       | 0,151 | 0,175 | 0,204 | 0,148 | 0,261 |
| 44 | [mm] |       | 0,169 | 0,058 | 0,253 | 0,305 | 0,347 |
| 45 | [mm] |       | 0,142 | 0,117 | 0,144 | 0,171 | 0,200 |
| 46 | [mm] |       | 0,178 | 0,217 | 0,265 | 0,294 | 0,328 |
| 47 | [mm] |       | 0,132 | 0,240 | 0,297 | 0,345 | 0,389 |
| 48 | [mm] |       | 0,159 | 0,249 | 0,303 | 0,343 | 0,380 |
| 49 | [mm] |       | 0,104 | 0,278 | 0,324 | 0,376 | 0,426 |
| 50 | [mm] |       | 0,119 | 0,226 | 0,255 | 0,295 | 0,340 |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

---

|    |      |  |       |       |       |       |       |
|----|------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| 51 | [mm] |  | 0,144 | 0,280 | 0,334 | 0,393 | 0,431 |
| 52 | [mm] |  |       | 0,173 | 0,211 | 0,246 | 0,282 |
| 53 | [mm] |  |       | 0,123 | 0,280 | 0,134 | 0,115 |
| 54 | [mm] |  |       | 0,236 | 0,269 | 0,324 | 0,359 |
| 55 | [mm] |  |       | 0,125 | 0,155 | 0,188 | 0,203 |
| 56 | [mm] |  |       |       |       |       | 0,058 |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 1, $\phi 20$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteilseite  |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$  |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>   | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] |   | 0,075                    | 0,100                    | 0,130                    | 0,148                    | 0,161                    |
| 2                             | [mm] |   | 0,063                    | 0,115                    | 0,138                    | 0,167                    | 0,182                    |
| 3                             | [mm] |   | 0,050                    | 0,077                    | 0,096                    | 0,111                    | 0,121                    |
| 4                             | [mm] |   | 0,073                    | 0,075                    | 0,069                    | 0,075                    | 0,086                    |
| 5                             | [mm] |   | 0,050                    | 0,094                    | 0,050                    | 0,058                    | 0,067                    |
| 6                             | [mm] |   | 0,056                    | 0,063                    | 0,086                    | 0,054                    | 0,071                    |
| 7                             | [mm] |   | 0,073                    | 0,075                    | 0,094                    | 0,069                    | 0,073                    |
| 8                             | [mm] |   |                          | 0,077                    | 0,098                    | 0,052                    | 0,056                    |
| 9                             | [mm] |   |                          | 0,094                    | 0,088                    | 0,094                    | 0,100                    |
| 10                            | [mm] |   |                          | 0,071                    | 0,050                    | 0,092                    | 0,109                    |
| 11                            | [mm] |   |                          | 0,063                    | 0,086                    | 0,115                    | 0,134                    |
| 12                            | [mm] |   |                          |                          | 0,094                    | 0,100                    | 0,113                    |
| 13                            | [mm] |   |                          |                          | 0,098                    | 0,069                    | 0,073                    |
| 14                            | [mm] |   |                          |                          | 0,094                    | 0,052                    | 0,056                    |
| 15                            | [mm] |   |                          |                          | 0,050                    | 0,094                    | 0,100                    |
| 16                            | [mm] |   |                          |                          | 0,088                    | 0,092                    | 0,109                    |
| 17                            | [mm] |   |                          |                          | 0,069                    | 0,115                    | 0,134                    |
| 18                            | [mm] |   |                          |                          | 0,086                    | 0,077                    | 0,071                    |
| 19                            | [mm] |   |                          |                          |                          | 0,052                    | 0,059                    |
| 20                            | [mm] |   |                          |                          |                          | 0,056                    | 0,073                    |
| 21                            | [mm] |   |                          |                          |                          | 0,097                    | 0,119                    |
| 22                            | [mm] |   |                          |                          |                          | 0,073                    | 0,084                    |
| 23                            | [mm] |   |                          |                          |                          | 0,100                    | 0,105                    |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

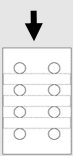
| Serie 1, $\phi 20$ mm, C50/60 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$                   |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>                    | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,153                                      | 0,203                    | 0,284                    | 0,314                    | 0,361                    | 0,401                    |
| 2                             | [mm] | 0,090                                      | 0,192                    | 0,302                    | 0,364                    | 0,418                    | 0,446                    |
| 3                             | [mm] | 0,188                                      | 0,251                    | 0,328                    | 0,376                    | 0,416                    | 0,447                    |
| 4                             | [mm] | 0,121                                      | 0,286                    | 0,384                    | 0,422                    | 0,470                    | 0,514                    |
| 5                             | [mm] | 0,113                                      | 0,109                    | 0,288                    | 0,255                    | 0,301                    | 0,343                    |
| 6                             | [mm] | 0,079                                      | 0,186                    | 0,274                    | 0,307                    | 0,343                    | 0,391                    |
| 7                             | [mm] | 0,111                                      | 0,136                    | 0,207                    | 0,242                    | 0,274                    | 0,295                    |
| 8                             | [mm] | 0,152                                      | 0,134                    | 0,090                    | 0,109                    | 0,134                    | 0,150                    |
| 9                             | [mm] | 0,111                                      | 0,053                    | 0,190                    | 0,222                    | 0,238                    | 0,226                    |
| 10                            | [mm] | 0,084                                      | 0,193                    | 0,129                    | 0,172                    | 0,230                    | 0,278                    |
| 11                            | [mm] | 0,138                                      | 0,257                    | 0,285                    | 0,322                    | 0,380                    | 0,063                    |
| 12                            | [mm] | 0,111                                      | 0,180                    | 0,378                    | 0,426                    | 0,491                    | 0,407                    |
| 13                            | [mm] | 0,075                                      | 0,151                    | 0,232                    | 0,286                    | 0,349                    | 0,523                    |
| 14                            | [mm] | 0,136                                      | 0,234                    | 0,249                    | 0,287                    | 0,353                    | 0,390                    |
| 15                            | [mm] | 0,104                                      | 0,190                    | 0,345                    | 0,395                    | 0,460                    | 0,393                    |
| 16                            | [mm] | 0,061                                      | 0,113                    | 0,283                    | 0,326                    | 0,382                    | 0,508                    |
| 17                            | [mm] | 0,159                                      | 0,084                    | 0,203                    | 0,234                    | 0,272                    | 0,407                    |
| 18                            | [mm] | 0,248                                      | 0,152                    | 0,138                    | 0,163                    | 0,186                    | 0,320                    |
| 19                            | [mm] | 0,115                                      | 0,205                    | 0,245                    | 0,282                    | 0,334                    | 0,211                    |
| 20                            | [mm] | 0,073                                      | 0,240                    | 0,290                    | 0,324                    | 0,368                    | 0,311                    |



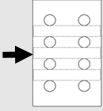
Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |       |       |       |       |       |       |
|----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 21 | [mm] | 0,098 | 0,192 | 0,354 | 0,385 | 0,491 | 0,410 |
| 22 | [mm] | 0,115 | 0,163 | 0,285 | 0,322 | 0,362 | 0,061 |
| 23 | [mm] | 0,086 | 0,232 | 0,244 | 0,292 | 0,330 | 0,445 |
| 24 | [mm] | 0,077 | 0,213 | 0,298 | 0,332 | 0,414 | 0,399 |
| 25 | [mm] | 0,096 | 0,204 | 0,346 | 0,420 | 0,461 | 0,357 |
| 26 | [mm] | 0,103 | 0,165 | 0,298 | 0,342 | 0,391 | 0,451 |
| 27 | [mm] |       | 0,157 | 0,224 | 0,270 | 0,304 | 0,503 |
| 28 | [mm] |       | 0,203 | 0,242 | 0,276 | 0,311 | 0,433 |
| 29 | [mm] |       | 0,186 | 0,136 | 0,179 | 0,201 | 0,339 |
| 30 | [mm] |       | 0,161 | 0,071 | 0,084 | 0,107 | 0,356 |
| 31 | [mm] |       | 0,129 | 0,113 | 0,141 | 0,165 | 0,219 |
| 32 | [mm] |       | 0,209 | 0,290 | 0,353 | 0,391 | 0,138 |
| 33 | [mm] |       | 0,186 | 0,278 | 0,326 | 0,372 | 0,203 |
| 34 | [mm] |       | 0,079 | 0,243 | 0,274 | 0,306 | 0,438 |
| 35 | [mm] |       | 0,071 | 0,198 | 0,230 | 0,269 | 0,420 |
| 36 | [mm] |       |       | 0,296 | 0,343 | 0,394 | 0,366 |
| 37 | [mm] |       |       | 0,236 | 0,261 | 0,285 | 0,305 |
| 38 | [mm] |       |       | 0,167 | 0,184 | 0,208 | 0,448 |
| 39 | [mm] |       |       | 0,119 | 0,145 | 0,207 | 0,301 |
| 40 | [mm] |       |       | 0,132 | 0,144 | 0,161 | 0,240 |
| 41 | [mm] |       |       |       |       |       | 0,239 |
| 42 | [mm] |       |       |       |       |       | 0,184 |


Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 1.1, $\phi 20$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche  |                          |                          |                          |                          |                          |
|---------------------------------|------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                                 |      |  |                          |                          |                          |                          |                          |
| Lfd. Nr.                        | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$  |                          |                          |                          |                          |                          |
|                                 |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>   | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                               | [mm] | 0,173   | 0,255                    | 0,351                    | 0,265                    | 0,441                    | 0,483                    |
| 2                               | [mm] | 0,069   | 0,142                    | 0,232                    | 0,347                    | 0,289                    | 0,323                    |
| 3                               | [mm] | 0,136   | 0,221                    | 0,305                    | 0,345                    | 0,393                    | 0,432                    |
| 4                               | [mm] | 0,151   | 0,232                    | 0,311                    | 0,180                    | 0,363                    | 0,410                    |
| 5                               | [mm] | 0,098   | 0,190                    | 0,280                    | 0,127                    | 0,217                    | 0,250                    |
| 6                               | [mm] | 0,071   | 0,075                    | 0,157                    | 0,182                    | 0,159                    | 0,190                    |
| 7                               | [mm] | 0,138   | 0,054                    | 0,111                    | 0,309                    | 0,209                    | 0,228                    |
| 8                               | [mm] | 0,117   | 0,079                    | 0,150                    | 0,082                    | 0,347                    | 0,376                    |
| 9                               | [mm] | 0,109   | 0,184                    | 0,269                    | 0,301                    | 0,107                    | 0,151                    |
| 10                              | [mm] | 0,190   | 0,151                    | 0,248                    | 0,419                    | 0,343                    | 0,393                    |
| 11                              | [mm] |   | 0,228                    | 0,357                    | 0,305                    | 0,481                    | 0,545                    |
| 12                              | [mm] |   | 0,209                    | 0,278                    | 0,301                    | 0,351                    | 0,385                    |
| 13                              | [mm] |   | 0,190                    | 0,255                    | 0,412                    | 0,338                    | 0,384                    |
| 14                              | [mm] |   | 0,272                    | 0,359                    | 0,190                    | 0,458                    | 0,499                    |
| 15                              | [mm] |   | 0,152                    | 0,182                    | 0,205                    | 0,205                    | 0,226                    |
| 16                              | [mm] |   | 0,077                    | 0,159                    | 0,163                    | 0,251                    | 0,291                    |
| 17                              | [mm] |   | 0,067                    | 0,130                    | 0,272                    | 0,190                    | 0,230                    |
| 18                              | [mm] |   | 0,150                    | 0,238                    | 0,081                    | 0,314                    | 0,372                    |
| 19                              | [mm] |   |                          | 0,054                    |                          | 0,107                    | 0,132                    |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 1.1, $\phi 20$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteilseite  |                          |                          |                          |                          |                          |
|---------------------------------|------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                        | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$  |                          |                          |                          |                          |                          |
|                                 |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>   | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                               | [mm] |   | 0,065                    | 0,054                    | 0,065                    | 0,083                    | 0,085                    |
| 2                               | [mm] |   | 0,061                    | 0,054                    | 0,058                    | 0,077                    | 0,081                    |
| 3                               | [mm] |   | 0,052                    | 0,067                    | 0,073                    | 0,069                    | 0,098                    |
| 4                               | [mm] |   | 0,069                    | 0,063                    | 0,086                    | 0,054                    | 0,075                    |
| 5                               | [mm] |   |                          | 0,086                    | 0,054                    | 0,084                    | 0,093                    |
| 6                               | [mm] |   |                          | 0,071                    | 0,065                    | 0,064                    | 0,069                    |
| 7                               | [mm] |   |                          | 0,098                    | 0,102                    | 0,1                      | 0,117                    |
| 8                               | [mm] |   |                          | 0,056                    | 0,086                    | 0,052                    | 0,069                    |
| 9                               | [mm] |   |                          | 0,061                    | 0,076                    | 0,065                    | 0,073                    |
| 10                              | [mm] |   |                          | 0,05                     | 0,113                    | 0,069                    | 0,088                    |
| 11                              | [mm] |   |                          |                          | 0,067                    | 0,119                    | 0,138                    |
| 12                              | [mm] |   |                          |                          | 0,084                    | 0,098                    | 0,1                      |
| 13                              | [mm] |   |                          |                          | 0,059                    | 0,073                    | 0,097                    |
| 14                              | [mm] |   |                          |                          | 0,054                    | 0,126                    | 0,136                    |
| 15                              | [mm] |   |                          |                          | 0,069                    | 0,05                     | 0,096                    |
| 16                              | [mm] |   |                          |                          |                          | 0,088                    | 0,115                    |
| 17                              | [mm] |   |                          |                          |                          | 0,1                      | 0,075                    |
| 18                              | [mm] |   |                          |                          |                          | 0,069                    | 0,065                    |
| 19                              | [mm] |   |                          |                          |                          | 0,05                     |                          |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 2, $\phi 20$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche  |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                               |      |  |                          |                          |                          |                          |                          |
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$  |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>   | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,088   | 0,186                    | 0,261                    | 0,299                    | 0,341                    | 0,384                    |
| 2                             | [mm] | 0,057   | 0,150                    | 0,227                    | 0,264                    | 0,316                    | 0,357                    |
| 3                             | [mm] | 0,140   | 0,259                    | 0,372                    | 0,383                    | 0,435                    | 0,479                    |
| 4                             | [mm] | 0,221   | 0,326                    | 0,389                    | 0,474                    | 0,514                    | 0,541                    |
| 5                             | [mm] | 0,115   | 0,188                    | 0,350                    | 0,391                    | 0,443                    | 0,478                    |
| 6                             | [mm] | 0,067   | 0,071                    | 0,167                    | 0,197                    | 0,234                    | 0,272                    |
| 7                             | [mm] | 0,088   | 0,184                    | 0,245                    | 0,286                    | 0,316                    | 0,347                    |
| 8                             | [mm] | 0,080   | 0,148                    | 0,075                    | 0,089                    | 0,108                    | 0,130                    |
| 9                             | [mm] | 0,052   | 0,155                    | 0,178                    | 0,207                    | 0,240                    | 0,267                    |
| 10                            | [mm] | 0,134   | 0,144                    | 0,073                    | 0,092                    | 0,121                    | 0,123                    |
| 11                            | [mm] | 0,074   | 0,196                    | 0,228                    | 0,270                    | 0,322                    | 0,386                    |
| 12                            | [mm] | 0,109   | 0,188                    | 0,159                    | 0,266                    | 0,298                    | 0,361                    |
| 13                            | [mm] | 0,101   | 0,102                    | 0,265                    | 0,313                    | 0,340                    | 0,361                    |
| 14                            | [mm] | 0,088   | 0,174                    | 0,253                    | 0,305                    | 0,429                    | 0,479                    |
| 15                            | [mm] | 0,052   | 0,146                    | 0,190                    | 0,311                    | 0,391                    | 0,478                    |
| 16                            | [mm] | 0,163   | 0,138                    | 0,266                    | 0,282                    | 0,333                    | 0,361                    |
| 17                            | [mm] | 0,113   | 0,238                    | 0,201                    | 0,228                    | 0,257                    | 0,301                    |
| 18                            | [mm] | 0,141   | 0,211                    | 0,188                    | 0,151                    | 0,157                    | 0,136                    |
| 19                            | [mm] | 0,109   | 0,265                    | 0,073                    | 0,086                    | 0,100                    | 0,107                    |
| 20                            | [mm] | 0,096   | 0,217                    | 0,134                    | 0,190                    | 0,212                    | 0,221                    |

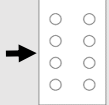
Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |       |       |       |       |       |       |
|----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 21 | [mm] | 0,084 | 0,150 | 0,307 | 0,055 | 0,373 | 0,103 |
| 22 | [mm] | 0,134 | 0,117 | 0,240 | 0,339 | 0,248 | 0,433 |
| 23 | [mm] | 0,065 | 0,186 | 0,282 | 0,065 | 0,353 | 0,292 |
| 24 | [mm] | 0,102 | 0,076 | 0,213 | 0,334 | 0,280 | 0,399 |
| 25 | [mm] | 0,119 | 0,056 | 0,188 | 0,244 | 0,229 | 0,305 |
| 26 | [mm] | 0,084 | 0,201 | 0,274 | 0,234 | 0,361 | 0,274 |
| 27 | [mm] | 0,071 | 0,117 | 0,117 | 0,313 | 0,165 | 0,401 |
| 28 | [mm] | 0,065 | 0,226 | 0,184 | 0,134 | 0,167 | 0,184 |
| 29 | [mm] | 0,081 | 0,230 | 0,107 | 0,270 | 0,138 | 0,211 |
| 30 | [mm] | 0,065 | 0,138 | 0,115 | 0,136 | 0,364 | 0,146 |
| 31 | [mm] | 0,052 | 0,146 | 0,286 | 0,119 | 0,234 | 0,409 |
| 32 | [mm] | 0,065 | 0,170 | 0,184 | 0,334 | 0,426 | 0,261 |
| 33 | [mm] | 0,113 | 0,142 | 0,322 | 0,213 | 0,351 | 0,480 |
| 34 | [mm] | 0,073 | 0,128 | 0,276 | 0,379 | 0,284 | 0,378 |
| 35 | [mm] | 0,079 | 0,117 | 0,198 | 0,307 | 0,284 | 0,307 |
| 36 | [mm] | 0,067 | 0,213 | 0,215 | 0,226 | 0,377 | 0,309 |
| 37 | [mm] |       | 0,178 | 0,270 | 0,253 | 0,237 | 0,397 |
| 38 | [mm] |       | 0,173 | 0,190 | 0,311 | 0,219 | 0,273 |
| 39 | [mm] |       | 0,159 | 0,180 | 0,219 | 0,257 | 0,266 |
| 40 | [mm] |       | 0,127 | 0,186 | 0,196 | 0,084 | 0,292 |
| 41 | [mm] |       | 0,094 | 0,259 | 0,213 | 0,333 | 0,119 |
| 42 | [mm] |       | 0,073 | 0,313 | 0,061 | 0,422 | 0,378 |
| 43 | [mm] |       | 0,060 | 0,255 | 0,301 | 0,345 | 0,468 |
| 44 | [mm] |       | 0,084 | 0,271 | 0,374 | 0,365 | 0,379 |
| 45 | [mm] |       | 0,100 | 0,261 | 0,299 | 0,359 | 0,422 |
| 46 | [mm] |       | 0,205 | 0,199 | 0,319 | 0,236 | 0,405 |
| 47 | [mm] |       | 0,246 | 0,142 | 0,307 | 0,203 | 0,276 |
| 48 | [mm] |       | 0,121 | 0,144 | 0,219 | 0,215 | 0,224 |
| 49 | [mm] |       | 0,190 | 0,146 | 0,175 | 0,202 | 0,243 |
| 50 | [mm] |       | 0,367 | 0,157 | 0,188 | 0,236 | 0,238 |


Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |  |       |       |       |       |       |
|----|------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| 51 | [mm] |  | 0,138 | 0,297 | 0,177 | 0,386 | 0,261 |
| 52 | [mm] |  | 0,073 | 0,071 | 0,199 | 0,104 | 0,424 |
| 53 | [mm] |  | 0,109 | 0,272 | 0,340 | 0,351 | 0,119 |
| 54 | [mm] |  | 0,063 | 0,351 | 0,088 | 0,455 | 0,391 |
| 55 | [mm] |  | 0,061 | 0,221 | 0,318 | 0,236 | 0,499 |
| 56 | [mm] |  | 0,127 | 0,243 | 0,399 | 0,347 | 0,284 |
| 57 | [mm] |  |       | 0,477 | 0,203 | 0,560 | 0,395 |
| 58 | [mm] |  |       | 0,235 | 0,294 | 0,311 | 0,629 |
| 59 | [mm] |  |       | 0,109 | 0,510 | 0,188 | 0,359 |
| 60 | [mm] |  |       | 0,182 | 0,280 | 0,238 | 0,219 |
| 61 | [mm] |  |       | 0,125 | 0,156 | 0,180 | 0,269 |
| 62 | [mm] |  |       | 0,092 | 0,211 | 0,125 | 0,209 |
| 63 | [mm] |  |       | 0,203 | 0,157 | 0,282 | 0,140 |
| 64 | [mm] |  |       |       | 0,111 | 0,085 | 0,322 |
| 65 | [mm] |  |       |       | 0,242 |       | 0,134 |
| 66 | [mm] |  |       |       | 0,064 |       |       |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 1, $\phi 20$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteilseite  |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$  |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>   | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,058   | 0,067                    | 0,157                    | 0,146                    | 0,182                    | 0,215                    |
| 2                             | [mm] |   | 0,057                    | 0,050                    | 0,063                    | 0,100                    | 0,096                    |
| 3                             | [mm] |   | 0,056                    | 0,052                    | 0,056                    | 0,065                    | 0,088                    |
| 4                             | [mm] |   | 0,050                    | 0,063                    | 0,057                    | 0,052                    | 0,063                    |
| 5                             | [mm] |   | 0,052                    | 0,092                    | 0,067                    | 0,065                    | 0,086                    |
| 6                             | [mm] |   | 0,069                    | 0,056                    | 0,107                    | 0,084                    | 0,090                    |
| 7                             | [mm] |   |                          | 0,079                    | 0,056                    | 0,111                    | 0,113                    |
| 8                             | [mm] |   |                          | 0,061                    | 0,084                    | 0,061                    | 0,054                    |
| 9                             | [mm] |   |                          | 0,061                    | 0,079                    | 0,111                    | 0,115                    |
| 10                            | [mm] |   |                          | 0,073                    | 0,052                    | 0,084                    | 0,061                    |
| 11                            | [mm] |   |                          | 0,050                    | 0,078                    | 0,090                    | 0,104                    |
| 12                            | [mm] |   |                          | 0,120                    | 0,082                    | 0,073                    | 0,094                    |
| 13                            | [mm] |   |                          |                          | 0,052                    | 0,101                    | 0,088                    |
| 14                            | [mm] |   |                          |                          | 0,137                    | 0,107                    | 0,063                    |
| 15                            | [mm] |   |                          |                          |                          | 0,059                    | 0,111                    |
| 16                            | [mm] |   |                          |                          |                          | 0,158                    | 0,096                    |
| 17                            | [mm] |   |                          |                          |                          | 0,054                    | 0,059                    |
| 18                            | [mm] |   |                          |                          |                          |                          | 0,172                    |
| 19                            | [mm] |   |                          |                          |                          |                          | 0,061                    |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 2, $\phi 20$ mm, C50/60 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche  |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                               |      |  |                          |                          |                          |                          |                          |
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$  |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>   | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,056   | 0,123                    | 0,201                    | 0,234                    | 0,284                    | 0,323                    |
| 2                             | [mm] | 0,088   | 0,146                    | 0,212                    | 0,269                    | 0,322                    | 0,349                    |
| 3                             | [mm] | 0,205   | 0,292                    | 0,380                    | 0,437                    | 0,488                    | 0,512                    |
| 4                             | [mm] | 0,119   | 0,195                    | 0,280                    | 0,320                    | 0,334                    | 0,404                    |
| 5                             | [mm] | 0,161   | 0,209                    | 0,240                    | 0,249                    | 0,257                    | 0,261                    |
| 6                             | [mm] | 0,077   | 0,221                    | 0,355                    | 0,410                    | 0,472                    | 0,491                    |
| 7                             | [mm] | 0,054   | 0,107                    | 0,248                    | 0,301                    | 0,347                    | 0,424                    |
| 8                             | [mm] | 0,102   | 0,127                    | 0,169                    | 0,197                    | 0,217                    | 0,261                    |
| 9                             | [mm] | 0,161   | 0,155                    | 0,230                    | 0,274                    | 0,301                    | 0,334                    |
| 10                            | [mm] | 0,094   | 0,107                    | 0,180                    | 0,215                    | 0,247                    | 0,288                    |
| 11                            | [mm] | 0,104   | 0,132                    | 0,092                    | 0,128                    | 0,161                    | 0,186                    |
| 12                            | [mm] | 0,063   | 0,170                    | 0,190                    | 0,224                    | 0,255                    | 0,289                    |
| 13                            | [mm] | 0,086   | 0,276                    | 0,249                    | 0,290                    | 0,335                    | 0,365                    |
| 14                            | [mm] | 0,169   | 0,069                    | 0,370                    | 0,416                    | 0,466                    | 0,512                    |
| 15                            | [mm] | 0,098   | 0,232                    | 0,065                    | 0,269                    | 0,313                    | 0,339                    |
| 16                            | [mm] | 0,069   | 0,222                    | 0,329                    | 0,376                    | 0,422                    | 0,466                    |
| 17                            | [mm] | 0,081   | 0,345                    | 0,337                    | 0,389                    | 0,443                    | 0,499                    |
| 18                            | [mm] | 0,117   | 0,138                    | 0,426                    | 0,473                    | 0,520                    | 0,564                    |
| 19                            | [mm] | 0,096   | 0,169                    | 0,176                    | 0,196                    | 0,220                    | 0,249                    |
| 20                            | [mm] | 0,092   | 0,109                    | 0,236                    | 0,274                    | 0,303                    | 0,343                    |



Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |       |       |       |       |       |       |
|----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 21 | [mm] | 0,056 | 0,226 | 0,280 | 0,312 | 0,339 | 0,384 |
| 22 | [mm] | 0,109 | 0,057 | 0,086 | 0,115 | 0,142 | 0,153 |
| 23 | [mm] | 0,134 | 0,205 | 0,338 | 0,394 | 0,440 | 0,487 |
| 24 | [mm] | 0,133 | 0,290 | 0,073 | 0,248 | 0,281 | 0,326 |
| 25 | [mm] |       | 0,182 | 0,213 | 0,219 | 0,247 | 0,269 |
| 26 | [mm] |       | 0,153 | 0,278 | 0,320 | 0,364 | 0,403 |
| 27 | [mm] |       | 0,146 | 0,261 | 0,301 | 0,322 | 0,351 |
| 28 | [mm] |       | 0,157 | 0,222 | 0,332 | 0,385 | 0,422 |
| 29 | [mm] |       | 0,111 | 0,119 | 0,230 | 0,259 | 0,284 |
| 30 | [mm] |       | 0,180 | 0,142 | 0,194 | 0,215 | 0,236 |
| 31 | [mm] |       | 0,215 | 0,180 | 0,214 | 0,244 | 0,276 |
| 32 | [mm] |       | 0,203 | 0,088 | 0,105 | 0,134 | 0,144 |
| 33 | [mm] |       | 0,186 | 0,109 | 0,151 | 0,178 | 0,205 |
| 34 | [mm] |       | 0,267 | 0,241 | 0,280 | 0,079 | 0,096 |
| 35 | [mm] |       | 0,207 | 0,298 | 0,333 | 0,312 | 0,348 |
| 36 | [mm] |       | 0,124 | 0,264 | 0,328 | 0,389 | 0,431 |
| 37 | [mm] |       |       | 0,257 | 0,293 | 0,392 | 0,420 |
| 38 | [mm] |       |       | 0,348 | 0,385 | 0,328 | 0,370 |
| 39 | [mm] |       |       | 0,259 | 0,295 | 0,432 | 0,485 |
| 40 | [mm] |       |       | 0,080 | 0,093 | 0,313 | 0,351 |
| 41 | [mm] |       |       | 0,192 | 0,221 | 0,092 | 0,171 |
| 42 | [mm] |       |       | 0,086 | 0,105 | 0,248 | 0,285 |
| 43 | [mm] |       |       | 0,105 | 0,131 | 0,130 | 0,142 |
| 44 | [mm] |       |       |       |       | 0,161 | 0,194 |
| 45 | [mm] |       |       |       |       | 0,071 | 0,096 |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 3, $\phi 20$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$                   |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>                    | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,092                                      | 0,157                    | 0,230                    | 0,247                    | 0,272                    | 0,293                    |
| 2                             | [mm] | 0,084                                      | 0,105                    | 0,167                    | 0,190                    | 0,230                    | 0,265                    |
| 3                             | [mm] | 0,059                                      | 0,148                    | 0,207                    | 0,238                    | 0,280                    | 0,326                    |
| 4                             | [mm] | 0,090                                      | 0,098                    | 0,123                    | 0,144                    | 0,255                    | 0,297                    |
| 5                             | [mm] | 0,067                                      | 0,132                    | 0,171                    | 0,196                    | 0,215                    | 0,230                    |
| 6                             | [mm] | 0,067                                      | 0,157                    | 0,215                    | 0,240                    | 0,270                    | 0,295                    |
| 7                             | [mm] | 0,082                                      | 0,100                    | 0,146                    | 0,171                    | 0,201                    | 0,219                    |
| 8                             | [mm] | 0,056                                      | 0,065                    | 0,073                    | 0,102                    | 0,138                    | 0,176                    |
| 9                             | [mm] | 0,094                                      | 0,071                    | 0,069                    | 0,077                    | 0,081                    | 0,108                    |
| 10                            | [mm] | 0,094                                      | 0,067                    | 0,065                    | 0,065                    | 0,065                    | 0,069                    |
| 11                            | [mm] | 0,073                                      | 0,163                    | 0,115                    | 0,142                    | 0,167                    | 0,190                    |
| 12                            | [mm] | 0,065                                      | 0,127                    | 0,092                    | 0,100                    | 0,121                    | 0,136                    |
| 13                            | [mm] | 0,061                                      | 0,161                    | 0,054                    | 0,059                    | 0,088                    | 0,104                    |
| 14                            | [mm] |  | 0,157                    | 0,264                    | 0,286                    | 0,275                    | 0,067                    |
| 15                            | [mm] |  | 0,115                    | 0,191                    | 0,230                    | 0,263                    | 0,307                    |
| 16                            | [mm] |  | 0,132                    | 0,230                    | 0,257                    | 0,295                    | 0,295                    |
| 17                            | [mm] |  | 0,098                    | 0,234                    | 0,269                    | 0,303                    | 0,347                    |
| 18                            | [mm] |  | 0,071                    | 0,169                    | 0,184                    | 0,209                    | 0,347                    |
| 19                            | [mm] |  |                          | 0,192                    | 0,211                    | 0,253                    | 0,240                    |
| 20                            | [mm] |  |                          | 0,138                    | 0,165                    | 0,184                    | 0,313                    |

---

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |  |  |       |       |       |       |
|----|------|--|--|-------|-------|-------|-------|
| 21 | [mm] |  |  | 0,082 | 0,073 | 0,088 | 0,217 |
| 22 | [mm] |  |  | 0,115 | 0,094 | 0,094 | 0,122 |
| 23 | [mm] |  |  | 0,079 | 0,092 | 0,125 | 0,196 |
| 24 | [mm] |  |  |       | 0,090 | 0,109 | 0,123 |
| 25 | [mm] |  |  |       | 0,050 | 0,067 | 0,071 |
| 26 | [mm] |  |  |       |       | 0,067 | 0,073 |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 4, $\phi 20$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$                   |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>                    | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,059                                      | 0,077                    | 0,109                    | 0,117                    | 0,125                    | 0,132                    |
| 2                             | [mm] | 0,052                                      | 0,050                    | 0,096                    | 0,102                    | 0,104                    | 0,111                    |
| 3                             | [mm] | 0,054                                      | 0,059                    | 0,092                    | 0,102                    | 0,111                    | 0,128                    |
| 4                             | [mm] | 0,058                                      | 0,061                    | 0,123                    | 0,119                    | 0,130                    | 0,146                    |
| 5                             | [mm] | 0,061                                      | 0,065                    | 0,102                    | 0,117                    | 0,125                    | 0,121                    |
| 6                             | [mm] | 0,052                                      | 0,067                    | 0,090                    | 0,056                    | 0,126                    | 0,096                    |
| 7                             | [mm] | 0,059                                      | 0,056                    | 0,073                    | 0,102                    | 0,121                    | 0,121                    |
| 8                             | [mm] |  | 0,088                    | 0,105                    | 0,075                    | 0,092                    | 0,107                    |
| 9                             | [mm] |  | 0,088                    | 0,126                    | 0,121                    | 0,140                    | 0,149                    |
| 10                            | [mm] |  | 0,054                    | 0,125                    | 0,165                    | 0,170                    | 0,163                    |
| 11                            | [mm] |  | 0,077                    | 0,075                    | 0,146                    | 0,148                    | 0,157                    |
| 12                            | [mm] |  | 0,061                    | 0,054                    | 0,077                    | 0,088                    | 0,094                    |
| 13                            | [mm] |  | 0,071                    | 0,084                    | 0,062                    | 0,102                    | 0,096                    |
| 14                            | [mm] |  | 0,090                    | 0,090                    | 0,098                    | 0,076                    | 0,075                    |
| 15                            | [mm] |  | 0,050                    | 0,115                    | 0,107                    | 0,050                    | 0,125                    |
| 16                            | [mm] |  | 0,052                    | 0,077                    | 0,157                    | 0,113                    | 0,134                    |
| 17                            | [mm] |  | 0,094                    | 0,071                    | 0,098                    | 0,117                    | 0,199                    |
| 18                            | [mm] |  | 0,063                    | 0,090                    | 0,090                    | 0,181                    | 0,121                    |
| 19                            | [mm] |  | 0,092                    | 0,102                    | 0,113                    | 0,111                    | 0,121                    |
| 20                            | [mm] |  | 0,061                    | 0,127                    | 0,127                    | 0,104                    | 0,136                    |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |  |       |       |       |       |       |
|----|------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| 21 | [mm] |  | 0,069 | 0,065 | 0,050 | 0,121 | 0,161 |
| 22 | [mm] |  |       | 0,079 | 0,152 | 0,144 | 0,071 |
| 23 | [mm] |  |       | 0,050 | 0,069 | 0,059 | 0,059 |
| 24 | [mm] |  |       | 0,065 | 0,088 | 0,052 | 0,194 |
| 25 | [mm] |  |       | 0,079 | 0,079 | 0,176 | 0,084 |
| 26 | [mm] |  |       | 0,132 | 0,067 | 0,077 | 0,119 |
| 27 | [mm] |  |       | 0,079 | 0,096 | 0,098 | 0,096 |
| 28 | [mm] |  |       | 0,138 | 0,140 | 0,092 | 0,111 |
| 29 | [mm] |  |       | 0,102 | 0,119 | 0,090 | 0,107 |
| 30 | [mm] |  |       | 0,077 | 0,157 | 0,100 | 0,163 |
| 31 | [mm] |  |       | 0,052 | 0,125 | 0,151 | 0,144 |
| 32 | [mm] |  |       | 0,069 | 0,052 | 0,140 | 0,163 |
| 33 | [mm] |  |       | 0,054 | 0,098 | 0,142 | 0,153 |
| 34 | [mm] |  |       | 0,071 | 0,074 | 0,050 | 0,059 |
| 35 | [mm] |  |       | 0,084 | 0,059 | 0,121 | 0,134 |
| 36 | [mm] |  |       |       | 0,077 | 0,092 | 0,109 |
| 37 | [mm] |  |       |       | 0,075 | 0,075 | 0,088 |
| 38 | [mm] |  |       |       | 0,088 | 0,098 | 0,104 |
| 39 | [mm] |  |       |       | 0,125 | 0,084 | 0,086 |
| 40 | [mm] |  |       |       | 0,096 | 0,098 | 0,113 |
| 41 | [mm] |  |       |       | 0,075 | 0,136 | 0,150 |
| 42 | [mm] |  |       |       | 0,088 | 0,113 | 0,113 |
| 43 | [mm] |  |       |       |       | 0,086 | 0,103 |
| 44 | [mm] |  |       |       |       | 0,111 | 0,117 |
| 45 | [mm] |  |       |       |       | 0,059 | 0,071 |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

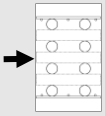
| Serie 4.1, $\phi 20$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche |                          |                          |                          |                          |                          |
|---------------------------------|------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                        | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$                   |                          |                          |                          |                          |                          |
|                                 |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>                    | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                               | [mm] | 0,067                                      | 0,100                    | 0,163                    | 0,190                    | 0,221                    | 0,255                    |
| 2                               | [mm] | 0,086                                      | 0,056                    | 0,132                    | 0,150                    | 0,182                    | 0,205                    |
| 3                               | [mm] | 0,052                                      | 0,063                    | 0,146                    | 0,163                    | 0,178                    | 0,198                    |
| 4                               | [mm] | 0,058                                      | 0,102                    | 0,178                    | 0,211                    | 0,242                    | 0,263                    |
| 5                               | [mm] | 0,073                                      | 0,109                    | 0,224                    | 0,263                    | 0,301                    | 0,347                    |
| 6                               | [mm] |  | 0,155                    | 0,169                    | 0,211                    | 0,238                    | 0,324                    |
| 7                               | [mm] |  | 0,090                    | 0,182                    | 0,215                    | 0,134                    | 0,278                    |
| 8                               | [mm] |  | 0,123                    | 0,102                    | 0,119                    | 0,203                    | 0,150                    |
| 9                               | [mm] |  | 0,061                    | 0,150                    | 0,180                    | 0,088                    | 0,238                    |
| 10                              | [mm] |  | 0,096                    | 0,123                    | 0,077                    | 0,155                    | 0,111                    |
| 11                              | [mm] |  | 0,098                    | 0,159                    | 0,131                    | 0,098                    | 0,186                    |
| 12                              | [mm] |  | 0,104                    | 0,171                    | 0,059                    | 0,230                    | 0,112                    |
| 13                              | [mm] |  | 0,081                    | 0,104                    | 0,184                    | 0,242                    | 0,255                    |
| 14                              | [mm] |  | 0,100                    | 0,138                    | 0,205                    | 0,123                    | 0,272                    |
| 15                              | [mm] |  | 0,109                    | 0,175                    | 0,109                    | 0,186                    | 0,129                    |
| 16                              | [mm] |  | 0,098                    | 0,165                    | 0,157                    | 0,244                    | 0,199                    |
| 17                              | [mm] |  | 0,140                    | 0,207                    | 0,207                    | 0,230                    | 0,261                    |
| 18                              | [mm] |  | 0,104                    | 0,169                    | 0,194                    | 0,288                    | 0,259                    |
| 19                              | [mm] |  | 0,092                    | 0,150                    | 0,249                    | 0,242                    | 0,330                    |
| 20                              | [mm] |  | 0,103                    | 0,131                    | 0,201                    | 0,213                    | 0,263                    |

---

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung


|    |      |  |       |       |       |       |       |
|----|------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| 21 | [mm] |  | 0,069 | 0,170 | 0,182 | 0,159 | 0,240 |
| 22 | [mm] |  | 0,065 | 0,100 | 0,153 | 0,234 | 0,184 |
| 23 | [mm] |  | 0,056 | 0,100 | 0,197 | 0,142 | 0,257 |
| 24 | [mm] |  |       |       | 0,121 | 0,136 | 0,165 |
| 25 | [mm] |  |       |       | 0,113 | 0,079 | 0,148 |
| 26 | [mm] |  |       |       | 0,063 |       |       |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 4.1, $\phi 20$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteilseite  |                          |                          |                          |                          |                          |
|---------------------------------|------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                        | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$  |                          |                          |                          |                          |                          |
|                                 |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>   | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                               | [mm] | 0,075   | 0,065                    | 0,061                    | 0,051                    | 0,052                    | 0,050                    |
| 2                               | [mm] | 0,065   | 0,104                    | 0,130                    | 0,081                    | 0,054                    | 0,067                    |
| 3                               | [mm] |   | 0,069                    | 0,050                    | 0,162                    | 0,056                    | 0,067                    |
| 4                               | [mm] |   | 0,052                    | 0,109                    | 0,063                    | 0,052                    | 0,063                    |
| 5                               | [mm] |   | 0,069                    | 0,119                    | 0,125                    | 0,171                    | 0,069                    |
| 6                               | [mm] |   | 0,088                    | 0,063                    | 0,117                    | 0,077                    | 0,190                    |
| 7                               | [mm] |   | 0,058                    | 0,092                    | 0,077                    | 0,138                    | 0,050                    |
| 8                               | [mm] |   |                          | 0,109                    | 0,107                    | 0,058                    | 0,086                    |
| 9                               | [mm] |   |                          | 0,079                    | 0,125                    | 0,136                    | 0,167                    |
| 10                              | [mm] |   |                          | 0,065                    | 0,090                    | 0,090                    | 0,056                    |
| 11                              | [mm] |   |                          | 0,050                    | 0,075                    | 0,123                    | 0,052                    |
| 12                              | [mm] |   |                          |                          | 0,063                    | 0,127                    | 0,144                    |
| 13                              | [mm] |   |                          |                          | 0,056                    | 0,100                    | 0,104                    |
| 14                              | [mm] |   |                          |                          |                          | 0,077                    | 0,143                    |
| 15                              | [mm] |   |                          |                          |                          | 0,071                    | 0,052                    |
| 16                              | [mm] |   |                          |                          |                          | 0,056                    | 0,052                    |
| 17                              | [mm] |   |                          |                          |                          |                          | 0,138                    |
| 18                              | [mm] |   |                          |                          |                          |                          | 0,117                    |
| 19                              | [mm] |   |                          |                          |                          |                          | 0,081                    |
| 20                              | [mm] |   |                          |                          |                          |                          | 0,080                    |
| 21                              | [mm] |   |                          |                          |                          |                          | 0,054                    |



B.1.2 Stabdurchmesser  $\phi 28$  mm

| Serie 1, $\phi 28$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche  |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                               |      |  |                          |                          |                          |                          |                          |
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$  |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>   | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,117   | 0,094                    | 0,170                    | 0,211                    | 0,260                    | 0,295                    |
| 2                             | [mm] | 0,094   | 0,052                    | 0,100                    | 0,117                    | 0,155                    | 0,184                    |
| 3                             | [mm] | 0,111   | 0,182                    | 0,238                    | 0,278                    | 0,314                    | 0,347                    |
| 4                             | [mm] | 0,135   | 0,120                    | 0,159                    | 0,184                    | 0,196                    | 0,221                    |
| 5                             | [mm] | 0,065   | 0,133                    | 0,216                    | 0,270                    | 0,301                    | 0,347                    |
| 6                             | [mm] | 0,073   | 0,159                    | 0,228                    | 0,253                    | 0,286                    | 0,320                    |
| 7                             | [mm] | 0,093   | 0,189                    | 0,276                    | 0,290                    | 0,356                    | 0,422                    |
| 8                             | [mm] | 0,084   | 0,052                    | 0,102                    | 0,119                    | 0,140                    | 0,170                    |
| 9                             | [mm] | 0,102   | 0,081                    | 0,073                    | 0,085                    | 0,092                    | 0,100                    |
| 10                            | [mm] | 0,075   | 0,065                    | 0,136                    | 0,163                    | 0,171                    | 0,202                    |
| 11                            | [mm] | 0,119   | 0,136                    | 0,088                    | 0,107                    | 0,128                    | 0,144                    |
| 12                            | [mm] | 0,079   | 0,127                    | 0,199                    | 0,248                    | 0,290                    | 0,328                    |
| 13                            | [mm] | 0,117   | 0,115                    | 0,204                    | 0,230                    | 0,266                    | 0,305                    |
| 14                            | [mm] | 0,084   | 0,146                    | 0,157                    | 0,182                    | 0,194                    | 0,210                    |
| 15                            | [mm] | 0,082   | 0,171                    | 0,225                    | 0,263                    | 0,301                    | 0,341                    |
| 16                            | [mm] | 0,059   | 0,150                    | 0,238                    | 0,261                    | 0,299                    | 0,327                    |
| 17                            | [mm] | 0,058   | 0,180                    | 0,249                    | 0,291                    | 0,320                    | 0,355                    |
| 18                            | [mm] | 0,102   | 0,063                    | 0,249                    | 0,293                    | 0,335                    | 0,378                    |
| 19                            | [mm] | 0,077   | 0,050                    | 0,079                    | 0,092                    | 0,092                    | 0,100                    |
| 20                            | [mm] | 0,090   | 0,086                    | 0,123                    | 0,159                    | 0,182                    | 0,205                    |

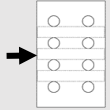
Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |       |       |       |       |       |       |
|----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 21 | [mm] | 0,100 | 0,098 | 0,132 | 0,155 | 0,188 | 0,203 |
| 22 | [mm] | 0,109 | 0,167 | 0,113 | 0,164 | 0,174 | 0,209 |
| 23 | [mm] | 0,067 | 0,138 | 0,210 | 0,239 | 0,200 | 0,309 |
| 24 | [mm] | 0,094 | 0,123 | 0,169 | 0,195 | 0,249 | 0,232 |
| 25 | [mm] | 0,142 | 0,159 | 0,155 | 0,165 | 0,291 | 0,278 |
| 26 | [mm] | 0,068 | 0,102 | 0,244 | 0,263 | 0,219 | 0,356 |
| 27 | [mm] | 0,069 | 0,115 | 0,182 | 0,207 | 0,314 | 0,282 |
| 28 | [mm] | 0,090 | 0,111 | 0,223 | 0,257 | 0,214 | 0,375 |
| 29 | [mm] | 0,071 | 0,203 | 0,164 | 0,188 | 0,322 | 0,221 |
| 30 | [mm] | 0,126 | 0,071 | 0,232 | 0,285 | 0,157 | 0,374 |
| 31 | [mm] | 0,065 | 0,132 | 0,123 | 0,130 | 0,107 | 0,190 |
| 32 | [mm] | 0,088 | 0,130 | 0,063 | 0,079 | 0,162 | 0,128 |
| 33 | [mm] | 0,121 | 0,117 | 0,075 | 0,079 | 0,233 | 0,184 |
| 34 | [mm] | 0,092 | 0,197 | 0,190 | 0,213 | 0,249 | 0,071 |
| 35 | [mm] | 0,134 | 0,155 | 0,184 | 0,228 | 0,167 | 0,264 |
| 36 | [mm] | 0,061 | 0,174 | 0,134 | 0,143 | 0,330 | 0,268 |
| 37 | [mm] |       | 0,194 | 0,259 | 0,303 | 0,311 | 0,221 |
| 38 | [mm] |       | 0,086 | 0,238 | 0,272 | 0,279 | 0,361 |
| 39 | [mm] |       | 0,127 | 0,234 | 0,264 | 0,357 | 0,349 |
| 40 | [mm] |       | 0,201 | 0,280 | 0,326 | 0,173 | 0,331 |
| 41 | [mm] |       | 0,249 | 0,125 | 0,150 | 0,278 | 0,395 |
| 42 | [mm] |       | 0,201 | 0,171 | 0,255 | 0,142 | 0,182 |
| 43 | [mm] |       | 0,267 | 0,084 | 0,115 | 0,111 | 0,310 |
| 44 | [mm] |       | 0,149 | 0,276 | 0,088 | 0,102 | 0,168 |
| 45 | [mm] |       | 0,197 | 0,313 | 0,077 | 0,318 | 0,143 |
| 46 | [mm] |       | 0,126 | 0,307 | 0,188 | 0,393 | 0,143 |
| 47 | [mm] |       | 0,142 | 0,219 | 0,322 | 0,360 | 0,391 |
| 48 | [mm] |       | 0,125 | 0,305 | 0,404 | 0,426 | 0,472 |
| 49 | [mm] |       | 0,167 | 0,174 | 0,364 | 0,432 | 0,478 |
| 50 | [mm] |       | 0,170 | 0,153 | 0,368 | 0,412 | 0,454 |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |  |       |       |       |       |       |
|----|------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| 51 | [mm] |  | 0,196 | 0,056 | 0,262 | 0,213 | 0,362 |
| 52 | [mm] |  | 0,244 | 0,063 | 0,336 | 0,201 | 0,435 |
| 53 | [mm] |  | 0,188 | 0,165 | 0,176 | 0,124 | 0,265 |
| 54 | [mm] |  | 0,251 | 0,253 | 0,061 | 0,130 | 0,201 |
| 55 | [mm] |  | 0,134 | 0,307 | 0,105 | 0,186 | 0,186 |
| 56 | [mm] |  | 0,138 | 0,255 | 0,190 | 0,324 | 0,176 |
| 57 | [mm] |  | 0,055 | 0,255 | 0,293 | 0,424 | 0,084 |
| 58 | [mm] |  |       | 0,350 | 0,362 | 0,411 | 0,198 |
| 59 | [mm] |  |       | 0,215 | 0,351 | 0,180 | 0,328 |
| 60 | [mm] |  |       | 0,198 | 0,297 | 0,152 | 0,494 |
| 61 | [mm] |  |       | 0,111 | 0,407 | 0,148 | 0,458 |
| 62 | [mm] |  |       | 0,088 | 0,259 | 0,353 | 0,071 |
| 63 | [mm] |  |       | 0,079 | 0,521 | 0,443 | 0,389 |
| 64 | [mm] |  |       |       | 0,141 | 0,301 | 0,516 |
| 65 | [mm] |  |       |       | 0,127 | 0,265 | 0,343 |
| 66 | [mm] |  |       |       | 0,123 |       | 0,297 |
| 67 | [mm] |  |       |       |       |       | 0,205 |
| 68 | [mm] |  |       |       |       |       | 0,183 |
| 69 | [mm] |  |       |       |       |       | 0,180 |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 1, $\phi 28$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteilseite  |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$  |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>   | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,051   | 0,078                    | 0,069                    | 0,084                    | 0,096                    | 0,110                    |
| 2                             | [mm] | 0,050   | 0,063                    | 0,100                    | 0,109                    | 0,130                    | 0,140                    |
| 3                             | [mm] | 0,082   | 0,071                    | 0,102                    | 0,125                    | 0,136                    | 0,157                    |
| 4                             | [mm] | 0,063   | 0,098                    | 0,135                    | 0,100                    | 0,148                    | 0,155                    |
| 5                             | [mm] |   | 0,082                    | 0,124                    | 0,157                    | 0,176                    | 0,201                    |
| 6                             | [mm] |   | 0,210                    | 0,249                    | 0,147                    | 0,168                    | 0,182                    |
| 7                             | [mm] |   | 0,052                    | 0,121                    | 0,251                    | 0,264                    | 0,274                    |
| 8                             | [mm] |   | 0,054                    | 0,129                    | 0,130                    | 0,138                    | 0,146                    |
| 9                             | [mm] |   | 0,109                    | 0,050                    | 0,144                    | 0,171                    | 0,207                    |
| 10                            | [mm] |   | 0,127                    | 0,173                    | 0,059                    | 0,081                    | 0,084                    |
| 11                            | [mm] |   |                          | 0,050                    | 0,199                    | 0,051                    | 0,065                    |
| 12                            | [mm] |   |                          |                          | 0,088                    | 0,228                    | 0,242                    |
| 13                            | [mm] |   |                          |                          |                          | 0,100                    |                          |

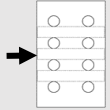
Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 1, $\phi 28$ mm, C50/60 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$                   |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>                    | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,050                                      | 0,197                    | 0,311                    | 0,331                    | 0,368                    | 0,400                    |
| 2                             | [mm] | 0,127                                      | 0,211                    | 0,274                    | 0,320                    | 0,355                    | 0,382                    |
| 3                             | [mm] | 0,113                                      | 0,211                    | 0,236                    | 0,318                    | 0,355                    | 0,393                    |
| 4                             | [mm] | 0,080                                      | 0,171                    | 0,283                    | 0,284                    | 0,326                    | 0,360                    |
| 5                             | [mm] | 0,084                                      | 0,171                    | 0,235                    | 0,334                    | 0,315                    | 0,408                    |
| 6                             | [mm] | 0,105                                      | 0,180                    | 0,266                    | 0,280                    | 0,332                    | 0,365                    |
| 7                             | [mm] | 0,090                                      | 0,058                    | 0,082                    | 0,297                    | 0,335                    | 0,363                    |
| 8                             | [mm] | 0,090                                      | 0,184                    | 0,238                    | 0,079                    | 0,132                    | 0,144                    |
| 9                             | [mm] | 0,094                                      | 0,105                    | 0,168                    | 0,290                    | 0,333                    | 0,377                    |
| 10                            | [mm] | 0,091                                      | 0,100                    | 0,161                    | 0,187                    | 0,207                    | 0,234                    |
| 11                            | [mm] | 0,090                                      | 0,092                    | 0,434                    | 0,181                    | 0,215                    | 0,234                    |
| 12                            | [mm] | 0,099                                      | 0,136                    | 0,263                    | 0,067                    | 0,116                    | 0,149                    |
| 13                            | [mm] | 0,082                                      | 0,111                    | 0,165                    | 0,474                    | 0,504                    | 0,524                    |
| 14                            | [mm] | 0,111                                      | 0,169                    | 0,236                    | 0,286                    | 0,299                    | 0,337                    |
| 15                            | [mm] | 0,104                                      | 0,198                    | 0,293                    | 0,194                    | 0,213                    | 0,263                    |
| 16                            | [mm] | 0,067                                      | 0,161                    | 0,253                    | 0,286                    | 0,328                    | 0,372                    |
| 17                            | [mm] | 0,132                                      | 0,178                    | 0,254                    | 0,332                    | 0,376                    | 0,416                    |
| 18                            | [mm] | 0,050                                      | 0,084                    | 0,117                    | 0,297                    | 0,330                    | 0,374                    |
| 19                            | [mm] | 0,059                                      | 0,171                    | 0,253                    | 0,288                    | 0,335                    | 0,376                    |
| 20                            | [mm] | 0,132                                      | 0,085                    | 0,099                    | 0,113                    | 0,136                    | 0,188                    |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |       |       |       |       |       |       |
|----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 21 | [mm] | 0,146 | 0,184 | 0,199 | 0,268 | 0,302 | 0,352 |
| 22 | [mm] | 0,144 | 0,134 | 0,236 | 0,140 | 0,157 | 0,186 |
| 23 | [mm] | 0,117 | 0,138 | 0,175 | 0,063 | 0,104 | 0,121 |
| 24 | [mm] | 0,065 | 0,221 | 0,190 | 0,214 | 0,226 | 0,245 |
| 25 | [mm] | 0,111 | 0,251 | 0,295 | 0,272 | 0,301 | 0,236 |
| 26 | [mm] | 0,103 | 0,265 | 0,084 | 0,215 | 0,249 | 0,269 |
| 27 | [mm] | 0,134 | 0,228 | 0,405 | 0,207 | 0,217 | 0,301 |
| 28 | [mm] |       | 0,146 | 0,069 | 0,341 | 0,322 | 0,177 |
| 29 | [mm] |       | 0,073 | 0,094 | 0,126 | 0,149 | 0,413 |
| 30 | [mm] |       | 0,176 | 0,253 | 0,339 | 0,390 | 0,610 |
| 31 | [mm] |       | 0,123 | 0,209 | 0,476 | 0,546 | 0,106 |
| 32 | [mm] |       | 0,119 | 0,117 | 0,081 | 0,094 | 0,180 |
| 33 | [mm] |       | 0,228 | 0,257 | 0,126 | 0,149 | 0,054 |
| 34 | [mm] |       | 0,245 | 0,182 | 0,063 | 0,086 | 0,301 |
| 35 | [mm] |       | 0,236 | 0,165 | 0,270 | 0,280 | 0,317 |
| 36 | [mm] |       |       | 0,282 | 0,240 | 0,288 | 0,190 |
| 37 | [mm] |       |       | 0,090 | 0,140 | 0,166 | 0,393 |
| 38 | [mm] |       |       | 0,295 | 0,311 | 0,349 | 0,253 |
| 39 | [mm] |       |       | 0,355 | 0,199 | 0,232 | 0,209 |
| 40 | [mm] |       |       | 0,050 | 0,180 | 0,196 | 0,175 |
| 41 | [mm] |       |       | 0,067 | 0,309 | 0,347 | 0,410 |
| 42 | [mm] |       |       |       | 0,123 | 0,146 | 0,524 |
| 43 | [mm] |       |       |       | 0,341 | 0,378 | 0,140 |
| 44 | [mm] |       |       |       | 0,409 | 0,466 | 0,202 |
| 45 | [mm] |       |       |       | 0,060 | 0,111 |       |
| 46 | [mm] |       |       |       | 0,125 | 0,157 |       |
| 47 | [mm] |       |       |       | 0,067 | 0,109 |       |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

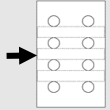
| Serie 1, $\phi 28$ mm, C50/60 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteilseite  |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$  |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>   | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,101   | 0,152                    | 0,198                    | 0,213                    | 0,231                    | 0,250                    |
| 2                             | [mm] | 0,052   | 0,082                    | 0,124                    | 0,137                    | 0,158                    | 0,181                    |
| 3                             | [mm] | 0,055   | 0,096                    | 0,065                    | 0,080                    | 0,088                    | 0,052                    |
| 4                             | [mm] | 0,053   | 0,082                    | 0,132                    | 0,141                    | 0,180                    | 0,097                    |
| 5                             | [mm] | 0,095   | 0,105                    | 0,128                    | 0,129                    | 0,142                    | 0,196                    |
| 6                             | [mm] | 0,067   | 0,069                    | 0,124                    | 0,142                    | 0,165                    | 0,154                    |
| 7                             | [mm] | 0,052   | 0,126                    | 0,056                    | 0,050                    | 0,200                    | 0,185                    |
| 8                             | [mm] | 0,121   | 0,107                    | 0,167                    | 0,186                    | 0,160                    | 0,162                    |
| 9                             | [mm] | 0,069   | 0,096                    | 0,122                    | 0,139                    | 0,132                    | 0,129                    |
| 10                            | [mm] |   | 0,141                    | 0,141                    | 0,123                    | 0,231                    | 0,227                    |
| 11                            | [mm] |   | 0,073                    | 0,186                    | 0,253                    | 0,199                    | 0,225                    |
| 12                            | [mm] |   | 0,081                    | 0,120                    | 0,149                    | 0,145                    | 0,144                    |
| 13                            | [mm] |   | 0,071                    | 0,119                    | 0,114                    | 0,154                    | 0,187                    |
| 14                            | [mm] |   | 0,091                    | 0,050                    | 0,136                    | 0,060                    | 0,173                    |
| 15                            | [mm] |   |                          | 0,054                    | 0,137                    | 0,064                    | 0,071                    |
| 16                            | [mm] |   |                          |                          | 0,061                    |                          | 0,085                    |
| 17                            | [mm] |   |                          |                          | 0,063                    |                          |                          |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung


| Serie 1.1, $\phi 28$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche |                          |                          |                          |                          |                          |
|---------------------------------|------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                        | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$                   |                          |                          |                          |                          |                          |
|                                 |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>                    | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                               | [mm] | 0,069                                      | 0,144                    | 0,192                    | 0,224                    | 0,283                    | 0,325                    |
| 2                               | [mm] | 0,088                                      | 0,175                    | 0,235                    | 0,285                    | 0,332                    | 0,368                    |
| 3                               | [mm] | 0,073                                      | 0,224                    | 0,366                    | 0,432                    | 0,510                    | 0,579                    |
| 4                               | [mm] | 0,067                                      | 0,192                    | 0,211                    | 0,215                    | 0,241                    | 0,255                    |
| 5                               | [mm] | 0,052                                      | 0,144                    | 0,222                    | 0,257                    | 0,288                    | 0,320                    |
| 6                               | [mm] | 0,050                                      | 0,140                    | 0,185                    | 0,232                    | 0,270                    | 0,233                    |
| 7                               | [mm] | 0,065                                      | 0,148                    | 0,228                    | 0,270                    | 0,302                    | 0,343                    |
| 8                               | [mm] | 0,096                                      | 0,104                    | 0,171                    | 0,203                    | 0,226                    | 0,255                    |
| 9                               | [mm] | 0,096                                      | 0,182                    | 0,086                    | 0,117                    | 0,144                    | 0,180                    |
| 10                              | [mm] | 0,071                                      | 0,192                    | 0,069                    | 0,088                    | 0,103                    | 0,124                    |
| 11                              | [mm] | 0,084                                      | 0,090                    | 0,220                    | 0,077                    | 0,111                    | 0,134                    |
| 12                              | [mm] | 0,095                                      | 0,179                    | 0,253                    | 0,240                    | 0,283                    | 0,324                    |
| 13                              | [mm] | 0,054                                      | 0,172                    | 0,327                    | 0,297                    | 0,334                    | 0,380                    |
| 14                              | [mm] | 0,076                                      | 0,160                    | 0,190                    | 0,422                    | 0,485                    | 0,572                    |
| 15                              | [mm] |  | 0,147                    | 0,235                    | 0,211                    | 0,219                    | 0,243                    |
| 16                              | [mm] |  |                          | 0,254                    | 0,280                    | 0,320                    | 0,352                    |
| 17                              | [mm] |  |                          | 0,202                    | 0,289                    | 0,333                    | 0,384                    |
| 18                              | [mm] |  |                          | 0,126                    | 0,224                    | 0,292                    | 0,349                    |
| 19                              | [mm] |  |                          | 0,120                    | 0,148                    | 0,188                    | 0,227                    |
| 20                              | [mm] |  |                          | 0,102                    | 0,145                    | 0,174                    | 0,203                    |
| 21                              | [mm] |  |                          |                          | 0,132                    | 0,165                    | 0,182                    |
| 22                              | [mm] |  |                          |                          | 0,065                    | 0,098                    | 0,132                    |



Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 1.1, $\phi 28$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteilseite  |                          |                          |                          |                          |                          |
|---------------------------------|------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                        | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$  |                          |                          |                          |                          |                          |
|                                 |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>   | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                               | [mm] | 0,050   | 0,096                    | 0,152                    | 0,160                    | 0,187                    | 0,217                    |
| 2                               | [mm] | 0,061   | 0,088                    | 0,117                    | 0,140                    | 0,163                    | 0,189                    |
| 3                               | [mm] | 0,113   | 0,056                    | 0,080                    | 0,119                    | 0,132                    | 0,147                    |
| 4                               | [mm] | 0,058   | 0,113                    | 0,080                    | 0,096                    | 0,112                    | 0,136                    |
| 5                               | [mm] | 0,081   | 0,150                    | 0,153                    | 0,159                    | 0,184                    | 0,199                    |
| 6                               | [mm] | 0,057   | 0,115                    | 0,191                    | 0,213                    | 0,232                    | 0,253                    |
| 7                               | [mm] | 0,102   | 0,050                    | 0,088                    | 0,119                    | 0,155                    | 0,167                    |
| 8                               | [mm] | 0,121   | 0,107                    | 0,119                    | 0,136                    | 0,142                    | 0,151                    |
| 9                               | [mm] | 0,122   | 0,127                    | 0,166                    | 0,130                    | 0,140                    | 0,169                    |
| 10                              | [mm] | 0,076   | 0,061                    | 0,167                    | 0,059                    | 0,059                    | 0,061                    |
| 11                              | [mm] |   | 0,101                    | 0,058                    | 0,190                    | 0,219                    | 0,311                    |
| 12                              | [mm] |   | 0,112                    | 0,059                    | 0,188                    | 0,203                    | 0,226                    |
| 13                              | [mm] |   | 0,165                    | 0,165                    | 0,069                    | 0,073                    | 0,081                    |
| 14                              | [mm] |   | 0,154                    | 0,206                    | 0,065                    | 0,065                    | 0,069                    |
| 15                              | [mm] |   | 0,181                    | 0,205                    | 0,174                    | 0,211                    | 0,245                    |
| 16                              | [mm] |   |                          | 0,175                    | 0,236                    | 0,276                    | 0,301                    |
| 17                              | [mm] |   |                          | 0,050                    | 0,257                    | 0,276                    | 0,300                    |
| 18                              | [mm] |   |                          | 0,217                    | 0,192                    | 0,206                    | 0,233                    |
| 19                              | [mm] |   |                          |                          | 0,071                    | 0,073                    | 0,080                    |
| 20                              | [mm] |   |                          |                          | 0,236                    | 0,260                    | 0,284                    |
| 21                              | [mm] |   |                          |                          | 0,054                    | 0,067                    | 0,110                    |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 2, $\phi 28$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche   |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                               |      |  |                          |                          |                          |                          |                          |
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$   |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>  | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,115  | 0,138                    | 0,199                    | 0,243                    | 0,270                    | 0,316                    |
| 2                             | [mm] | 0,085  | 0,143                    | 0,211                    | 0,230                    | 0,266                    | 0,293                    |
| 3                             | [mm] | 0,079  | 0,052                    | 0,128                    | 0,155                    | 0,193                    | 0,243                    |
| 4                             | [mm] | 0,069  | 0,260                    | 0,373                    | 0,410                    | 0,435                    | 0,481                    |
| 5                             | [mm] | 0,069  | 0,247                    | 0,306                    | 0,338                    | 0,404                    | 0,410                    |
| 6                             | [mm] | 0,113  | 0,123                    | 0,057                    | 0,077                    | 0,103                    | 0,119                    |
| 7                             | [mm] | 0,094  | 0,105                    | 0,178                    | 0,061                    | 0,067                    | 0,082                    |
| 8                             | [mm] | 0,094  | 0,077                    | 0,182                    | 0,192                    | 0,197                    | 0,224                    |
| 9                             | [mm] | 0,092  | 0,134                    | 0,109                    | 0,203                    | 0,245                    | 0,253                    |
| 10                            | [mm] | 0,092  | 0,203                    | 0,218                    | 0,113                    | 0,111                    | 0,123                    |
| 11                            | [mm] | 0,061  | 0,054                    | 0,320                    | 0,255                    | 0,284                    | 0,328                    |
| 12                            | [mm] | 0,094  | 0,142                    | 0,079                    | 0,330                    | 0,389                    | 0,429                    |
| 13                            | [mm] | 0,094  | 0,146                    | 0,138                    | 0,086                    | 0,109                    | 0,132                    |
| 14                            | [mm] | 0,058  | 0,138                    | 0,230                    | 0,121                    | 0,130                    | 0,278                    |
| 15                            | [mm] | 0,100  | 0,119                    | 0,212                    | 0,254                    | 0,272                    | 0,291                    |
| 16                            | [mm] | 0,067  | 0,220                    | 0,199                    | 0,234                    | 0,270                    | 0,284                    |
| 17                            | [mm] | 0,074  | 0,216                    | 0,209                    | 0,220                    | 0,260                    | 0,209                    |
| 18                            | [mm] | 0,076  | 0,134                    | 0,270                    | 0,214                    | 0,180                    | 0,390                    |
| 19                            | [mm] | 0,096  | 0,393                    | 0,063                    | 0,301                    | 0,340                    | 0,094                    |
| 20                            | [mm] | 0,088  | 0,119                    | 0,157                    | 0,084                    | 0,088                    | 0,218                    |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |       |       |       |       |       |       |
|----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 21 | [mm] | 0,076 | 0,115 | 0,396 | 0,179 | 0,201 | 0,481 |
| 22 | [mm] | 0,077 | 0,192 | 0,069 | 0,427 | 0,448 | 0,109 |
| 23 | [mm] | 0,050 | 0,144 | 0,207 | 0,077 | 0,090 | 0,289 |
| 24 | [mm] | 0,063 | 0,079 | 0,172 | 0,237 | 0,264 | 0,268 |
| 25 | [mm] | 0,090 | 0,092 | 0,283 | 0,195 | 0,230 | 0,428 |
| 26 | [mm] | 0,058 | 0,142 | 0,205 | 0,331 | 0,364 | 0,350 |
| 27 | [mm] | 0,092 | 0,088 | 0,134 | 0,245 | 0,303 | 0,209 |
| 28 | [mm] | 0,080 | 0,207 | 0,157 | 0,157 | 0,178 | 0,203 |
| 29 | [mm] | 0,134 | 0,155 | 0,167 | 0,188 | 0,205 | 0,303 |
| 30 | [mm] | 0,092 | 0,134 | 0,154 | 0,240 | 0,263 | 0,196 |
| 31 | [mm] | 0,061 | 0,084 | 0,232 | 0,163 | 0,178 | 0,311 |
| 32 | [mm] | 0,099 | 0,124 | 0,226 | 0,273 | 0,284 | 0,265 |
| 33 | [mm] | 0,094 | 0,121 | 0,194 | 0,230 | 0,247 | 0,134 |
| 34 | [mm] | 0,084 | 0,171 | 0,111 | 0,226 | 0,121 | 0,259 |
| 35 | [mm] | 0,149 | 0,077 | 0,185 | 0,120 | 0,218 | 0,312 |
| 36 | [mm] | 0,073 | 0,157 | 0,209 | 0,199 | 0,282 | 0,091 |
| 37 | [mm] | 0,071 | 0,174 | 0,194 | 0,241 | 0,075 | 0,242 |
| 38 | [mm] | 0,069 | 0,121 | 0,113 | 0,210 | 0,234 | 0,149 |
| 39 | [mm] | 0,075 | 0,176 | 0,242 | 0,124 | 0,134 | 0,303 |
| 40 | [mm] | 0,054 | 0,136 | 0,246 | 0,278 | 0,286 | 0,285 |
| 41 | [mm] | 0,082 | 0,122 | 0,184 | 0,249 | 0,265 | 0,281 |
| 42 | [mm] | 0,090 | 0,095 | 0,107 | 0,212 | 0,245 | 0,099 |
| 43 | [mm] |       | 0,155 | 0,059 | 0,069 | 0,092 | 0,347 |
| 44 | [mm] |       | 0,111 | 0,245 | 0,278 | 0,320 | 0,208 |
| 45 | [mm] |       | 0,110 | 0,184 | 0,228 | 0,215 | 0,069 |
| 46 | [mm] |       | 0,145 | 0,105 | 0,082 | 0,073 | 0,230 |
| 47 | [mm] |       | 0,078 | 0,148 | 0,176 | 0,201 | 0,301 |
| 48 | [mm] |       | 0,180 | 0,215 | 0,236 | 0,280 | 0,299 |
| 49 | [mm] |       | 0,146 | 0,186 | 0,224 | 0,268 | 0,138 |
| 50 | [mm] |       | 0,188 | 0,082 | 0,101 | 0,125 | 0,173 |

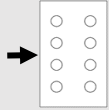
Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |  |       |       |       |       |       |
|----|------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| 51 | [mm] |  | 0,190 | 0,132 | 0,140 | 0,165 | 0,154 |
| 52 | [mm] |  | 0,105 | 0,115 | 0,149 | 0,144 | 0,362 |
| 53 | [mm] |  | 0,134 | 0,222 | 0,266 | 0,306 | 0,367 |
| 54 | [mm] |  | 0,237 | 0,233 | 0,299 | 0,332 | 0,421 |
| 55 | [mm] |  | 0,115 | 0,239 | 0,316 | 0,509 | 0,426 |
| 56 | [mm] |  | 0,113 | 0,236 | 0,340 | 0,373 | 0,295 |
| 57 | [mm] |  | 0,098 | 0,284 | 0,338 | 0,265 | 0,263 |
| 58 | [mm] |  | 0,146 | 0,285 | 0,229 | 0,224 | 0,402 |
| 59 | [mm] |  | 0,169 | 0,203 | 0,205 | 0,362 | 0,275 |
| 60 | [mm] |  | 0,148 | 0,178 | 0,325 | 0,257 | 0,109 |
| 61 | [mm] |  | 0,195 | 0,291 | 0,204 | 0,100 | 0,267 |
| 62 | [mm] |  | 0,176 | 0,157 | 0,071 | 0,255 | 0,336 |
| 63 | [mm] |  | 0,207 | 0,075 | 0,215 | 0,272 | 0,305 |
| 64 | [mm] |  | 0,119 | 0,174 | 0,232 | 0,266 | 0,473 |
| 65 | [mm] |  | 0,124 | 0,190 | 0,219 | 0,432 | 0,427 |
| 66 | [mm] |  | 0,136 | 0,191 | 0,393 | 0,340 | 0,502 |
| 67 | [mm] |  | 0,153 | 0,167 | 0,307 | 0,478 | 0,296 |
| 68 | [mm] |  | 0,203 | 0,253 | 0,431 | 0,280 | 0,426 |
| 69 | [mm] |  | 0,205 | 0,303 | 0,266 | 0,376 | 0,147 |
| 70 | [mm] |  | 0,224 | 0,230 | 0,341 | 0,138 | 0,300 |
| 71 | [mm] |  | 0,171 | 0,302 | 0,096 | 0,278 | 0,391 |
| 72 | [mm] |  | 0,076 | 0,221 | 0,252 | 0,327 | 0,299 |
| 73 | [mm] |  | 0,196 | 0,084 | 0,286 | 0,272 | 0,467 |
| 74 | [mm] |  | 0,132 | 0,207 | 0,246 | 0,398 | 0,461 |
| 75 | [mm] |  | 0,092 | 0,221 | 0,372 | 0,414 | 0,477 |
| 76 | [mm] |  | 0,168 | 0,211 | 0,363 | 0,408 | 0,364 |
| 77 | [mm] |  | 0,180 | 0,324 | 0,394 | 0,324 | 0,378 |
| 78 | [mm] |  | 0,176 | 0,316 | 0,286 | 0,328 | 0,315 |
| 79 | [mm] |  | 0,176 | 0,287 | 0,278 | 0,276 | 0,280 |
| 80 | [mm] |  | 0,143 | 0,244 | 0,332 | 0,246 | 0,359 |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |  |       |       |       |       |       |
|----|------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| 81 | [mm] |  | 0,108 | 0,257 | 0,209 | 0,328 | 0,435 |
| 82 | [mm] |  | 0,094 | 0,254 | 0,288 | 0,389 | 0,439 |
| 83 | [mm] |  | 0,123 | 0,203 | 0,345 | 0,378 | 0,407 |
| 84 | [mm] |  | 0,098 | 0,169 | 0,329 | 0,372 | 0,196 |
| 85 | [mm] |  |       | 0,230 | 0,324 | 0,192 | 0,215 |
| 86 | [mm] |  |       | 0,288 | 0,186 | 0,251 | 0,322 |
| 87 | [mm] |  |       | 0,286 | 0,207 | 0,276 | 0,309 |
| 88 | [mm] |  |       | 0,272 | 0,219 | 0,276 | 0,255 |
| 89 | [mm] |  |       | 0,180 | 0,236 | 0,238 |       |
| 90 | [mm] |  |       | 0,167 | 0,194 |       |       |
| 91 | [mm] |  |       | 0,161 |       |       |       |
| 92 | [mm] |  |       | 0,194 |       |       |       |
| 93 | [mm] |  |       | 0,171 |       |       |       |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 2, $\phi 28$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteilseite  |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$  |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>   | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,050   | 0,068                    | 0,153                    | 0,172                    | 0,196                    | 0,203                    |
| 2                             | [mm] | 0,136   | 0,054                    | 0,063                    | 0,065                    | 0,086                    | 0,084                    |
| 3                             | [mm] | 0,059   | 0,100                    | 0,081                    | 0,092                    | 0,098                    | 0,111                    |
| 4                             | [mm] | 0,071   | 0,113                    | 0,054                    | 0,067                    | 0,077                    | 0,090                    |
| 5                             | [mm] | 0,090   | 0,054                    | 0,133                    | 0,152                    | 0,169                    | 0,194                    |
| 6                             | [mm] |   | 0,190                    | 0,137                    | 0,191                    | 0,242                    | 0,267                    |
| 7                             | [mm] |   | 0,075                    | 0,086                    | 0,115                    | 0,146                    | 0,169                    |
| 8                             | [mm] |   | 0,084                    | 0,080                    | 0,096                    | 0,050                    | 0,051                    |
| 9                             | [mm] |   | 0,144                    | 0,245                    | 0,278                    | 0,107                    | 0,122                    |
| 10                            | [mm] |   | 0,121                    | 0,093                    | 0,113                    | 0,309                    | 0,082                    |
| 11                            | [mm] |   | 0,071                    | 0,113                    | 0,129                    | 0,127                    | 0,330                    |
| 12                            | [mm] |   | 0,052                    | 0,239                    | 0,252                    | 0,132                    | 0,155                    |
| 13                            | [mm] |   | 0,094                    | 0,164                    | 0,191                    | 0,265                    | 0,153                    |
| 14                            | [mm] |   | 0,050                    | 0,107                    | 0,125                    | 0,211                    | 0,297                    |
| 15                            | [mm] |   | 0,052                    | 0,159                    | 0,182                    | 0,134                    | 0,232                    |
| 16                            | [mm] |   | 0,135                    | 0,065                    | 0,078                    | 0,199                    | 0,136                    |
| 17                            | [mm] |   | 0,077                    | 0,081                    | 0,107                    | 0,090                    | 0,222                    |
| 18                            | [mm] |   | 0,082                    | 0,063                    | 0,057                    | 0,119                    | 0,109                    |
| 19                            | [mm] |   | 0,150                    | 0,145                    | 0,071                    | 0,075                    | 0,125                    |
| 20                            | [mm] |   | 0,092                    | 0,062                    | 0,172                    | 0,082                    | 0,088                    |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |  |  |       |       |       |       |
|----|------|--|--|-------|-------|-------|-------|
| 21 | [mm] |  |  | 0,147 | 0,064 | 0,199 | 0,101 |
| 22 | [mm] |  |  | 0,100 | 0,184 | 0,075 | 0,230 |
| 23 | [mm] |  |  | 0,149 | 0,115 | 0,145 | 0,111 |
| 24 | [mm] |  |  | 0,052 | 0,181 | 0,121 | 0,057 |
| 25 | [mm] |  |  | 0,176 | 0,054 | 0,189 | 0,180 |
| 26 | [mm] |  |  | 0,079 | 0,238 | 0,067 | 0,147 |
| 27 | [mm] |  |  | 0,090 | 0,096 | 0,307 | 0,339 |
| 28 | [mm] |  |  | 0,069 | 0,113 | 0,111 | 0,081 |
| 29 | [mm] |  |  | 0,110 | 0,090 | 0,136 | 0,350 |
| 30 | [mm] |  |  | 0,054 | 0,138 | 0,103 | 0,140 |
| 31 | [mm] |  |  | 0,079 | 0,213 | 0,151 | 0,109 |
| 32 | [mm] |  |  | 0,084 | 0,075 | 0,081 | 0,188 |
| 33 | [mm] |  |  | 0,127 | 0,117 | 0,238 | 0,259 |
| 34 | [mm] |  |  |       | 0,099 | 0,135 | 0,155 |
| 35 | [mm] |  |  |       | 0,131 | 0,107 | 0,109 |
| 36 | [mm] |  |  |       |       | 0,056 | 0,148 |
| 37 | [mm] |  |  |       |       | 0,148 | 0,063 |
| 38 | [mm] |  |  |       |       |       | 0,184 |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

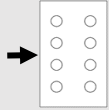
| Serie 2, $\phi 28$ mm, C50/60 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$                   |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>                    | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,081                                      | 0,151                    | 0,217                    | 0,249                    | 0,305                    | 0,328                    |
| 2                             | [mm] | 0,092                                      | 0,181                    | 0,246                    | 0,274                    | 0,315                    | 0,355                    |
| 3                             | [mm] | 0,111                                      | 0,188                    | 0,255                    | 0,260                    | 0,301                    | 0,320                    |
| 4                             | [mm] | 0,063                                      | 0,125                    | 0,215                    | 0,254                    | 0,284                    | 0,296                    |
| 5                             | [mm] | 0,136                                      | 0,201                    | 0,293                    | 0,311                    | 0,355                    | 0,403                    |
| 6                             | [mm] | 0,071                                      | 0,182                    | 0,259                    | 0,303                    | 0,345                    | 0,387                    |
| 7                             | [mm] | 0,071                                      | 0,188                    | 0,265                    | 0,385                    | 0,442                    | 0,497                    |
| 8                             | [mm] | 0,065                                      | 0,198                    | 0,268                    | 0,283                    | 0,374                    | 0,399                    |
| 9                             | [mm] | 0,087                                      | 0,178                    | 0,251                    | 0,315                    | 0,355                    | 0,401                    |
| 10                            | [mm] | 0,069                                      | 0,054                    | 0,094                    | 0,113                    | 0,140                    | 0,159                    |
| 11                            | [mm] | 0,092                                      | 0,107                    | 0,184                    | 0,207                    | 0,069                    | 0,087                    |
| 12                            | [mm] | 0,090                                      | 0,130                    | 0,184                    | 0,211                    | 0,259                    | 0,271                    |
| 13                            | [mm] | 0,092                                      | 0,154                    | 0,224                    | 0,267                    | 0,242                    | 0,267                    |
| 14                            | [mm] | 0,084                                      | 0,134                    | 0,217                    | 0,249                    | 0,300                    | 0,293                    |
| 15                            | [mm] | 0,088                                      | 0,201                    | 0,295                    | 0,322                    | 0,286                    | 0,334                    |
| 16                            | [mm] | 0,065                                      | 0,203                    | 0,320                    | 0,370                    | 0,386                    | 0,397                    |
| 17                            | [mm] | 0,059                                      | 0,142                    | 0,239                    | 0,275                    | 0,420                    | 0,475                    |
| 18                            | [mm] | 0,121                                      | 0,192                    | 0,269                    | 0,324                    | 0,328                    | 0,361                    |
| 19                            | [mm] | 0,098                                      | 0,077                    | 0,146                    | 0,171                    | 0,366                    | 0,412                    |
| 20                            | [mm] | 0,100                                      | 0,163                    | 0,228                    | 0,278                    | 0,188                    | 0,217                    |



Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |       |       |       |       |       |       |
|----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 21 | [mm] | 0,061 | 0,180 | 0,261 | 0,326 | 0,306 | 0,347 |
| 22 | [mm] | 0,121 | 0,157 | 0,249 | 0,290 | 0,370 | 0,427 |
| 23 | [mm] |       | 0,226 | 0,328 | 0,393 | 0,338 | 0,389 |
| 24 | [mm] |       | 0,111 | 0,171 | 0,203 | 0,462 | 0,506 |
| 25 | [mm] |       | 0,161 | 0,234 | 0,255 | 0,215 | 0,249 |
| 26 | [mm] |       | 0,184 | 0,279 | 0,334 | 0,318 | 0,343 |
| 27 | [mm] |       | 0,205 | 0,309 | 0,370 | 0,373 | 0,448 |
| 28 | [mm] |       | 0,187 | 0,282 | 0,332 | 0,410 | 0,464 |
| 29 | [mm] |       | 0,240 | 0,345 | 0,401 | 0,385 | 0,435 |
| 30 | [mm] |       | 0,102 | 0,170 | 0,205 | 0,445 | 0,500 |
| 31 | [mm] |       | 0,170 | 0,252 | 0,297 | 0,233 | 0,260 |
| 32 | [mm] |       |       |       |       | 0,322 | 0,374 |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 2, $\phi 28$ mm, 50/60 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteilseite  |                          |                          |                          |                          |                          |
|------------------------------|------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                     | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$  |                          |                          |                          |                          |                          |
|                              |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>   | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                            | [mm] | 0,077   | 0,112                    | 0,150                    | 0,175                    | 0,202                    | 0,215                    |
| 2                            | [mm] | 0,080   | 0,055                    | 0,091                    | 0,106                    | 0,116                    | 0,125                    |
| 3                            | [mm] | 0,050   | 0,055                    | 0,070                    | 0,077                    | 0,080                    | 0,083                    |
| 4                            | [mm] |   | 0,097                    | 0,118                    | 0,138                    | 0,125                    | 0,139                    |
| 5                            | [mm] |   | 0,067                    | 0,103                    | 0,124                    | 0,154                    | 0,174                    |
| 6                            | [mm] |   | 0,061                    | 0,092                    | 0,120                    | 0,142                    | 0,171                    |
| 7                            | [mm] |   | 0,068                    | 0,125                    | 0,105                    | 0,133                    | 0,148                    |
| 8                            | [mm] |   | 0,091                    | 0,123                    | 0,142                    | 0,121                    | 0,125                    |
| 9                            | [mm] |   | 0,084                    | 0,144                    | 0,140                    | 0,156                    | 0,177                    |
| 10                           | [mm] |   | 0,071                    |                          | 0,162                    | 0,158                    | 0,177                    |
| 11                           | [mm] |   |                          |                          |                          | 0,186                    | 0,205                    |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 3, $\phi 28$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$                   |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>                    | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,072                                      | 0,130                    | 0,166                    | 0,174                    | 0,052                    | 0,063                    |
| 2                             | [mm] | 0,081                                      | 0,098                    | 0,126                    | 0,138                    | 0,205                    | 0,263                    |
| 3                             | [mm] | 0,067                                      | 0,079                    | 0,194                    | 0,197                    | 0,167                    | 0,180                    |
| 4                             | [mm] | 0,119                                      | 0,094                    | 0,105                    | 0,130                    | 0,293                    | 0,261                    |
| 5                             | [mm] |  | 0,067                    | 0,111                    | 0,088                    | 0,151                    | 0,189                    |
| 6                             | [mm] |  | 0,080                    | 0,188                    | 0,255                    | 0,127                    | 0,118                    |
| 7                             | [mm] |  | 0,100                    | 0,141                    | 0,147                    | 0,288                    | 0,342                    |
| 8                             | [mm] |  | 0,181                    | 0,105                    | 0,127                    | 0,158                    | 0,130                    |
| 9                             | [mm] |  | 0,073                    | 0,094                    | 0,096                    | 0,148                    | 0,182                    |
| 10                            | [mm] |  | 0,077                    | 0,077                    | 0,077                    | 0,117                    | 0,145                    |
| 11                            | [mm] |  |                          | 0,184                    | 0,176                    | 0,106                    | 0,110                    |
| 12                            | [mm] |  |                          | 0,134                    | 0,151                    | 0,056                    | 0,086                    |
| 13                            | [mm] |  |                          | 0,171                    | 0,203                    | 0,161                    | 0,180                    |
| 14                            | [mm] |  |                          | 0,213                    | 0,255                    | 0,119                    | 0,138                    |
| 15                            | [mm] |  |                          | 0,092                    | 0,086                    | 0,242                    | 0,293                    |
| 16                            | [mm] |  |                          | 0,088                    | 0,088                    | 0,263                    | 0,307                    |
| 17                            | [mm] |  |                          | 0,080                    | 0,098                    | 0,077                    | 0,079                    |
| 18                            | [mm] |  |                          | 0,079                    | 0,110                    | 0,090                    | 0,090                    |
| 19                            | [mm] |  |                          |                          |                          | 0,121                    | 0,146                    |
| 20                            | [mm] |  |                          |                          |                          | 0,113                    | 0,147                    |
| 21                            | [mm] |  |                          |                          |                          | 0,095                    | 0,119                    |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 4, $\phi 28$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$                   |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>                    | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,076                                      | 0,067                    | 0,084                    | 0,113                    | 0,111                    | 0,144                    |
| 2                             | [mm] | 0,107                                      | 0,094                    | 0,105                    | 0,116                    | 0,134                    | 0,136                    |
| 3                             | [mm] | 0,069                                      | 0,123                    | 0,128                    | 0,142                    | 0,163                    | 0,184                    |
| 4                             | [mm] | 0,086                                      | 0,092                    | 0,154                    | 0,175                    | 0,188                    | 0,182                    |
| 5                             | [mm] | 0,067                                      | 0,086                    | 0,077                    | 0,097                    | 0,109                    | 0,108                    |
| 6                             | [mm] | 0,068                                      | 0,065                    | 0,147                    | 0,157                    | 0,168                    | 0,163                    |
| 7                             | [mm] | 0,073                                      | 0,128                    | 0,117                    | 0,134                    | 0,161                    | 0,172                    |
| 8                             | [mm] | 0,063                                      | 0,090                    | 0,059                    | 0,104                    | 0,086                    | 0,123                    |
| 9                             | [mm] | 0,096                                      | 0,111                    | 0,063                    | 0,104                    | 0,146                    | 0,157                    |
| 10                            | [mm] | 0,052                                      | 0,056                    | 0,084                    | 0,092                    | 0,149                    | 0,138                    |
| 11                            | [mm] | 0,063                                      | 0,084                    | 0,165                    | 0,184                    | 0,197                    | 0,214                    |
| 12                            | [mm] | 0,050                                      | 0,069                    | 0,113                    | 0,146                    | 0,184                    | 0,192                    |
| 13                            | [mm] | 0,075                                      | 0,056                    | 0,142                    | 0,140                    | 0,167                    | 0,186                    |
| 14                            | [mm] | 0,065                                      | 0,069                    | 0,079                    | 0,096                    | 0,133                    | 0,065                    |
| 15                            | [mm] |  | 0,098                    | 0,063                    | 0,067                    | 0,138                    | 0,167                    |
| 16                            | [mm] |  | 0,071                    | 0,128                    | 0,148                    | 0,150                    | 0,113                    |
| 17                            | [mm] |  | 0,125                    | 0,113                    | 0,132                    | 0,153                    | 0,148                    |
| 18                            | [mm] |  | 0,056                    | 0,094                    | 0,111                    | 0,132                    | 0,184                    |
| 19                            | [mm] |  | 0,115                    | 0,109                    | 0,134                    | 0,153                    | 0,182                    |
| 20                            | [mm] |  | 0,086                    | 0,130                    | 0,138                    | 0,157                    | 0,188                    |

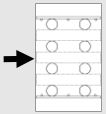
Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |  |       |       |       |       |       |
|----|------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| 21 | [mm] |  | 0,119 | 0,107 | 0,121 | 0,146 | 0,161 |
| 22 | [mm] |  | 0,090 | 0,161 | 0,194 | 0,205 | 0,173 |
| 23 | [mm] |  | 0,092 | 0,109 | 0,109 | 0,140 | 0,234 |
| 24 | [mm] |  | 0,107 | 0,117 | 0,127 | 0,171 | 0,134 |
| 25 | [mm] |  | 0,109 | 0,136 | 0,157 | 0,175 | 0,115 |
| 26 | [mm] |  | 0,056 | 0,169 | 0,188 | 0,189 | 0,184 |
| 27 | [mm] |  | 0,086 | 0,144 | 0,157 | 0,180 | 0,207 |
| 28 | [mm] |  | 0,086 | 0,060 | 0,153 | 0,173 | 0,190 |
| 29 | [mm] |  | 0,067 | 0,136 | 0,060 | 0,051 | 0,245 |
| 30 | [mm] |  | 0,138 | 0,144 | 0,157 | 0,178 | 0,199 |
| 31 | [mm] |  | 0,067 | 0,132 | 0,165 | 0,167 | 0,242 |
| 32 | [mm] |  |       | 0,102 | 0,138 | 0,153 | 0,155 |
| 33 | [mm] |  |       | 0,094 | 0,056 | 0,067 | 0,092 |
| 34 | [mm] |  |       | 0,090 | 0,117 | 0,134 | 0,136 |
| 35 | [mm] |  |       | 0,100 | 0,107 | 0,125 | 0,151 |
| 36 | [mm] |  |       | 0,153 | 0,157 | 0,173 | 0,222 |
| 37 | [mm] |  |       | 0,123 | 0,107 | 0,142 | 0,155 |
| 38 | [mm] |  |       | 0,054 | 0,178 | 0,188 | 0,196 |
| 39 | [mm] |  |       | 0,084 | 0,142 | 0,161 | 0,178 |
| 40 | [mm] |  |       |       | 0,061 | 0,081 | 0,096 |
| 41 | [mm] |  |       |       | 0,108 | 0,123 | 0,136 |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

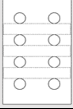
| Serie 4.1, $\phi 28$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche |                          |                          |                          |                          |                          |
|---------------------------------|------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                        | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$                   |                          |                          |                          |                          |                          |
|                                 |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>                    | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                               | [mm] | 0,094                                      | 0,169                    | 0,251                    | 0,288                    | 0,326                    | 0,368                    |
| 2                               | [mm] | 0,077                                      | 0,127                    | 0,188                    | 0,219                    | 0,255                    | 0,297                    |
| 3                               | [mm] | 0,075                                      | 0,159                    | 0,244                    | 0,290                    | 0,324                    | 0,361                    |
| 4                               | [mm] | 0,077                                      | 0,151                    | 0,240                    | 0,297                    | 0,330                    | 0,355                    |
| 5                               | [mm] | 0,065                                      | 0,157                    | 0,251                    | 0,286                    | 0,328                    | 0,358                    |
| 6                               | [mm] | 0,054                                      | 0,161                    | 0,238                    | 0,288                    | 0,335                    | 0,386                    |
| 7                               | [mm] | 0,086                                      | 0,052                    | 0,102                    | 0,138                    | 0,159                    | 0,169                    |
| 8                               | [mm] | 0,077                                      | 0,165                    | 0,282                    | 0,335                    | 0,376                    | 0,435                    |
| 9                               | [mm] | 0,099                                      | 0,102                    | 0,163                    | 0,194                    | 0,226                    | 0,255                    |
| 10                              | [mm] |  | 0,100                    | 0,135                    | 0,165                    | 0,208                    | 0,261                    |
| 11                              | [mm] |  | 0,148                    | 0,232                    | 0,269                    | 0,318                    | 0,351                    |
| 12                              | [mm] |  | 0,144                    | 0,214                    | 0,244                    | 0,290                    | 0,335                    |
| 13                              | [mm] |  | 0,178                    | 0,276                    | 0,326                    | 0,361                    | 0,389                    |
| 14                              | [mm] |  | 0,167                    | 0,251                    | 0,291                    | 0,332                    | 0,341                    |
| 15                              | [mm] |  | 0,173                    | 0,282                    | 0,324                    | 0,370                    | 0,400                    |
| 16                              | [mm] |  | 0,148                    | 0,261                    | 0,240                    | 0,333                    | 0,392                    |
| 17                              | [mm] |  | 0,056                    | 0,113                    | 0,165                    | 0,188                    | 0,207                    |
| 18                              | [mm] |  | 0,130                    | 0,247                    | 0,301                    | 0,349                    | 0,395                    |
| 19                              | [mm] |  | 0,115                    | 0,167                    | 0,203                    | 0,240                    | 0,274                    |
| 20                              | [mm] |  | 0,249                    | 0,328                    | 0,368                    | 0,404                    | 0,451                    |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 4.1, $\phi 28$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteilseite  |                          |                          |                          |                          |                          |
|---------------------------------|------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                        | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$  |                          |                          |                          |                          |                          |
|                                 |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>   | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                               | [mm] | 0,061   | 0,094                    | 0,053                    | 0,054                    | 0,063                    | 0,072                    |
| 2                               | [mm] |   | 0,065                    | 0,117                    | 0,139                    | 0,164                    | 0,169                    |
| 3                               | [mm] |   | 0,079                    | 0,107                    | 0,125                    | 0,117                    | 0,138                    |
| 4                               | [mm] |   | 0,088                    | 0,148                    | 0,081                    | 0,100                    | 0,125                    |
| 5                               | [mm] |   | 0,067                    | 0,073                    | 0,067                    | 0,081                    | 0,077                    |
| 6                               | [mm] |   | 0,077                    | 0,132                    | 0,178                    | 0,190                    | 0,210                    |
| 7                               | [mm] |   | 0,063                    | 0,142                    | 0,101                    | 0,128                    | 0,150                    |
| 8                               | [mm] |   | 0,069                    | 0,128                    | 0,126                    | 0,151                    | 0,170                    |
| 9                               | [mm] |   | 0,096                    | 0,086                    | 0,157                    | 0,182                    | 0,195                    |
| 10                              | [mm] |   | 0,113                    | 0,119                    | 0,150                    | 0,176                    | 0,207                    |
| 11                              | [mm] |   |                          | 0,146                    | 0,097                    | 0,112                    | 0,126                    |
| 12                              | [mm] |   |                          | 0,156                    | 0,063                    | 0,054                    | 0,075                    |
| 13                              | [mm] |   |                          | 0,054                    | 0,142                    | 0,164                    | 0,191                    |
| 14                              | [mm] |   |                          | 0,129                    | 0,153                    | 0,183                    | 0,201                    |
| 15                              | [mm] |   |                          |                          | 0,169                    | 0,201                    | 0,214                    |
| 16                              | [mm] |   |                          |                          | 0,059                    | 0,050                    | 0,065                    |
| 17                              | [mm] |   |                          |                          | 0,180                    | 0,076                    | 0,084                    |
| 18                              | [mm] |   |                          |                          |                          | 0,190                    | 0,221                    |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

B.1.3 Stabdurchmesser  $\phi 40$  mm

| Serie 1, $\phi 40$ mm, C30/37 |      |                          | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche   |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|--------------------------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                               |      |                          | ↓<br> |                          |                          |                          |                          |
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$ |  |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>  | 160<br>N/mm <sup>2</sup>   | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,075                    | 0,065  | 0,061                    | 0,061                    |                          |                          |
| 2                             | [mm] | 0,063                    | 0,216  | 0,308                    | 0,366                    |                          |                          |
| 3                             | [mm] | 0,084                    | 0,106  | 0,172                    | 0,193                    |                          |                          |
| 4                             | [mm] | 0,078                    | 0,174  | 0,295                    | 0,322                    |                          |                          |
| 5                             | [mm] | 0,068                    | 0,174  | 0,276                    | 0,234                    |                          |                          |
| 6                             | [mm] | 0,105                    | 0,157  | 0,214                    | 0,221                    |                          |                          |
| 7                             | [mm] | 0,08                     | 0,13   | 0,192                    | 0,228                    |                          |                          |
| 8                             | [mm] | 0,071                    | 0,096  | 0,15                     | 0,173                    |                          |                          |
| 9                             | [mm] | 0,058                    | 0,073  | 0,119                    | 0,175                    |                          |                          |
| 10                            | [mm] | 0,131                    | 0,161  | 0,25                     | 0,284                    |                          |                          |
| 11                            | [mm] | 0,092                    | 0,215  | 0,341                    | 0,28                     |                          |                          |
| 12                            | [mm] | 0,075                    | 0,123  | 0,192                    | 0,214                    |                          |                          |
| 13                            | [mm] | 0,084                    | 0,069  | 0,151                    | 0,195                    |                          |                          |
| 14                            | [mm] | 0,09                     | 0,172  | 0,251                    | 0,305                    |                          |                          |
| 15                            | [mm] | 0,102                    | 0,123  | 0,186                    | 0,219                    |                          |                          |
| 16                            | [mm] | 0,081                    | 0,109  | 0,178                    | 0,217                    |                          |                          |
| 17                            | [mm] | 0,052                    | 0,067  | 0,132                    | 0,167                    |                          |                          |
| 18                            | [mm] | 0,086                    | 0,099  | 0,18                     | 0,207                    |                          |                          |
| 19                            | [mm] | 0,067                    | 0,104  | 0,159                    | 0,186                    |                          |                          |
| 20                            | [mm] | 0,111                    | 0,209  | 0,29                     | 0,311                    |                          |                          |



Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |       |       |       |       |  |  |
|----|------|-------|-------|-------|-------|--|--|
| 21 | [mm] | 0,067 | 0,125 | 0,192 | 0,224 |  |  |
| 22 | [mm] | 0,089 | 0,117 | 0,171 | 0,192 |  |  |
| 23 | [mm] | 0,115 | 0,122 | 0,171 | 0,205 |  |  |
| 24 | [mm] | 0,125 | 0,165 | 0,424 | 0,465 |  |  |
| 25 | [mm] | 0,079 | 0,197 | 0,238 | 0,27  |  |  |
| 26 | [mm] | 0,133 | 0,142 | 0,32  | 0,355 |  |  |
| 27 | [mm] | 0,113 | 0,063 | 0,22  | 0,238 |  |  |
| 28 | [mm] | 0,113 | 0,076 | 0,125 | 0,14  |  |  |
| 29 | [mm] | 0,078 | 0,117 | 0,149 | 0,175 |  |  |
| 30 | [mm] | 0,067 | 0,073 | 0,18  | 0,205 |  |  |
| 31 | [mm] | 0,115 | 0,115 | 0,132 | 0,163 |  |  |
| 32 | [mm] | 0,067 | 0,136 | 0,171 | 0,19  |  |  |
| 33 | [mm] | 0,083 | 0,149 | 0,215 | 0,249 |  |  |
| 34 | [mm] | 0,119 | 0,121 | 0,205 | 0,221 |  |  |
| 35 | [mm] | 0,121 | 0,215 | 0,129 | 0,205 |  |  |
| 36 | [mm] | 0,059 | 0,24  | 0,332 | 0,372 |  |  |
| 37 | [mm] | 0,14  | 0,224 | 0,349 | 0,389 |  |  |
| 38 | [mm] | 0,069 | 0,161 | 0,334 | 0,387 |  |  |
| 39 | [mm] | 0,149 | 0,059 | 0,228 | 0,234 |  |  |
| 40 | [mm] | 0,073 | 0,099 | 0,106 | 0,129 |  |  |
| 41 | [mm] | 0,096 | 0,096 | 0,117 | 0,145 |  |  |
| 42 | [mm] | 0,113 | 0,19  | 0,212 | 0,218 |  |  |
| 43 | [mm] | 0,088 | 0,117 | 0,054 | 0,077 |  |  |
| 44 | [mm] | 0,148 | 0,139 | 0,14  | 0,393 |  |  |
| 45 | [mm] | 0,084 | 0,132 | 0,163 | 0,205 |  |  |
| 46 | [mm] | 0,052 | 0,161 | 0,104 | 0,224 |  |  |
| 47 | [mm] | 0,098 | 0,13  | 0,214 | 0,241 |  |  |
| 48 | [mm] | 0,081 | 0,111 | 0,196 | 0,259 |  |  |
| 49 | [mm] |       | 0,096 | 0,153 | 0,199 |  |  |
| 50 | [mm] |       | 0,103 | 0,189 | 0,24  |  |  |

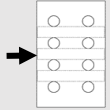
Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |  |       |       |       |  |  |
|----|------|--|-------|-------|-------|--|--|
| 51 | [mm] |  | 0,23  | 0,224 | 0,255 |  |  |
| 52 | [mm] |  | 0,15  | 0,353 | 0,242 |  |  |
| 53 | [mm] |  | 0,09  | 0,161 | 0,196 |  |  |
| 54 | [mm] |  | 0,178 | 0,237 | 0,244 |  |  |
| 55 | [mm] |  | 0,075 | 0,146 | 0,186 |  |  |
| 56 | [mm] |  | 0,1   | 0,059 | 0,07  |  |  |
| 57 | [mm] |  | 0,127 | 0,105 | 0,141 |  |  |
| 58 | [mm] |  | 0,132 | 0,126 | 0,153 |  |  |
| 59 | [mm] |  | 0,221 | 0,214 | 0,23  |  |  |
| 60 | [mm] |  | 0,149 | 0,33  | 0,15  |  |  |
| 61 | [mm] |  | 0,167 | 0,183 | 0,418 |  |  |
| 62 | [mm] |  | 0,098 | 0,176 | 0,203 |  |  |
| 63 | [mm] |  | 0,165 | 0,188 | 0,226 |  |  |
| 64 | [mm] |  | 0,217 | 0,341 | 0,399 |  |  |
| 65 | [mm] |  | 0,098 | 0,213 | 0,212 |  |  |
| 66 | [mm] |  | 0,212 | 0,211 | 0,224 |  |  |
| 67 | [mm] |  | 0,061 | 0,201 | 0,184 |  |  |
| 68 | [mm] |  | 0,059 | 0,249 | 0,276 |  |  |
| 69 | [mm] |  | 0,054 | 0,261 | 0,301 |  |  |
| 70 | [mm] |  | 0,069 | 0,155 | 0,203 |  |  |
| 71 | [mm] |  | 0,173 | 0,182 | 0,155 |  |  |
| 72 | [mm] |  | 0,138 | 0,085 | 0,069 |  |  |
| 73 | [mm] |  | 0,206 | 0,098 | 0,123 |  |  |
| 74 | [mm] |  | 0,119 | 0,132 | 0,161 |  |  |
| 75 | [mm] |  | 0,108 | 0,136 | 0,144 |  |  |
| 76 | [mm] |  | 0,188 | 0,069 | 0,086 |  |  |
| 77 | [mm] |  | 0,136 | 0,284 | 0,577 |  |  |
| 78 | [mm] |  | 0,186 | 0,201 | 0,236 |  |  |
| 79 | [mm] |  |       | 0,309 | 0,372 |  |  |
| 80 | [mm] |  |       | 0,181 | 0,21  |  |  |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |  |  |       |       |  |  |
|----|------|--|--|-------|-------|--|--|
| 81 | [mm] |  |  | 0,176 | 0,221 |  |  |
| 82 | [mm] |  |  | 0,272 | 0,376 |  |  |
| 83 | [mm] |  |  | 0,128 | 0,073 |  |  |
| 84 | [mm] |  |  | 0,084 | 0,192 |  |  |
| 85 | [mm] |  |  | 0,224 | 0,228 |  |  |
| 86 | [mm] |  |  | 0,188 | 0,218 |  |  |
| 87 | [mm] |  |  |       | 0,209 |  |  |
| 88 | [mm] |  |  |       | 0,372 |  |  |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 1, $\phi 40$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteilseite  |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$  |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>   | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,058   | 0,115                    | 0,144                    | 0,157                    |                          |                          |
| 2                             | [mm] | 0,082   | 0,161                    | 0,197                    | 0,222                    |                          |                          |
| 3                             | [mm] | 0,065   | 0,138                    | 0,168                    | 0,171                    |                          |                          |
| 4                             | [mm] | 0,074   | 0,146                    | 0,202                    | 0,22                     |                          |                          |
| 5                             | [mm] | 0,103   | 0,178                    | 0,242                    | 0,233                    |                          |                          |
| 6                             | [mm] | 0,085   | 0,15                     | 0,215                    | 0,248                    |                          |                          |
| 7                             | [mm] | 0,073   | 0,115                    | 0,157                    | 0,18                     |                          |                          |
| 8                             | [mm] | 0,059   | 0,137                    | 0,193                    | 0,234                    |                          |                          |
| 9                             | [mm] | 0,09  | 0,131                    | 0,173                    | 0,175                    |                          |                          |
| 10                            | [mm] | 0,094   | 0,121                    | 0,163                    | 0,297                    |                          |                          |
| 11                            | [mm] | 0,071   | 0,143                    | 0,198                    | 0,231                    |                          |                          |
| 12                            | [mm] | 0,109   | 0,101                    | 0,216                    | 0,26                     |                          |                          |
| 13                            | [mm] | 0,065   | 0,155                    | 0,215                    | 0,251                    |                          |                          |
| 14                            | [mm] | 0,125   | 0,059                    | 0,104                    | 0,116                    |                          |                          |
| 15                            | [mm] | 0,096   | 0,173                    | 0,233                    | 0,251                    |                          |                          |
| 16                            | [mm] | 0,052   | 0,069                    | 0,074                    | 0,115                    |                          |                          |
| 17                            | [mm] | 0,075   | 0,084                    | 0,121                    | 0,132                    |                          |                          |
| 18                            | [mm] | 0,086   | 0,126                    | 0,198                    | 0,23                     |                          |                          |
| 19                            | [mm] | 0,309   | 0,178                    | 0,05                     | 0,058                    |                          |                          |
| 20                            | [mm] | 0,053   | 0,105                    | 0,226                    | 0,251                    |                          |                          |
| 21                            | [mm] |   | 0,088                    | 0,169                    | 0,199                    |                          |                          |
| 22                            | [mm] |   | 0,169                    | 0,057                    | 0,238                    |                          |                          |
| 23                            | [mm] |   | 0,073                    | 0,221                    | 0,121                    |                          |                          |
| 24                            | [mm] |   | 0,136                    | 0,1                      | 0,217                    |                          |                          |

---

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |  |       |       |       |  |  |
|----|------|--|-------|-------|-------|--|--|
| 25 | [mm] |  | 0,105 | 0,203 | 0,188 |  |  |
| 26 | [mm] |  | 0,361 | 0,163 | 0,215 |  |  |
| 27 | [mm] |  | 0,069 | 0,184 | 0,462 |  |  |
| 28 | [mm] |  | 0,071 | 0,43  | 0,113 |  |  |
| 29 | [mm] |  | 0,063 | 0,075 | 0,125 |  |  |
| 30 | [mm] |  | 0,098 | 0,109 | 0,092 |  |  |
| 31 | [mm] |  | 0,065 | 0,081 | 0,061 |  |  |
| 32 | [mm] |  |       | 0,061 | 0,235 |  |  |
| 33 | [mm] |  |       | 0,211 | 0,077 |  |  |
| 34 | [mm] |  |       | 0,069 |       |  |  |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 1, $\phi 40$ mm, C50/60 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$                   |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>                    | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,061                                      | 0,155                    | 0,232                    | 0,27                     |                          |                          |
| 2                             | [mm] | 0,127                                      | 0,243                    | 0,333                    | 0,361                    |                          |                          |
| 3                             | [mm] | 0,094                                      | 0,161                    | 0,23                     | 0,324                    |                          |                          |
| 4                             | [mm] | 0,1  | 0,142                    | 0,156                    | 0,18                     |                          |                          |
| 5                             | [mm] | 0,102                                      | 0,141                    | 0,192                    | 0,238                    |                          |                          |
| 6                             | [mm] | 0,069                                      | 0,146                    | 0,203                    | 0,225                    |                          |                          |
| 7                             | [mm] | 0,096                                      | 0,225                    | 0,196                    | 0,364                    |                          |                          |
| 8                             | [mm] | 0,08                                       | 0,211                    | 0,311                    | 0,14                     |                          |                          |
| 9                             | [mm] | 0,082                                      | 0,081                    | 0,099                    | 0,174                    |                          |                          |
| 10                            | [mm] | 0,052                                      | 0,119                    | 0,136                    | 0,215                    |                          |                          |
| 11                            | [mm] | 0,113                                      | 0,094                    | 0,182                    | 0,167                    |                          |                          |
| 12                            | [mm] | 0,065                                      | 0,17                     | 0,142                    | 0,284                    |                          |                          |
| 13                            | [mm] | 0,061                                      | 0,167                    | 0,245                    | 0,299                    |                          |                          |
| 14                            | [mm] | 0,107                                      | 0,148                    | 0,055                    | 0,242                    |                          |                          |
| 15                            | [mm] | 0,1  | 0,14                     | 0,204                    | 0,221                    |                          |                          |
| 16                            | [mm] | 0,102                                      | 0,088                    | 0,2                      | 0,159                    |                          |                          |
| 17                            | [mm] | 0,121                                      | 0,207                    | 0,123                    | 0,234                    |                          |                          |
| 18                            | [mm] | 0,061                                      | 0,067                    | 0,213                    | 0,399                    |                          |                          |
| 19                            | [mm] | 0,057                                      | 0,102                    | 0,324                    | 0,138                    |                          |                          |
| 20                            | [mm] | 0,081                                      | 0,157                    | 0,102                    | 0,15                     |                          |                          |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |       |       |       |       |  |  |
|----|------|-------|-------|-------|-------|--|--|
| 21 | [mm] | 0,082 | 0,165 | 0,121 | 0,156 |  |  |
| 22 | [mm] | 0,097 | 0,167 | 0,109 | 0,186 |  |  |
| 23 | [mm] | 0,084 | 0,088 | 0,153 | 0,058 |  |  |
| 24 | [mm] | 0,176 | 0,152 | 0,226 | 0,272 |  |  |
| 25 | [mm] | 0,104 | 0,222 | 0,263 | 0,301 |  |  |
| 26 | [mm] | 0,109 | 0,196 | 0,221 | 0,253 |  |  |
| 27 | [mm] |       | 0,131 | 0,151 | 0,191 |  |  |
| 28 | [mm] |       | 0,069 | 0,171 | 0,182 |  |  |
| 29 | [mm] |       | 0,05  | 0,332 | 0,385 |  |  |
| 30 | [mm] |       | 0,128 | 0,178 | 0,192 |  |  |
| 31 | [mm] |       | 0,188 | 0,2   | 0,213 |  |  |
| 32 | [mm] |       | 0,158 | 0,144 | 0,173 |  |  |
| 33 | [mm] |       | 0,109 | 0,128 | 0,146 |  |  |
| 34 | [mm] |       | 0,13  | 0,098 | 0,128 |  |  |
| 35 | [mm] |       | 0,297 | 0,213 | 0,228 |  |  |
| 36 | [mm] |       | 0,209 | 0,278 | 0,324 |  |  |
| 37 | [mm] |       | 0,213 | 0,238 | 0,286 |  |  |
| 38 | [mm] |       | 0,067 | 0,17  | 0,2   |  |  |
| 39 | [mm] |       | 0,092 | 0,188 | 0,213 |  |  |
| 40 | [mm] |       |       | 0,34  | 0,41  |  |  |
| 41 | [mm] |       |       | 0,261 | 0,293 |  |  |
| 42 | [mm] |       |       | 0,289 | 0,318 |  |  |
| 43 | [mm] |       |       | 0,086 | 0,1   |  |  |
| 44 | [mm] |       |       | 0,092 | 0,088 |  |  |
| 45 | [mm] |       |       | 0,17  | 0,194 |  |  |
| 46 | [mm] |       |       | 0,086 | 0,1   |  |  |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 1.1, $\phi 40$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche |                          |                          |                          |                          |                          |
|---------------------------------|------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                        | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$                   |                          |                          |                          |                          |                          |
|                                 |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>                    | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                               | [mm] | 0,088                                      | 0,174                    | 0,209                    | 0,238                    |                          |                          |
| 2                               | [mm] | 0,075                                      | 0,117                    | 0,18                     | 0,209                    |                          |                          |
| 3                               | [mm] | 0,073                                      | 0,194                    | 0,328                    | 0,385                    |                          |                          |
| 4                               | [mm] | 0,065                                      | 0,113                    | 0,234                    | 0,286                    |                          |                          |
| 5                               | [mm] | 0,094                                      | 0,101                    | 0,123                    | 0,142                    |                          |                          |
| 6                               | [mm] | 0,132                                      | 0,224                    | 0,23                     | 0,255                    |                          |                          |
| 7                               | [mm] | 0,079                                      | 0,201                    | 0,263                    | 0,286                    |                          |                          |
| 8                               | [mm] | 0,077                                      | 0,138                    | 0,188                    | 0,203                    |                          |                          |
| 9                               | [mm] | 0,065                                      | 0,121                    | 0,347                    | 0,393                    |                          |                          |
| 10                              | [mm] |  | 0,136                    | 0,23                     | 0,284                    |                          |                          |
| 11                              | [mm] |  | 0,123                    | 0,153                    | 0,192                    |                          |                          |
| 12                              | [mm] |  | 0,203                    | 0,234                    | 0,255                    |                          |                          |
| 13                              | [mm] |  | 0,076                    | 0,152                    | 0,18                     |                          |                          |
| 14                              | [mm] |  | 0,1                      | 0,173                    | 0,209                    |                          |                          |
| 15                              | [mm] |  | 0,088                    | 0,167                    | 0,196                    |                          |                          |
| 16                              | [mm] |  | 0,081                    | 0,079                    | 0,092                    |                          |                          |
| 17                              | [mm] |  | 0,056                    | 0,069                    | 0,143                    |                          |                          |
| 18                              | [mm] |  | 0,056                    | 0,081                    | 0,128                    |                          |                          |
| 19                              | [mm] |  |                          | 0,144                    | 0,175                    |                          |                          |
| 20                              | [mm] |  |                          | 0,067                    | 0,067                    |                          |                          |
| 21                              | [mm] |  |                          | 0,102                    | 0,142                    |                          |                          |
| 22                              | [mm] |  |                          | 0,13                     | 0,086                    |                          |                          |
| 23                              | [mm] |  |                          | 0,115                    | 0,148                    |                          |                          |
| 24                              | [mm] |  |                          |                          | 0,15                     |                          |                          |



Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 1.1, $\phi 40$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteilseite  |                          |                          |                          |                          |                          |
|---------------------------------|------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                        | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$  |                          |                          |                          |                          |                          |
|                                 |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>   | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                               | [mm] | 0,063   | 0,113                    | 0,167                    | 0,203                    |                          |                          |
| 2                               | [mm] | 0,075   | 0,125                    | 0,167                    | 0,177                    |                          |                          |
| 3                               | [mm] | 0,061   | 0,102                    | 0,155                    | 0,193                    |                          |                          |
| 4                               | [mm] | 0,07  | 0,067                    | 0,084                    | 0,096                    |                          |                          |
| 5                               | [mm] | 0,057   | 0,115                    | 0,18                     | 0,239                    |                          |                          |
| 6                               | [mm] | 0,055   | 0,063                    | 0,123                    | 0,196                    |                          |                          |
| 7                               | [mm] |   | 0,051                    | 0,258                    | 0,28                     |                          |                          |
| 8                               | [mm] |   | 0,093                    | 0,159                    | 0,199                    |                          |                          |
| 9                               | [mm] |   | 0,116                    | 0,184                    | 0,209                    |                          |                          |
| 10                              | [mm] |   | 0,063                    | 0,052                    | 0,082                    |                          |                          |
| 11                              | [mm] |   | 0,128                    | 0,14                     | 0,157                    |                          |                          |
| 12                              | [mm] |   | 0,073                    | 0,127                    | 0,203                    |                          |                          |
| 13                              | [mm] |   | 0,075                    | 0,184                    | 0,155                    |                          |                          |
| 14                              | [mm] |   | 0,105                    | 0,069                    | 0,217                    |                          |                          |
| 15                              | [mm] |   | 0,078                    | 0,078                    | 0,099                    |                          |                          |
| 16                              | [mm] |   |                          | 0,125                    | 0,094                    |                          |                          |
| 17                              | [mm] |   |                          | 0,133                    | 0,084                    |                          |                          |
| 18                              | [mm] |   |                          | 0,088                    | 0,157                    |                          |                          |
| 19                              | [mm] |   |                          |                          | 0,178                    |                          |                          |
| 20                              | [mm] |   |                          |                          | 0,098                    |                          |                          |
| 21                              | [mm] |   |                          |                          | 0,054                    |                          |                          |

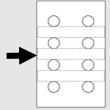
Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 1.2, $\phi 40$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche |                          |                          |                          |                          |                          |
|---------------------------------|------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                        | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$                   |                          |                          |                          |                          |                          |
|                                 |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>                    | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                               | [mm] | 0,167                                      | 0,171                    | 0,263                    | 0,246                    |                          |                          |
| 2                               | [mm] | 0,061                                      | 0,176                    | 0,222                    | 0,219                    |                          |                          |
| 3                               | [mm] | 0,067                                      | 0,186                    | 0,278                    | 0,276                    |                          |                          |
| 4                               | [mm] | 0,065                                      | 0,086                    | 0,086                    | 0,065                    |                          |                          |
| 5                               | [mm] | 0,086                                      | 0,138                    | 0,121                    | 0,136                    |                          |                          |
| 6                               | [mm] | 0,081                                      | 0,132                    | 0,217                    | 0,058                    |                          |                          |
| 7                               | [mm] | 0,059                                      | 0,155                    | 0,192                    | 0,249                    |                          |                          |
| 8                               | [mm] | 0,08                                       | 0,186                    | 0,083                    | 0,201                    |                          |                          |
| 9                               | [mm] | 0,097                                      | 0,128                    | 0,232                    | 0,083                    |                          |                          |
| 10                              | [mm] | 0,102                                      | 0,079                    | 0,266                    | 0,238                    |                          |                          |
| 11                              | [mm] | 0,075                                      | 0,071                    | 0,197                    | 0,274                    |                          |                          |
| 12                              | [mm] | 0,086                                      | 0,147                    | 0,148                    | 0,209                    |                          |                          |
| 13                              | [mm] | 0,107                                      | 0,123                    | 0,086                    | 0,157                    |                          |                          |
| 14                              | [mm] | 0,084                                      | 0,081                    | 0,23                     | 0,084                    |                          |                          |
| 15                              | [mm] | 0,109                                      | 0,161                    | 0,124                    | 0,244                    |                          |                          |
| 16                              | [mm] |  | 0,161                    | 0,169                    | 0,111                    |                          |                          |
| 17                              | [mm] |  | 0,094                    | 0,24                     | 0,186                    |                          |                          |
| 18                              | [mm] |  | 0,113                    | 0,232                    | 0,255                    |                          |                          |
| 19                              | [mm] |  | 0,163                    | 0,136                    | 0,245                    |                          |                          |
| 20                              | [mm] |  | 0,19                     | 0,152                    | 0,125                    |                          |                          |


Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |  |       |       |       |  |  |
|----|------|--|-------|-------|-------|--|--|
| 21 | [mm] |  | 0,18  | 0,242 | 0,165 |  |  |
| 22 | [mm] |  | 0,067 | 0,282 | 0,255 |  |  |
| 23 | [mm] |  | 0,061 | 0,259 | 0,301 |  |  |
| 24 | [mm] |  |       | 0,127 | 0,211 |  |  |
| 25 | [mm] |  |       | 0,109 | 0,135 |  |  |
| 26 | [mm] |  |       |       | 0,111 |  |  |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 1.2, $\phi 40$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteilseite  |                          |                          |                          |                          |                          |
|---------------------------------|------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                        | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$  |                          |                          |                          |                          |                          |
|                                 |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>   | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                               | [mm] | 0,094   | 0,144                    | 0,186                    | 0,186                    |                          |                          |
| 2                               | [mm] | 0,094   | 0,146                    | 0,193                    | 0,197                    |                          |                          |
| 3                               | [mm] | 0,071   | 0,086                    | 0,123                    | 0,081                    |                          |                          |
| 4                               | [mm] | 0,065   | 0,077                    | 0,121                    | 0,142                    |                          |                          |
| 5                               | [mm] | 0,113   | 0,096                    | 0,14                     | 0,14                     |                          |                          |
| 6                               | [mm] | 0,073   | 0,104                    | 0,094                    | 0,152                    |                          |                          |
| 7                               | [mm] | 0,061   | 0,081                    | 0,127                    | 0,1                      |                          |                          |
| 8                               | [mm] |   | 0,073                    | 0,121                    | 0,13                     |                          |                          |
| 9                               | [mm] |   | 0,151                    | 0,176                    | 0,125                    |                          |                          |
| 10                              | [mm] |   | 0,107                    | 0,142                    | 0,19                     |                          |                          |
| 11                              | [mm] |   | 0,098                    | 0,13                     | 0,161                    |                          |                          |
| 12                              | [mm] |   | 0,075                    | 0,054                    | 0,13                     |                          |                          |
| 13                              | [mm] |   | 0,121                    | 0,071                    | 0,103                    |                          |                          |
| 14                              | [mm] |   |                          | 0,146                    | 0,157                    |                          |                          |
| 15                              | [mm] |   |                          |                          | 0,054                    |                          |                          |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 2, $\phi 40$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche  |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                               |      |  |                          |                          |                          |                          |                          |
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$  |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>   | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,054   | 0,163                    | 0,28                     | 0,295                    |                          |                          |
| 2                             | [mm] | 0,079   | 0,13                     | 0,222                    | 0,211                    |                          |                          |
| 3                             | [mm] | 0,092   | 0,184                    | 0,297                    | 0,332                    |                          |                          |
| 4                             | [mm] | 0,065   | 0,104                    | 0,097                    | 0,142                    |                          |                          |
| 5                             | [mm] | 0,073   | 0,157                    | 0,266                    | 0,33                     |                          |                          |
| 6                             | [mm] | 0,086   | 0,052                    | 0,071                    | 0,109                    |                          |                          |
| 7                             | [mm] | 0,09  | 0,079                    | 0,125                    | 0,173                    |                          |                          |
| 8                             | [mm] | 0,088   | 0,089                    | 0,142                    | 0,168                    |                          |                          |
| 9                             | [mm] | 0,098   | 0,203                    | 0,109                    | 0,096                    |                          |                          |
| 10                            | [mm] | 0,111   | 0,171                    | 0,278                    | 0,346                    |                          |                          |
| 11                            | [mm] | 0,092   | 0,136                    | 0,261                    | 0,267                    |                          |                          |
| 12                            | [mm] | 0,069   | 0,107                    | 0,261                    | 0,138                    |                          |                          |
| 13                            | [mm] | 0,098   | 0,059                    | 0,14                     | 0,214                    |                          |                          |
| 14                            | [mm] | 0,098   | 0,069                    | 0,169                    | 0,197                    |                          |                          |
| 15                            | [mm] | 0,081   | 0,178                    | 0,164                    | 0,217                    |                          |                          |
| 16                            | [mm] | 0,08  | 0,205                    | 0,186                    | 0,203                    |                          |                          |
| 17                            | [mm] | 0,063   | 0,111                    | 0,107                    | 0,295                    |                          |                          |
| 18                            | [mm] | 0,08  | 0,182                    | 0,257                    | 0,335                    |                          |                          |
| 19                            | [mm] | 0,077   | 0,08                     | 0,295                    | 0,176                    |                          |                          |
| 20                            | [mm] | 0,05  | 0,081                    | 0,155                    | 0,321                    |                          |                          |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

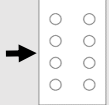
|    |      |       |       |       |       |  |  |
|----|------|-------|-------|-------|-------|--|--|
| 21 | [mm] | 0,052 | 0,211 | 0,278 | 0,207 |  |  |
| 22 | [mm] | 0,075 | 0,196 | 0,153 | 0,292 |  |  |
| 23 | [mm] | 0,088 | 0,119 | 0,251 | 0,364 |  |  |
| 24 | [mm] | 0,068 | 0,18  | 0,359 | 0,353 |  |  |
| 25 | [mm] | 0,081 | 0,178 | 0,305 | 0,167 |  |  |
| 26 | [mm] | 0,088 | 0,161 | 0,147 | 0,3   |  |  |
| 27 | [mm] | 0,086 | 0,134 | 0,248 | 0,226 |  |  |
| 28 | [mm] | 0,073 | 0,167 | 0,222 | 0,099 |  |  |
| 29 | [mm] | 0,102 | 0,169 | 0,079 | 0,303 |  |  |
| 30 | [mm] | 0,121 | 0,196 | 0,278 | 0,248 |  |  |
| 31 | [mm] | 0,08  | 0,17  | 0,219 | 0,234 |  |  |
| 32 | [mm] | 0,096 | 0,169 | 0,201 | 0,284 |  |  |
| 33 | [mm] | 0,069 | 0,145 | 0,242 | 0,263 |  |  |
| 34 | [mm] | 0,054 | 0,105 | 0,215 | 0,324 |  |  |
| 35 | [mm] |       | 0,226 | 0,301 | 0,322 |  |  |
| 36 | [mm] |       | 0,065 | 0,273 | 0,32  |  |  |
| 37 | [mm] |       | 0,153 | 0,269 | 0,221 |  |  |
| 38 | [mm] |       | 0,171 | 0,205 | 0,213 |  |  |
| 39 | [mm] |       | 0,222 | 0,201 | 0,096 |  |  |
| 40 | [mm] |       | 0,255 | 0,242 | 0,138 |  |  |
| 41 | [mm] |       | 0,169 | 0,119 | 0,096 |  |  |
| 42 | [mm] |       | 0,211 | 0,084 | 0,267 |  |  |
| 43 | [mm] |       | 0,165 | 0,237 | 0,297 |  |  |
| 44 | [mm] |       | 0,129 | 0,257 | 0,293 |  |  |
| 45 | [mm] |       | 0,169 | 0,269 | 0,322 |  |  |
| 46 | [mm] |       | 0,115 | 0,297 | 0,067 |  |  |
| 47 | [mm] |       | 0,134 | 0,259 | 0,315 |  |  |
| 48 | [mm] |       | 0,119 | 0,293 | 0,309 |  |  |
| 49 | [mm] |       | 0,182 | 0,28  | 0,269 |  |  |
| 50 | [mm] |       | 0,173 | 0,224 | 0,309 |  |  |

---

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |  |  |       |       |  |  |
|----|------|--|--|-------|-------|--|--|
| 51 | [mm] |  |  | 0,261 | 0,28  |  |  |
| 52 | [mm] |  |  | 0,077 | 0,09  |  |  |
| 53 | [mm] |  |  | 0,056 | 0,338 |  |  |
| 54 | [mm] |  |  | 0,056 | 0,119 |  |  |
| 55 | [mm] |  |  | 0,069 | 0,077 |  |  |
| 56 | [mm] |  |  | 0,054 | 0,242 |  |  |
| 57 | [mm] |  |  | 0,18  | 0,244 |  |  |
| 58 | [mm] |  |  | 0,209 | 0,286 |  |  |
| 59 | [mm] |  |  | 0,213 |       |  |  |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 2, $\phi 40$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteilseite  |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$  |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>   | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,082   | 0,094                    | 0,151                    | 0,172                    |                          |                          |
| 2                             | [mm] | 0,063   | 0,079                    | 0,13                     | 0,155                    |                          |                          |
| 3                             | [mm] | 0,069   | 0,097                    | 0,1                      | 0,121                    |                          |                          |
| 4                             | [mm] | 0,171   | 0,15                     | 0,088                    | 0,077                    |                          |                          |
| 5                             | [mm] | 0,071   | 0,141                    | 0,196                    | 0,201                    |                          |                          |
| 6                             | [mm] | 0,069   | 0,226                    | 0,211                    | 0,246                    |                          |                          |
| 7                             | [mm] | 0,104   | 0,069                    | 0,079                    | 0,097                    |                          |                          |
| 8                             | [mm] |   | 0,138                    | 0,084                    | 0,086                    |                          |                          |
| 9                             | [mm] |   | 0,155                    | 0,285                    | 0,306                    |                          |                          |
| 10                            | [mm] |   | 0,142                    | 0,145                    | 0,186                    |                          |                          |
| 11                            | [mm] |   | 0,172                    | 0,088                    | 0,122                    |                          |                          |
| 12                            | [mm] |   |                          | 0,069                    | 0,094                    |                          |                          |
| 13                            | [mm] |   |                          | 0,134                    | 0,155                    |                          |                          |
| 14                            | [mm] |   |                          | 0,182                    | 0,203                    |                          |                          |
| 15                            | [mm] |   |                          | 0,236                    | 0,267                    |                          |                          |
| 16                            | [mm] |   |                          | 0,191                    | 0,186                    |                          |                          |
| 17                            | [mm] |   |                          | 0,122                    | 0,113                    |                          |                          |
| 18                            | [mm] |   |                          | 0,213                    | 0,239                    |                          |                          |



Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 2, $\phi 40$ mm, C50/60 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$                   |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>                    | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,09                                       | 0,174                    | 0,247                    | 0,282                    |                          |                          |
| 2                             | [mm] | 0,078                                      | 0,062                    | 0,129                    | 0,228                    |                          |                          |
| 3                             | [mm] | 0,056                                      | 0,168                    | 0,238                    | 0,264                    |                          |                          |
| 4                             | [mm] | 0,082                                      | 0,142                    | 0,201                    | 0,24                     |                          |                          |
| 5                             | [mm] | 0,098                                      | 0,157                    | 0,18                     | 0,203                    |                          |                          |
| 6                             | [mm] | 0,112                                      | 0,138                    | 0,176                    | 0,169                    |                          |                          |
| 7                             | [mm] | 0,086                                      | 0,165                    | 0,246                    | 0,243                    |                          |                          |
| 8                             | [mm] | 0,073                                      | 0,209                    | 0,284                    | 0,297                    |                          |                          |
| 9                             | [mm] | 0,059                                      | 0,155                    | 0,197                    | 0,217                    |                          |                          |
| 10                            | [mm] | 0,073                                      | 0,132                    | 0,232                    | 0,053                    |                          |                          |
| 11                            | [mm] | 0,076                                      | 0,113                    | 0,15                     | 0,054                    |                          |                          |
| 12                            | [mm] | 0,086                                      | 0,167                    | 0,232                    | 0,261                    |                          |                          |
| 13                            | [mm] | 0,073                                      | 0,111                    | 0,144                    | 0,168                    |                          |                          |
| 14                            | [mm] | 0,102                                      | 0,174                    | 0,236                    | 0,242                    |                          |                          |
| 15                            | [mm] | 0,094                                      | 0,138                    | 0,247                    | 0,163                    |                          |                          |
| 16                            | [mm] | 0,073                                      | 0,213                    | 0,318                    | 0,236                    |                          |                          |
| 17                            | [mm] | 0,094                                      | 0,18                     | 0,226                    | 0,263                    |                          |                          |
| 18                            | [mm] | 0,09                                       | 0,082                    | 0,075                    | 0,394                    |                          |                          |
| 19                            | [mm] | 0,073                                      | 0,111                    | 0,069                    | 0,247                    |                          |                          |
| 20                            | [mm] | 0,148                                      | 0,17                     | 0,094                    | 0,24                     |                          |                          |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |       |       |       |       |  |  |
|----|------|-------|-------|-------|-------|--|--|
| 21 | [mm] | 0,058 | 0,171 | 0,186 | 0,098 |  |  |
| 22 | [mm] | 0,081 | 0,165 | 0,249 | 0,119 |  |  |
| 23 | [mm] | 0,069 | 0,151 | 0,278 | 0,214 |  |  |
| 24 | [mm] | 0,096 | 0,138 | 0,224 | 0,247 |  |  |
| 25 | [mm] | 0,086 | 0,065 | 0,13  | 0,332 |  |  |
| 26 | [mm] | 0,092 | 0,13  | 0,23  | 0,24  |  |  |
| 27 | [mm] | 0,109 | 0,184 | 0,206 | 0,145 |  |  |
| 28 | [mm] | 0,078 | 0,136 | 0,137 | 0,25  |  |  |
| 29 | [mm] | 0,053 | 0,192 | 0,194 | 0,232 |  |  |
| 30 | [mm] | 0,092 | 0,117 | 0,178 | 0,155 |  |  |
| 31 | [mm] |       | 0,178 | 0,192 | 0,226 |  |  |
| 32 | [mm] |       | 0,14  | 0,263 | 0,213 |  |  |
| 33 | [mm] |       | 0,129 | 0,224 | 0,228 |  |  |
| 34 | [mm] |       | 0,144 | 0,268 | 0,305 |  |  |
| 35 | [mm] |       | 0,147 | 0,195 | 0,296 |  |  |
| 36 | [mm] |       | 0,121 | 0,201 | 0,332 |  |  |
| 37 | [mm] |       | 0,092 | 0,222 | 0,236 |  |  |
| 38 | [mm] |       | 0,121 | 0,205 | 0,234 |  |  |
| 39 | [mm] |       | 0,124 | 0,259 | 0,253 |  |  |
| 40 | [mm] |       |       | 0,159 | 0,228 |  |  |
| 41 | [mm] |       |       | 0,178 | 0,299 |  |  |
| 42 | [mm] |       |       | 0,196 | 0,222 |  |  |
| 43 | [mm] |       |       |       | 0,201 |  |  |
| 44 | [mm] |       |       |       | 0,227 |  |  |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 3, $\phi 40$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$                   |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>                    | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,058                                      | 0,063                    | 0,117                    | 0,121                    |                          |                          |
| 2                             | [mm] | 0,132                                      | 0,132                    | 0,063                    | 0,059                    |                          |                          |
| 3                             | [mm] | 0,096                                      | 0,069                    | 0,322                    | 0,372                    |                          |                          |
| 4                             | [mm] | 0,05                                       | 0,232                    | 0,274                    | 0,331                    |                          |                          |
| 5                             | [mm] | 0,109                                      | 0,246                    | 0,144                    | 0,075                    |                          |                          |
| 6                             | [mm] | 0,123                                      | 0,105                    | 0,185                    | 0,168                    |                          |                          |
| 7                             | [mm] |  | 0,14                     | 0,165                    | 0,218                    |                          |                          |
| 8                             | [mm] |  | 0,157                    | 0,05                     | 0,21                     |                          |                          |
| 9                             | [mm] |  |                          |                          | 0,077                    |                          |                          |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 4, $\phi 40$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche |                          |                          |                          |                          |                          |
|-------------------------------|------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$                   |                          |                          |                          |                          |                          |
|                               |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>                    | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                             | [mm] | 0,069                                      | 0,09                     | 0,084                    | 0,161                    |                          |                          |
| 2                             | [mm] | 0,058                                      | 0,081                    | 0,13                     | 0,156                    |                          |                          |
| 3                             | [mm] | 0,061                                      | 0,065                    | 0,096                    | 0,103                    |                          |                          |
| 4                             | [mm] | 0,05                                       | 0,055                    | 0,105                    | 0,132                    |                          |                          |
| 5                             | [mm] |  | 0,067                    | 0,088                    | 0,098                    |                          |                          |
| 6                             | [mm] |  | 0,063                    | 0,079                    | 0,089                    |                          |                          |
| 7                             | [mm] |  | 0,086                    | 0,083                    | 0,119                    |                          |                          |
| 8                             | [mm] |  | 0,088                    | 0,119                    | 0,132                    |                          |                          |
| 9                             | [mm] |  | 0,09                     | 0,16                     | 0,159                    |                          |                          |
| 10                            | [mm] |  | 0,056                    | 0,148                    | 0,182                    |                          |                          |
| 11                            | [mm] |  | 0,1                      | 0,113                    | 0,067                    |                          |                          |
| 12                            | [mm] |  | 0,061                    | 0,054                    | 0,132                    |                          |                          |
| 13                            | [mm] |  | 0,069                    | 0,061                    | 0,099                    |                          |                          |
| 14                            | [mm] |  | 0,063                    |                          | 0,112                    |                          |                          |
| 15                            | [mm] |  | 0,084                    | 0,196                    | 0,215                    |                          |                          |
| 16                            | [mm] |  | 0,127                    | 0,138                    | 0,167                    |                          |                          |
| 17                            | [mm] |  | 0,09                     | 0,115                    | 0,141                    |                          |                          |
| 18                            | [mm] |  | 0,079                    | 0,157                    | 0,158                    |                          |                          |
| 19                            | [mm] |  | 0,075                    | 0,148                    | 0,155                    |                          |                          |
| 20                            | [mm] |  | 0,125                    | 0,149                    | 0,159                    |                          |                          |

---

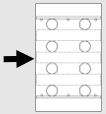
Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|    |      |  |       |       |       |  |  |
|----|------|--|-------|-------|-------|--|--|
| 21 | [mm] |  | 0,075 | 0,142 | 0,152 |  |  |
| 22 | [mm] |  | 0,081 | 0,119 | 0,136 |  |  |
| 23 | [mm] |  | 0,086 | 0,135 | 0,155 |  |  |
| 24 | [mm] |  |       | 0,195 | 0,207 |  |  |
| 25 | [mm] |  |       | 0,115 | 0,126 |  |  |
| 26 | [mm] |  |       | 0,13  | 0,165 |  |  |
| 27 | [mm] |  |       | 0,109 | 0,136 |  |  |
| 28 | [mm] |  |       | 0,061 | 0,073 |  |  |
| 29 | [mm] |  |       |       | 0,054 |  |  |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 4.1, $\phi 40$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteiloberfläche |                          |                          |                          |                          |                          |
|---------------------------------|------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                        | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$                   |                          |                          |                          |                          |                          |
|                                 |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>                    | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                               | [mm] | 0,067                                      | 0,125                    | 0,194                    | 0,236                    |                          |                          |
| 2                               | [mm] | 0,083                                      | 0,109                    | 0,178                    | 0,197                    |                          |                          |
| 3                               | [mm] | 0,075                                      | 0,18                     | 0,282                    | 0,328                    |                          |                          |
| 4                               | [mm] | 0,067                                      | 0,159                    | 0,274                    | 0,318                    |                          |                          |
| 5                               | [mm] | 0,186                                      | 0,23                     | 0,303                    | 0,428                    |                          |                          |
| 6                               | [mm] | 0,088                                      | 0,106                    | 0,165                    | 0,168                    |                          |                          |
| 7                               | [mm] | 0,069                                      | 0,194                    | 0,314                    | 0,365                    |                          |                          |
| 8                               | [mm] | 0,092                                      | 0,102                    | 0,105                    | 0,407                    |                          |                          |
| 9                               | [mm] |  | 0,063                    | 0,125                    | 0,151                    |                          |                          |
| 10                              | [mm] |  | 0,142                    | 0,198                    | 0,226                    |                          |                          |
| 11                              | [mm] |  | 0,144                    | 0,232                    | 0,274                    |                          |                          |
| 12                              | [mm] |  | 0,117                    | 0,172                    | 0,195                    |                          |                          |
| 13                              | [mm] |  | 0,077                    | 0,15                     | 0,18                     |                          |                          |
| 14                              | [mm] |  | 0,127                    | 0,207                    | 0,245                    |                          |                          |
| 15                              | [mm] |  | 0,126                    | 0,104                    | 0,132                    |                          |                          |
| 16                              | [mm] |  | 0,132                    | 0,193                    | 0,226                    |                          |                          |
| 17                              | [mm] |  | 0,107                    | 0,222                    | 0,261                    |                          |                          |
| 18                              | [mm] |  | 0,117                    | 0,19                     | 0,226                    |                          |                          |
| 19                              | [mm] |  | 0,125                    | 0,182                    | 0,217                    |                          |                          |
| 20                              | [mm] |  |                          | 0,216                    | 0,251                    |                          |                          |

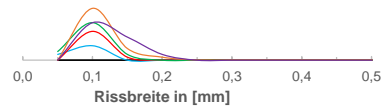
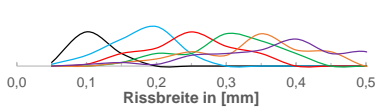
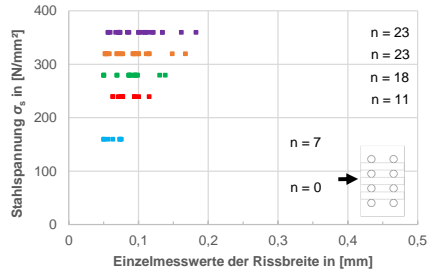
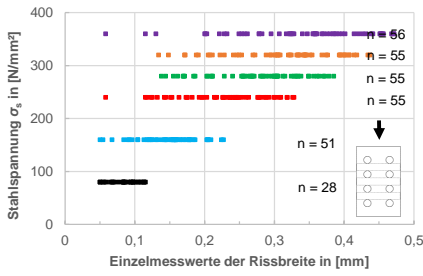
Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 4.1, $\phi 40$ mm, C30/37 |      | Untersuchungsbereich:<br>Bauteilseite  |                          |                          |                          |                          |                          |
|---------------------------------|------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Lfd. Nr.                        | [-]  | Stahlspannung $\sigma_s$  |                          |                          |                          |                          |                          |
|                                 |      | 80<br>N/mm <sup>2</sup>   | 160<br>N/mm <sup>2</sup> | 240<br>N/mm <sup>2</sup> | 280<br>N/mm <sup>2</sup> | 320<br>N/mm <sup>2</sup> | 360<br>N/mm <sup>2</sup> |
| 1                               | [mm] | 0,059   | 0,081                    | 0,113                    | 0,135                    |                          |                          |
| 2                               | [mm] | 0,065   | 0,109                    | 0,2                      | 0,242                    |                          |                          |
| 3                               | [mm] | 0,054   | 0,125                    | 0,081                    | 0,079                    |                          |                          |
| 4                               | [mm] | 0,084   | 0,071                    | 0,18                     | 0,207                    |                          |                          |
| 5                               | [mm] | 0,05  | 0,115                    | 0,121                    | 0,146                    |                          |                          |
| 6                               | [mm] |   | 0,114                    | 0,171                    | 0,209                    |                          |                          |
| 7                               | [mm] |   | 0,098                    | 0,19                     | 0,219                    |                          |                          |
| 8                               | [mm] |   | 0,109                    | 0,138                    | 0,161                    |                          |                          |
| 9                               | [mm] |   | 0,132                    | 0,163                    | 0,181                    |                          |                          |
| 10                              | [mm] |   | 0,084                    | 0,069                    | 0,077                    |                          |                          |
| 11                              | [mm] |   |                          | 0,05                     | 0,109                    |                          |                          |
| 12                              | [mm] |   |                          | 0,193                    | 0,215                    |                          |                          |
| 13                              | [mm] |   |                          | 0,107                    | 0,121                    |                          |                          |

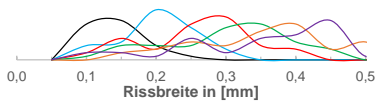
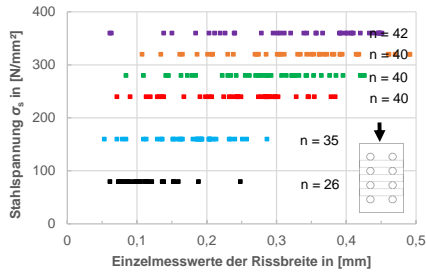
**B.2 Punktwolken und empirische Dichtefunktionen**

**B.2.1 Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm**

**Serie 1,  $\phi 20$  mm, C30/37**

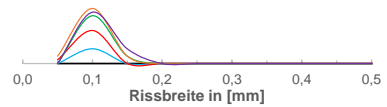
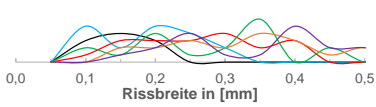
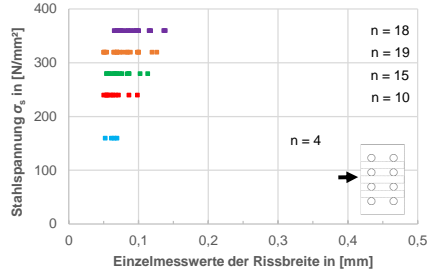
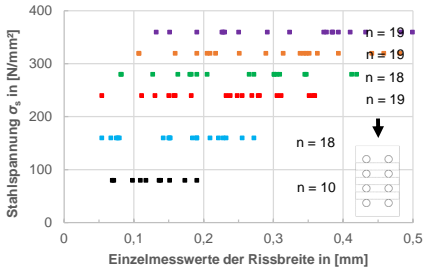


**Serie 1,  $\phi 20$  mm, C50/60**

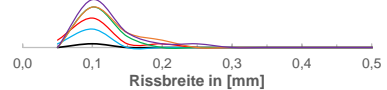
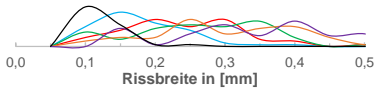
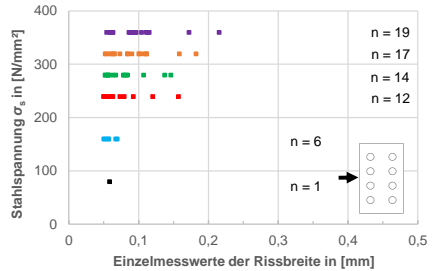
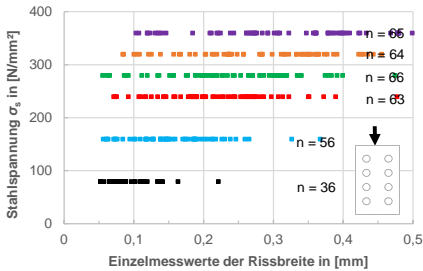




Serie 1.1,  $\phi 20$  mm, C30/37

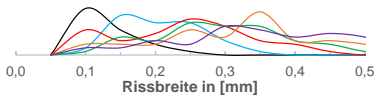
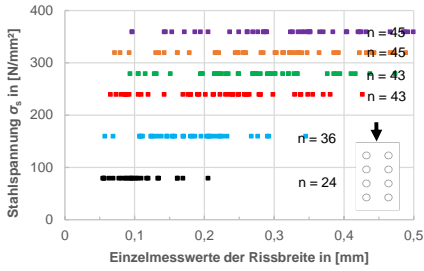


Serie 2,  $\phi 20$  mm, C30/37

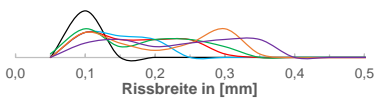
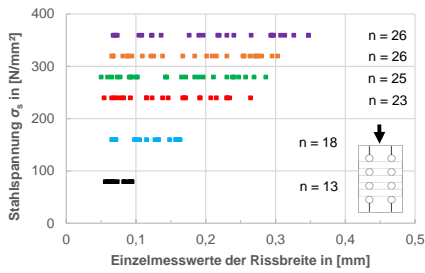


Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

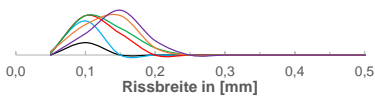
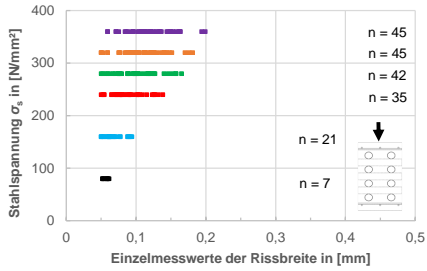
Serie 2,  $\phi 20$  mm, C50/60



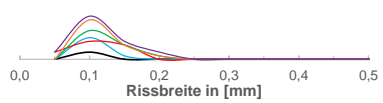
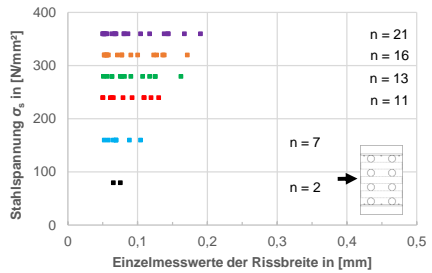
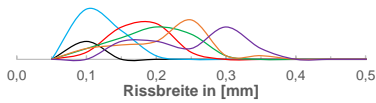
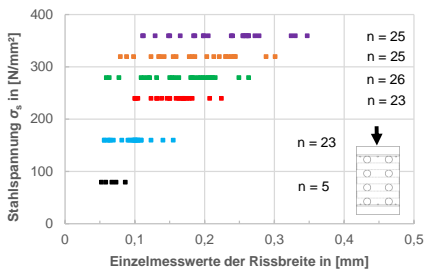
Serie 3,  $\phi 20$  mm, C30/37



Serie 4,  $\phi 20$  mm, C30/37



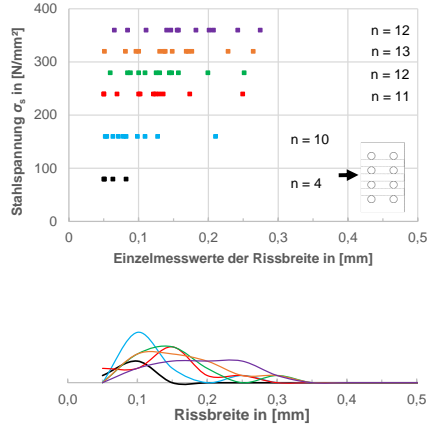
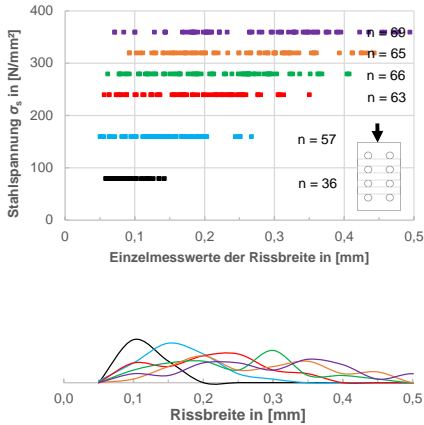
Serie 4.1,  $\phi 20$  mm, C30/37



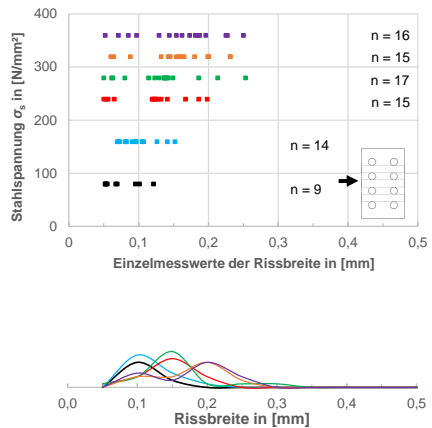
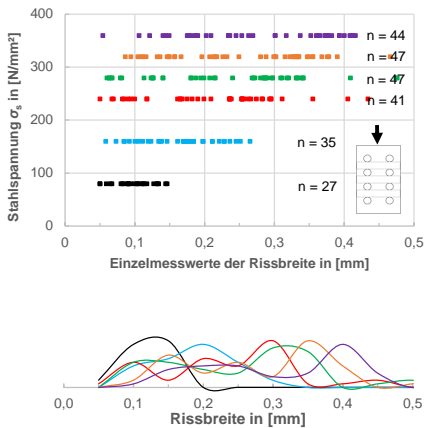
## Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

### B.2.2 Stabdurchmesser $\phi 28$ mm

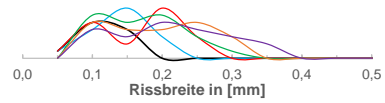
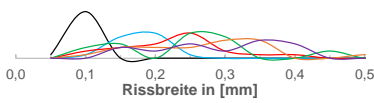
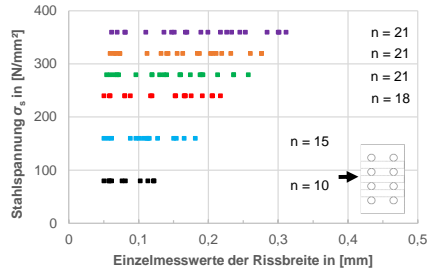
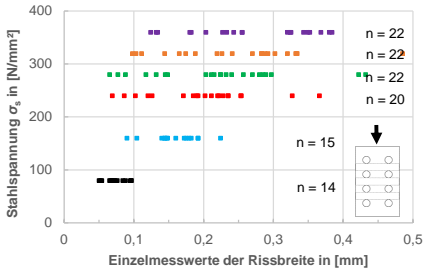
#### Serie 1, $\phi 28$ mm, C30/37



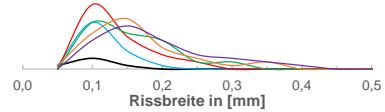
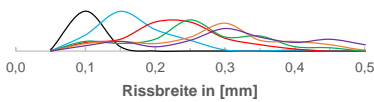
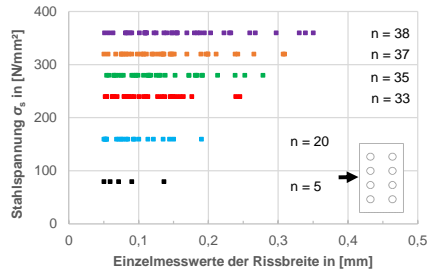
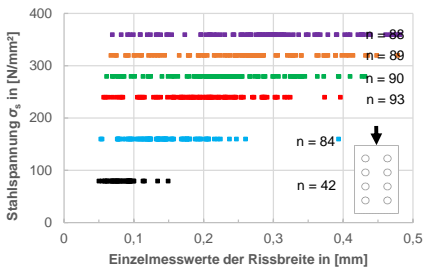
#### Serie 1, $\phi 28$ mm, C50/60



Serie 1.1,  $\phi 28$  mm, C30/37

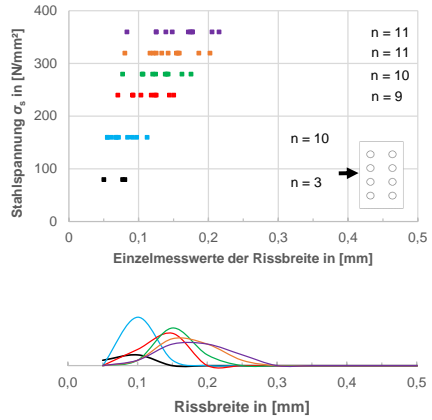
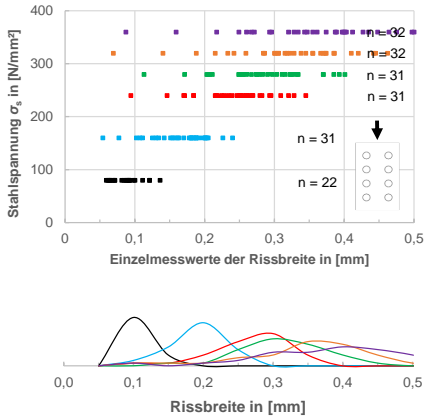


Serie 2,  $\phi 28$  mm, C30/37

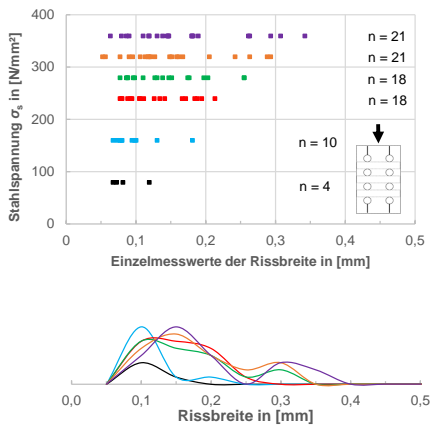


## Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

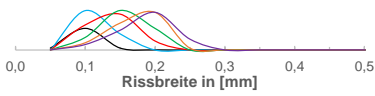
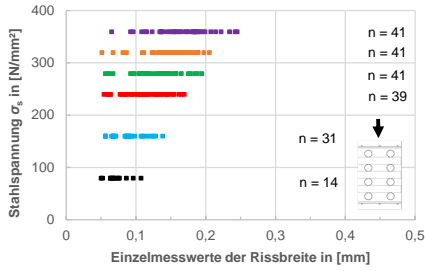
### Serie 2, $\phi 28$ mm, C50/60



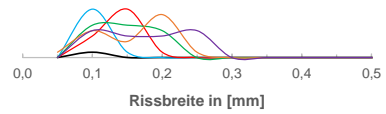
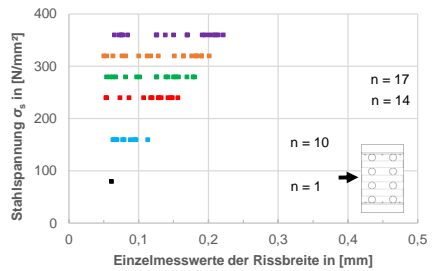
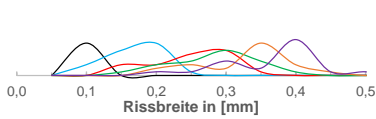
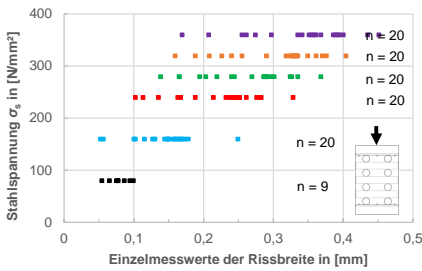
### Serie 3, $\phi 28$ mm, C30/37



Serie 4,  $\phi 28$  mm, C30/37

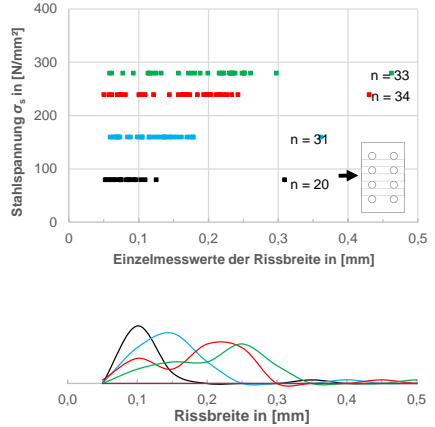
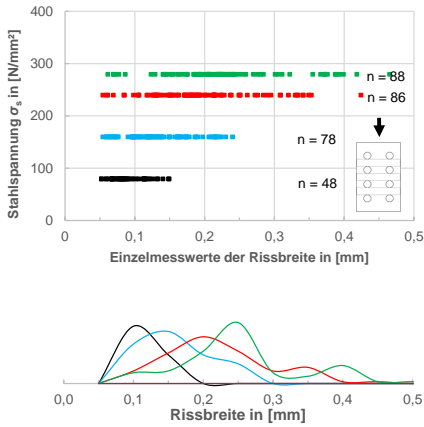


Serie 4.1,  $\phi 28$  mm, C30/37

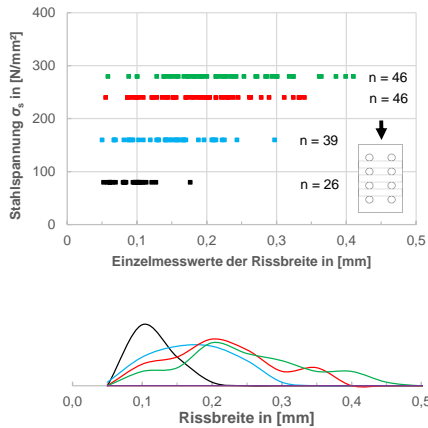


B.2.3 Stabdurchmesser  $\phi 40$  mm

Serie 1,  $\phi 40$  mm, C30/37

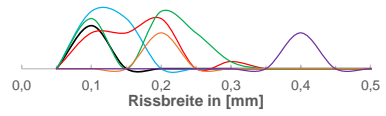
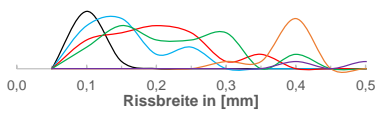
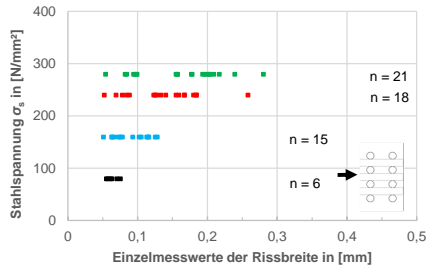
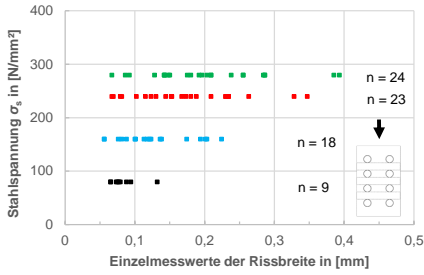


Serie 1,  $\phi 40$  mm, C50/60

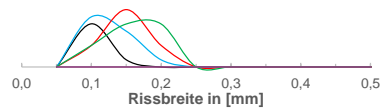
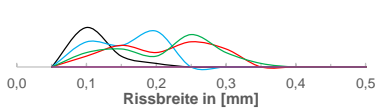
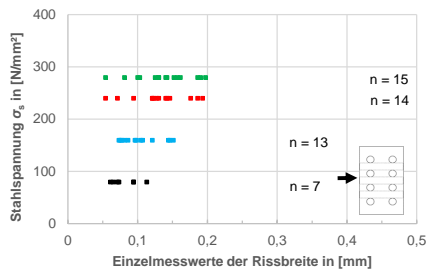
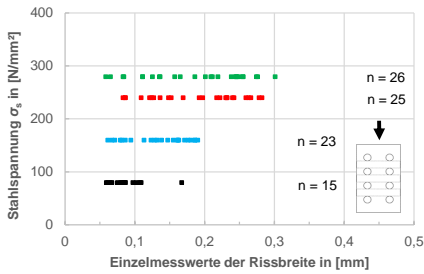




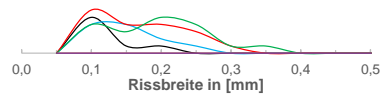
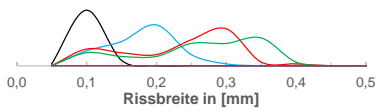
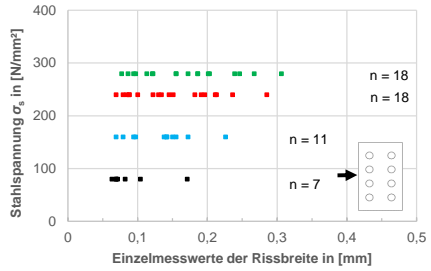
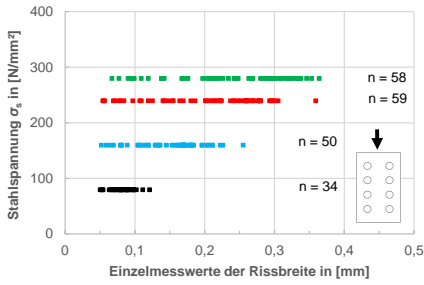
Serie 1.1,  $\phi 40$  mm, C30/37



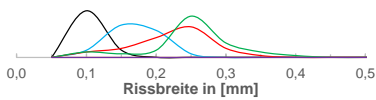
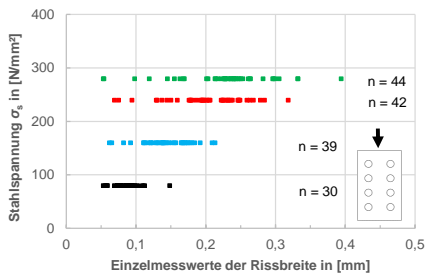
Serie 1.2,  $\phi 40$  mm, C30/37



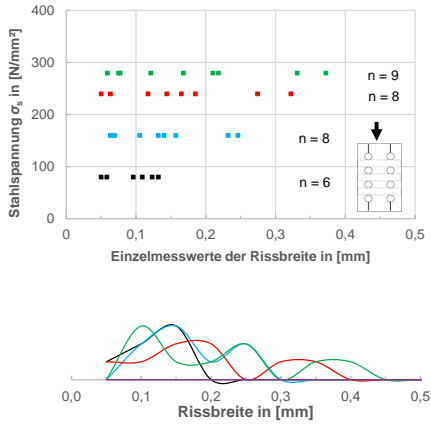
Serie 2,  $\phi 40$  mm, C30/37



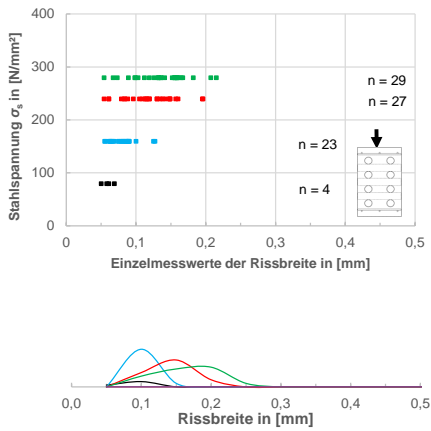
Serie 2,  $\phi 40$  mm, C50/60



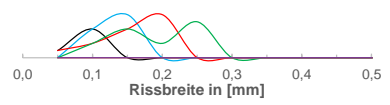
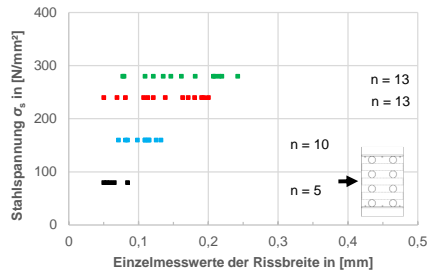
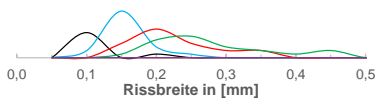
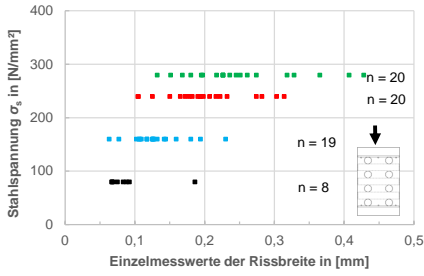
Serie 3,  $\phi 40$  mm, C30/37



Serie 4,  $\phi 40$  mm, C30/37



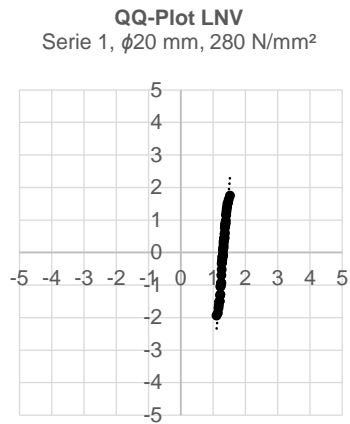
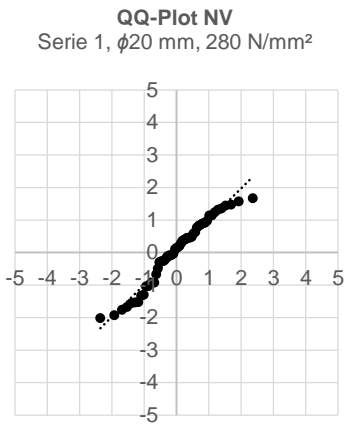
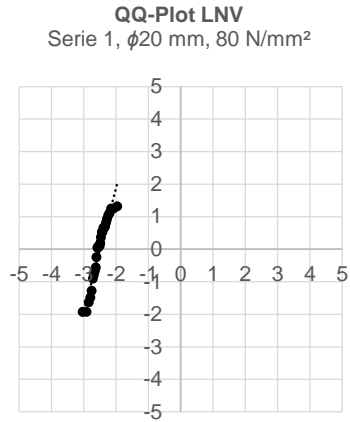
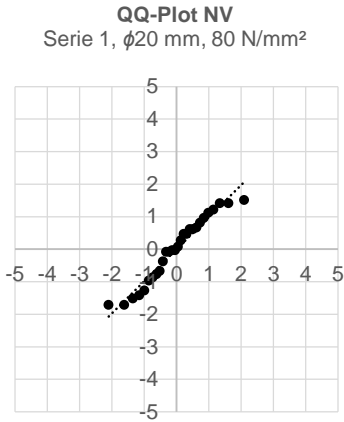
Serie 4.1,  $\phi 40$  mm, C30/37



**B.3 QQ-Plots**

B.3.1 Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm

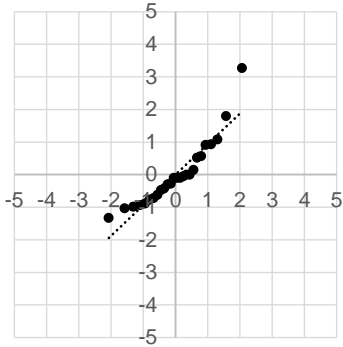
Serie 1,  $\phi 20$  mm, C30/37, Oberseite



Serie 1,  $\phi 20$  mm, C50/60, Oberseite

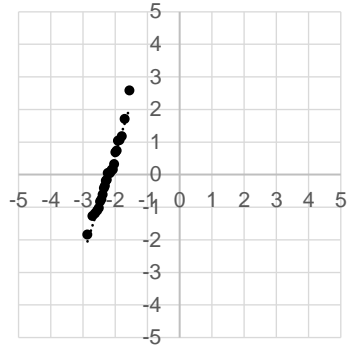
QQ-Plot NV

Serie 1,  $\phi 20$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



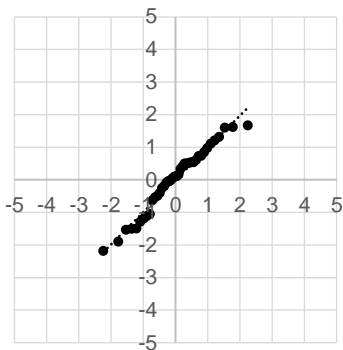
QQ-Plot LNV

Serie 1,  $\phi 20$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



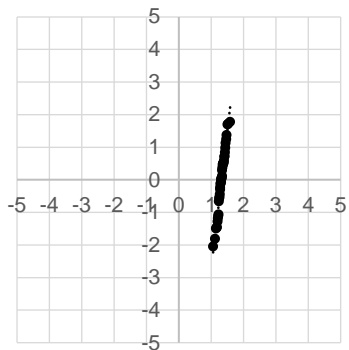
QQ-Plot NV

Serie 1,  $\phi 20$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



QQ-Plot LNV

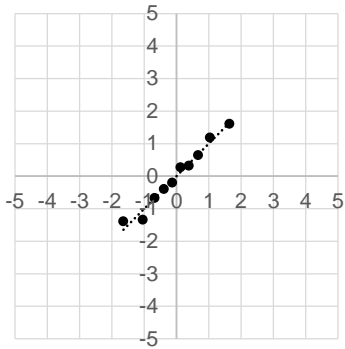
Serie 1,  $\phi 20$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



Serie 1.1,  $\phi 20$  mm, C30/37, Oberseite

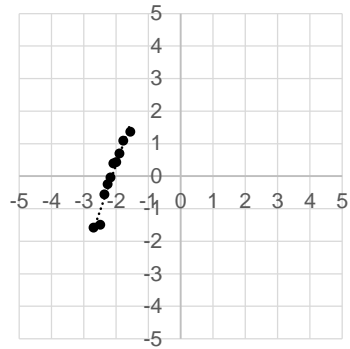
QQ-Plot NV

Serie 1.1,  $\phi 20$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



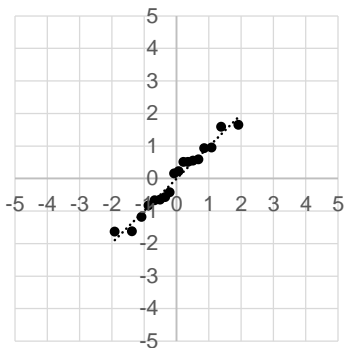
QQ-Plot LNV

Serie 1.1,  $\phi 20$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



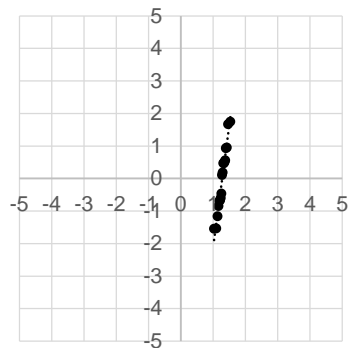
QQ-Plot NV

Serie 1.1,  $\phi 20$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



QQ-Plot LNV

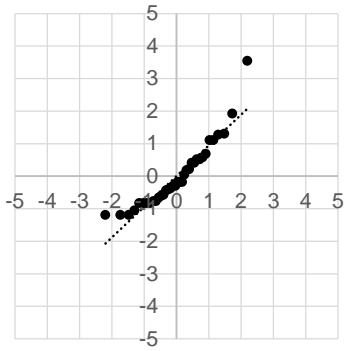
Serie 1.1,  $\phi 20$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



Serie 2,  $\phi 20$  mm, C30/37, Oberseite

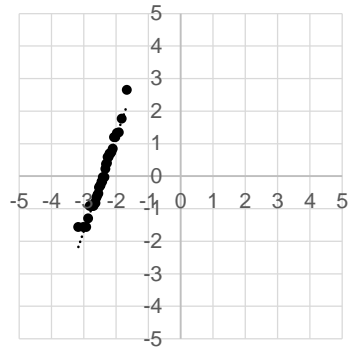
QQ-Plot NV

Serie 2,  $\phi 20$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



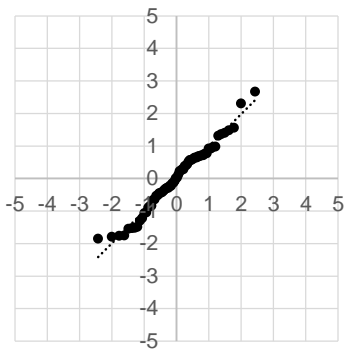
QQ-Plot LNV

Serie 2,  $\phi 20$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



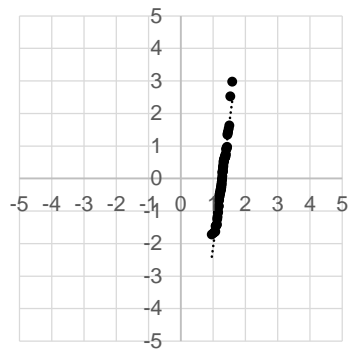
QQ-Plot NV

Serie 2,  $\phi 20$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



QQ-Plot LNV

Serie 2,  $\phi 20$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>

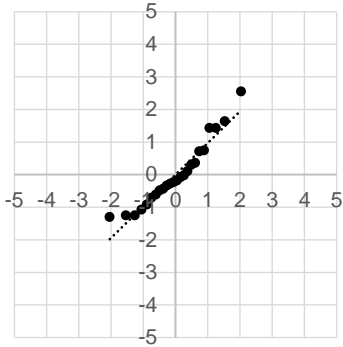




Serie 2,  $\phi 20$  mm, C50/60, Oberseite

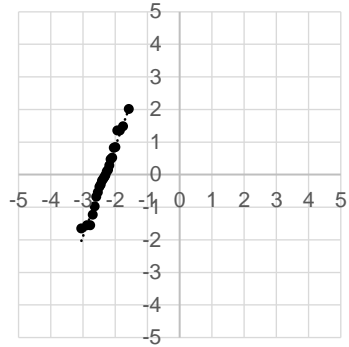
QQ-Plot NV

Serie 2,  $\phi 20$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



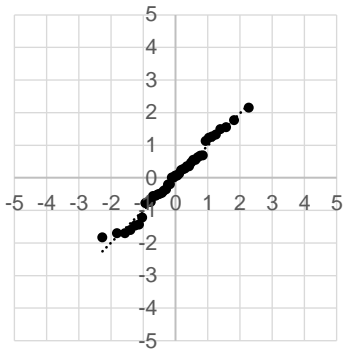
QQ-Plot LNV

Serie 2,  $\phi 20$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



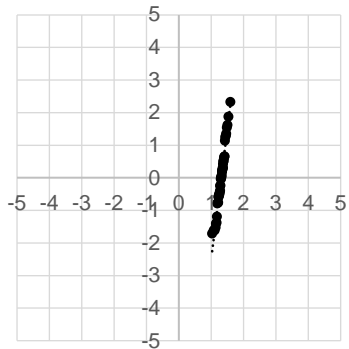
QQ-Plot NV

Serie 2,  $\phi 20$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



QQ-Plot LNV

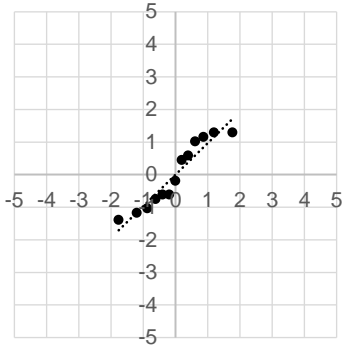
Serie 2,  $\phi 20$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



Serie 3,  $\phi 20$  mm, C30/37, Oberseite

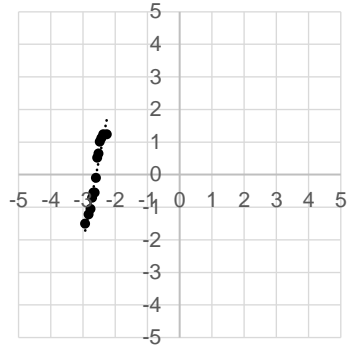
QQ-Plot NV

Serie 3,  $\phi 20$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



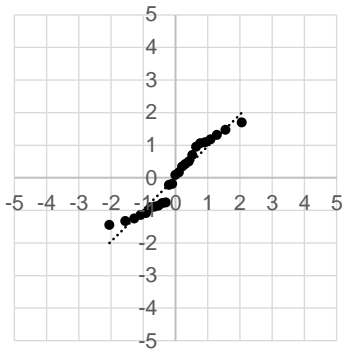
QQ-Plot LNV

Serie 3,  $\phi 20$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



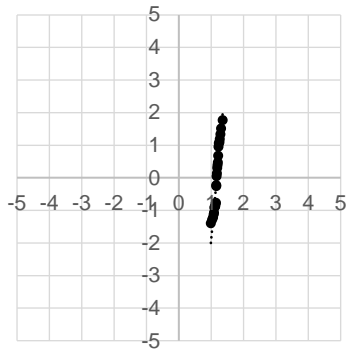
QQ-Plot NV

Serie 3,  $\phi 20$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



QQ-Plot LNV

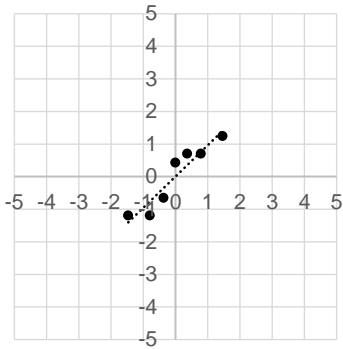
Serie 3,  $\phi 20$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



Serie 4,  $\phi 20$  mm, C30/37, Oberseite

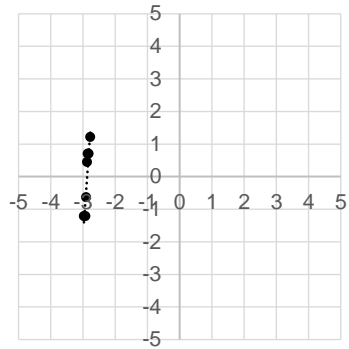
**QQ-Plot NV**

Serie 4,  $\phi 20$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



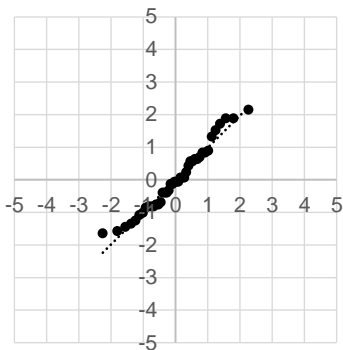
**QQ-Plot LNV**

Serie 4,  $\phi 20$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



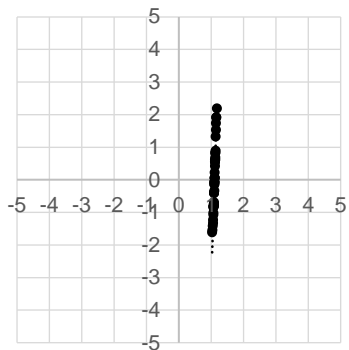
**QQ-Plot NV**

Serie 4,  $\phi 20$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



**QQ-Plot LNV**

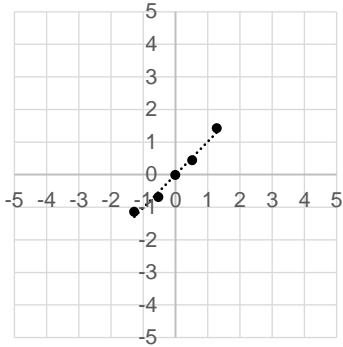
Serie 4,  $\phi 20$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



Serie 4.1,  $\phi 20$  mm, C30/37, Oberseite

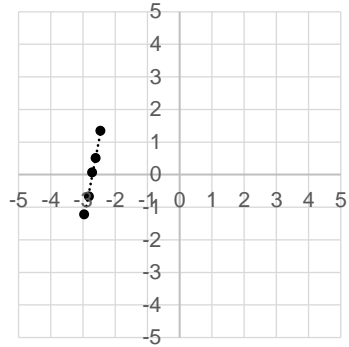
QQ-Plot NV

Serie 4.1,  $\phi 20$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



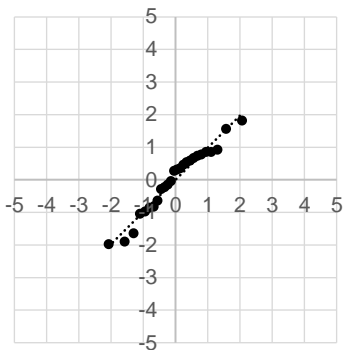
QQ-Plot LNV

Serie 4.1,  $\phi 20$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



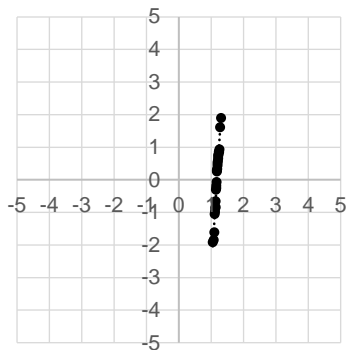
QQ-Plot NV

Serie 4.1,  $\phi 20$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



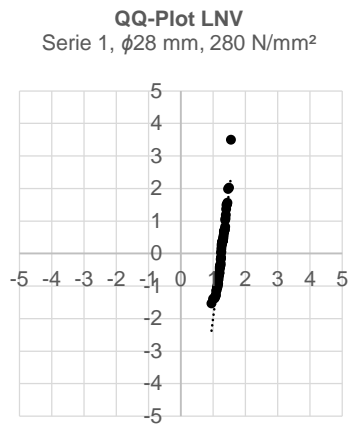
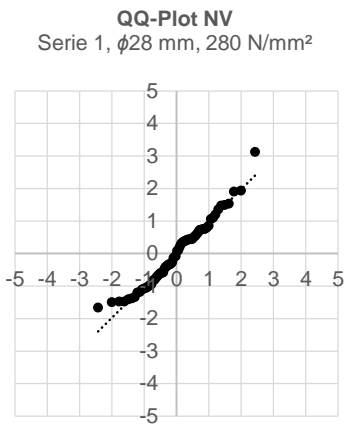
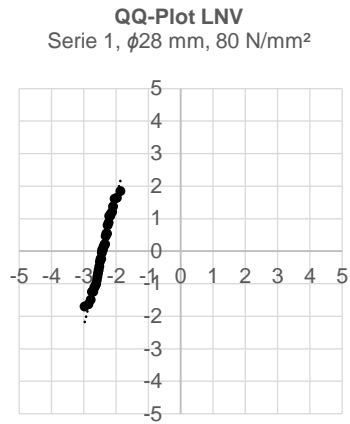
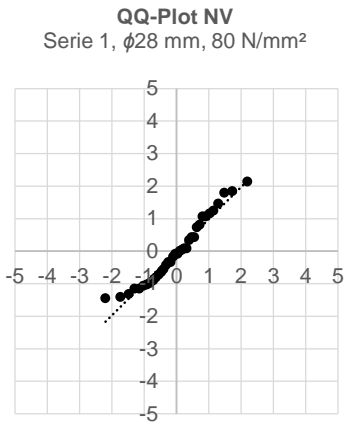
QQ-Plot LNV

Serie 4.1,  $\phi 20$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



B.3.2 Stabdurchmesser  $\phi 28$  mm

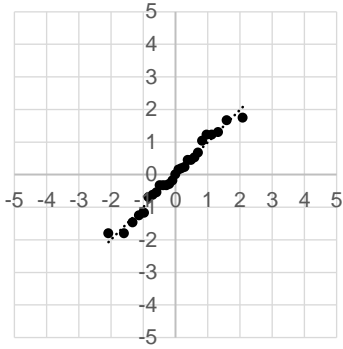
Serie 1,  $\phi 28$  mm, C30/37, Oberseite



Serie 1,  $\phi 28$  mm, C50/60, Oberseite

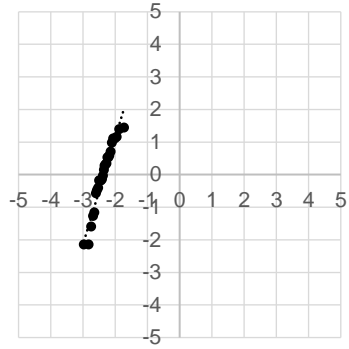
QQ-Plot NV

Serie 1,  $\phi 28$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



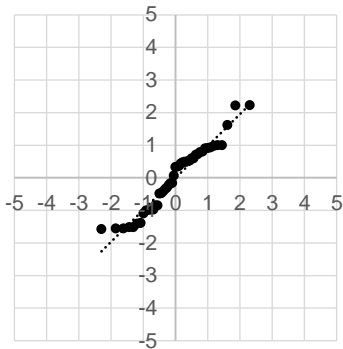
QQ-Plot LNV

Serie 1,  $\phi 28$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



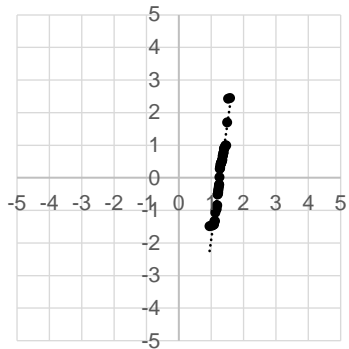
QQ-Plot NV

Serie 1,  $\phi 28$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



QQ-Plot LNV

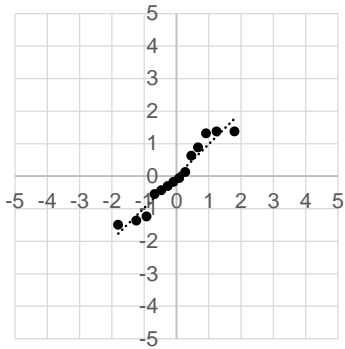
Serie 1,  $\phi 28$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



Serie 1.1,  $\phi 28$  mm, C30/37, Oberseite

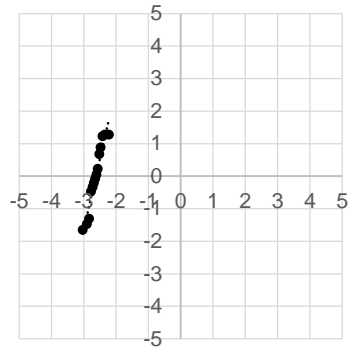
QQ-Plot NV

Serie 1.1,  $\phi 28$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



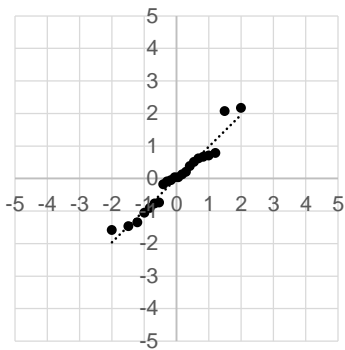
QQ-Plot LNV

Serie 1.1,  $\phi 28$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



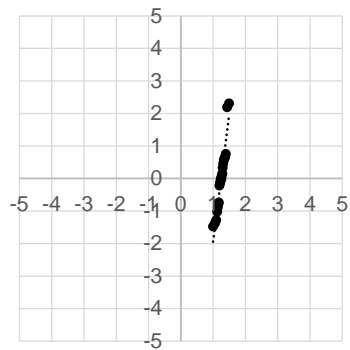
QQ-Plot NV

Serie 1.1,  $\phi 28$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



QQ-Plot LNV

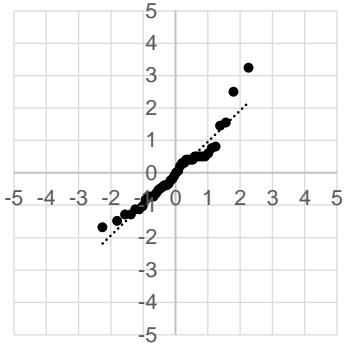
Serie 1.1,  $\phi 28$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



Serie 2,  $\phi 28$  mm, C30/37, Oberseite

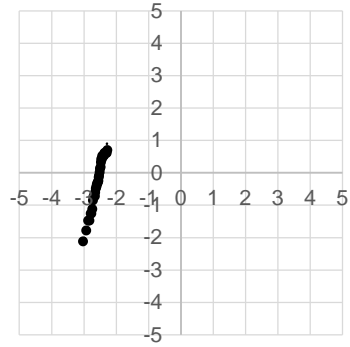
QQ-Plot NV

Serie 2,  $\phi 28$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



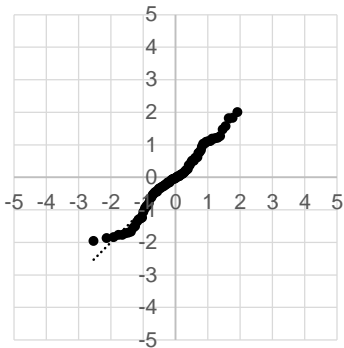
QQ-Plot LNV

Serie 2,  $\phi 28$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



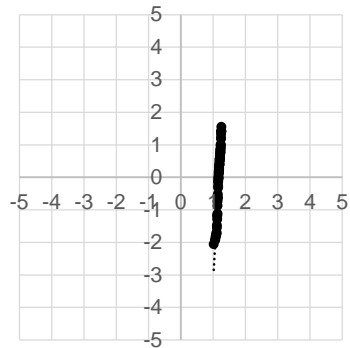
QQ-Plot NV

Serie 2,  $\phi 28$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



QQ-Plot LNV

Serie 2,  $\phi 28$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>

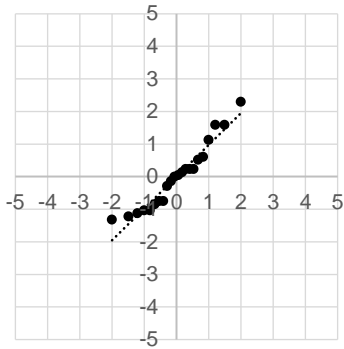




Serie 2,  $\phi 28$  mm, C50/60, Oberseite

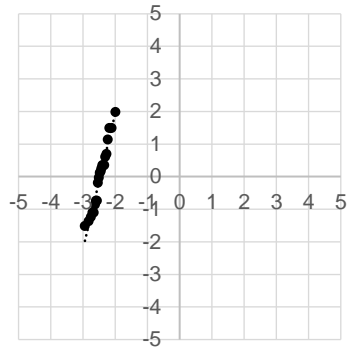
QQ-Plot NV

Serie 2,  $\phi 28$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



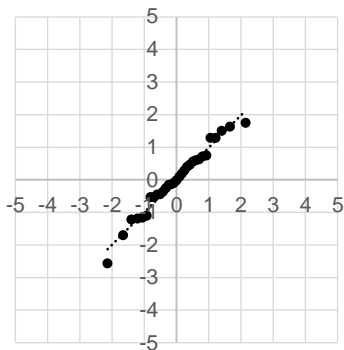
QQ-Plot LNV

Serie 2,  $\phi 28$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



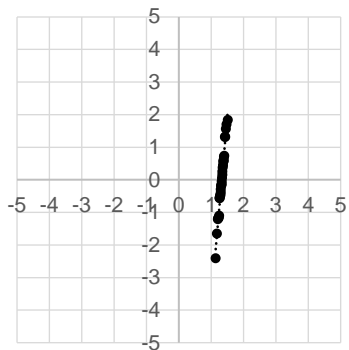
QQ-Plot NV

Serie 2,  $\phi 28$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



QQ-Plot LNV

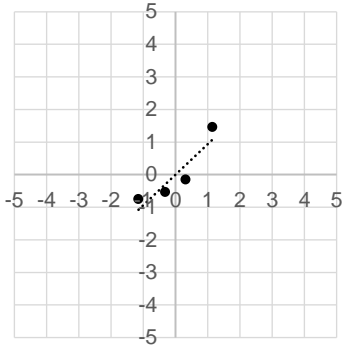
Serie 2,  $\phi 28$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



Serie 3,  $\phi 28$  mm, C30/37, Oberseite

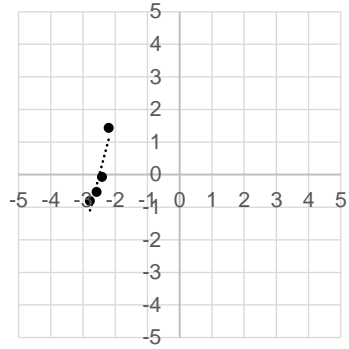
QQ-Plot NV

Serie 3,  $\phi 28$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



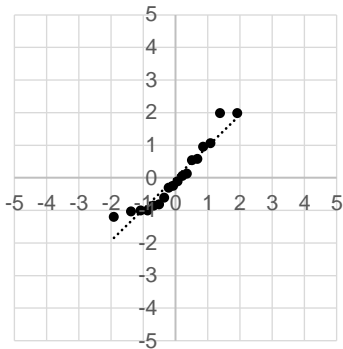
QQ-Plot LNV

Serie 3,  $\phi 28$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



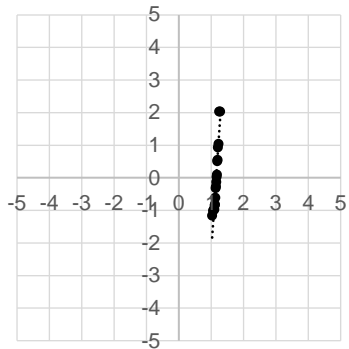
QQ-Plot NV

Serie 3,  $\phi 28$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



QQ-Plot LNV

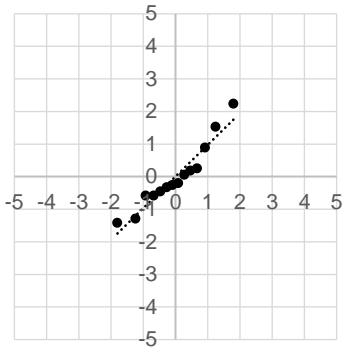
Serie 3,  $\phi 28$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



Serie 4,  $\phi 28$  mm, C30/37, Oberseite

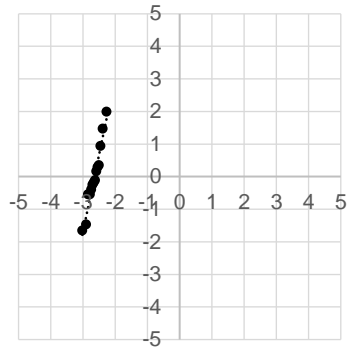
QQ-Plot NV

Serie 4,  $\phi 28$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



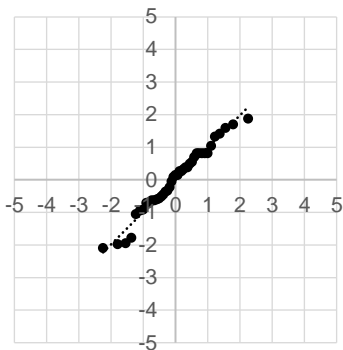
QQ-Plot LNV

Serie 4,  $\phi 28$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



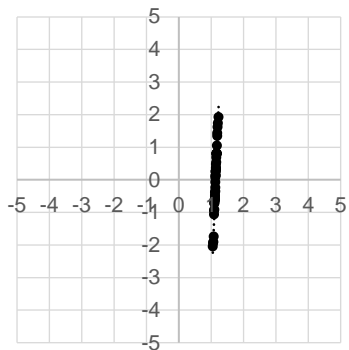
QQ-Plot NV

Serie 4,  $\phi 28$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



QQ-Plot LNV

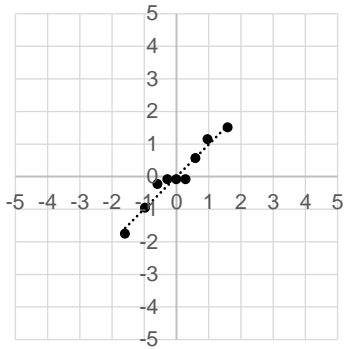
Serie 4,  $\phi 28$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



Serie 4.1,  $\phi 28$  mm, C30/37, Oberseite

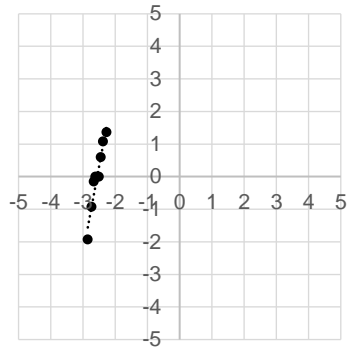
QQ-Plot NV

Serie 4.1,  $\phi 28$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



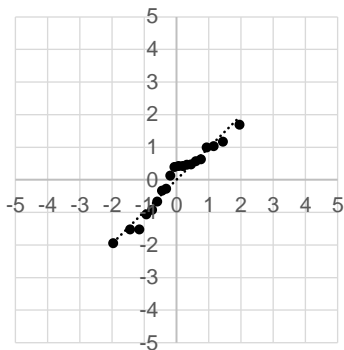
QQ-Plot LNV

Serie 4.1,  $\phi 28$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



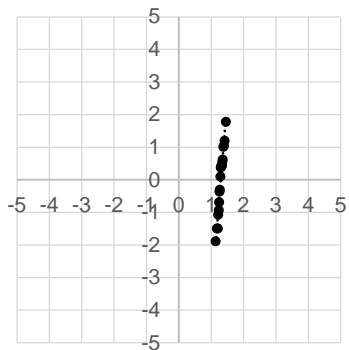
QQ-Plot NV

Serie 4.1,  $\phi 28$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



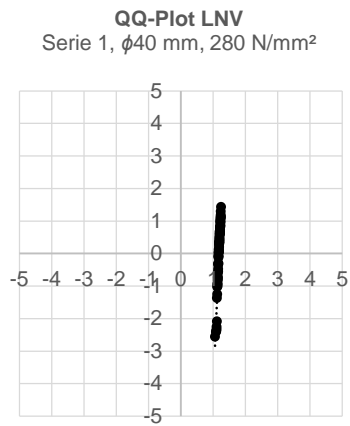
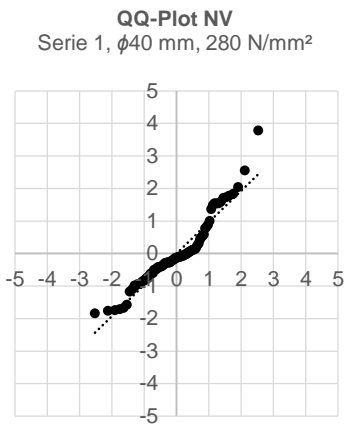
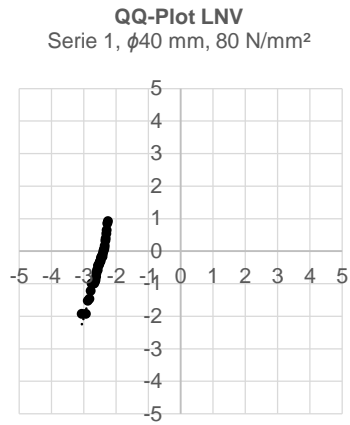
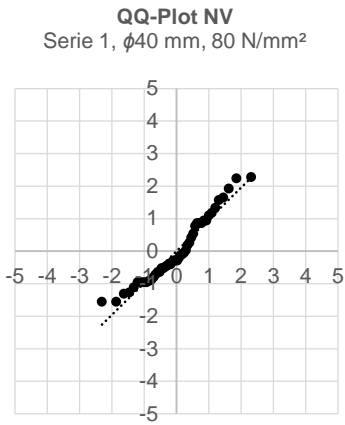
QQ-Plot LNV

Serie 4.1,  $\phi 28$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



B.3.3 Stabdurchmesser  $\phi 40$  mm

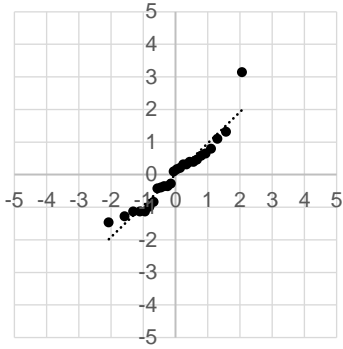
Serie 1,  $\phi 40$  mm, C30/37, Oberseite



Serie 1,  $\phi 40$  mm, C50/60, Oberseite

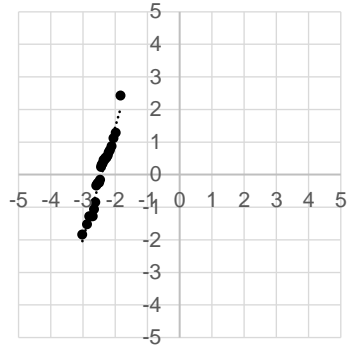
QQ-Plot NV

Serie 1,  $\phi 40$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



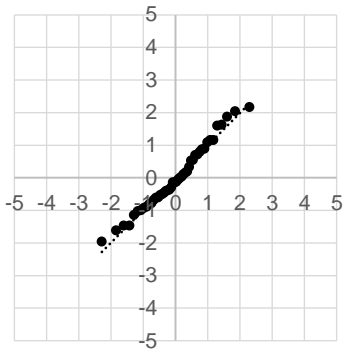
QQ-Plot LNV

Serie 1,  $\phi 40$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



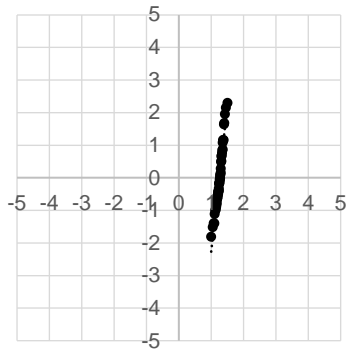
QQ-Plot NV

Serie 1,  $\phi 40$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



QQ-Plot LNV

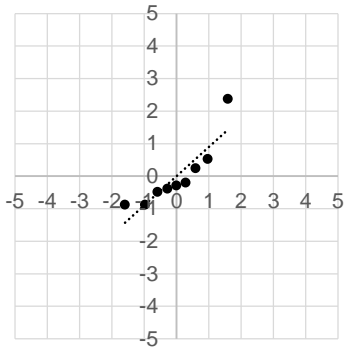
Serie 1,  $\phi 40$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



Serie 1.1,  $\phi 40$  mm, C30/37, Oberseite

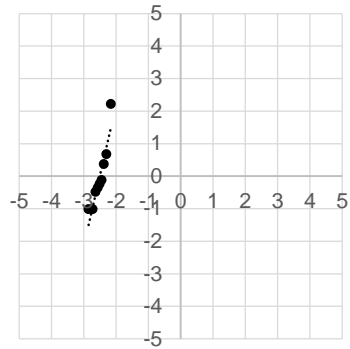
QQ-Plot NV

Serie 1.1,  $\phi 40$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



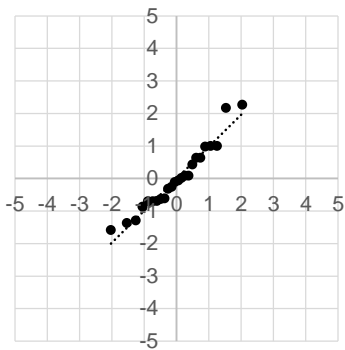
QQ-Plot LNV

Serie 1.1,  $\phi 40$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



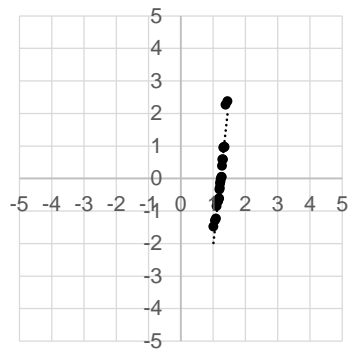
QQ-Plot NV

Serie 1.1,  $\phi 40$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



QQ-Plot LNV

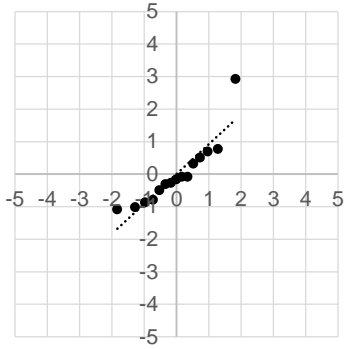
Serie 1.1,  $\phi 40$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



Serie 1.2,  $\phi 40$  mm, C30/37, Oberseite

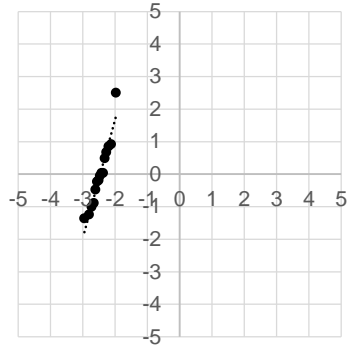
QQ-Plot NV

Serie 1.2,  $\phi 40$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



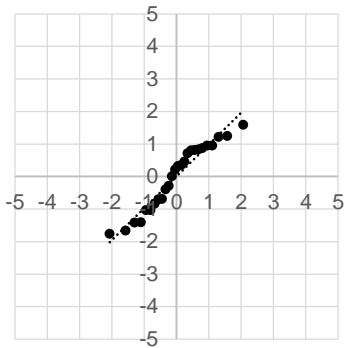
QQ-Plot LNV

Serie 1.2,  $\phi 40$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



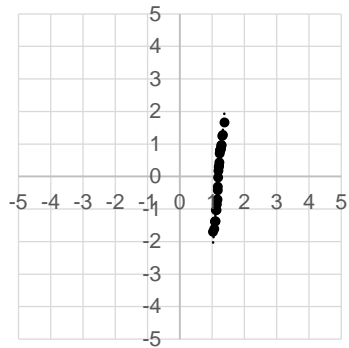
QQ-Plot NV

Serie 1.2,  $\phi 40$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



QQ-Plot LNV

Serie 1.2,  $\phi 40$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>

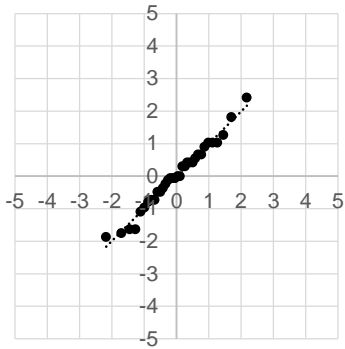




Serie 2,  $\phi 40$  mm, C30/37, Oberseite

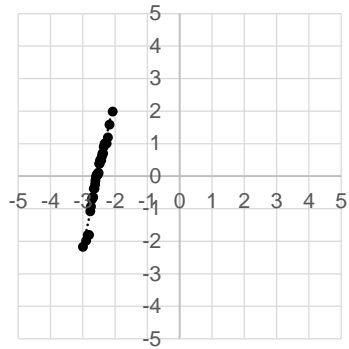
QQ-Plot NV

Serie 2,  $\phi 40$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



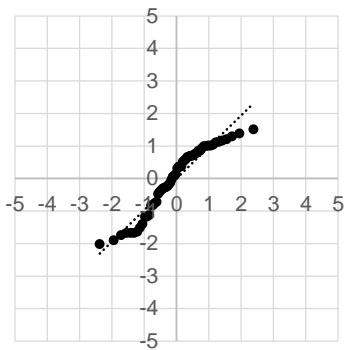
QQ-Plot LNV

Serie 2,  $\phi 40$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



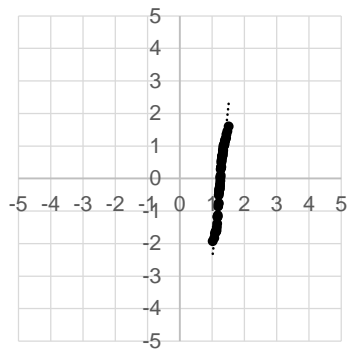
QQ-Plot NV

Serie 2,  $\phi 40$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



QQ-Plot LNV

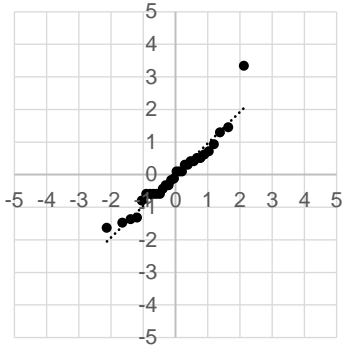
Serie 2,  $\phi 40$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



Serie 2,  $\phi 40$  mm, C50/60, Oberseite

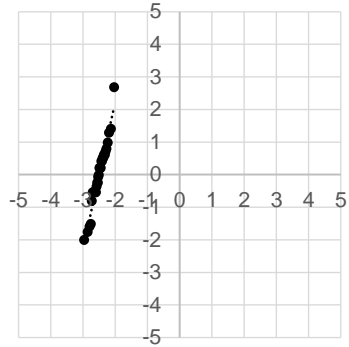
QQ-Plot NV

Serie 2,  $\phi 40$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



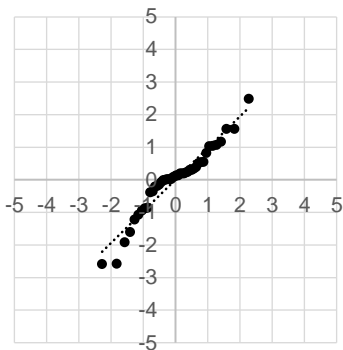
QQ-Plot LNV

Serie 2,  $\phi 40$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



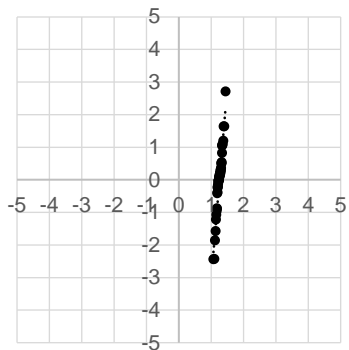
QQ-Plot NV

Serie 2,  $\phi 40$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



QQ-Plot LNV

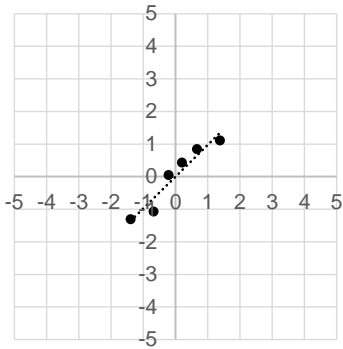
Serie 2,  $\phi 40$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



Serie 3,  $\phi 40$  mm, C30/37, Oberseite

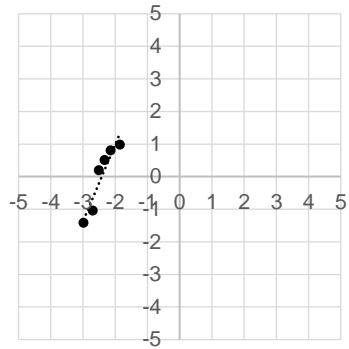
QQ-Plot NV

Serie 3,  $\phi 40$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



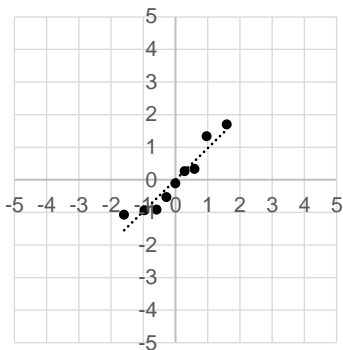
QQ-Plot LNV

Serie 3,  $\phi 40$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



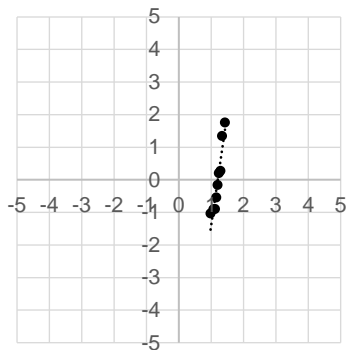
QQ-Plot NV

Serie 3,  $\phi 40$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



QQ-Plot LNV

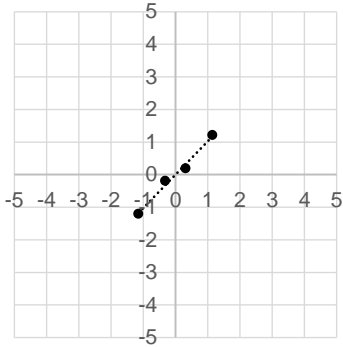
Serie 3,  $\phi 40$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



Serie 4,  $\phi 40$  mm, C30/37, Oberseite

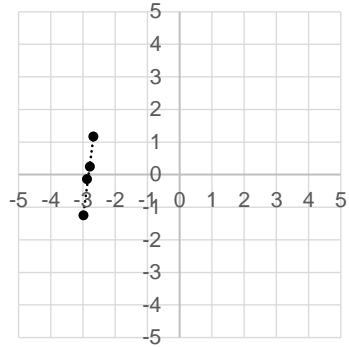
QQ-Plot NV

Serie 4,  $\phi 40$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



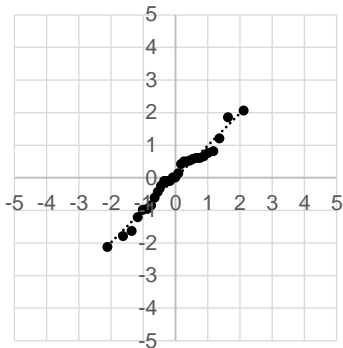
QQ-Plot LNV

Serie 4,  $\phi 40$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



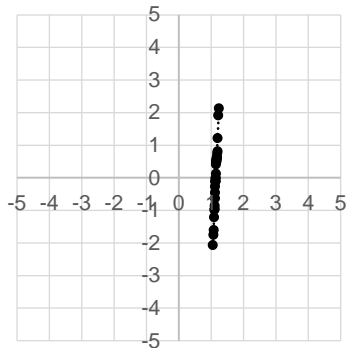
QQ-Plot NV

Serie 4,  $\phi 40$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



QQ-Plot LNV

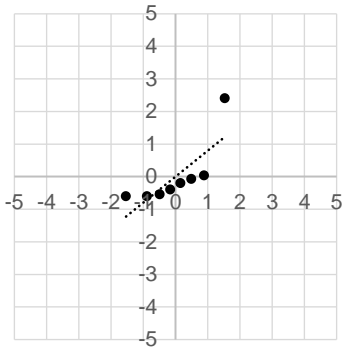
Serie 4,  $\phi 40$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



Serie 4.1,  $\phi 40$  mm, C30/37, Oberseite

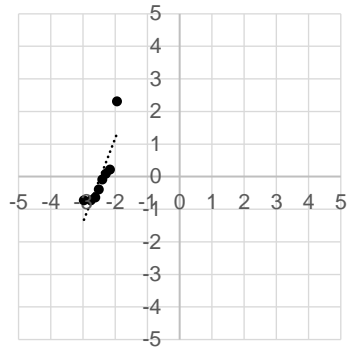
QQ-Plot NV

Serie 4.1,  $\phi 40$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



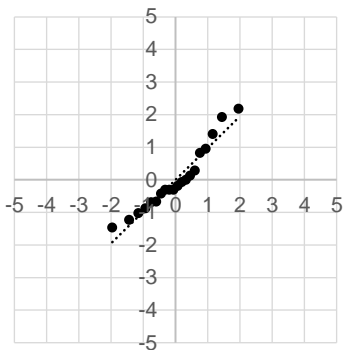
QQ-Plot LNV

Serie 4.1,  $\phi 40$  mm, 80 N/mm<sup>2</sup>



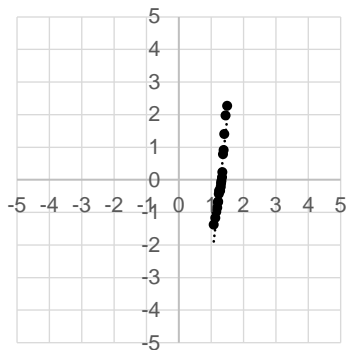
QQ-Plot NV

Serie 4.1,  $\phi 40$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>



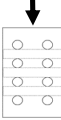
QQ-Plot LNV


Serie 4.1,  $\phi 40$  mm, 280 N/mm<sup>2</sup>




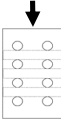
**B.4 Statistische Auswertung**


**B.4.1 Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm**


|   |            | Serie 1, $\phi 20$ mm, C30/37 |                      |       |       |       |       |       |
|---|------------|-------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |            | $\sigma_s$                    | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   |
|  | $w_{max}$  | [mm]                          | 0,115                | 0,227 | 0,328 | 0,385 | 0,437 | 0,471 |
|   | $w_m$      | [mm]                          | 0,085                | 0,148 | 0,225 | 0,273 | 0,310 | 0,338 |
|   | $s_x$      | [mm]                          | 0,020                | 0,041 | 0,063 | 0,067 | 0,079 | 0,095 |
|   | $V_x$      | [-]                           | 0,24                 | 0,28  | 0,28  | 0,25  | 0,25  | 0,28  |
|   | $n$        | [-]                           | 28                   | 51    | 55    | 55    | 55    | 56    |
|   | $k_n$      | [-]                           | 0,83                 | 0,79  | 0,78  | 0,78  | 0,78  | 0,78  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                          | 0,101                | 0,181 | 0,275 | 0,326 | 0,372 | 0,412 |


|   |            | Serie 1, $\phi 20$ mm, C30/37 |                      |       |       |       |       |       |
|---|------------|-------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |            | $\sigma_s$                    | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   |
|  | $w_{max}$  | [mm]                          | ./.                  | 0,075 | 0,115 | 0,138 | 0,167 | 0,182 |
|   | $w_m$      | [mm]                          | ./.                  | 0,063 | 0,082 | 0,087 | 0,087 | 0,098 |
|   | $s_x$      | [mm]                          | ./.                  | 0,011 | 0,016 | 0,024 | 0,031 | 0,034 |
|   | $V_x$      | [-]                           | ./.                  | 0,18  | 0,20  | 0,27  | 0,35  | 0,34  |
|   | $n$        | [-]                           | ./.                  | 7     | 11    | 18    | 23    | 23    |
|   | $k_n$      | [-]                           | ./.                  | 1,04  | 0,95  | 0,88  | 0,85  | 0,85  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                          | ./.                  | 0,074 | 0,098 | 0,108 | 0,113 | 0,127 |

|   |            | Serie 1, $\phi 20$ mm, C50/60 |                      |       |       |       |       |       |
|---|------------|-------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |            | $\sigma_s$                    | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   |
|  | $w_{max}$  | [mm]                          | 0,248                | 0,286 | 0,384 | 0,426 | 0,491 | 0,523 |
|   | $w_m$      | [mm]                          | 0,115                | 0,174 | 0,242 | 0,278 | 0,322 | 0,340 |
|   | $s_x$      | [mm]                          | 0,041                | 0,055 | 0,081 | 0,089 | 0,100 | 0,119 |
|   | $V_x$      | [-]                           | 0,35                 | 0,31  | 0,33  | 0,32  | 0,31  | 0,35  |
|   | $n$        | [-]                           | 26                   | 35    | 40    | 40    | 40    | 42    |
|   | $k_n$      | [-]                           | 0,84                 | 0,81  | 0,80  | 0,80  | 0,80  | 0,80  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                          | 0,149                | 0,219 | 0,307 | 0,350 | 0,403 | 0,435 |


|   |            | Serie 1.1, $\phi 20$ mm, C30/37 |                      |       |       |       |       |       |
|---|------------|---------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |            | $\sigma_s$                      | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   |
|  | $w_{max}$  | [mm]                            | 0,190                | 0,272 | 0,359 | 0,419 | 0,481 | 0,545 |
|   | $w_m$      | [mm]                            | 0,125                | 0,163 | 0,233 | 0,249 | 0,293 | 0,332 |
|   | $s_x$      | [mm]                            | 0,040                | 0,069 | 0,089 | 0,103 | 0,113 | 0,120 |
|   | $V_x$      | [-]                             | 0,32                 | 0,42  | 0,38  | 0,41  | 0,39  | 0,36  |
|   | $n$        | [-]                             | 10                   | 18    | 19    | 18    | 19    | 19    |
|   | $k_n$      | [-]                             | 0,96                 | 0,88  | 0,87  | 0,88  | 0,87  | 0,87  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                            | 0,164                | 0,223 | 0,310 | 0,340 | 0,391 | 0,436 |

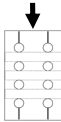
|   |            | Serie 1.1, $\phi 20$ mm, C30/37 |                      |       |       |       |       |       |
|---|------------|---------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |            | $\sigma_s$                      | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   |
|  | $w_{max}$  | [mm]                            | ./.                  | 0,069 | 0,098 | 0,113 | 0,126 | 0,138 |
|   | $w_m$      | [mm]                            | ./.                  | 0,062 | 0,066 | 0,074 | 0,078 | 0,093 |
|   | $s_x$      | [mm]                            | ./.                  | 0,007 | 0,015 | 0,017 | 0,022 | 0,022 |
|   | $V_x$      | [-]                             | ./.                  | 0,12  | 0,23  | 0,23  | 0,28  | 0,24  |
|   | $n$        | [-]                             | ./.                  | 4     | 10    | 15    | 19    | 18    |
|   | $k_n$      | [-]                             | ./.                  | 1,26  | 0,96  | 0,90  | 0,87  | 0,88  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                            | ./.                  | 0,071 | 0,081 | 0,090 | 0,098 | 0,112 |


|   |            | Serie 2, $\phi 20$ mm, C30/37 |                      |       |       |       |       |       |
|---|------------|-------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |            | $\sigma_s$                    | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   |
|  | $w_{max}$  | [mm]                          | 0,221                | 0,367 | 0,477 | 0,510 | 0,560 | 0,629 |
|   | $w_m$      | [mm]                          | 0,095                | 0,158 | 0,217 | 0,242 | 0,283 | 0,315 |
|   | $s_x$      | [mm]                          | 0,036                | 0,065 | 0,083 | 0,101 | 0,108 | 0,120 |
|   | $V_x$      | [-]                           | 0,38                 | 0,41  | 0,38  | 0,42  | 0,38  | 0,38  |
|   | $n$        | [-]                           | 36                   | 56    | 63    | 66    | 64    | 65    |
|   | $k_n$      | [-]                           | 0,81                 | 0,78  | 0,78  | 0,77  | 0,77  | 0,77  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                          | 0,124                | 0,209 | 0,281 | 0,320 | 0,366 | 0,408 |

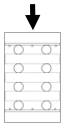
|   |            | Serie 2, $\phi 20$ mm, C30/37 |                      |       |       |       |       |       |
|---|------------|-------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |            | $\sigma_s$                    | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   |
|  | $w_{max}$  | [mm]                          | ./.                  | 0,069 | 0,157 | 0,146 | 0,182 | 0,215 |
|   | $w_m$      | [mm]                          | ./.                  | 0,059 | 0,076 | 0,080 | 0,092 | 0,096 |
|   | $s_x$      | [mm]                          | ./.                  | 0,008 | 0,033 | 0,030 | 0,036 | 0,040 |
|   | $V_x$      | [-]                           | ./.                  | 0,13  | 0,43  | 0,38  | 0,39  | 0,42  |
|   | $n$        | [-]                           | ./.                  | 6     | 12    | 14    | 17    | 19    |
|   | $k_n$      | [-]                           | ./.                  | 1,09  | 0,93  | 0,91  | 0,88  | 0,87  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                          | ./.                  | 0,067 | 0,107 | 0,107 | 0,123 | 0,131 |

## Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|   |            | Serie 2, $\phi 20$ mm, C50/60 |       |       |       |       |       |       |
|---|------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | $\sigma_s$ | [N/mm <sup>2</sup> ]          | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   | 360   |
|   | $w_{max}$  | [mm]                          | 0,205 | 0,345 | 0,426 | 0,473 | 0,520 | 0,564 |
|   | $w_m$      | [mm]                          | 0,105 | 0,179 | 0,221 | 0,268 | 0,293 | 0,329 |
|   | $s_x$      | [mm]                          | 0,039 | 0,065 | 0,095 | 0,095 | 0,113 | 0,119 |
|   | $V_x$      | [-]                           | 0,37  | 0,36  | 0,43  | 0,36  | 0,39  | 0,36  |
|   | $n$        | [-]                           | 24    | 36    | 43    | 43    | 45    | 45    |
|   | $k_n$      | [-]                           | 0,85  | 0,81  | 0,80  | 0,80  | 0,80  | 0,80  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                          | 0,138 | 0,232 | 0,296 | 0,345 | 0,384 | 0,423 |


|   |            | Serie 3, $\phi 20$ mm, C30/37 |       |       |       |       |       |       |
|---|------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | $\sigma_s$ | [N/mm <sup>2</sup> ]          | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   | 360   |
|   | $w_{max}$  | [mm]                          | 0,094 | 0,163 | 0,264 | 0,286 | 0,303 | 0,347 |
|   | $w_m$      | [mm]                          | 0,076 | 0,118 | 0,149 | 0,159 | 0,181 | 0,209 |
|   | $s_x$      | [mm]                          | 0,014 | 0,035 | 0,064 | 0,075 | 0,083 | 0,095 |
|   | $V_x$      | [-]                           | 0,19  | 0,30  | 0,43  | 0,47  | 0,46  | 0,46  |
|   | $n$        | [-]                           | 13    | 18    | 23    | 25    | 26    | 26    |
|   | $k_n$      | [-]                           | 0,92  | 0,88  | 0,85  | 0,84  | 0,84  | 0,84  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                          | 0,089 | 0,149 | 0,203 | 0,222 | 0,251 | 0,289 |

|   |            | Serie 4, $\phi 20$ mm, C30/37 |       |       |       |       |       |       |
|---|------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | $\sigma_s$ | [N/mm <sup>2</sup> ]          | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   | 360   |
|   | $w_{max}$  | [mm]                          | 0,061 | 0,094 | 0,138 | 0,165 | 0,181 | 0,199 |
|   | $w_m$      | [mm]                          | 0,056 | 0,069 | 0,089 | 0,100 | 0,109 | 0,120 |
|   | $s_x$      | [mm]                          | 0,004 | 0,014 | 0,024 | 0,030 | 0,032 | 0,033 |
|   | $V_x$      | [-]                           | 0,07  | 0,21  | 0,27  | 0,30  | 0,29  | 0,27  |
|   | $n$        | [-]                           | 7     | 21    | 35    | 42    | 45    | 45    |
|   | $k_n$      | [-]                           | 1,04  | 0,86  | 0,81  | 0,80  | 0,80  | 0,80  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                          | 0,060 | 0,081 | 0,109 | 0,124 | 0,134 | 0,146 |

|   |            | Serie 4.1, $\phi 20$ mm, C30/37 |       |       |       |       |       |       |
|---|------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | $\sigma_s$ | [N/mm <sup>2</sup> ]            | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   | 360   |
|   | $w_{max}$  | [mm]                            | 0,086 | 0,155 | 0,224 | 0,263 | 0,301 | 0,347 |
|   | $w_m$      | [mm]                            | 0,067 | 0,095 | 0,153 | 0,166 | 0,192 | 0,225 |
|   | $s_x$      | [mm]                            | 0,013 | 0,025 | 0,033 | 0,054 | 0,061 | 0,066 |
|   | $V_x$      | [-]                             | 0,20  | 0,27  | 0,22  | 0,32  | 0,32  | 0,29  |
|   | $n$        | [-]                             | 5     | 23    | 23    | 26    | 25    | 25    |
|   | $k_n$      | [-]                             | 1,15  | 0,85  | 0,85  | 0,84  | 0,84  | 0,84  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                            | 0,082 | 0,116 | 0,181 | 0,211 | 0,243 | 0,281 |

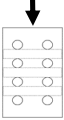



Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

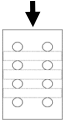
|   |            | Serie 4.1, $\phi 20$ mm, C30/37 |       |       |       |       |       |       |
|---|------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | $\sigma_s$ | [N/mm <sup>2</sup> ]            | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   | 360   |
|   | $w_{max}$  | [mm]                            | 0,075 | 0,104 | 0,130 | 0,162 | 0,171 | 0,190 |
|   | $w_m$      | [mm]                            | 0,070 | 0,072 | 0,084 | 0,092 | 0,090 | 0,090 |
|   | $s_x$      | [mm]                            | 0,007 | 0,018 | 0,029 | 0,033 | 0,038 | 0,043 |
|   | $V_x$      | [-]                             | 0,10  | 0,25  | 0,34  | 0,36  | 0,42  | 0,48  |
|   | $n$        | [-]                             | 2     | 7     | 11    | 13    | 16    | 21    |
|   | $k_n$      | [-]                             | 2,23  | 1,04  | 0,95  | 0,92  | 0,89  | 0,86  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                            | 0,086 | 0,091 | 0,112 | 0,122 | 0,124 | 0,127 |


## Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung


### B.4.2 Stabdurchmesser $\phi 28$ mm


|  |  | Serie 1, $\phi 28$ mm, C30/37 |                      |       |       |       |       |       |       |
|---|--|-------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |  | $\sigma_s$                    | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   | 360   |
|   |  | $w_{max}$                     | [mm]                 | 0,142 | 0,267 | 0,350 | 0,521 | 0,443 | 0,516 |
|   |  | $w_m$                         | [mm]                 | 0,092 | 0,143 | 0,185 | 0,221 | 0,249 | 0,276 |
|   |  | $s_x$                         | [mm]                 | 0,023 | 0,053 | 0,074 | 0,096 | 0,096 | 0,111 |
|   |  | $V_x$                         | [-]                  | 0,25  | 0,37  | 0,40  | 0,43  | 0,39  | 0,40  |
|   |  | $n$                           | [-]                  | 36    | 57    | 63    | 66    | 65    | 69    |
|   |  | $k_n$                         | [-]                  | 0,81  | 0,78  | 0,78  | 0,77  | 0,77  | 0,77  |
|   |  | $w_{0,75}$                    | [mm]                 | 0,111 | 0,184 | 0,242 | 0,295 | 0,324 | 0,361 |


|  |  | Serie 1, $\phi 28$ mm, C30/37 |                      |       |       |       |       |       |       |
|---|--|-------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |  | $\sigma_s$                    | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   | 360   |
|   |  | $w_{max}$                     | [mm]                 | 0,082 | 0,210 | 0,249 | 0,251 | 0,264 | 0,274 |
|   |  | $w_m$                         | [mm]                 | 0,062 | 0,094 | 0,118 | 0,133 | 0,145 | 0,164 |
|   |  | $s_x$                         | [mm]                 | 0,015 | 0,047 | 0,057 | 0,053 | 0,058 | 0,062 |
|   |  | $V_x$                         | [-]                  | 0,24  | 0,50  | 0,48  | 0,40  | 0,40  | 0,38  |
|   |  | $n$                           | [-]                  | 4     | 10    | 11    | 12    | 13    | 12    |
|   |  | $k_n$                         | [-]                  | 1,26  | 0,96  | 0,95  | 0,93  | 0,92  | 0,93  |
|   |  | $w_{0,75}$                    | [mm]                 | 0,080 | 0,140 | 0,173 | 0,182 | 0,199 | 0,221 |


|  |  | Serie 1, $\phi 28$ mm, C50/60 |                      |       |       |       |       |       |       |
|---|--|-------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |  | $\sigma_s$                    | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   | 360   |
|   |  | $w_{max}$                     | [mm]                 | 0,146 | 0,265 | 0,434 | 0,476 | 0,546 | 0,610 |
|   |  | $w_m$                         | [mm]                 | 0,099 | 0,164 | 0,212 | 0,233 | 0,264 | 0,296 |
|   |  | $s_x$                         | [mm]                 | 0,027 | 0,055 | 0,092 | 0,109 | 0,113 | 0,122 |
|   |  | $V_x$                         | [-]                  | 0,27  | 0,34  | 0,44  | 0,47  | 0,43  | 0,41  |
|   |  | $n$                           | [-]                  | 27    | 35    | 41    | 47    | 47    | 44    |
|   |  | $k_n$                         | [-]                  | 0,83  | 0,81  | 0,80  | 0,79  | 0,79  | 0,80  |
|   |  | $w_{0,75}$                    | [mm]                 | 0,122 | 0,209 | 0,286 | 0,319 | 0,354 | 0,393 |

|  |  | Serie 1, $\phi 28$ mm, C50/60 |                      |       |       |       |       |       |       |
|---|--|-------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |  | $\sigma_s$                    | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   | 360   |
|   |  | $w_{max}$                     | [mm]                 | 0,121 | 0,152 | 0,198 | 0,253 | 0,231 | 0,250 |
|   |  | $w_m$                         | [mm]                 | 0,074 | 0,098 | 0,119 | 0,133 | 0,154 | 0,157 |
|   |  | $s_x$                         | [mm]                 | 0,026 | 0,026 | 0,046 | 0,053 | 0,053 | 0,058 |
|   |  | $V_x$                         | [-]                  | 0,35  | 0,26  | 0,39  | 0,40  | 0,34  | 0,37  |
|   |  | $n$                           | [-]                  | 9     | 14    | 15    | 17    | 15    | 16    |
|   |  | $k_n$                         | [-]                  | 0,99  | 0,91  | 0,90  | 0,88  | 0,90  | 0,89  |
|   |  | $w_{0,75}$                    | [mm]                 | 0,099 | 0,122 | 0,161 | 0,179 | 0,201 | 0,209 |

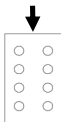
|   |            | Serie 1.1, $\phi 28$ mm, C30/37 |                      |       |       |       |       |       |
|---|------------|---------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |            | $\sigma_s$                      | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   |
|  | $w_{max}$  | [mm]                            | 0,096                | 0,224 | 0,366 | 0,432 | 0,510 | 0,579 |
|   | $w_m$      | [mm]                            | 0,074                | 0,160 | 0,200 | 0,221 | 0,259 | 0,294 |
|   | $s_x$      | [mm]                            | 0,016                | 0,034 | 0,075 | 0,098 | 0,109 | 0,123 |
|   | $V_x$      | [-]                             | 0,22                 | 0,22  | 0,37  | 0,44  | 0,42  | 0,42  |
|   | $n$        | [-]                             | 14                   | 15    | 20    | 22    | 22    | 22    |
|   | $k_n$      | [-]                             | 0,91                 | 0,90  | 0,87  | 0,85  | 0,85  | 0,85  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                            | 0,089                | 0,191 | 0,264 | 0,304 | 0,352 | 0,399 |


|   |            | Serie 1.1, $\phi 28$ mm, C30/37 |                      |       |       |       |       |       |
|---|------------|---------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |            | $\sigma_s$                      | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   |
|  | $w_{max}$  | [mm]                            | 0,122                | 0,181 | 0,217 | 0,257 | 0,276 | 0,311 |
|   | $w_m$      | [mm]                            | 0,084                | 0,112 | 0,136 | 0,146 | 0,164 | 0,187 |
|   | $s_x$      | [mm]                            | 0,028                | 0,039 | 0,056 | 0,063 | 0,071 | 0,080 |
|   | $V_x$      | [-]                             | 0,33                 | 0,35  | 0,41  | 0,43  | 0,43  | 0,43  |
|   | $n$        | [-]                             | 10                   | 15    | 18    | 21    | 21    | 21    |
|   | $k_n$      | [-]                             | 0,96                 | 0,90  | 0,88  | 0,86  | 0,86  | 0,86  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                            | 0,111                | 0,147 | 0,185 | 0,200 | 0,224 | 0,256 |

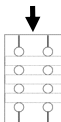
|   |            | Serie 2, $\phi 28$ mm, C30/37 |                      |       |       |       |       |       |
|---|------------|-------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |            | $\sigma_s$                    | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   |
|  | $w_{max}$  | [mm]                          | 0,149                | 0,393 | 0,396 | 0,431 | 0,509 | 0,502 |
|   | $w_m$      | [mm]                          | 0,084                | 0,147 | 0,201 | 0,234 | 0,260 | 0,289 |
|   | $s_x$      | [mm]                          | 0,020                | 0,052 | 0,070 | 0,088 | 0,101 | 0,110 |
|   | $V_x$      | [-]                           | 0,24                 | 0,36  | 0,35  | 0,38  | 0,39  | 0,38  |
|   | $n$        | [-]                           | 42                   | 84    | 93    | 90    | 89    | 88    |
|   | $k_n$      | [-]                           | 0,80                 | 0,76  | 0,76  | 0,76  | 0,76  | 0,76  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                          | 0,100                | 0,186 | 0,254 | 0,301 | 0,337 | 0,373 |


|   |            | Serie 2, $\phi 28$ mm, C30/37 |                      |       |       |       |       |       |
|---|------------|-------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |            | $\sigma_s$                    | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   |
|  | $w_{max}$  | [mm]                          | 0,136                | 0,190 | 0,245 | 0,278 | 0,309 | 0,350 |
|   | $w_m$      | [mm]                          | 0,081                | 0,093 | 0,110 | 0,132 | 0,143 | 0,162 |
|   | $s_x$      | [mm]                          | 0,034                | 0,039 | 0,050 | 0,058 | 0,067 | 0,080 |
|   | $V_x$      | [-]                           | 0,42                 | 0,42  | 0,45  | 0,44  | 0,47  | 0,49  |
|   | $n$        | [-]                           | 5                    | 20    | 33    | 35    | 37    | 38    |
|   | $k_n$      | [-]                           | 1,15                 | 0,87  | 0,82  | 0,81  | 0,81  | 0,81  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                          | 0,120                | 0,126 | 0,151 | 0,179 | 0,197 | 0,227 |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

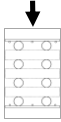
|   |            | Serie 2, $\phi 28$ mm, C50/60 |       |       |       |       |       |       |
|---|------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | $\sigma_s$ | [N/mm <sup>2</sup> ]          | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   | 360   |
|   | $w_{max}$  | [mm]                          | 0,136 | 0,240 | 0,345 | 0,401 | 0,462 | 0,506 |
|   | $w_m$      | [mm]                          | 0,087 | 0,164 | 0,244 | 0,285 | 0,320 | 0,356 |
|   | $s_x$      | [mm]                          | 0,021 | 0,043 | 0,055 | 0,067 | 0,087 | 0,098 |
|   | $V_x$      | [-]                           | 0,24  | 0,26  | 0,23  | 0,23  | 0,27  | 0,28  |
|   | $n$        | [-]                           | 22    | 31    | 31    | 31    | 32    | 32    |
|   | $k_n$      | [-]                           | 0,85  | 0,82  | 0,82  | 0,82  | 0,82  | 0,82  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                          | 0,105 | 0,199 | 0,289 | 0,340 | 0,391 | 0,437 |


|   |            | Serie 2, $\phi 28$ mm, C50/60 |       |       |       |       |       |       |
|---|------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | $\sigma_s$ | [N/mm <sup>2</sup> ]          | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   | 360   |
|   | $w_{max}$  | [mm]                          | 0,080 | 0,112 | 0,150 | 0,175 | 0,202 | 0,215 |
|   | $w_m$      | [mm]                          | 0,069 | 0,076 | 0,113 | 0,129 | 0,143 | 0,158 |
|   | $s_x$      | [mm]                          | 0,017 | 0,019 | 0,026 | 0,029 | 0,034 | 0,039 |
|   | $V_x$      | [-]                           | 0,24  | 0,25  | 0,23  | 0,22  | 0,24  | 0,24  |
|   | $n$        | [-]                           | 3     | 10    | 9     | 10    | 11    | 11    |
|   | $k_n$      | [-]                           | 1,47  | 0,96  | 0,99  | 0,96  | 0,95  | 0,95  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                          | 0,093 | 0,095 | 0,139 | 0,157 | 0,175 | 0,195 |

|  |            | Serie 3, $\phi 28$ mm, C30/37 |       |       |       |       |       |       |
|--|------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | $\sigma_s$ | [N/mm <sup>2</sup> ]          | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   | 360   |
|  | $w_{max}$  | [mm]                          | 0,119 | 0,181 | 0,213 | 0,255 | 0,293 | 0,342 |
|  | $w_m$      | [mm]                          | 0,085 | 0,098 | 0,130 | 0,144 | 0,150 | 0,170 |
|  | $s_x$      | [mm]                          | 0,024 | 0,034 | 0,045 | 0,056 | 0,071 | 0,080 |
|  | $V_x$      | [-]                           | 0,28  | 0,35  | 0,34  | 0,39  | 0,47  | 0,47  |
|  | $n$        | [-]                           | 4     | 10    | 18    | 18    | 21    | 21    |
|  | $k_n$      | [-]                           | 1,26  | 0,96  | 0,88  | 0,88  | 0,86  | 0,86  |
|  | $w_{0,75}$ | [mm]                          | 0,114 | 0,131 | 0,170 | 0,193 | 0,211 | 0,239 |

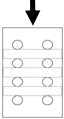
|   |            | Serie 4, $\phi 28$ mm, C30/37 |       |       |       |       |       |       |
|---|------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | $\sigma_s$ | [N/mm <sup>2</sup> ]          | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   | 360   |
|   | $w_{max}$  | [mm]                          | 0,107 | 0,138 | 0,169 | 0,194 | 0,205 | 0,245 |
|   | $w_m$      | [mm]                          | 0,072 | 0,089 | 0,112 | 0,129 | 0,149 | 0,165 |
|   | $s_x$      | [mm]                          | 0,016 | 0,024 | 0,032 | 0,035 | 0,034 | 0,041 |
|   | $V_x$      | [-]                           | 0,22  | 0,27  | 0,28  | 0,27  | 0,23  | 0,25  |
|   | $n$        | [-]                           | 14    | 31    | 39    | 41    | 41    | 41    |
|   | $k_n$      | [-]                           | 0,91  | 0,82  | 0,81  | 0,80  | 0,80  | 0,80  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                          | 0,086 | 0,108 | 0,138 | 0,157 | 0,176 | 0,197 |


Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

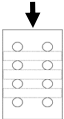
|   |            | Serie 4.1, $\phi 28$ mm, C30/37 |                      |       |       |       |       |       |
|---|------------|---------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |            | $\sigma_s$                      | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   |
|  | $w_{max}$  | [mm]                            | 0,099                | 0,249 | 0,328 | 0,368 | 0,404 | 0,451 |
|   | $w_m$      | [mm]                            | 0,078                | 0,143 | 0,223 | 0,262 | 0,303 | 0,339 |
|   | $s_x$      | [mm]                            | 0,014                | 0,044 | 0,060 | 0,063 | 0,067 | 0,074 |
|   | $V_x$      | [-]                             | 0,18                 | 0,31  | 0,27  | 0,24  | 0,22  | 0,22  |
|   | $n$        | [-]                             | 9                    | 20    | 20    | 20    | 20    | 20    |
|   | $k_n$      | [-]                             | 0,99                 | 0,87  | 0,87  | 0,87  | 0,87  | 0,87  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                            | 0,092                | 0,181 | 0,275 | 0,316 | 0,361 | 0,403 |

|   |            | Serie 4.1, $\phi 28$ mm, C30/37 |                      |       |       |       |       |       |
|---|------------|---------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |            | $\sigma_s$                      | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   | 280   | 320   |
|  | $w_{max}$  | [mm]                            | 0,061                | 0,113 | 0,156 | 0,180 | 0,201 | 0,221 |
|   | $w_m$      | [mm]                            | 0,061                | 0,081 | 0,114 | 0,120 | 0,132 | 0,149 |
|   | $s_x$      | [mm]                            | ./.                  | 0,016 | 0,034 | 0,043 | 0,052 | 0,056 |
|   | $V_x$      | [-]                             | ./.                  | 0,20  | 0,30  | 0,36  | 0,39  | 0,37  |
|   | $n$        | [-]                             | 1                    | 10    | 14    | 17    | 18    | 18    |
|   | $k_n$      | [-]                             | -                    | 0,96  | 0,91  | 0,88  | 0,88  | 0,88  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                            | ./.                  | 0,097 | 0,145 | 0,158 | 0,178 | 0,198 |

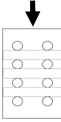
B.4.3 Stabdurchmesser  $\phi 40$  mm

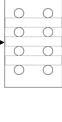
|  |  | Serie 1, $\phi 40$ mm, C30/37 |                      |       |       |       |
|---|--|-------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|
|   |  | $\sigma_s$                    | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   |
| $w_{max}$   |  | [mm]                          | 0,149                | 0,240 | 0,424 | 0,577 |
| $w_m$   |  | [mm]                          | 0,091                | 0,135 | 0,197 | 0,231 |
| $s_x$   |  | [mm]                          | 0,025                | 0,049 | 0,077 | 0,092 |
| $V_x$   |  | [-]                           | 0,28                 | 0,36  | 0,39  | 0,40  |
| $n$   |  | [-]                           | 48                   | 78    | 86    | 88    |
| $k_n$   |  | [-]                           | 0,79                 | 0,76  | 0,76  | 0,76  |
| $w_{0,75}$  |  | [mm]                          | 0,111                | 0,173 | 0,255 | 0,300 |

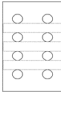
|  |  | Serie 1, $\phi 40$ mm, C30/37 |                      |       |       |       |
|---|--|-------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|
|   |  | $\sigma_s$                    | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   |
| $w_{max}$   |  | [mm]                          | 0,309                | 0,361 | 0,430 | 0,462 |
| $w_m$   |  | [mm]                          | 0,091                | 0,125 | 0,165 | 0,193 |
| $s_x$   |  | [mm]                          | 0,055                | 0,057 | 0,075 | 0,080 |
| $V_x$   |  | [-]                           | 0,60                 | 0,46  | 0,45  | 0,42  |
| $n$   |  | [-]                           | 20                   | 31    | 34    | 33    |
| $k_n$   |  | [-]                           | 0,87                 | 0,82  | 0,82  | 0,82  |
| $w_{0,75}$  |  | [mm]                          | 0,139                | 0,172 | 0,227 | 0,259 |

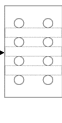
|  |  | Serie 1, $\phi 40$ mm, C50/60 |                      |       |       |       |
|---|--|-------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|
|   |  | $\sigma_s$                    | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   |
| $w_{max}$   |  | [mm]                          | 0,176                | 0,297 | 0,340 | 0,410 |
| $w_m$   |  | [mm]                          | 0,092                | 0,149 | 0,191 | 0,226 |
| $s_x$   |  | [mm]                          | 0,027                | 0,055 | 0,073 | 0,085 |
| $V_x$   |  | [-]                           | 0,29                 | 0,37  | 0,38  | 0,38  |
| $n$   |  | [-]                           | 26                   | 39    | 46    | 46    |
| $k_n$   |  | [-]                           | 0,84                 | 0,81  | 0,79  | 0,79  |
| $w_{0,75}$  |  | [mm]                          | 0,114                | 0,193 | 0,249 | 0,293 |

Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung


|   |            | Serie 1.1, $\phi 40$ mm, C30/37 |                      |       |       |       |
|---|------------|---------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|
|   |            | $\sigma_s$                      | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   |
|  | $w_{max}$  | [mm]                            | 0,132                | 0,224 | 0,347 | 0,393 |
|   | $w_m$      | [mm]                            | 0,083                | 0,128 | 0,174 | 0,202 |
|   | $s_x$      | [mm]                            | 0,021                | 0,052 | 0,077 | 0,085 |
|   | $V_x$      | [-]                             | 0,25                 | 0,41  | 0,45  | 0,42  |
|   | $n$        | [-]                             | 9                    | 18    | 23    | 24    |
|   | $k_n$      | [-]                             | 0,99                 | 0,88  | 0,85  | 0,85  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                            | 0,103                | 0,173 | 0,240 | 0,273 |


|   |            | Serie 1.1, $\phi 40$ mm, C30/37 |                      |       |       |       |
|---|------------|---------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|
|   |            | $\sigma_s$                      | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   |
|  | $w_{max}$  | [mm]                            | 0,075                | 0,128 | 0,258 | 0,280 |
|   | $w_m$      | [mm]                            | 0,064                | 0,091 | 0,137 | 0,160 |
|   | $s_x$      | [mm]                            | 0,008                | 0,025 | 0,051 | 0,061 |
|   | $V_x$      | [-]                             | 0,12                 | 0,28  | 0,37  | 0,38  |
|   | $n$        | [-]                             | 6                    | 15    | 18    | 21    |
|   | $k_n$      | [-]                             | 1,09                 | 0,90  | 0,88  | 0,86  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                            | 0,072                | 0,114 | 0,182 | 0,213 |


|   |            | Serie 1.2, $\phi 40$ mm, C30/37 |                      |       |       |       |
|---|------------|---------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|
|   |            | $\sigma_s$                      | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   |
|  | $w_{max}$  | [mm]                            | 0,167                | 0,190 | 0,282 | 0,301 |
|   | $w_m$      | [mm]                            | 0,088                | 0,133 | 0,188 | 0,186 |
|   | $s_x$      | [mm]                            | 0,027                | 0,043 | 0,066 | 0,073 |
|   | $V_x$      | [-]                             | 0,30                 | 0,32  | 0,35  | 0,39  |
|   | $n$        | [-]                             | 15                   | 23    | 25    | 26    |
|   | $k_n$      | [-]                             | 0,90                 | 0,85  | 0,84  | 0,84  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                            | 0,113                | 0,169 | 0,243 | 0,247 |

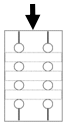
|   |            | Serie 1.2, $\phi 40$ mm, C30/37 |                      |       |       |       |
|---|------------|---------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|
|   |            | $\sigma_s$                      | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   |
|  | $w_{max}$  | [mm]                            | 0,113                | 0,151 | 0,193 | 0,197 |
|   | $w_m$      | [mm]                            | 0,082                | 0,105 | 0,130 | 0,137 |
|   | $s_x$      | [mm]                            | 0,019                | 0,028 | 0,040 | 0,040 |
|   | $V_x$      | [-]                             | 0,23                 | 0,27  | 0,30  | 0,30  |
|   | $n$        | [-]                             | 7                    | 13    | 14    | 15    |
|   | $k_n$      | [-]                             | 1,04                 | 0,92  | 0,91  | 0,90  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                            | 0,101                | 0,130 | 0,166 | 0,173 |

## Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

|   |            | Serie 2, $\phi$ 40 mm, C30/37 |                      |       |       |       |
|---|------------|-------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|
|   |            | $\sigma_s$                    | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   |
|  | $w_{max}$  | [mm]                          | 0,121                | 0,255 | 0,359 | 0,364 |
|   | $w_m$      | [mm]                          | 0,081                | 0,150 | 0,204 | 0,237 |
|   | $s_x$      | [mm]                          | 0,017                | 0,048 | 0,079 | 0,084 |
|   | $V_x$      | [-]                           | 0,20                 | 0,32  | 0,39  | 0,35  |
|   | $n$        | [-]                           | 34                   | 50    | 59    | 58    |
|   | $k_n$      | [-]                           | 0,82                 | 0,79  | 0,78  | 0,78  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                          | 0,095                | 0,188 | 0,266 | 0,303 |

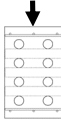
|   |            | Serie 2, $\phi$ 40 mm, C30/37 |                      |       |       |       |
|---|------------|-------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|
|   |            | $\sigma_s$                    | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   |
|  | $w_{max}$  | [mm]                          | 0,171                | 0,226 | 0,285 | 0,306 |
|   | $w_m$      | [mm]                          | 0,090                | 0,133 | 0,150 | 0,168 |
|   | $s_x$      | [mm]                          | 0,038                | 0,046 | 0,062 | 0,067 |
|   | $V_x$      | [-]                           | 0,43                 | 0,34  | 0,41  | 0,40  |
|   | $n$        | [-]                           | 7                    | 11    | 18    | 18    |
|   | $k_n$      | [-]                           | 1,04                 | 0,95  | 0,88  | 0,88  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                          | 0,130                | 0,176 | 0,205 | 0,227 |

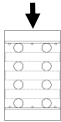
|  |            | Serie 2, $\phi$ 40 mm, C50/60 |                      |       |       |       |
|--|------------|-------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|
|  |            | $\sigma_s$                    | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   |
|  | $w_{max}$  | [mm]                          | 0,148                | 0,213 | 0,318 | 0,394 |
|  | $w_m$      | [mm]                          | 0,084                | 0,144 | 0,202 | 0,227 |
|  | $s_x$      | [mm]                          | 0,019                | 0,035 | 0,055 | 0,067 |
|  | $V_x$      | [-]                           | 0,23                 | 0,24  | 0,27  | 0,30  |
|  | $n$        | [-]                           | 30                   | 39    | 42    | 44    |
|  | $k_n$      | [-]                           | 0,83                 | 0,81  | 0,80  | 0,80  |
|  | $w_{0,75}$ | [mm]                          | 0,100                | 0,172 | 0,246 | 0,281 |


|   |            | Serie 3, $\phi$ 40 mm, C30/37 |                      |       |       |       |
|---|------------|-------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|
|   |            | $\sigma_s$                    | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   |
|  | $w_{max}$  | [mm]                          | 0,132                | 0,246 | 0,322 | 0,372 |
|   | $w_m$      | [mm]                          | 0,095                | 0,143 | 0,165 | 0,181 |
|   | $s_x$      | [mm]                          | 0,034                | 0,068 | 0,095 | 0,113 |
|   | $V_x$      | [-]                           | 0,36                 | 0,47  | 0,58  | 0,62  |
|   | $n$        | [-]                           | 6                    | 8     | 8     | 9     |
|   | $k_n$      | [-]                           | 1,09                 | 1,01  | 1,01  | 0,99  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                          | 0,132                | 0,212 | 0,261 | 0,292 |



Anhang B – Ergebnisse zur Rissbreitenuntersuchung

| Serie 4, $\phi 40$ mm, C30/37   |            |                      |       |       |       |       |
|---|------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
|  | $\sigma_s$ | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   | 280   |
|   | $w_{max}$  | [mm]                 | 0,069 | 0,127 | 0,196 | 0,215 |
|   | $w_m$      | [mm]                 | 0,060 | 0,081 | 0,120 | 0,136 |
|   | $s_x$      | [mm]                 | 0,008 | 0,019 | 0,037 | 0,038 |
|   | $V_x$      | [-]                  | 0,13  | 0,23  | 0,31  | 0,28  |
|   | $n$        | [-]                  | 4     | 23    | 27    | 29    |
|   | $k_n$      | [-]                  | 1,26  | 0,85  | 0,83  | 0,83  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                 | 0,069 | 0,097 | 0,151 | 0,168 |

| Serie 4.1, $\phi 40$ mm, C30/37   |            |                      |       |       |       |       |
|---|------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
|  | $\sigma_s$ | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   | 280   |
|   | $w_{max}$  | [mm]                 | 0,186 | 0,230 | 0,314 | 0,428 |
|   | $w_m$      | [mm]                 | 0,091 | 0,131 | 0,200 | 0,252 |
|   | $s_x$      | [mm]                 | 0,040 | 0,039 | 0,059 | 0,081 |
|   | $V_x$      | [-]                  | 0,44  | 0,30  | 0,30  | 0,32  |
|   | $n$        | [-]                  | 8     | 19    | 20    | 20    |
|   | $k_n$      | [-]                  | 1,01  | 0,87  | 0,87  | 0,87  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                 | 0,131 | 0,165 | 0,252 | 0,322 |

| Serie 4.1, $\phi 40$ mm, C30/37   |            |                      |       |       |       |       |
|---|------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
|  | $\sigma_s$ | [N/mm <sup>2</sup> ] | 80    | 160   | 240   | 280   |
|   | $w_{max}$  | [mm]                 | 0,084 | 0,132 | 0,200 | 0,242 |
|   | $w_m$      | [mm]                 | 0,062 | 0,104 | 0,137 | 0,162 |
|   | $s_x$      | [mm]                 | 0,013 | 0,020 | 0,051 | 0,055 |
|   | $V_x$      | [-]                  | 0,21  | 0,19  | 0,37  | 0,34  |
|   | $n$        | [-]                  | 5     | 10    | 13    | 13    |
|   | $k_n$      | [-]                  | 1,15  | 0,96  | 0,92  | 0,92  |
|   | $w_{0,75}$ | [mm]                 | 0,078 | 0,123 | 0,183 | 0,212 |



## **Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung**

| Abs. | Inhalt                                | Seite         |
|------|---------------------------------------|---------------|
| C.1  | Einzelwerte der Rissabstandsmessungen | C-2 bis C-37  |
| C.2  | Punktwolken und emp. Dichtefunktionen | C-38 bis C-51 |
| C.3  | QQ-Plots                              | C-52 bis C-64 |
| C.4  | Statistische Auswertung               | C-65 bis C-72 |

Der Anhang C umfasst insgesamt 72 Seiten.

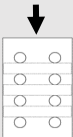
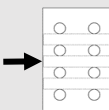


## **Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung**

- C.1.1 – C.1.3 Einzelwerte der Rissabstandsmessungen  $\phi 20$  mm,  $\phi 28$  mm,  $\phi 40$  mm
- C.2.1 – C.2.3 Punktwolken, emp. Dichtefunktionen,  $\phi 20$  mm,  $\phi 28$  mm,  $\phi 40$  mm
- C.3.1 – C.3.3 QQ-Plots,  $\phi 20$  mm,  $\phi 28$  mm,  $\phi 40$  mm
- C.4.1 – C.4.3 Statistische Auswertung

**C.1 Einzelwerte der Rissbreitenmessungen**

C.1.1 Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm

| Serie 1, $\phi 20$ mm, C30/37 |      |   |   |     |
|-------------------------------|------|---|---|-----|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Untersuchungsbereich  |   |     |
|                               |      |  |  |     |
| 1                             | [cm] | 15,5  | 16,3  | 8,5 |
| 2                             | [cm] | 17,1  | 14,3  | 4,8 |
| 3                             | [cm] | 19,1  | 19,3  | 8,1 |
| 4                             | [cm] | 17,6  | 17,5  | 5,9 |
| 5                             | [cm] | 26,8  | 25,5  | 7,3 |
| 6                             | [cm] | 20,1  | 19,0  | 6,6 |
| 7                             | [cm] | 15,0  | 15,0  | 6,3 |
| 8                             | [cm] | 20,9  | 23,7  | 6,7 |
| 9                             | [cm] | 27,6  | 25,6  | 7,8 |
| 10                            | [cm] | 16,9  | 14,2  | 7,4 |
| 11                            | [cm] | 15,0  | 14,4  | 6,6 |
| 12                            | [cm] | 18,2  | 18,7  | 6,0 |
| 13                            | [cm] | 22,1  | 22,9  | 6,5 |
| 14                            | [cm] | 12,7  | 10,8  | 7,2 |
| 15                            | [cm] | 21,1  | 22,7  | 8,1 |
| 16                            | [cm] | 19,1  | 16,8  | 5,9 |
| 17                            | [cm] | 17,5  | 20,0  | 7,7 |
| 18                            | [cm] | 18,4  | 18,8  | 6,5 |
| 19                            | [cm] | 16,9  | 19,1  | 6,5 |
| 20                            | [cm] | 25,6  | 21,6  | 6,8 |

---

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

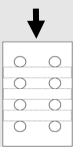
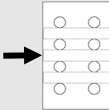
|    |      |      |      |     |
|----|------|------|------|-----|
| 21 | [cm] | 14,8 | 15,1 | 7,5 |
| 22 | [cm] | 11,2 | 9,8  | 6,0 |
| 23 | [cm] | 15,0 | 16,4 | 6,9 |
| 24 | [cm] | 21,2 | 23,9 | 8,3 |
| 25 | [cm] | 21,1 | 10,6 | 6,9 |
| 26 | [cm] | 11,4 | 14,2 | 5,7 |
| 27 | [cm] | 14,0 | 12,2 | 7,1 |
| 28 | [cm] | 10,4 | 19,5 | 8,2 |
| 29 | [cm] | 21,8 | 18,9 | 7,6 |
| 30 | [cm] | 17,4 | 21,2 | 5,5 |
| 31 | [cm] | 23,8 |      |     |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

| Serie 1, $\phi$ 20 mm, C50/60 |      |   |   |  |
|-------------------------------|------|---|---|--|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Untersuchungsbereich  |   |  |
|                               |      |  |  |  |
| 1                             | [cm] | 14,1  | 13,9  |  |
| 2                             | [cm] | 25,0  | 23,8  |  |
| 3                             | [cm] | 15,0  | 16,0  |  |
| 4                             | [cm] | 10,2  | 9,0   |  |
| 5                             | [cm] | 16,3  | 17,9  |  |
| 6                             | [cm] | 17,4  | 18,2  |  |
| 7                             | [cm] | 25,9  | 25,3  |  |
| 8                             | [cm] | 13,2  | 11,9  |  |
| 9                             | [cm] | 24,9  | 24,9  |  |
| 10                            | [cm] | 19,7  | 21,5  |  |
| 11                            | [cm] | 15,9  | 15,6  |  |
| 12                            | [cm] | 16,1  | 18,4  |  |
| 13                            | [cm] | 20,3  | 19,2  |  |
| 14                            | [cm] | 19,9  | 18,8  |  |
| 15                            | [cm] | 18,5  | 19,5  |  |
| 16                            | [cm] | 10,3  | 9,9   |  |
| 17                            | [cm] | 13,8  | 15,2  |  |
| 18                            | [cm] | 16,4  | 18,4  |  |
| 19                            | [cm] | 16,5  | 14,8  |  |
| 20                            | [cm] | 21,2  | 21,4  |  |
| 21                            | [cm] | 20,5  | 19,7  |  |
| 22                            | [cm] | 13,6  | 15,3  |  |



Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung


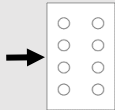
| Serie 1.1, $\phi$ 20 mm, C30/37 |      |   |   |     |
|---------------------------------|------|---|---|-----|
| Lfd. Nr.                        | [-]  | Untersuchungsbereich  |   |     |
|                                 |      |  |  |     |
| 1                               | [cm] | 13,3  | 12,7  | 7,3 |
| 2                               | [cm] | 21,1  | 21,3  | 6,8 |
| 3                               | [cm] | 13,6  | 14,7  | 6,3 |
| 4                               | [cm] | 22,4  | 22,3  | 8,0 |
| 5                               | [cm] | 27,6  | 16,4  | 4,9 |
| 6                               | [cm] | 23,2  | 22,3  | 3,9 |
| 7                               | [cm] | 13,3  | 13,2  | 5,9 |
| 8                               | [cm] | 8,7   | 8,5   | 6,9 |
| 9                               | [cm] | 23,1  | 24,2  | 6,5 |
| 10                              | [cm] | 12,6  | 13,2  | 6,2 |
| 11                              | [cm] | 16,7  | 16,6  | 7,2 |
| 12                              | [cm] |   |   | 6,4 |
| 13                              | [cm] |   |   | 6,9 |
| 14                              | [cm] |   |   | 4,1 |
| 15                              | [cm] |   |   | 5,2 |
| 16                              | [cm] |   |   | 3,2 |
| 17                              | [cm] |   |   | 8,1 |
| 18                              | [cm] |   |   | 7,2 |
| 19                              | [cm] |   |   | 4,3 |
| 20                              | [cm] |   |   | 9,0 |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

---

|    |      |  |  |     |
|----|------|--|--|-----|
| 21 | [cm] |  |  | 6,7 |
| 22 | [cm] |  |  | 8,0 |
| 23 | [cm] |  |  | 6,7 |
| 24 | [cm] |  |  | 5,9 |
| 25 | [cm] |  |  | 7,3 |
| 26 | [cm] |  |  | 7,2 |
| 27 | [cm] |  |  | 7,3 |
| 28 | [cm] |  |  | 6,1 |
| 29 | [cm] |  |  | 6,8 |
| 30 | [cm] |  |  | 8,2 |
| 31 | [cm] |  |  | 6,1 |
| 32 | [cm] |  |  | 6,2 |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

| Serie 2, $\phi$ 20 mm, C30/37 |      |   |   |     |
|-------------------------------|------|---|---|-----|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Untersuchungsbereich  |   |     |
|                               |      |  |  |     |
| 1                             | [cm] | 24,7  | 21,9  | 6,1 |
| 2                             | [cm] | 14,6  | 16,3  | 6,5 |
| 3                             | [cm] | 12,2  | 11,2  | 8,0 |
| 4                             | [cm] | 21,3  | 21,1  | 9,8 |
| 5                             | [cm] | 15,0  | 16,3  | 7,0 |
| 6                             | [cm] | 27,2  | 25,0  | 5,2 |
| 7                             | [cm] | 15,9  | 14,7  | 7,9 |
| 8                             | [cm] | 18,1  | 19,1  | 5,8 |
| 9                             | [cm] | 13,0  | 14,1  | 8,2 |
| 10                            | [cm] | 15,5  | 16,3  | 8,6 |
| 11                            | [cm] | 13,7  | 12,5  | 8,1 |
| 12                            | [cm] | 15,2  | 17,4  | 5,8 |
| 13                            | [cm] | 22,5  | 19,1  | 5,5 |
| 14                            | [cm] | 5,8   | 8,7   | 7,5 |
| 15                            | [cm] | 22,7  | 22,5  | 4,4 |
| 16                            | [cm] | 28,1  | 27,3  | 6,0 |
| 17                            | [cm] | 14,0  | 13,5  | 5,1 |
| 18                            | [cm] | 14,2  | 11,9  | 5,9 |
| 19                            | [cm] | 19,3  | 20,0  | 4,8 |
| 20                            | [cm] | 8,6   | 11,0  | 7,5 |

## Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

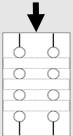
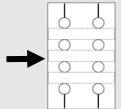
---

|    |      |      |      |     |
|----|------|------|------|-----|
| 21 | [cm] | 18,2 | 16,8 | 4,7 |
| 22 | [cm] | 17,0 | 17,8 | 3,5 |
| 23 | [cm] | 17,0 | 15,7 | 3,6 |
| 24 | [cm] | 10,6 | 11,0 | 8,5 |
| 25 | [cm] | 14,4 | 14,5 | 4,7 |
| 26 | [cm] | 19,6 | 21,3 | 2,9 |
| 27 | [cm] | 8,6  | 9,3  | 8,1 |
| 28 | [cm] | 15,8 | 14,3 | 3,7 |
| 29 | [cm] | 16,7 | 16,7 | 5,9 |
| 30 | [cm] | 13,4 | 14,0 | 4,2 |
| 31 | [cm] | 20,9 | 22,1 | 8,8 |
| 32 | [cm] | 17,3 | 17,2 | 9,2 |
| 33 | [cm] | 15,6 | 13,3 | 8,5 |
| 34 | [cm] | 15,7 | 16,5 | 5,4 |
| 35 | [cm] |      |      | 4,3 |

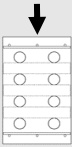
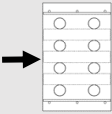
Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

| Serie 2, $\phi$ 20 mm, C50/60 |      |   |   |  |
|-------------------------------|------|---|---|--|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Untersuchungsbereich  |   |  |
|                               |      |  |  |  |
| 1                             | [cm] | 19,4  | 17,1  |  |
| 2                             | [cm] | 20,2  | 19,4  |  |
| 3                             | [cm] | 10,3  | 13,4  |  |
| 4                             | [cm] | 14,8  | 11,9  |  |
| 5                             | [cm] | 12,9  | 15,3  |  |
| 6                             | [cm] | 28,2  | 26,7  |  |
| 7                             | [cm] | 18,0  | 17,4  |  |
| 8                             | [cm] | 13,7  | 12,3  |  |
| 9                             | [cm] | 16,0  | 19,3  |  |
| 10                            | [cm] | 22,5  | 21,9  |  |
| 11                            | [cm] | 24,2  | 22,1  |  |
| 12                            | [cm] | 15,1  | 16,6  |  |
| 13                            | [cm] | 21,4  | 23,9  |  |
| 14                            | [cm] | 11,9  | 10,1  |  |
| 15                            | [cm] | 13,8  | 13,1  |  |
| 16                            | [cm] | 8,8   | 7,7   |  |
| 17                            | [cm] | 16,5  | 17,7  |  |
| 18                            | [cm] | 17,8  | 17,7  |  |
| 19                            | [cm] | 8,6   | 8,2   |  |
| 20                            | [cm] | 16,1  | 17,5  |  |
| 21                            | [cm] | 14,0  | 13,5  |  |
| 22                            | [cm] | 15,0  | 13,8  |  |
| 23                            | [cm] | 18,1  | 18,0  |  |
| 24                            | [cm] | 13,1  | 15,4  |  |
| 25                            | [cm] | 12,1  | 11,4  |  |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

| Serie 3, $\phi 20$ mm, C30/37 |      |   |   |  |
|-------------------------------|------|---|---|--|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Untersuchungsbereich  |   |  |
|                               |      |  |  |  |
| 1                             | [cm] | 10,4  | 9,1   |  |
| 2                             | [cm] | 9,5   | 10,0  |  |
| 3                             | [cm] | 19,3  | 18,1  |  |
| 4                             | [cm] | 18,5  | 18,4  |  |
| 5                             | [cm] | 9,5   | 11,4  |  |
| 6                             | [cm] | 16,7  | 15,2  |  |
| 7                             | [cm] | 22,6  | 22,7  |  |
| 8                             | [cm] | 10,8  | 11,8  |  |
| 9                             | [cm] | 8,9   | 7,5   |  |
| 10                            | [cm] | 3,8   | 6,8   |  |
| 11                            | [cm] | 22,4  | 20,6  |  |
| 12                            | [cm] | 16,6  | 15,8  |  |
| 13                            | [cm] | 10,3  | 9,3   |  |
| 14                            | [cm] | 15,3  | 17,0  |  |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

| Serie 4, $\phi 20$ mm, C30/37 |      |   |   |  |
|-------------------------------|------|---|---|--|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Untersuchungsbereich  |   |  |
|                               |      |  |  |  |
| 1                             | [cm] | 4,4   | 6,7   |  |
| 2                             | [cm] | 11,5  | 10,3  |  |
| 3                             | [cm] | 3,1   | 3,4   |  |
| 4                             | [cm] | 5,7   | 4,0   |  |
| 5                             | [cm] | 7,2   | 10,2  |  |
| 6                             | [cm] | 6,5   | 5,0   |  |
| 7                             | [cm] | 4,2   | 3,2   |  |
| 8                             | [cm] | 6,5   | 7,6   |  |
| 9                             | [cm] | 11,7  | 10,1  |  |
| 10                            | [cm] | 5,2   | 6,3   |  |
| 11                            | [cm] | 8,3   | 7,7   |  |
| 12                            | [cm] | 7,0   | 6,5   |  |
| 13                            | [cm] | 6,3   | 7,2   |  |
| 14                            | [cm] | 9,5   | 8,7   |  |
| 15                            | [cm] | 2,7   | 3,3   |  |
| 16                            | [cm] | 8,0   | 9,8   |  |
| 17                            | [cm] | 5,7   | 4,2   |  |
| 18                            | [cm] | 5,8   | 5,0   |  |
| 19                            | [cm] | 6,3   | 6,9   |  |
| 20                            | [cm] | 7,4   | 7,9   |  |

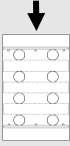
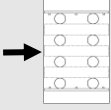
Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

---

|    |      |      |     |  |
|----|------|------|-----|--|
| 21 | [cm] | 8,8  | 8,1 |  |
| 22 | [cm] | 10,5 | 7,5 |  |
| 23 | [cm] | 4,1  | 5,0 |  |
| 24 | [cm] | 5,9  | 7,5 |  |
| 25 | [cm] | 6,1  | 8,8 |  |
| 26 | [cm] | 9,5  | 7,5 |  |
| 27 | [cm] | 5,6  | 7,1 |  |
| 28 | [cm] | 6,4  | 5,5 |  |
| 29 | [cm] | 8,3  | 6,5 |  |
| 30 | [cm] | 7,6  | 8,7 |  |



Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

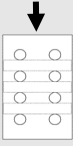
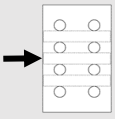
| Serie 4.1, $\phi$ 20 mm, C30/37 |      |   |      |   |
|---------------------------------|------|---|------|---|
| Lfd. Nr.                        | [-]  | Untersuchungsbereich  |      |   |
|                                 |      |  |      |  |
| 1                               | [cm] | 13,5  | 13,7 | 7,0   |
| 2                               | [cm] | 22,0  | 19,2 | 5,4   |
| 3                               | [cm] | 12,3  | 14,9 | 7,4   |
| 4                               | [cm] | 8,6   | 9,2  | 6,4   |
| 5                               | [cm] | 13,0  | 9,9  | 7,5   |
| 6                               | [cm] | 14,2  | 17,1 | 7,6   |
| 7                               | [cm] | 17,6  | 18,1 | 6,3   |
| 8                               | [cm] | 13,5  | 12,6 | 7,9   |
| 9                               | [cm] | 8,8   | 9,2  | 7,6   |
| 10                              | [cm] | 14,4  | 15,9 | 7,0   |
| 11                              | [cm] | 18,7  | 15,7 | 6,5   |
| 12                              | [cm] | 15,2  | 16,5 | 7,6   |
| 13                              | [cm] | 18,0  | 19,7 | 5,8   |
| 14                              | [cm] | 15,1  | 15,6 | 6,7   |
| 15                              | [cm] | 11,3  | 12,9 | 6,8   |
| 16                              | [cm] |   |      | 6,6   |
| 17                              | [cm] |   |      | 8,1   |
| 18                              | [cm] |   |      | 7,9   |
| 19                              | [cm] |   |      | 6,8   |
| 20                              | [cm] |   |      | 6,5   |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

---

|    |      |  |  |     |
|----|------|--|--|-----|
| 21 | [cm] |  |  | 6,9 |
| 22 | [cm] |  |  | 7,6 |
| 23 | [cm] |  |  | 7,3 |
| 24 | [cm] |  |  | 6,0 |
| 25 | [cm] |  |  | 5,1 |
| 26 | [cm] |  |  | 7,8 |
| 27 | [cm] |  |  | 5,9 |
| 28 | [cm] |  |  | 7,8 |
| 29 | [cm] |  |  | 5,4 |
| 30 | [cm] |  |  | 8,1 |
| 31 | [cm] |  |  | 7,1 |
| 32 | [cm] |  |  | 7,2 |

C.1.2 Stabdurchmesser  $\phi 28$  mm

| Serie 1, $\phi 28$ mm, C30/37 |      |   |   |      |
|-------------------------------|------|---|---|------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Untersuchungsbereich  |   |      |
|                               |      |  |  |      |
| 1                             | [cm] | 12,8  | 13,5  | 10,9 |
| 2                             | [cm] | 10,3  | 10,4  | 10,2 |
| 3                             | [cm] | 20,2  | 17,0  | 10,2 |
| 4                             | [cm] | 27,1  | 28,4  | 8,8  |
| 5                             | [cm] | 11,5  | 10,3  | 8,4  |
| 6                             | [cm] | 13,8  | 14,5  | 8,8  |
| 7                             | [cm] | 14,2  | 15,0  | 10,0 |
| 8                             | [cm] | 11,3  | 11,5  | 10,8 |
| 9                             | [cm] | 24,5  | 24,3  | 8,9  |
| 10                            | [cm] | 18,2  | 17,8  | 5,3  |
| 11                            | [cm] | 15,3  | 14,1  | 5,5  |
| 12                            | [cm] | 9,2   | 9,1   | 8,4  |
| 13                            | [cm] | 16,2  | 15,6  | 10,3 |
| 14                            | [cm] | 18,2  | 17,4  | 8,3  |
| 15                            | [cm] | 18,1  | 17,4  | 10,2 |
| 16                            | [cm] | 14,0  | 14,9  | 9,2  |
| 17                            | [cm] | 15,1  | 15,7  | 9,9  |
| 18                            | [cm] | 16,7  | 14,6  | 10,5 |
| 19                            | [cm] | 12,1  | 13,5  | 9,2  |
| 20                            | [cm] | 11,4  | 13,3  | 11,1 |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

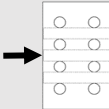
---

|    |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|
| 21 | [cm] | 11,7 | 13,3 | 7,1  |
| 22 | [cm] | 20,0 | 19,2 | 10,1 |
| 23 | [cm] | 18,3 | 15,9 |      |
| 24 | [cm] | 6,5  | 8,7  |      |
| 25 | [cm] | 23,9 | 22,1 |      |
| 26 | [cm] | 16,1 | 15,2 |      |
| 27 | [cm] | 15,2 | 17,8 |      |
| 28 | [cm] | 10,8 | 10,0 |      |
| 29 | [cm] | 19,6 | 16,8 |      |
| 30 | [cm] | 9,2  | 10,9 |      |
| 31 | [cm] | 11,1 | 12,2 |      |
| 32 | [cm] | 21,8 | 20,0 |      |
| 33 | [cm] | 13,4 | 13,3 |      |
| 34 | [cm] | 17,3 | 16,4 |      |
| 35 | [cm] | 20,4 | 20,9 |      |
| 36 | [cm] | 11,7 | 11,9 |      |
| 37 | [cm] | 8,3  | 7,8  |      |
| 38 | [cm] | 15,2 | 12,7 |      |
| 39 | [cm] | 13,4 | 14,5 |      |


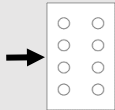
Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

| Serie 1, $\phi$ 28 mm, C50/60 |      |   |   |      |
|-------------------------------|------|---|---|------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Untersuchungsbereich  |   |      |
|                               |      |  |  |      |
| 1                             | [cm] | 12,9  | 12,7  | 11,0 |
| 2                             | [cm] | 7,5   | 13,1  | 9,5  |
| 3                             | [cm] | 25,0  | 21,5  | 10,6 |
| 4                             | [cm] | 14,8  | 13,8  | 8,8  |
| 5                             | [cm] | 14,7  | 14,7  | 10,2 |
| 6                             | [cm] | 19,2  | 18,1  | 8,1  |
| 7                             | [cm] | 20,3  | 19,2  | 9,5  |
| 8                             | [cm] | 13,6  | 17,4  | 10,3 |
| 9                             | [cm] | 18,8  | 18,9  | 10,2 |
| 10                            | [cm] | 19,0  | 16,5  | 7,0  |
| 11                            | [cm] | 10,3  | 8,7   | 13,3 |
| 12                            | [cm] | 13,5  | 16,0  | 8,0  |
| 13                            | [cm] | 9,5   | 9,7   | 11,0 |
| 14                            | [cm] | 10,3  | 8,8   | 8,0  |
| 15                            | [cm] | 14,8  | 16,3  | 11,5 |
| 16                            | [cm] | 14,8  | 14,0  | 9,7  |
| 17                            | [cm] | 14,0  | 13,2  | 8,8  |
| 18                            | [cm] | 17,0  | 16,5  | 10,7 |
| 19                            | [cm] | 13,0  | 17,6  | 9,7  |
| 20                            | [cm] | 7,4   | 11,7  | 7,0  |
| 21                            | [cm] | 17,4  | 10,7  |      |
| 22                            | [cm] | 14,0  | 14,8  |      |
| 23                            | [cm] | 12,1  | 13,4  |      |
| 24                            | [cm] | 23,0  | 10,2  |      |
| 25                            | [cm] |   | 24,2  |      |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

| Serie 1.1, $\phi 28$ mm, C30/37 |      |   |      |   |
|---------------------------------|------|---|------|---|
| Lfd. Nr.                        | [-]  | Untersuchungsbereich  |      |   |
|                                 |      |  |      |  |
| 1                               | [cm] | 14,1  | 15,1 | 9,1   |
| 2                               | [cm] | 16,3  | 15,1 | 6,3   |
| 3                               | [cm] | 11,8  | 11,3 | 10,5  |
| 4                               | [cm] | 25,1  | 23,2 | 9,9   |
| 5                               | [cm] | 18,5  | 31,0 | 9,4   |
| 6                               | [cm] | 19,3  | 17,8 | 10,4  |
| 7                               | [cm] | 7,9   | 8,1  | 9,3   |
| 8                               | [cm] | 9,3   | 11,6 | 12,3  |
| 9                               | [cm] | 13,3  | 11,9 | 5,6   |
| 10                              | [cm] | 20,0  | 21,1 | 11,4  |
| 11                              | [cm] | 18,5  | 16,3 | 8,6   |
| 12                              | [cm] | 17,1  | 21,3 | 9,8   |
| 13                              | [cm] |   |      | 9,9   |
| 14                              | [cm] |   |      | 7,5   |
| 15                              | [cm] |   |      | 12,1  |
| 16                              | [cm] |   |      | 11,2  |
| 17                              | [cm] |   |      | 9,1   |
| 18                              | [cm] |   |      | 10,0  |
| 19                              | [cm] |   |      | 8,0   |
| 20                              | [cm] |   |      | 12,1  |
| 21                              | [cm] |   |      | 6,8   |
| 22                              | [cm] |   |      | 11,3  |
| 23                              | [cm] |   |      | 6,9   |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung


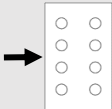
| Serie 2, $\phi$ 28 mm, C30/37 |      |   |   |      |
|-------------------------------|------|---|---|------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Untersuchungsbereich  |   |      |
|                               |      |  |  |      |
| 1                             | [cm] | 15,8  | 17,7  | 13,1 |
| 2                             | [cm] | 15,3  | 14,5  | 3,7  |
| 3                             | [cm] | 22,2  | 21,0  | 10,1 |
| 4                             | [cm] | 13,4  | 13,2  | 7,4  |
| 5                             | [cm] | 9,9   | 7,2   | 11,0 |
| 6                             | [cm] | 9,7   | 12,7  | 5,2  |
| 7                             | [cm] | 13,8  | 12,8  | 8,5  |
| 8                             | [cm] | 17,4  | 18,7  | 8,3  |
| 9                             | [cm] | 12,3  | 10,8  | 7,0  |
| 10                            | [cm] | 13,6  | 16,9  | 6,5  |
| 11                            | [cm] | 16,4  | 20,3  | 6,5  |
| 12                            | [cm] | 12,8  | 26,2  | 7,5  |
| 13                            | [cm] | 15,4  | 12,7  | 11,5 |
| 14                            | [cm] | 9,0   | 5,1   | 14,7 |
| 15                            | [cm] | 11,6  | 13,5  | 10,9 |
| 16                            | [cm] | 12,9  | 14,0  | 5,1  |
| 17                            | [cm] | 20,2  | 21,4  | 5,4  |
| 18                            | [cm] | 14,9  | 13,4  | 8,0  |
| 19                            | [cm] | 15,0  | 14,4  | 5,5  |
| 20                            | [cm] | 15,0  | 15,8  | 6,0  |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

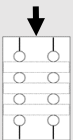
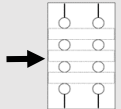
|    |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|
| 21 | [cm] | 15,8 | 18,1 | 7,9  |
| 22 | [cm] | 15,1 | 11,0 | 9,7  |
| 23 | [cm] | 12,5 | 13,2 | 4,5  |
| 24 | [cm] | 9,6  | 9,3  | 5,4  |
| 25 | [cm] | 8,1  | 7,5  | 8,1  |
| 26 | [cm] | 17,6 | 18,5 | 10,8 |
| 27 | [cm] | 22,5 | 21,8 | 12,5 |
| 28 | [cm] | 18,5 | 15,0 | 9,2  |
| 29 | [cm] | 28,0 | 28,9 | 12,0 |
| 30 | [cm] | 15,4 | 16,9 | 11,2 |
| 31 | [cm] | 21,4 | 20,3 | 11,5 |
| 32 | [cm] | 13,9 | 13,8 | 14,8 |
| 33 | [cm] | 6,2  | 7,7  | 17,5 |
| 34 | [cm] | 19,2 | 19,5 | 12,8 |
| 35 | [cm] | 20,1 | 18,5 | 10,5 |
| 36 | [cm] | 9,6  | 10,2 | 9,9  |
| 37 | [cm] | 20,1 | 18,1 | 8,4  |
| 38 | [cm] | 13,4 | 13,4 | 8,2  |
| 39 | [cm] | 29,5 | 25,8 | 5,8  |
| 40 | [cm] | 17,3 | 18,5 | 10,1 |
| 41 | [cm] | 29,3 | 28,4 | 13,0 |
| 42 | [cm] | 14,1 | 15,8 | 12,1 |
| 43 | [cm] | 22,8 | 20,7 | 11,4 |
| 44 | [cm] | 11,9 | 13,1 | 8,2  |
| 45 | [cm] | 20,8 | 22,2 |      |
| 46 | [cm] | 25,0 | 13,1 |      |
| 47 | [cm] | 11,2 | 12,9 |      |
| 48 | [cm] | 21,0 | 20,9 |      |



Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

| Serie 2, $\phi$ 28 mm, C50/60 |      |   |   |      |
|-------------------------------|------|---|---|------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Untersuchungsbereich  |   |      |
|                               |      |  |  |      |
| 1                             | [cm] | 17,8  | 14,2  | 10,7 |
| 2                             | [cm] | 15,2  | 15,6  | 6,8  |
| 3                             | [cm] | 7,1   | 8,7   | 7,0  |
| 4                             | [cm] | 20,5  | 22,3  | 10,5 |
| 5                             | [cm] | 12,0  | 12,5  | 7,7  |
| 6                             | [cm] | 26,4  | 24,4  | 9,8  |
| 7                             | [cm] | 25,2  | 22,4  | 10,3 |
| 8                             | [cm] | 21,6  | 22,6  | 6,2  |
| 9                             | [cm] | 18,9  | 21,4  | 8,8  |
| 10                            | [cm] | 18,5  | 17,4  | 9,5  |
| 11                            | [cm] | 13,6  | 11,2  | 14,1 |
| 12                            | [cm] | 21,5  | 23,4  | 11,6 |
| 13                            | [cm] | 13,3  | 13,4  | 7,6  |
| 14                            | [cm] | 24,4  | 22,6  | 7,5  |
| 15                            | [cm] | 20,0  | 19,1  | 12,5 |
| 16                            | [cm] | 21,2  | 21,7  | 8,1  |
| 17                            | [cm] | 23,3  | 24,3  | 5,3  |
| 18                            | [cm] | 20,5  | 18,9  | 6,4  |
| 19                            | [cm] | 23,2  | 25,5  | 9,5  |
| 20                            | [cm] |   |   | 4,4  |
| 21                            | [cm] |   |   | 10,0 |
| 22                            | [cm] |   |   | 4,5  |
| 23                            | [cm] |   |   | 7,1  |
| 24                            | [cm] |   |   | 10,3 |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

| Serie 3, $\phi 28$ mm, C30/37 |      |   |   |  |
|-------------------------------|------|---|---|--|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Untersuchungsbereich  |   |  |
|                               |      |  |  |  |
| 1                             | [cm] | 20,8  |   |  |
| 2                             | [cm] | 12,5  |   |  |
| 3                             | [cm] | 15,3  |   |  |
| 4                             | [cm] | 13,6  |   |  |
| 5                             | [cm] | 8,3   |   |  |
| 6                             | [cm] | 12,8  |   |  |
| 7                             | [cm] | 15,7  |   |  |
| 8                             | [cm] | 11,4  |   |  |
| 9                             | [cm] | 12,6  |   |  |
| 10                            | [cm] | 19,9  |   |  |
| 11                            | [cm] | 16,2  |   |  |
| 12                            | [cm] | 13,5  |   |  |
| 13                            | [cm] | 21,6  |   |  |
| 14                            | [cm] | 13,2  |   |  |

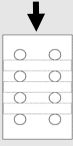
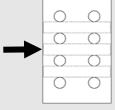
Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

| Serie 4, $\phi 28$ mm, C30/37 |      |   |   |  |
|-------------------------------|------|---|---|--|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Untersuchungsbereich  |   |  |
|                               |      |  |  |  |
| 1                             | [cm] | 5,4   | 7,5   |  |
| 2                             | [cm] | 9,6   | 7,5   |  |
| 3                             | [cm] | 9,9   | 10,6  |  |
| 4                             | [cm] | 9,8   | 11,8  |  |
| 5                             | [cm] | 9,2   | 8,0   |  |
| 6                             | [cm] | 7,4   | 8,1   |  |
| 7                             | [cm] | 12,5  | 11,4  |  |
| 8                             | [cm] | 8,2   | 8,2   |  |
| 9                             | [cm] | 10,8  | 14,5  |  |
| 10                            | [cm] | 12,0  | 9,4   |  |
| 11                            | [cm] | 13,2  | 8,7   |  |
| 12                            | [cm] | 9,8   | 4,6   |  |
| 13                            | [cm] | 7,3   | 10,9  |  |
| 14                            | [cm] | 14,3  | 8,4   |  |
| 15                            | [cm] | 11,0  | 13,2  |  |
| 16                            | [cm] | 10,9  | 7,7   |  |
| 17                            | [cm] | 8,2   | 8,4   |  |
| 18                            | [cm] | 8,6   | 12,1  |  |
| 19                            | [cm] | 10,7  | 9,5   |  |
| 20                            | [cm] | 9,8   | 10,2  |  |
| 21                            | [cm] | 10,9  | 9,6   |  |
| 22                            | [cm] |   | 7,6   |  |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

| Serie 4.1, $\phi 28$ mm, C30/37 |      |   |      |   |
|---------------------------------|------|---|------|---|
| Lfd. Nr.                        | [-]  | Untersuchungsbereich  |      |   |
|                                 |      |  |      |  |
| 1                               | [cm] | 17,6  | 16,5 | 10,4  |
| 2                               | [cm] | 17,7  | 19,6 | 10,4  |
| 3                               | [cm] | 12,2  | 8,9  | 8,5   |
| 4                               | [cm] | 19,5  | 23,0 | 12,5  |
| 5                               | [cm] | 20,0  | 18,1 | 8,0   |
| 6                               | [cm] | 11,5  | 12,9 | 11,5  |
| 7                               | [cm] | 17,6  | 17,0 | 7,9   |
| 8                               | [cm] | 22,8  | 22,7 | 9,0   |
| 9                               | [cm] | 17,0  | 14,5 | 8,8   |
| 10                              | [cm] | 15,6  | 19,1 | 8,9   |
| 11                              | [cm] | 21,6  | 17,7 | 6,0   |
| 12                              | [cm] |   |      | 6,1   |
| 13                              | [cm] |   |      | 9,5   |
| 14                              | [cm] |   |      | 10,0  |
| 15                              | [cm] |   |      | 8,5   |
| 16                              | [cm] |   |      | 10,5  |
| 17                              | [cm] |   |      | 10,1  |
| 18                              | [cm] |   |      | 10,3  |
| 19                              | [cm] |   |      | 9,7   |
| 20                              | [cm] |   |      | 9,5   |
| 21                              | [cm] |   |      | 10,5  |
| 22                              | [cm] |   |      | 6,9   |
| 23                              | [cm] |   |      | 10,8  |

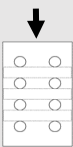
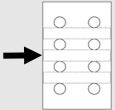
C.1.3 Stabdurchmesser  $\phi 40$  mm

| Serie 1, $\phi 40$ mm, C30/37 |      |   |   |      |
|-------------------------------|------|---|---|------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Untersuchungsbereich  |   |      |
|                               |      |  |  |      |
| 1                             | [cm] | 24,4  | 22,1  | 13,0 |
| 2                             | [cm] | 20,1  | 17,7  | 13,9 |
| 3                             | [cm] | 16,4  | 24,4  | 15,3 |
| 4                             | [cm] | 30,7  | 16,6  | 12,0 |
| 5                             | [cm] | 18,6  | 28,3  | 11,3 |
| 6                             | [cm] | 18,1  | 20,6  | 13,2 |
| 7                             | [cm] | 24,6  | 17,1  | 21,4 |
| 8                             | [cm] | 12,7  | 23,0  | 18,0 |
| 9                             | [cm] | 7,7   | 10,7  | 12,6 |
| 10                            | [cm] | 11,2  | 8,2   | 12,3 |
| 11                            | [cm] | 13,9  | 13,7  | 12,7 |
| 12                            | [cm] | 13,3  | 13,5  | 13,5 |
| 13                            | [cm] | 10,4  | 15,7  | 14,4 |
| 14                            | [cm] | 12,2  | 11,5  | 15,8 |
| 15                            | [cm] | 13,1  | 14,3  | 13,5 |
| 16                            | [cm] | 20,7  | 17,5  | 9,2  |
| 17                            | [cm] | 26,6  | 27,5  | 11,6 |
| 18                            | [cm] | 21,1  | 22,9  | 11,8 |
| 19                            | [cm] | 18,0  | 16,4  | 13,6 |
| 20                            | [cm] | 19,2  | 18,0  | 14,4 |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

|    |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|
| 21 | [cm] | 13,6 | 13,7 | 14,7 |
| 22 | [cm] | 11,5 | 15,5 | 13,5 |
| 23 | [cm] | 14,6 | 10,9 | 9,1  |
| 24 | [cm] | 5,2  | 6,0  | 8,6  |
| 25 | [cm] | 7,9  | 9,4  | 6,4  |
| 26 | [cm] | 10,4 | 11,0 | 14,0 |
| 27 | [cm] | 15,9 | 15,8 | 10,2 |
| 28 | [cm] | 14,0 | 12,5 | 15,8 |
| 29 | [cm] | 12,4 | 14,6 | 15,6 |
| 30 | [cm] | 13,5 | 12,3 | 13,6 |
| 31 | [cm] | 18,8 | 17,0 | 9,6  |
| 32 | [cm] | 7,1  | 9,5  | 15,0 |
| 33 | [cm] | 14,7 | 12,1 |      |
| 34 | [cm] | 13,8 | 16,6 |      |
| 35 | [cm] | 17,2 | 15,5 |      |
| 36 | [cm] | 17,8 | 16,0 |      |
| 37 | [cm] | 21,6 | 21,9 |      |
| 38 | [cm] | 19,3 | 17,4 |      |
| 39 | [cm] | 17,0 | 17,9 |      |
| 40 | [cm] | 19,6 | 21,1 |      |
| 41 | [cm] | 15,1 | 17,5 |      |
| 42 | [cm] | 18,4 | 14,0 |      |
| 43 | [cm] | 23,3 | 27,7 |      |
| 44 | [cm] | 25,5 | 21,9 |      |
| 45 | [cm] | 7,2  | 12,2 |      |
| 46 | [cm] |      | 19,5 |      |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

| Serie 1, $\phi$ 40 mm, C50/60 |      |   |   |  |
|-------------------------------|------|---|---|--|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Untersuchungsbereich  |   |  |
|                               |      |  |  |  |
| 1                             | [cm] | 19,8  | 17,7  |  |
| 2                             | [cm] | 8,7   | 9,0   |  |
| 3                             | [cm] | 14,1  | 17,0  |  |
| 4                             | [cm] | 16,0  | 9,2   |  |
| 5                             | [cm] | 10,0  | 13,5  |  |
| 6                             | [cm] | 24,8  | 25,3  |  |
| 7                             | [cm] | 14,7  | 11,7  |  |
| 8                             | [cm] | 14,1  | 14,2  |  |
| 9                             | [cm] | 11,4  | 15,0  |  |
| 10                            | [cm] | 17,9  | 18,3  |  |
| 11                            | [cm] | 9,3   | 9,1   |  |
| 12                            | [cm] | 18,0  | 18,5  |  |
| 13                            | [cm] | 15,1  | 14,2  |  |
| 14                            | [cm] | 10,5  | 14,7  |  |
| 15                            | [cm] | 8,9   | 7,3   |  |
| 16                            | [cm] | 24,5  | 24,0  |  |
| 17                            | [cm] | 11,4  | 9,8   |  |
| 18                            | [cm] | 13,5  | 15,4  |  |
| 19                            | [cm] | 10,5  | 8,7   |  |
| 20                            | [cm] | 14,4  | 14,0  |  |

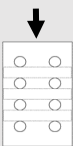
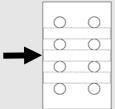
Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

---

|    |      |      |      |  |
|----|------|------|------|--|
| 21 | [cm] | 15,6 | 16,4 |  |
| 22 | [cm] | 6,8  | 10,4 |  |
| 23 | [cm] | 21,7 | 16,3 |  |
| 24 | [cm] | 19,5 | 25,9 |  |
| 25 | [cm] | 16,6 | 9,8  |  |
| 26 | [cm] | 4,3  | 10,5 |  |




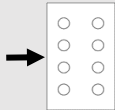
Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

| Serie 1.1, $\phi 40$ mm, C30/37 |      |   |   |      |
|---------------------------------|------|---|---|------|
| Lfd. Nr.                        | [-]  | Untersuchungsbereich  |   |      |
|                                 |      |  |  |      |
| 1                               | [cm] | 15,1  | 13,0  | 16,4 |
| 2                               | [cm] | 12,9  | 14,2  | 12,6 |
| 3                               | [cm] | 14,8  | 16,1  | 10,6 |
| 4                               | [cm] | 20,3  | 18,5  | 11,4 |
| 5                               | [cm] | 24,3  | 21,8  | 11,5 |
| 6                               | [cm] | 19,9  | 22,2  | 4,3  |
| 7                               | [cm] | 13,0  | 13,2  | 4,0  |
| 8                               | [cm] | 15,9  | 15,1  | 15,3 |
| 9                               | [cm] | 10,1  | 13,1  | 6,7  |
| 10                              | [cm] | 14,9  | 11,8  | 30,1 |
| 11                              | [cm] | 14,0  | 17,6  | 14,5 |
| 12                              | [cm] | 12,5  | 11,2  | 11,3 |
| 13                              | [cm] |   |   | 12,1 |
| 14                              | [cm] |   |   | 13,3 |
| 15                              | [cm] |   |   | 16,2 |
| 16                              | [cm] |   |   | 4,0  |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

| Serie 1.2, $\phi 40$ mm, C30/37 |      |   |      |   |
|---------------------------------|------|---|------|---|
| Lfd. Nr.                        | [-]  | Untersuchungsbereich  |      |   |
|                                 |      |  |      |  |
| 1                               | [cm] | 18,8  | 12,9 | 7,8   |
| 2                               | [cm] | 7,2   | 9,5  | 8,6   |
| 3                               | [cm] | 13,4  | 11,6 | 8,8   |
| 4                               | [cm] | 10,1  | 17,9 | 9,0   |
| 5                               | [cm] | 7,9   | 15,2 | 9,3   |
| 6                               | [cm] | 6,2   | 18,0 | 8,4   |
| 7                               | [cm] | 10,7  | 19,6 | 8,9   |
| 8                               | [cm] | 16,7  | 12,7 | 9,1   |
| 9                               | [cm] | 21,7  | 7,0  | 8,2   |
| 10                              | [cm] | 9,8   | 14,5 | 12,4  |
| 11                              | [cm] | 8,4   | 22,2 | 12,5  |
| 12                              | [cm] | 13,8  | 17,0 | 8,0   |
| 13                              | [cm] | 20,6  |      | 4,8   |
| 14                              | [cm] | 18,5  |      | 5,7   |
| 15                              | [cm] |   |      | 10,6  |
| 16                              | [cm] |   |      | 8,4   |
| 17                              | [cm] |   |      | 6,0   |
| 18                              | [cm] |   |      | 13,2  |
| 19                              | [cm] |   |      | 8,1   |
| 20                              | [cm] |   |      | 8,6   |
| 21                              | [cm] |   |      | 9,3   |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung


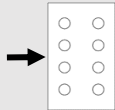
| Serie 2, $\phi$ 40 mm, C30/37 |      |   |   |      |
|-------------------------------|------|---|---|------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Untersuchungsbereich  |   |      |
|                               |      |  |  |      |
| 1                             | [cm] | 17,5  | 20,8  | 13,1 |
| 2                             | [cm] | 21,1  | 16,3  | 6,1  |
| 3                             | [cm] | 12,0  | 27,9  | 15,5 |
| 4                             | [cm] | 14,2  | 15,2  | 18,9 |
| 5                             | [cm] | 26,1  | 8,5   | 14,2 |
| 6                             | [cm] | 21,8  | 13,0  | 22,0 |
| 7                             | [cm] | 11,2  | 14,9  | 20,2 |
| 8                             | [cm] | 26,7  | 17,5  | 12,2 |
| 9                             | [cm] | 18,6  | 18,1  | 11,3 |
| 10                            | [cm] | 16,4  | 13,8  | 10,8 |
| 11                            | [cm] | 22,3  | 10,3  | 9,3  |
| 12                            | [cm] | 13,8  | 7,6   | 9,6  |
| 13                            | [cm] | 15,2  | 10,1  |      |
| 14                            | [cm] | 25,9  | 14,7  |      |
| 15                            | [cm] | 17,0  | 22,3  |      |
| 16                            | [cm] | 15,3  | 14,8  |      |
| 17                            | [cm] | 26,7  | 8,7   |      |
| 18                            | [cm] | 25,4  | 20,9  |      |
| 19                            | [cm] | 13,2  | 17,6  |      |
| 20                            | [cm] | 18,5  | 12,4  |      |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

---

|    |      |      |      |  |
|----|------|------|------|--|
| 21 | [cm] | 22,1 | 14,5 |  |
| 22 | [cm] | 19,2 | 18,9 |  |
| 23 | [cm] | 20,1 | 13,4 |  |
| 24 | [cm] | 18,1 | 12,9 |  |
| 25 | [cm] | 22,8 | 8,1  |  |
| 26 | [cm] | 17,2 | 7,0  |  |
| 27 | [cm] | 9,9  | 16,4 |  |
| 28 | [cm] | 11,9 | 22,3 |  |
| 29 | [cm] | 22,0 | 13,0 |  |
| 30 | [cm] | 17,6 | 12,6 |  |
| 31 | [cm] | 21,8 | 19,4 |  |
| 32 | [cm] | 17,6 | 15,9 |  |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

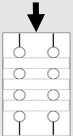
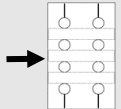
| Serie 2, $\phi$ 40 mm, C50/60 |      |   |      |   |
|-------------------------------|------|---|------|---|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Untersuchungsbereich  |      |   |
|                               |      |  |      |  |
| 1                             | [cm] | 14,2  | 11,1 |   |
| 2                             | [cm] | 15,5  | 14,6 |   |
| 3                             | [cm] | 21,3  | 19,1 |   |
| 4                             | [cm] | 7,3   | 12,4 |   |
| 5                             | [cm] | 8,9   | 8,8  |   |
| 6                             | [cm] | 9,0   | 10,6 |   |
| 7                             | [cm] | 13,4  | 12,3 |   |
| 8                             | [cm] | 14,4  | 13,7 |   |
| 9                             | [cm] | 11,4  | 11,0 |   |
| 10                            | [cm] | 9,5   | 9,4  |   |
| 11                            | [cm] | 23,6  | 20,7 |   |
| 12                            | [cm] | 5,3   | 11,3 |   |
| 13                            | [cm] | 16,2  | 11,2 |   |
| 14                            | [cm] | 8,8   | 12,9 |   |
| 15                            | [cm] | 5,2   | 17,2 |   |
| 16                            | [cm] | 13,3  | 15,9 |   |
| 17                            | [cm] | 11,8  | 17,4 |   |
| 18                            | [cm] | 23,3  | 25,3 |   |
| 19                            | [cm] | 22,0  | 17,9 |   |
| 20                            | [cm] | 20,4  | 18,3 |   |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung


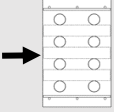
---

|    |      |      |      |  |
|----|------|------|------|--|
| 21 | [cm] | 15,1 | 12,3 |  |
| 22 | [cm] | 13,7 | 14,5 |  |
| 23 | [cm] | 14,8 | 14,2 |  |
| 24 | [cm] | 14,5 | 8,4  |  |
| 25 | [cm] | 5,5  | 9,8  |  |
| 26 | [cm] | 13,9 | 15,0 |  |
| 27 | [cm] | 15,2 | 14,3 |  |
| 28 | [cm] | 10,0 |      |  |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

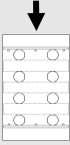
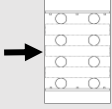
| Serie 3, $\phi 40$ mm, C30/37 |      |   |   |  |
|-------------------------------|------|---|---|--|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Untersuchungsbereich  |   |  |
|                               |      |  |  |  |
| 1                             | [cm] | 15,5  |   |  |
| 2                             | [cm] | 8,9   |   |  |
| 3                             | [cm] | 14,4  |   |  |
| 4                             | [cm] | 13,6  |   |  |
| 5                             | [cm] | 13,7  |   |  |
| 6                             | [cm] | 30,3  |   |  |
| 7                             | [cm] | 26,7  |   |  |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

| Serie 4, $\phi 40$ mm, C30/37 |      |   |   |      |
|-------------------------------|------|---|---|------|
| Lfd. Nr.                      | [-]  | Untersuchungsbereich  |   |      |
|                               |      |  |  |      |
| 1                             | [cm] | 12,0  | 14,7  | 11,0 |
| 2                             | [cm] | 14,6  | 14,2  | 13,7 |
| 3                             | [cm] | 19,1  | 16,0  | 12,5 |
| 4                             | [cm] | 12,3  | 15,3  | 12,4 |
| 5                             | [cm] | 24,7  | 23,2  | 14,9 |
| 6                             | [cm] | 17,2  | 16,6  | 12,3 |
| 7                             | [cm] | 13,3  | 14,5  | 7,2  |
| 8                             | [cm] | 10,9  | 14,0  | 8,3  |
| 9                             | [cm] | 26,1  | 18,7  | 11,3 |
| 10                            | [cm] | 21,8  | 25,5  | 12,2 |
| 11                            | [cm] |   |   | 14,8 |
| 12                            | [cm] |   |   | 14,1 |
| 13                            | [cm] |   |   | 14,3 |
| 14                            | [cm] |   |   | 9,7  |
| 15                            | [cm] |   |   | 14,5 |



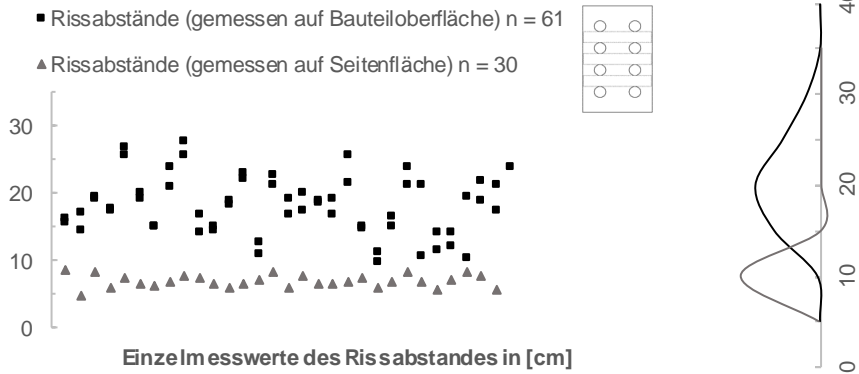
Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

| Serie 4.1, $\phi 40$ mm, C30/37 |      |   |   |  |
|---------------------------------|------|---|---|--|
| Lfd. Nr.                        | [-]  | Untersuchungsbereich  |   |  |
|                                 |      |  |  |  |
| 1                               | [cm] | 16,1  | 19,1  |  |
| 2                               | [cm] | 12,1  | 11,6  |  |
| 3                               | [cm] | 18,6  | 15,6  |  |
| 4                               | [cm] | 5,5   | 11,9  |  |
| 5                               | [cm] | 15,9  | 13,3  |  |
| 6                               | [cm] | 7,5   | 4,2   |  |
| 7                               | [cm] | 8,8   | 10,2  |  |
| 8                               | [cm] | 15,7  | 14,3  |  |
| 9                               | [cm] | 11,4  | 12,8  |  |
| 10                              | [cm] | 13,0  | 15,6  |  |
| 11                              | [cm] | 13,0  | 8,8   |  |
| 12                              | [cm] | 12,7  | 14,9  |  |
| 13                              | [cm] | 18,0  | 13,1  |  |
| 14                              | [cm] | 9,4   | 14,9  |  |
| 15                              | [cm] | 17,5  | 14,3  |  |

## C.2 Punktwolken und empirische Dichtefunktionen

### C.2.1 Stabdurchmesser $\phi 20$ mm

Serie 1,  $\phi 20$  mm, C30/37

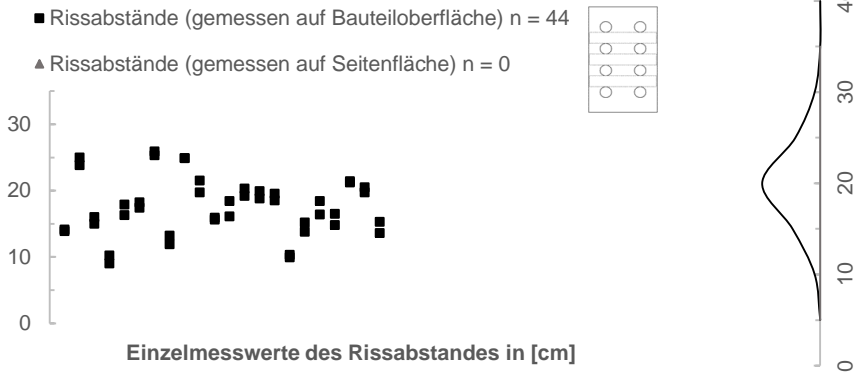


$s_m = 18,1$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

$s_m = 6,9$  cm (bzgl. Seitenfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 1: 6,9 cm

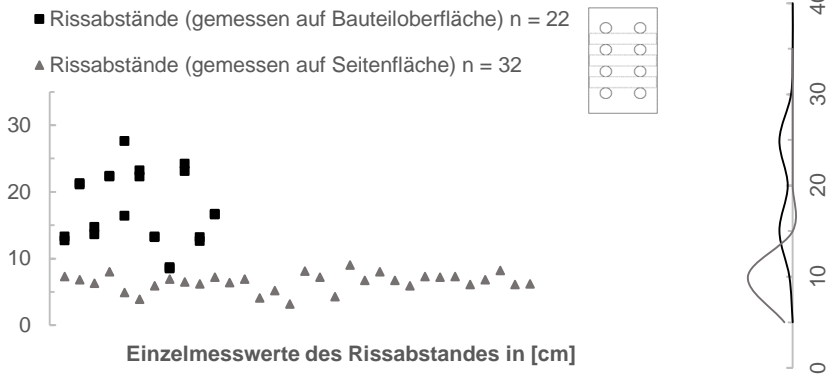
Serie 1,  $\phi 20$  mm, C50/60



$s_m = 17,6$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 1: 6,9 cm

Serie 1.1,  $\phi 20$  mm, C30/37

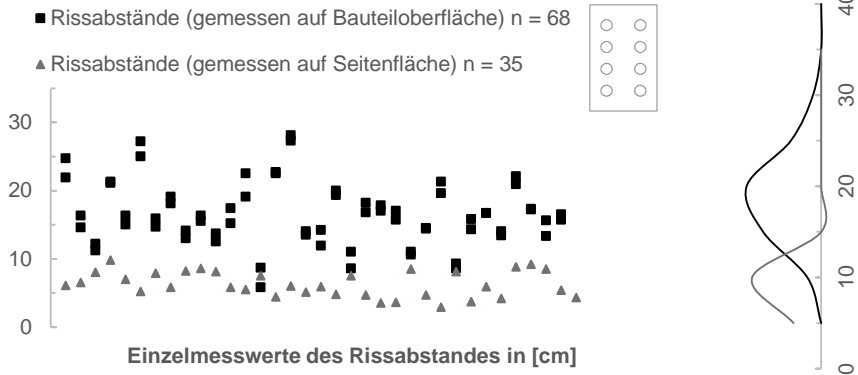


$s_m = 17,3$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

$s_m = 6,5$  cm (bzgl. Seitenfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 1.1: 13,8 cm

Serie 2,  $\phi 20$  mm, C30/37

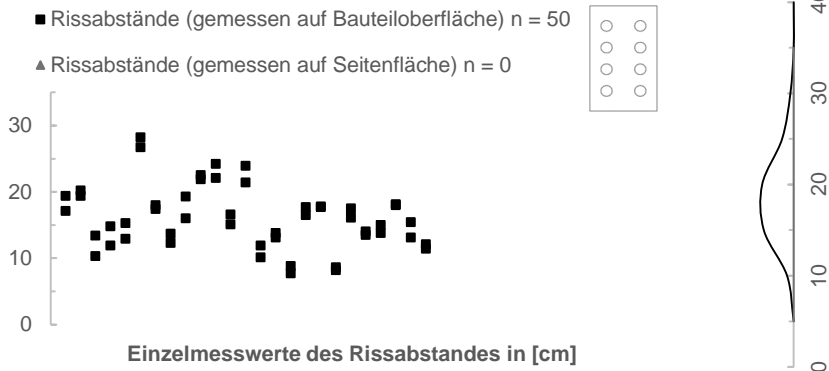


$s_m = 16,5$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

$s_m = 6,3$  cm (bzgl. Seitenfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 2:  $\therefore$ .

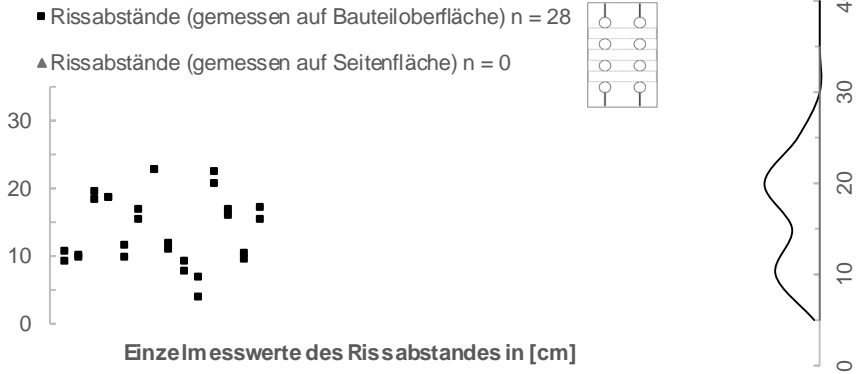
Serie 2,  $\phi 20$  mm, C50/60



$s_m = 16,1$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 2:  $\therefore$ .

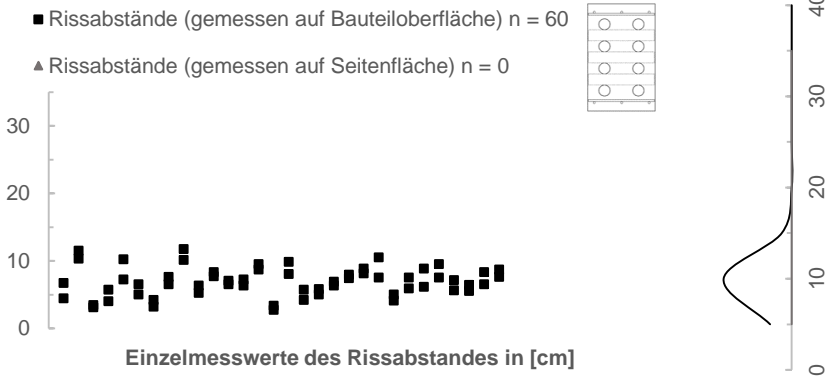
Serie 3,  $\phi 20$  mm, C30/37



$s_m = 13,9$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 3: 6,9 cm

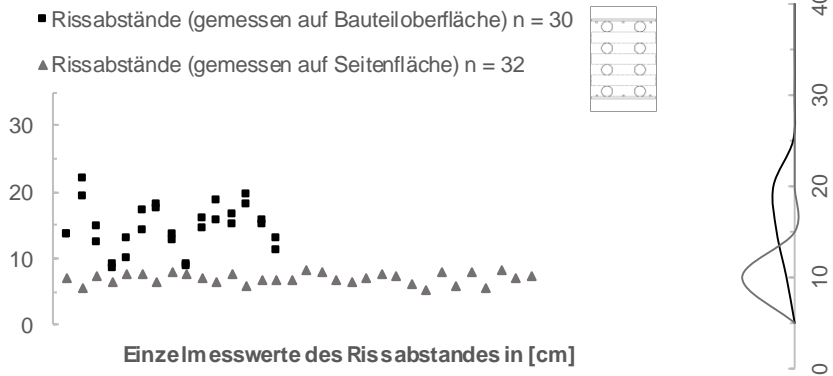
Serie 4,  $\phi 20$  mm, C30/37



$s_m = 6,9$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 4: 6,9 cm

Serie 4.1,  $\phi 20$  mm, C30/37



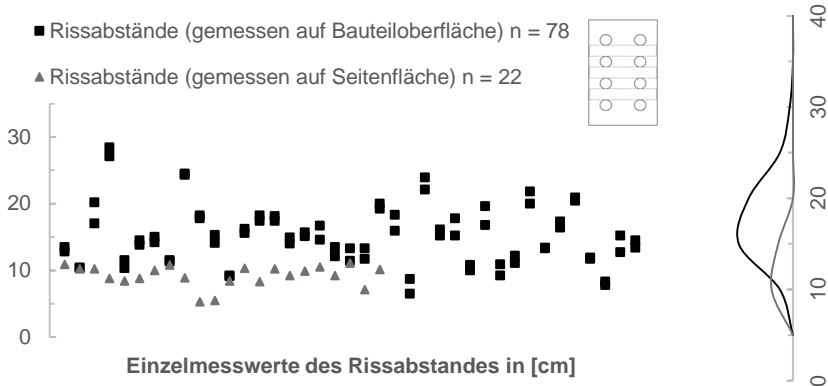
$s_m = 14,5$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

$s_m = 6,9$  cm (bzgl. Seitenfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 4.1: 6,9 cm

C.2.2 Stabdurchmesser  $\phi 28$  mm

Serie 1,  $\phi 28$  mm, C30/37

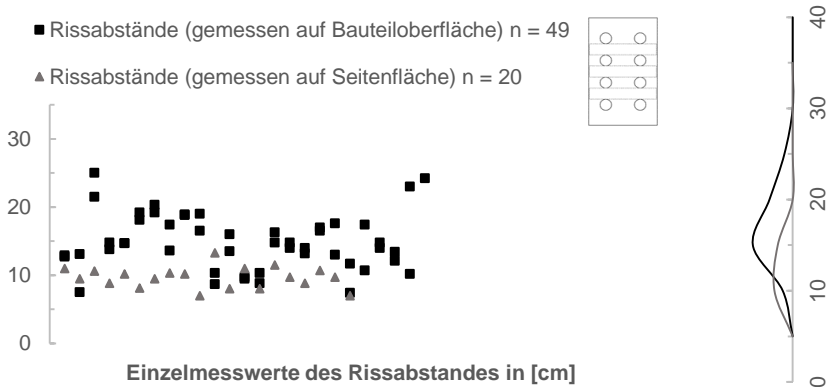


$s_m = 15,2$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

$s_m = 9,2$  cm (bzgl. Seitenfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 1: 9,6 cm

Serie 1,  $\phi 28$  mm, C50/60

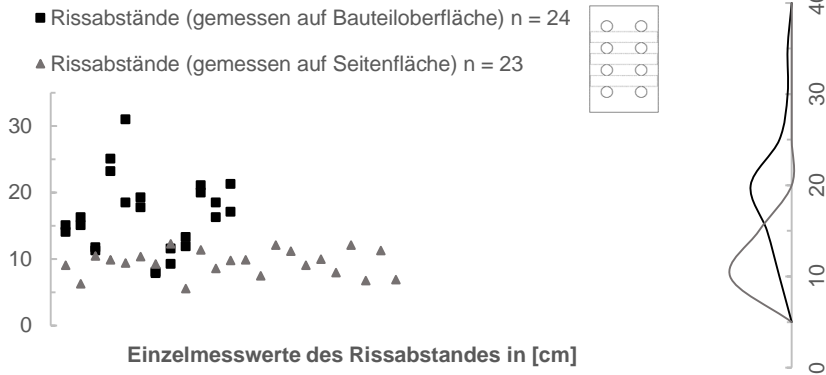


$s_m = 14,9$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

$s_m = 9,6$  cm (bzgl. Seitenfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 1: 9,6 cm

Serie 1.1,  $\phi 28$  mm, C30/37

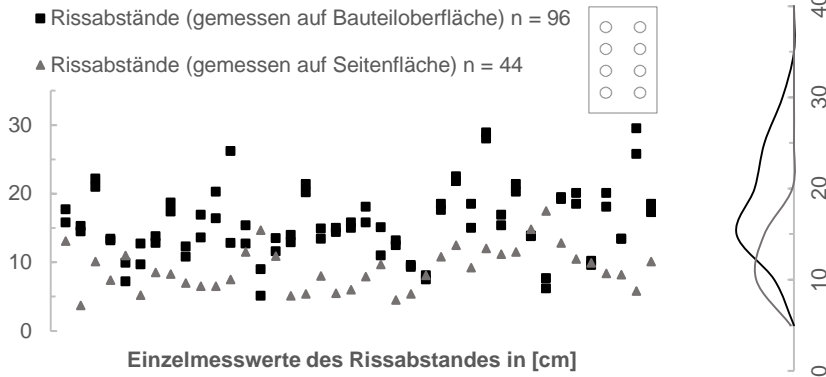


$s_m = 16,5$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

$s_m = 9,5$  cm (bzgl. Seitenfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 1.1: 19,2 cm

Serie 2,  $\phi 28$  mm, C30/37



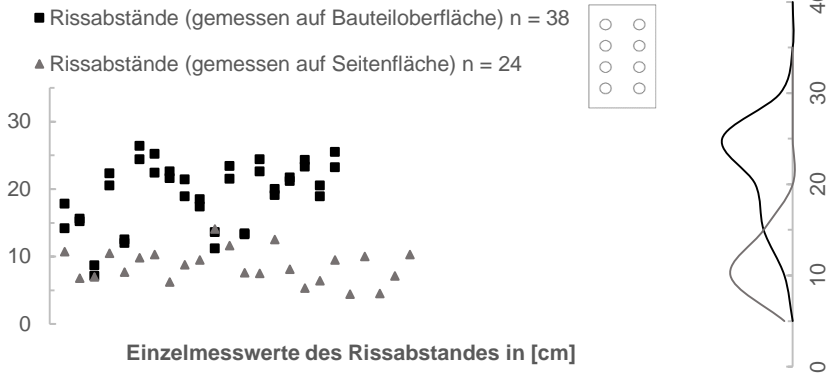
$s_m = 16,2$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

$s_m = 9,3$  cm (bzgl. Seitenfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 2: ./.



Serie 2,  $\phi 28$  mm, C50/60

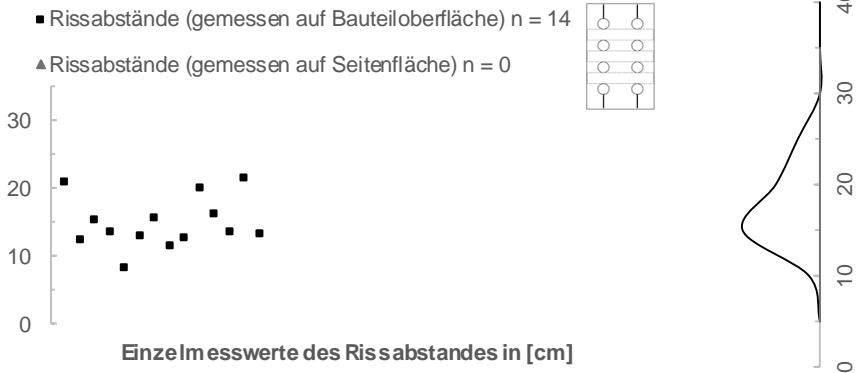


$s_m = 19,1$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

$s_m = 8,6$  cm (bzgl. Seitenfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 2:  $\therefore$ .

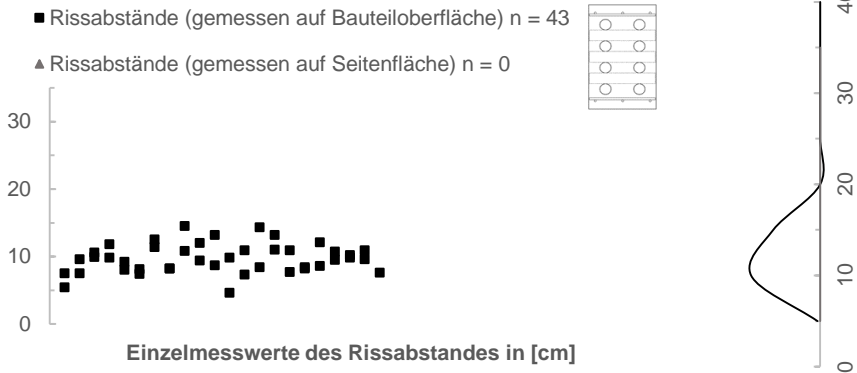
Serie 3,  $\phi 28$  mm, C30/37



$s_m = 14,8$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 3: 9,6 cm

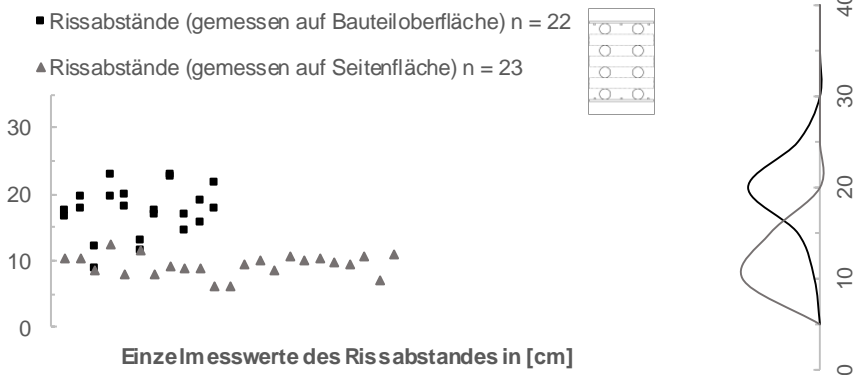
Serie 4,  $\phi 28$  mm, C30/37



$s_m = 9,7$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 4: 9,6 cm

Serie 4.1,  $\phi 28$  mm, C30/37



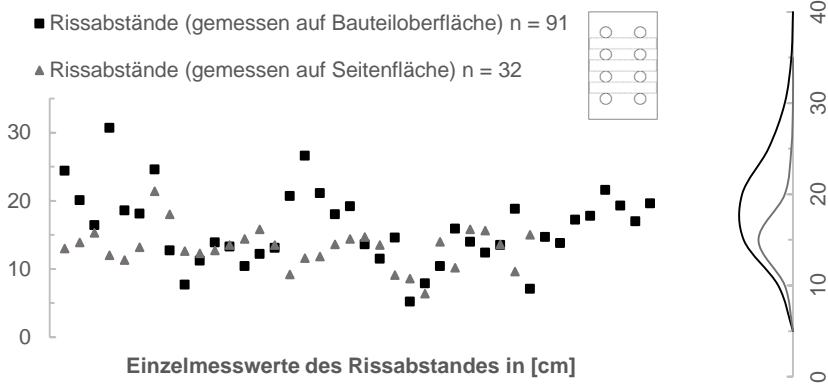
$s_m = 17,4$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

$s_m = 9,3$  cm (bzgl. Seitenfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 4.1: 9,6 cm

C.2.3 Stabdurchmesser  $\phi 40$  mm

Serie 1,  $\phi 40$  mm, C30/37

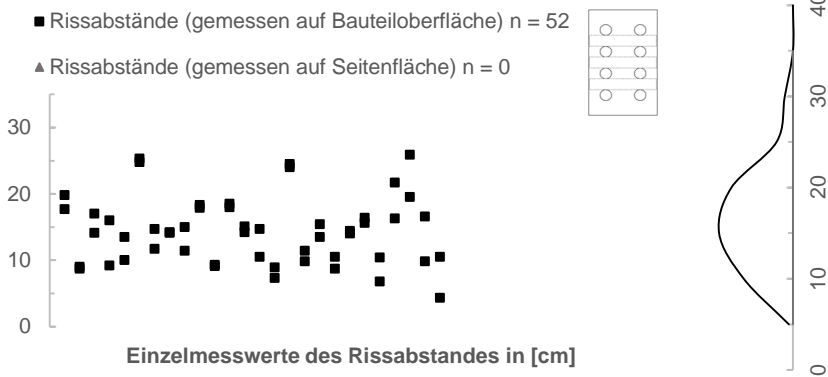


$s_m = 16,3$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

$s_m = 13,1$  cm (bzgl. Seitenfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 1: 13,2 cm

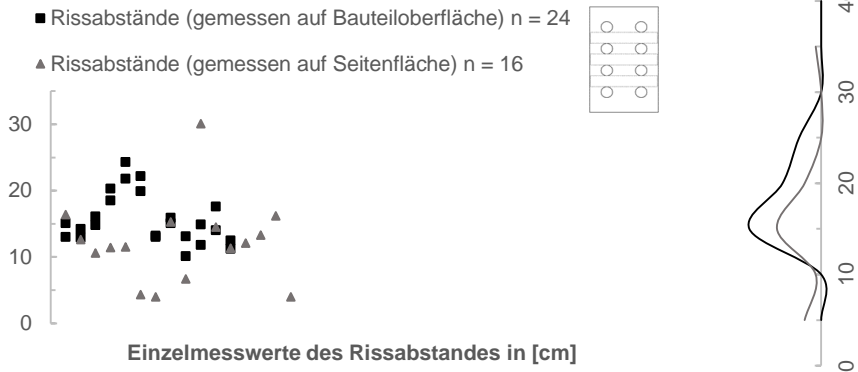
Serie 1,  $\phi 40$  mm, C50/60



$s_m = 14,4$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 1: 13,2 cm

Serie 1.1,  $\phi 40$  mm, C30/37

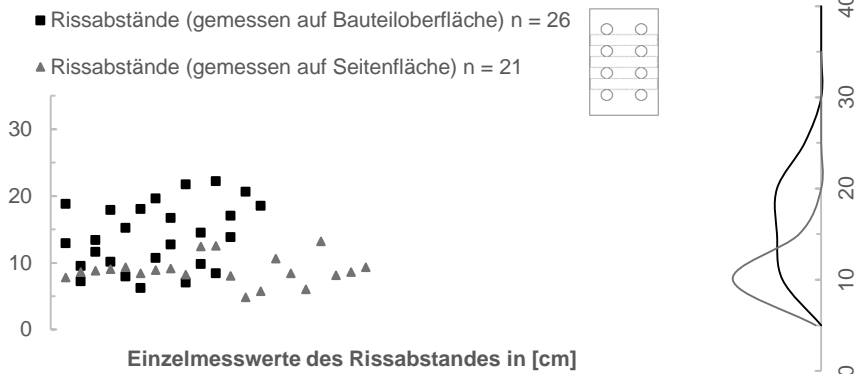


$s_m = 15,6$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

$s_m = 13,1$  cm (bzgl. Seitenfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 1.1: 26,4 cm

Serie 1.2,  $\phi 40$  mm, C30/37

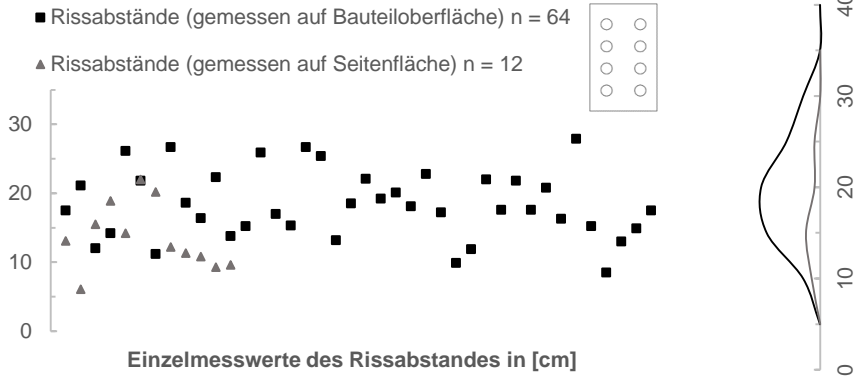


$s_m = 13,9$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

$s_m = 8,8$  cm (bzgl. Seitenfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 1.2: 8,8 cm

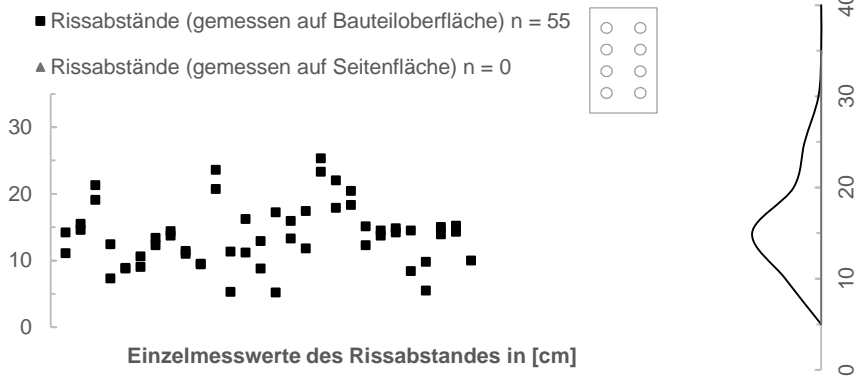
Serie 2,  $\phi 40$  mm, C30/37



$s_m = 13,8$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 2:  $\cdot$ .

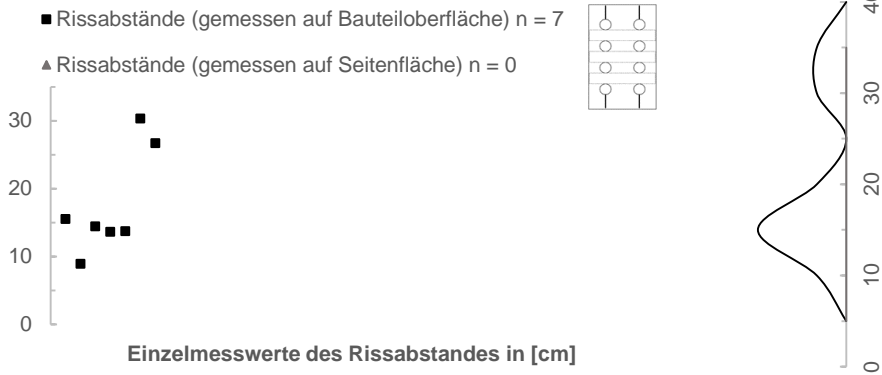
Serie 2,  $\phi 40$  mm, C50/60



$s_m = 13,8$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 2:  $\cdot$ .

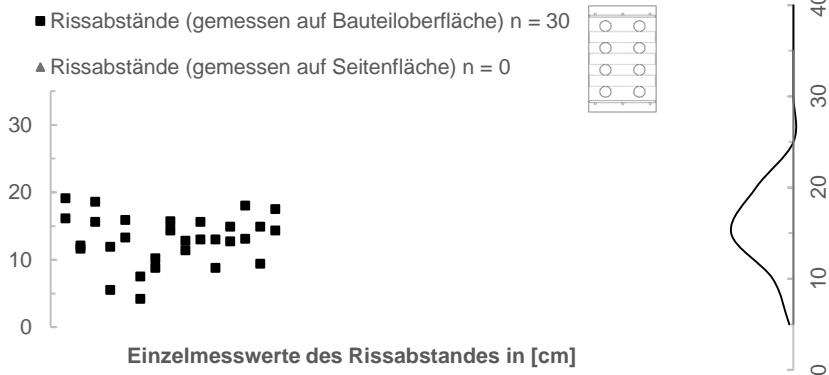
Serie 3,  $\phi 40$  mm, C30/37



$s_m = 17,6$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 3: 13,2 cm

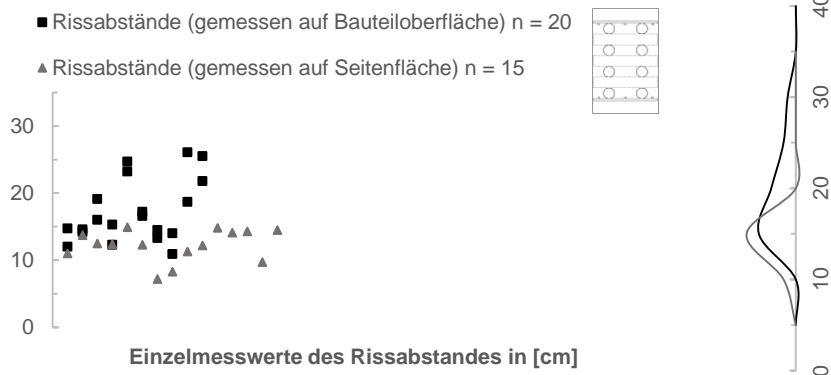
Serie 4,  $\phi 40$  mm, C30/37



$s_m = 13,0$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

Achsabstand der Querbewehrung in Serie 4: 13,2 cm

Serie 4.1,  $\phi 40$  mm, C30/37



$s_m = 17,2$  cm (bzgl. Bauteiloberfläche)

$s_m = 12,2$  cm (bzgl. Seitenfläche)

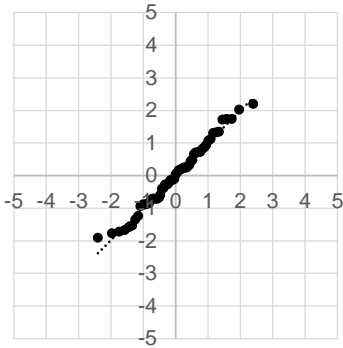
Achsabstand der Querbewehrung in Serie 4.1: 13,2 cm

**C.3 QQ-Plots**

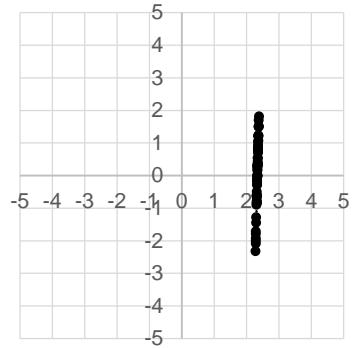
C.3.1 Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm

Serie 1,  $\phi 20$  mm, C30/37, Oberseite

**QQ-Plot NV**  
Serie 1,  $\phi 20$  mm

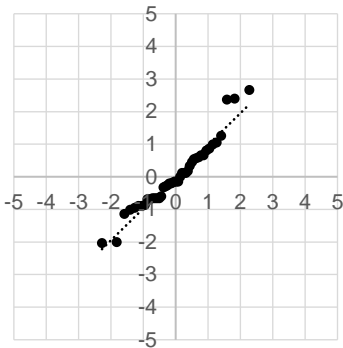


**QQ-Plot LNV**  
Serie 1,  $\phi 20$  mm

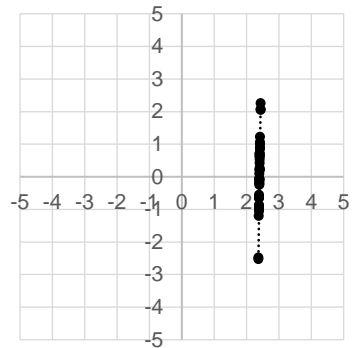


Serie 1,  $\phi 20$  mm, C50/60, Oberseite

**QQ-Plot NV**  
Serie 1,  $\phi 20$  mm



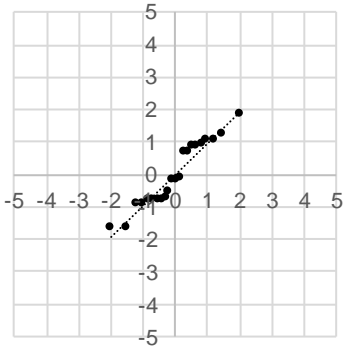
**QQ-Plot LNV**  
Serie 1,  $\phi 20$  mm



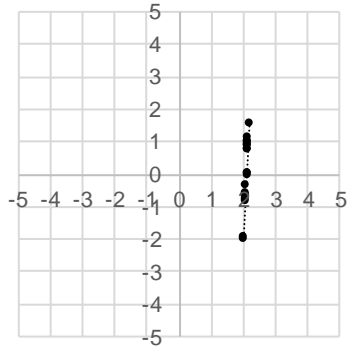


Serie 1.1,  $\phi 20$  mm, C30/37, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 1.1,  $\phi 20$  mm

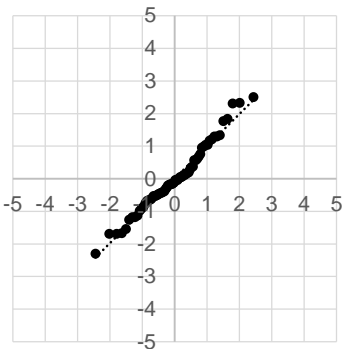


QQ-Plot LNV  
Serie 1.1,  $\phi 20$  mm

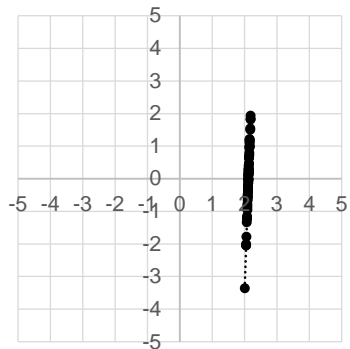


Serie 2,  $\phi 20$  mm, C30/37, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 2,  $\phi 20$  mm

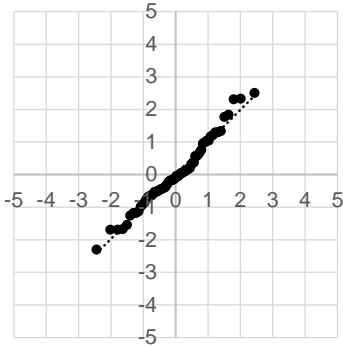


QQ-Plot LNV  
Serie 2,  $\phi 20$  mm

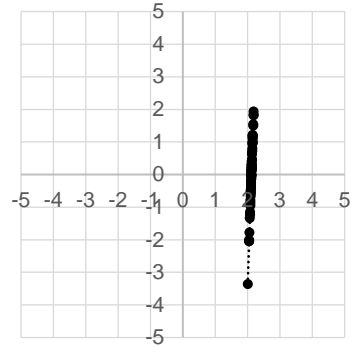


Serie 2,  $\phi 20$  mm, C50/60, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 2,  $\phi 20$  mm

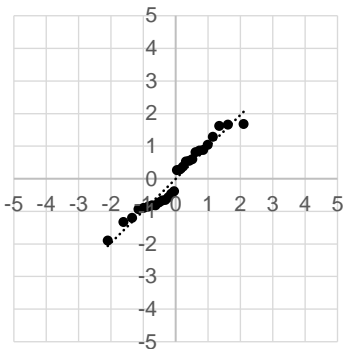


QQ-Plot LNV  
Serie 2,  $\phi 20$  mm

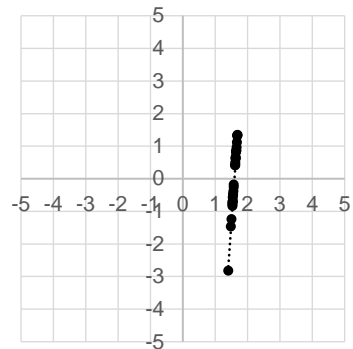


Serie 3,  $\phi 20$  mm, C30/37, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 3,  $\phi 20$  mm

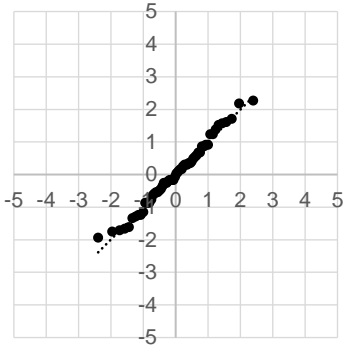


QQ-Plot LNV  
Serie 3,  $\phi 20$  mm

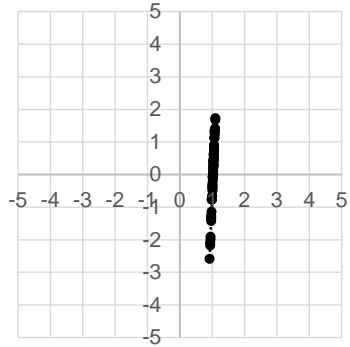


Serie 4,  $\phi 20$  mm, C30/37, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 4,  $\phi 20$  mm

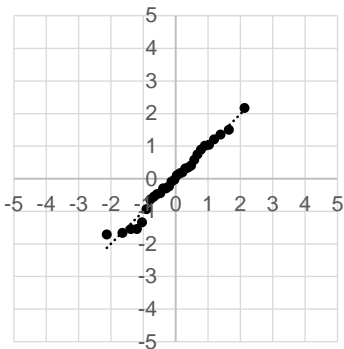


QQ-Plot LNV  
Serie 4,  $\phi 20$  mm

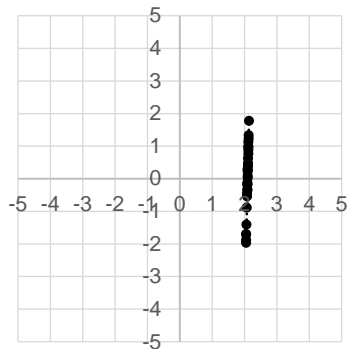


Serie 4.1,  $\phi 20$  mm, C30/37, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 4.1,  $\phi 20$  mm



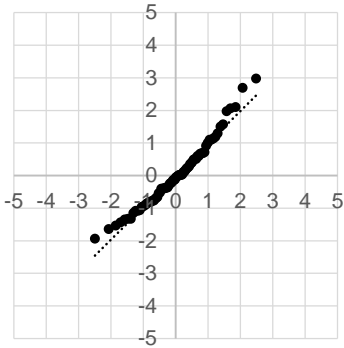
QQ-Plot LNV  
Serie 4.1,  $\phi 20$  mm



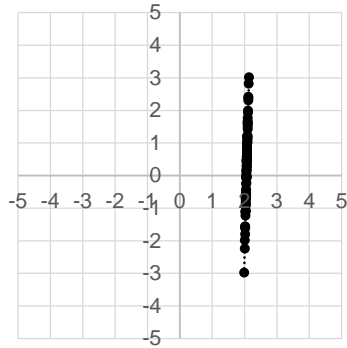
C.3.2 Stabdurchmesser  $\phi 28$  mm

Serie 1,  $\phi 28$  mm, C30/37, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 1,  $\phi 28$  mm

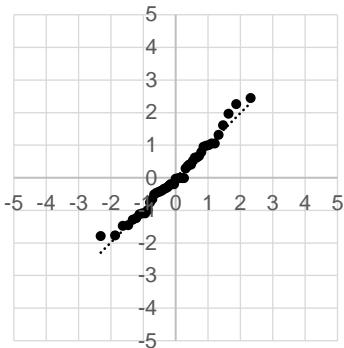


QQ-Plot LNV  
Serie 1,  $\phi 28$  mm

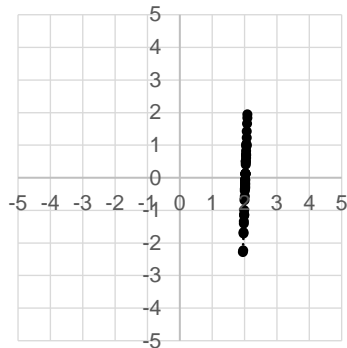


Serie 1,  $\phi 28$  mm, C50/60, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 1,  $\phi 28$  mm

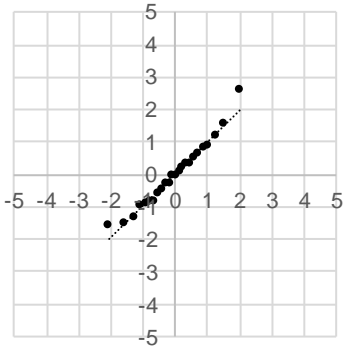


QQ-Plot LNV  
Serie 1,  $\phi 28$  mm

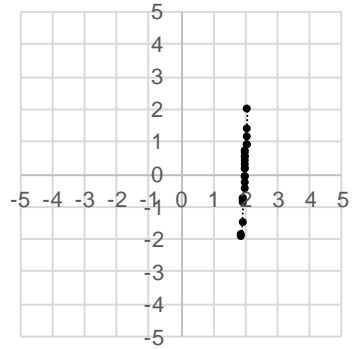


Serie 1.1,  $\phi 28$  mm, C30/37, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 1.1,  $\phi 28$  mm

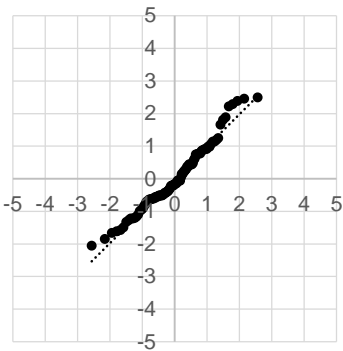


QQ-Plot LNV  
Serie 1.1,  $\phi 28$  mm

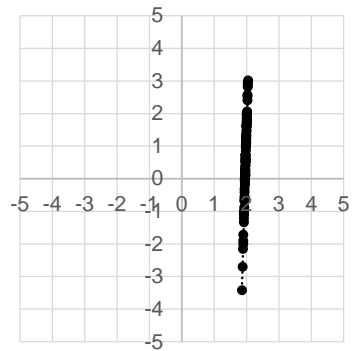


Serie 2,  $\phi 28$  mm, C30/37, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 2,  $\phi 28$  mm

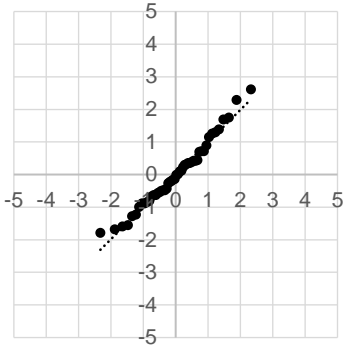


QQ-Plot LNV  
Serie 2,  $\phi 28$  mm

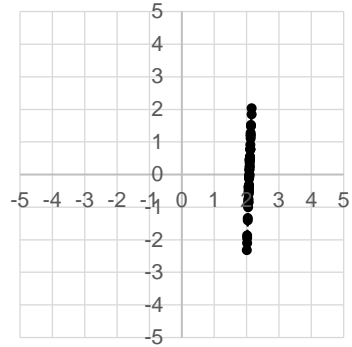


Serie 2,  $\phi 28$  mm, C50/60, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 2,  $\phi 20$  mm

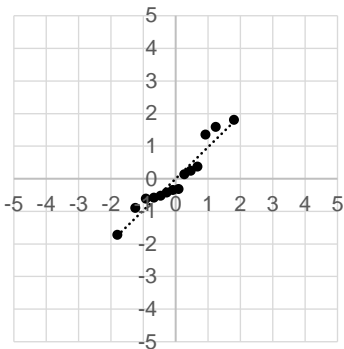


QQ-Plot LNV  
Serie 2,  $\phi 20$  mm

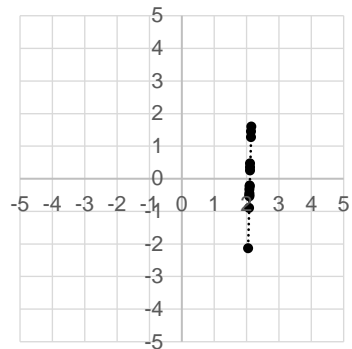


Serie 3,  $\phi 28$  mm, C30/37, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 3,  $\phi 28$  mm

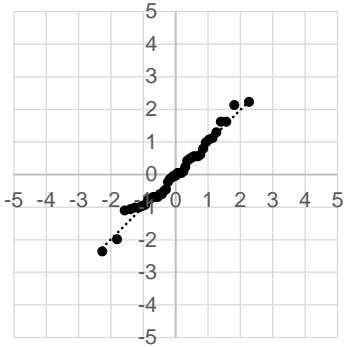


QQ-Plot LNV  
Serie 3,  $\phi 28$  mm

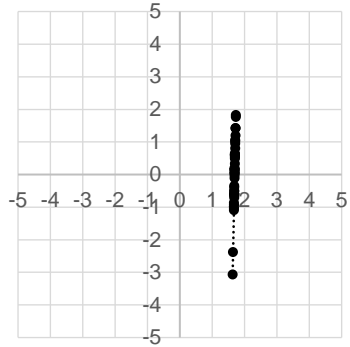


Serie 4,  $\phi 28$  mm, C30/37, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 4,  $\phi 28$  mm

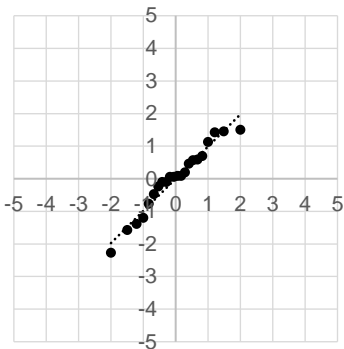


QQ-Plot LNV  
Serie 4,  $\phi 28$  mm

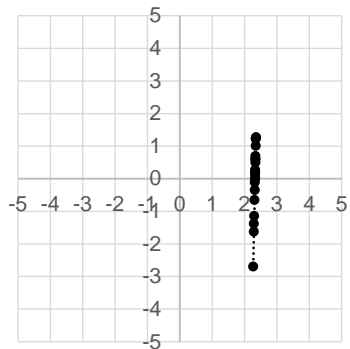


Serie 4.1,  $\phi 28$  mm, C30/37, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 4.1,  $\phi 28$  mm



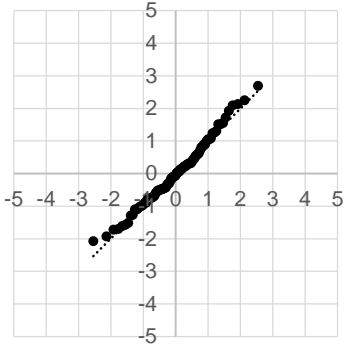
QQ-Plot LNV  
Serie 4.1,  $\phi 28$  mm



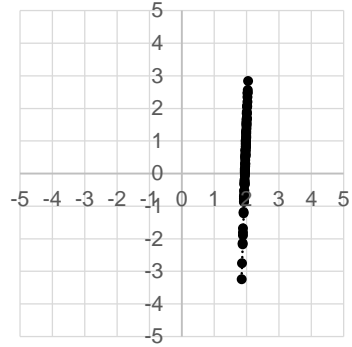
C.3.3 Stabdurchmesser  $\phi 40$  mm

Serie 1,  $\phi 40$  mm, C30/37, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 1,  $\phi 40$  mm

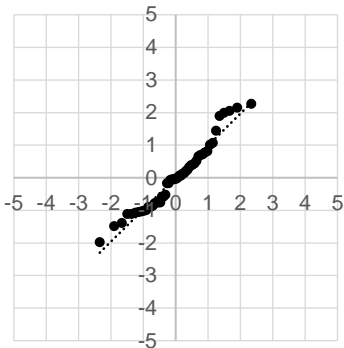


QQ-Plot LNV  
Serie 1,  $\phi 40$  mm

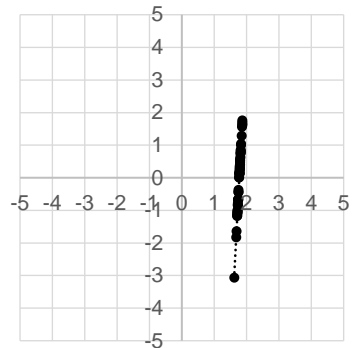


Serie 1,  $\phi 40$  mm, C50/60, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 1,  $\phi 40$  mm



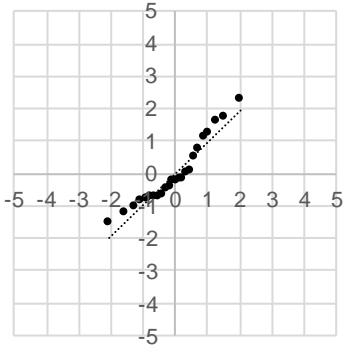
QQ-Plot LNV  
Serie 1,  $\phi 40$  mm



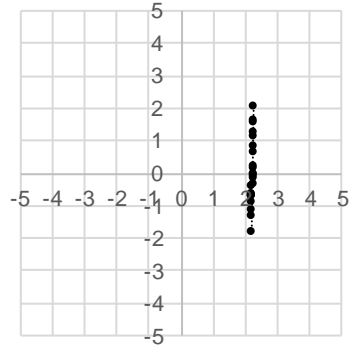


Serie 1.1,  $\phi 40$  mm, C30/37, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 1.1,  $\phi 40$  mm

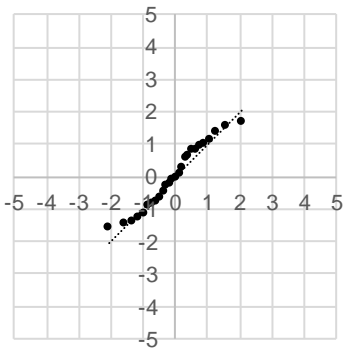


QQ-Plot LNV  
Serie 1.1,  $\phi 40$  mm

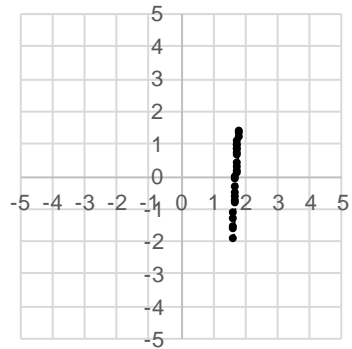


Serie 1.2,  $\phi 40$  mm, C30/37, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 1.2,  $\phi 40$  mm

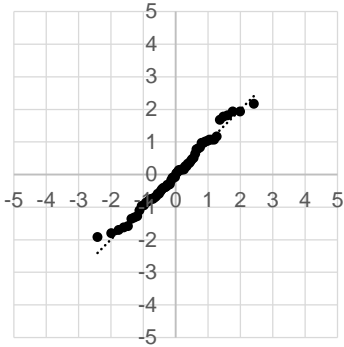


QQ-Plot LNV  
Serie 1.2,  $\phi 40$  mm

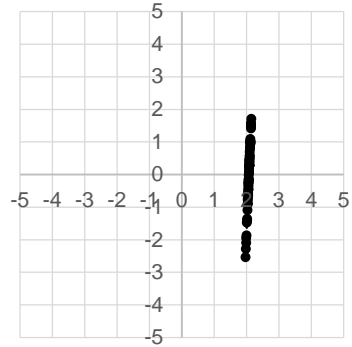


Serie 2,  $\phi 40$  mm, C30/37, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 2,  $\phi 40$  mm

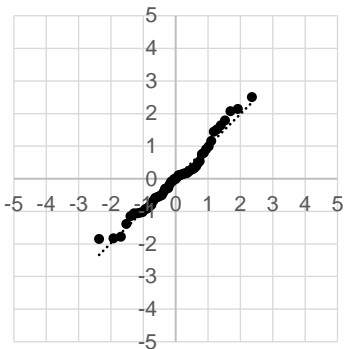


QQ-Plot LNV  
Serie 2,  $\phi 40$  mm

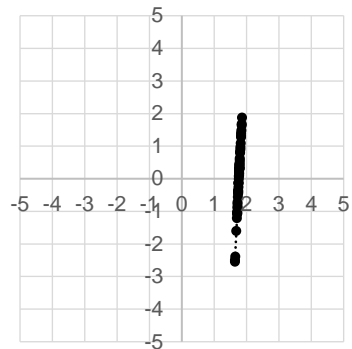


Serie 2,  $\phi 40$  mm, C50/60, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 2,  $\phi 40$  mm

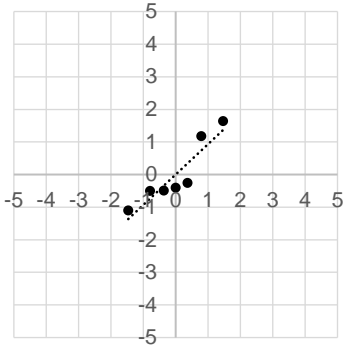


QQ-Plot LNV  
Serie 2,  $\phi 40$  mm

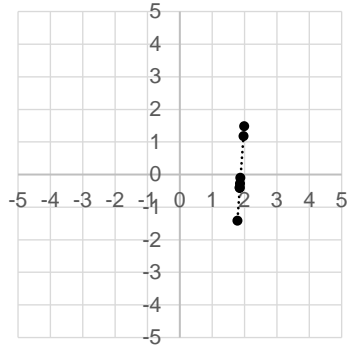


Serie 3,  $\phi 40$  mm, C30/37, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 3,  $\phi 40$  mm

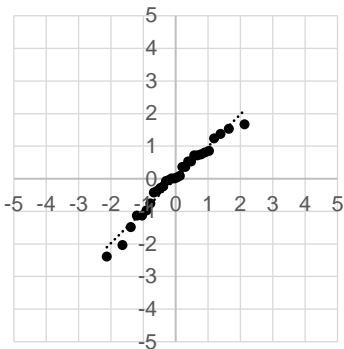


QQ-Plot LNV  
Serie 3,  $\phi 40$  mm

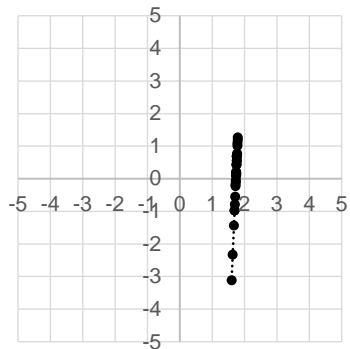


Serie 4,  $\phi 40$  mm, C30/37, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 4,  $\phi 40$  mm

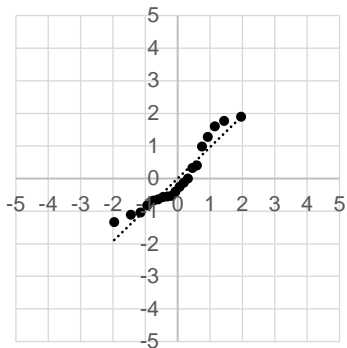


QQ-Plot LNV  
Serie 4,  $\phi 40$  mm

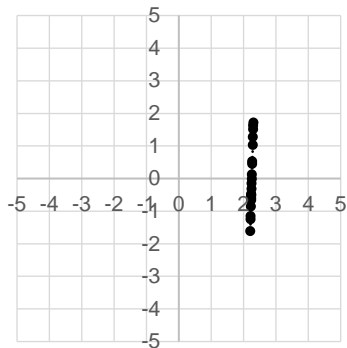


Serie 4.1,  $\phi 40$  mm, C30/37, Oberseite

QQ-Plot NV  
Serie 4.1,  $\phi 40$  mm

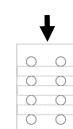



QQ-Plot LNV  
Serie 4.1,  $\phi 40$  mm

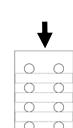


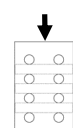
**C.4 Statistische Auswertung**


**C.4.1 Stabdurchmesser  $\phi 20$  mm**

|  | Serie 1, $\phi 20$ mm, C30/37 |      |      |
|---|-------------------------------|------|------|
|   | $s_{max}$                     | [cm] | 27,6 |
|   | $s_m$                         | [cm] | 18,1 |
|   | $s_x$                         | [cm] | 4,3  |
|   | $V_x$                         | [-]  | 0,24 |
|   | $n$                           | [-]  | 61   |
|   | $k_n$                         | [-]  | 0,78 |
|   | $s_{0,75}$                    | [cm] | 21,5 |


|  | Serie 1, $\phi 20$ mm, C30/37 |      |      |
|---|-------------------------------|------|------|
|   | $s_{max}$                     | [cm] | 8,5  |
|   | $s_m$                         | [cm] | 6,9  |
|   | $s_x$                         | [cm] | 0,9  |
|   | $V_x$                         | [-]  | 0,13 |
|   | $n$                           | [-]  | 30   |
|   | $k_n$                         | [-]  | 0,83 |
|   | $s_{0,75}$                    | [cm] | 7,7  |


|  | Serie 1, $\phi 20$ mm, C50/60 |      |      |
|---|-------------------------------|------|------|
|   | $s_{max}$                     | [cm] | 25,9 |
|   | $s_m$                         | [cm] | 17,6 |
|   | $s_x$                         | [cm] | 4,3  |
|   | $V_x$                         | [-]  | 0,25 |
|   | $n$                           | [-]  | 44   |
|   | $k_n$                         | [-]  | 0,80 |
|   | $s_{0,75}$                    | [cm] | 21,0 |


|  | Serie 1.1, $\phi 20$ mm, C30/37 |      |      |
|---|---------------------------------|------|------|
|   | $s_{max}$                       | [cm] | 27,6 |
|   | $s_m$                           | [cm] | 17,3 |
|   | $s_x$                           | [cm] | 5,4  |
|   | $V_x$                           | [-]  | 0,31 |
|   | $n$                             | [-]  | 22   |
|   | $k_n$                           | [-]  | 0,85 |
|   | $s_{0,75}$                      | [cm] | 21,9 |


|  | Serie 1.1, $\phi 20$ mm, C30/37 |      |      |
|---|---------------------------------|------|------|
|   | $s_{max}$                       | [cm] | 9,0  |
|   | $s_m$                           | [cm] | 6,5  |
|   | $s_x$                           | [cm] | 1,3  |
|   | $V_x$                           | [-]  | 0,20 |
|   | $n$                             | [-]  | 32   |
|   | $k_n$                           | [-]  | 0,82 |
|   | $s_{0,75}$                      | [cm] | 7,5  |


Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

| Serie 2, $\phi$ 20 mm, C30/37   |            |      |      |
|---|------------|------|------|
|  | $s_{max}$  | [cm] | 28,1 |
|   | $s_m$      | [cm] | 16,5 |
|   | $s_x$      | [cm] | 4,6  |
|   | $V_x$      | [-]  | 0,28 |
|   | $n$        | [-]  | 68   |
|   | $k_n$      | [-]  | 0,77 |
|   | $s_{0,75}$ | [cm] | 20,1 |

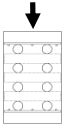
| Serie 2, $\phi$ 20 mm, C30/37   |            |      |      |
|---|------------|------|------|
|  | $s_{max}$  | [cm] | 9,8  |
|   | $s_m$      | [cm] | 6,3  |
|   | $s_x$      | [cm] | 1,9  |
|   | $V_x$      | [-]  | 0,30 |
|   | $n$        | [-]  | 35   |
|   | $k_n$      | [-]  | 0,81 |
|   | $s_{0,75}$ | [cm] | 7,8  |


| Serie 2, $\phi$ 20 mm, C50/60   |            |      |      |
|---|------------|------|------|
|  | $s_{max}$  | [cm] | 28,2 |
|   | $s_m$      | [cm] | 16,1 |
|   | $s_x$      | [cm] | 4,7  |
|   | $V_x$      | [-]  | 0,29 |
|   | $n$        | [-]  | 50   |
|   | $k_n$      | [-]  | 0,79 |
|   | $s_{0,75}$ | [cm] | 19,8 |

| Serie 3, $\phi$ 20 mm, C30/37   |            |      |      |
|---|------------|------|------|
|  | $s_{max}$  | [cm] | 22,7 |
|   | $s_m$      | [cm] | 13,9 |
|   | $s_x$      | [cm] | 5,3  |
|   | $V_x$      | [-]  | 0,38 |
|   | $n$        | [-]  | 28   |
|   | $k_n$      | [-]  | 0,83 |
|   | $s_{0,75}$ | [cm] | 18,3 |

| Serie 4, $\phi$ 20 mm, C30/37   |            |      |      |
|---|------------|------|------|
|  | $s_{max}$  | [cm] | 11,7 |
|   | $s_m$      | [cm] | 6,9  |
|   | $s_x$      | [cm] | 2,1  |
|   | $V_x$      | [-]  | 0,31 |
|   | $n$        | [-]  | 60   |
|   | $k_n$      | [-]  | 0,78 |
|   | $s_{0,75}$ | [cm] | 8,5  |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

| Serie 4.1, $\phi 20$ mm, C30/37   |            |      |      |
|---|------------|------|------|
|  | $s_{\max}$ | [cm] | 22,0 |
|   | $s_m$      | [cm] | 14,5 |
|   | $s_x$      | [cm] | 3,4  |
|   | $V_x$      | [-]  | 0,24 |
|   | $n$        | [-]  | 30   |
|   | $k_n$      | [-]  | 0,83 |
|   | $s_{0,75}$ | [cm] | 17,4 |

| Serie 4.1, $\phi 20$ mm, C30/37   |            |      |      |
|---|------------|------|------|
|  | $s_{\max}$ | [cm] | 8,1  |
|   | $s_m$      | [cm] | 6,9  |
|   | $s_x$      | [cm] | 0,8  |
|   | $V_x$      | [-]  | 0,12 |
|   | $n$        | [-]  | 32   |
|   | $k_n$      | [-]  | 0,82 |
|   | $s_{0,75}$ | [cm] | 7,6  |

C.4.2 Stabdurchmesser  $\phi 28$  mm

|  | Serie 1, $\phi 28$ mm, C30/37 |      |      |
|--|-------------------------------|------|------|
|  | $s_{max}$                     | [cm] | 28,4 |
|  | $s_m$                         | [cm] | 15,2 |
|  | $s_x$                         | [cm] | 4,5  |
|  | $V_x$                         | [-]  | 0,29 |
|  | $n$                           | [-]  | 78   |
|  | $k_n$                         | [-]  | 0,76 |
|  | $s_{0,75}$                    | [cm] | 18,6 |

|  | Serie 1, $\phi 28$ mm, C30/37 |      |      |
|--|-------------------------------|------|------|
|  | $s_{max}$                     | [cm] | 11,1 |
|  | $s_m$                         | [cm] | 9,2  |
|  | $s_x$                         | [cm] | 1,6  |
|  | $V_x$                         | [-]  | 0,17 |
|  | $n$                           | [-]  | 22   |
|  | $k_n$                         | [-]  | 0,85 |
|  | $s_{0,75}$                    | [cm] | 10,5 |

|  | Serie 1, $\phi 28$ mm, C50/60 |      |      |
|--|-------------------------------|------|------|
|  | $s_{max}$                     | [cm] | 25,0 |
|  | $s_m$                         | [cm] | 14,9 |
|  | $s_x$                         | [cm] | 4,1  |
|  | $V_x$                         | [-]  | 0,28 |
|  | $n$                           | [-]  | 49   |
|  | $k_n$                         | [-]  | 0,79 |
|  | $s_{0,75}$                    | [cm] | 18,1 |

|  | Serie 1, $\phi 28$ mm, C50/60 |      |      |
|--|-------------------------------|------|------|
|  | $s_{max}$                     | [cm] | 13,3 |
|  | $s_m$                         | [cm] | 9,6  |
|  | $s_x$                         | [cm] | 1,6  |
|  | $V_x$                         | [-]  | 0,16 |
|  | $n$                           | [-]  | 20   |
|  | $k_n$                         | [-]  | 0,87 |
|  | $s_{0,75}$                    | [cm] | 11,0 |


|  | Serie 1.1, $\phi 28$ mm, C30/37 |      |      |
|--|---------------------------------|------|------|
|  | $s_{max}$                       | [cm] | 31,0 |
|  | $s_m$                           | [cm] | 16,5 |
|  | $s_x$                           | [cm] | 5,6  |
|  | $V_x$                           | [-]  | 0,34 |
|  | $n$                             | [-]  | 24   |
|  | $k_n$                           | [-]  | 0,85 |
|  | $s_{0,75}$                      | [cm] | 21,2 |


|  | Serie 1.1, $\phi 28$ mm, C30/37 |      |      |
|--|---------------------------------|------|------|
|  | $s_{max}$                       | [cm] | 12,3 |
|  | $s_m$                           | [cm] | 9,5  |
|  | $s_x$                           | [cm] | 1,9  |
|  | $V_x$                           | [-]  | 0,20 |
|  | $n$                             | [-]  | 23   |
|  | $k_n$                           | [-]  | 0,85 |
|  | $s_{0,75}$                      | [cm] | 11,1 |

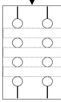
|  | Serie 2, $\phi 28$ mm, C30/37 |      |      |
|--|-------------------------------|------|------|
|  | $s_{max}$                     | [cm] | 29,5 |
|  | $s_m$                         | [cm] | 16,2 |
|  | $s_x$                         | [cm] | 5,4  |
|  | $V_x$                         | [-]  | 0,33 |
|  | $n$                           | [-]  | 96   |
|  | $k_n$                         | [-]  | 0,76 |
|  | $s_{0,75}$                    | [cm] | 20,2 |


|  | Serie 2, $\phi 28$ mm, C30/37 |      |      |
|--|-------------------------------|------|------|
|  | $s_{max}$                     | [cm] | 17,5 |
|  | $s_m$                         | [cm] | 9,3  |
|  | $s_x$                         | [cm] | 3,1  |
|  | $V_x$                         | [-]  | 0,34 |
|  | $n$                           | [-]  | 44   |
|  | $k_n$                         | [-]  | 0,80 |
|  | $s_{0,75}$                    | [cm] | 11,7 |





| Serie 2, $\phi 28$ mm, C50/60   |            |      |      |
|---|------------|------|------|
|  | $s_{max}$  | [cm] | 26,4 |
|   | $s_m$      | [cm] | 19,1 |
|   | $s_x$      | [cm] | 5,0  |
|   | $V_x$      | [-]  | 0,26 |
|   | $n$        | [-]  | 38   |
|   | $k_n$      | [-]  | 0,81 |
|   | $s_{0,75}$ | [cm] | 23,1 |

| Serie 2, $\phi 28$ mm, C50/60   |            |      |      |
|---|------------|------|------|
|  | $s_{max}$  | [cm] | 14,1 |
|   | $s_m$      | [cm] | 8,6  |
|   | $s_x$      | [cm] | 2,5  |
|   | $V_x$      | [-]  | 0,29 |
|   | $n$        | [-]  | 24   |
|   | $k_n$      | [-]  | 0,85 |
|   | $s_{0,75}$ | [cm] | 10,7 |

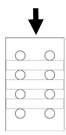
| Serie 3, $\phi 28$ mm, C30/37   |            |      |      |
|---|------------|------|------|
|  | $s_{max}$  | [cm] | 21,6 |
|   | $s_m$      | [cm] | 14,8 |
|   | $s_x$      | [cm] | 3,8  |
|   | $V_x$      | [-]  | 0,25 |
|   | $n$        | [-]  | 14   |
|   | $k_n$      | [-]  | 0,91 |
|   | $s_{0,75}$ | [cm] | 18,2 |

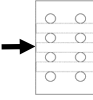
| Serie 4, $\phi 28$ mm, C30/37   |            |      |      |
|---|------------|------|------|
|  | $s_{max}$  | [cm] | 14,5 |
|   | $s_m$      | [cm] | 9,7  |
|   | $s_x$      | [cm] | 2,2  |
|   | $V_x$      | [-]  | 0,22 |
|   | $n$        | [-]  | 43   |
|   | $k_n$      | [-]  | 0,80 |
|   | $s_{0,75}$ | [cm] | 11,4 |

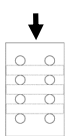
| Serie 4.1, $\phi 28$ mm, C30/37   |            |      |      |
|---|------------|------|------|
|  | $s_{max}$  | [cm] | 23,0 |
|   | $s_m$      | [cm] | 17,4 |
|   | $s_x$      | [cm] | 3,7  |
|   | $V_x$      | [-]  | 0,21 |
|   | $n$        | [-]  | 22   |
|   | $k_n$      | [-]  | 0,85 |
|   | $s_{0,75}$ | [cm] | 20,6 |

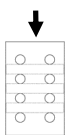
| Serie 4.1, $\phi 28$ mm, C30/37   |            |      |      |
|---|------------|------|------|
|  | $s_{max}$  | [cm] | 12,5 |
|   | $s_m$      | [cm] | 9,3  |
|   | $s_x$      | [cm] | 1,6  |
|   | $V_x$      | [-]  | 0,17 |
|   | $n$        | [-]  | 23   |
|   | $k_n$      | [-]  | 0,85 |
|   | $s_{0,75}$ | [cm] | 10,7 |


C.4.3 Stabdurchmesser  $\phi 40$  mm

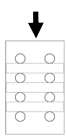
|  | Serie 1, $\phi 40$ mm, C30/37 |      |      |
|---|-------------------------------|------|------|
|   | $s_{max}$                     | [cm] | 30,7 |
|   | $s_m$                         | [cm] | 16,3 |
|   | $s_x$                         | [cm] | 5,3  |
|   | $V_x$                         | [-]  | 0,33 |
|   | $n$                           | [-]  | 91   |
|   | $k_n$                         | [-]  | 0,76 |
|   | $s_{0,75}$                    | [cm] | 20,4 |

|  | Serie 1, $\phi 40$ mm, C30/37 |      |      |
|---|-------------------------------|------|------|
|   | $s_{max}$                     | [cm] | 21,4 |
|   | $s_m$                         | [cm] | 13,1 |
|   | $s_x$                         | [cm] | 2,9  |
|   | $V_x$                         | [-]  | 0,22 |
|   | $n$                           | [-]  | 32   |
|   | $k_n$                         | [-]  | 0,82 |
|   | $s_{0,75}$                    | [cm] | 15,5 |


|  | Serie 1, $\phi 40$ mm, C50/60 |      |      |
|---|-------------------------------|------|------|
|   | $s_{max}$                     | [cm] | 25,9 |
|   | $s_m$                         | [cm] | 14,4 |
|   | $s_x$                         | [cm] | 5,1  |
|   | $V_x$                         | [-]  | 0,35 |
|   | $n$                           | [-]  | 52   |
|   | $k_n$                         | [-]  | 0,79 |
|   | $s_{0,75}$                    | [cm] | 18,4 |


|  | Serie 1.1, $\phi 40$ mm, C30/37 |      |      |
|---|---------------------------------|------|------|
|   | $s_{max}$                       | [cm] | 24,3 |
|   | $s_m$                           | [cm] | 15,6 |
|   | $s_x$                           | [cm] | 3,8  |
|   | $V_x$                           | [-]  | 0,24 |
|   | $n$                             | [-]  | 24   |
|   | $k_n$                           | [-]  | 0,85 |
|   | $s_{0,75}$                      | [cm] | 18,8 |


|  | Serie 1.1, $\phi 40$ mm, C30/37 |      |      |
|---|---------------------------------|------|------|
|   | $s_{max}$                       | [cm] | 30,1 |
|   | $s_m$                           | [cm] | 12,1 |
|   | $s_x$                           | [cm] | 6,3  |
|   | $V_x$                           | [-]  | 0,52 |
|   | $n$                             | [-]  | 16   |
|   | $k_n$                           | [-]  | 0,89 |
|   | $s_{0,75}$                      | [cm] | 17,8 |


|  | Serie 1.2, $\phi 40$ mm, C30/37 |      |      |
|---|---------------------------------|------|------|
|   | $s_{max}$                       | [cm] | 22,2 |
|   | $s_m$                           | [cm] | 13,9 |
|   | $s_x$                           | [cm] | 4,9  |
|   | $V_x$                           | [-]  | 0,35 |
|   | $n$                             | [-]  | 26   |
|   | $k_n$                           | [-]  | 0,84 |
|   | $s_{0,75}$                      | [cm] | 18,0 |


|  | Serie 1.2, $\phi 40$ mm, C30/37 |      |      |
|---|---------------------------------|------|------|
|   | $s_{max}$                       | [cm] | 13,2 |
|   | $s_m$                           | [cm] | 8,8  |
|   | $s_x$                           | [cm] | 2,1  |
|   | $V_x$                           | [-]  | 0,23 |
|   | $n$                             | [-]  | 21   |
|   | $k_n$                           | [-]  | 0,86 |
|   | $s_{0,75}$                      | [cm] | 10,6 |

| Serie 2, $\phi$ 40 mm, C30/37   |            |      |      |
|---|------------|------|------|
|  | $s_{max}$  | [cm] | 27,9 |
|   | $s_m$      | [cm] | 16,9 |
|   | $s_x$      | [cm] | 5,1  |
|   | $V_x$      | [-]  | 0,30 |
|   | $n$        | [-]  | 64   |
|   | $k_n$      | [-]  | 0,77 |
|   | $s_{0,75}$ | [cm] | 20,8 |

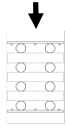
| Serie 2, $\phi$ 40 mm, C30/37   |            |      |      |
|---|------------|------|------|
|  | $s_{max}$  | [cm] | 22,0 |
|   | $s_m$      | [cm] | 13,6 |
|   | $s_x$      | [cm] | 4,8  |
|   | $V_x$      | [-]  | 0,35 |
|   | $n$        | [-]  | 12   |
|   | $k_n$      | [-]  | 0,93 |
|   | $s_{0,75}$ | [cm] | 18,1 |

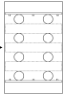
| Serie 2, $\phi$ 40 mm, C50/60   |            |      |      |
|---|------------|------|------|
|  | $s_{max}$  | [cm] | 25,3 |
|   | $s_m$      | [cm] | 13,8 |
|   | $s_x$      | [cm] | 4,6  |
|   | $V_x$      | [-]  | 0,34 |
|   | $n$        | [-]  | 55   |
|   | $k_n$      | [-]  | 0,78 |
|   | $s_{0,75}$ | [cm] | 17,4 |

| Serie 3, $\phi$ 40 mm, C30/37   |            |      |      |
|---|------------|------|------|
|  | $s_{max}$  | [cm] | 30,3 |
|   | $s_m$      | [cm] | 17,6 |
|   | $s_x$      | [cm] | 7,8  |
|   | $V_x$      | [-]  | 0,44 |
|   | $n$        | [-]  | 7    |
|   | $k_n$      | [-]  | 1,04 |
|   | $s_{0,75}$ | [cm] | 25,7 |

| Serie 4, $\phi$ 40 mm, C30/37   |            |      |      |
|---|------------|------|------|
|  | $s_{max}$  | [cm] | 19,1 |
|   | $s_m$      | [cm] | 13,0 |
|   | $s_x$      | [cm] | 3,7  |
|   | $V_x$      | [-]  | 0,28 |
|   | $n$        | [-]  | 30   |
|   | $k_n$      | [-]  | 0,83 |
|   | $s_{0,75}$ | [cm] | 16,0 |

Anhang C – Ergebnisse zur Rissabstandsuntersuchung

| Serie 4.1, $\phi$ 40 mm, C30/37   |            |      |      |
|---|------------|------|------|
|  | $s_{\max}$ | [cm] | 26,1 |
|   | $s_m$      | [cm] | 17,2 |
|   | $s_x$      | [cm] | 4,7  |
|   | $V_x$      | [-]  | 0,27 |
|   | $n$        | [-]  | 20   |
|   | $k_n$      | [-]  | 0,87 |
|   | $s_{0,75}$ | [cm] | 21,3 |

| Serie 4.1, $\phi$ 40 mm, C30/37   |            |      |      |
|---|------------|------|------|
|  | $s_{\max}$ | [cm] | 14,9 |
|   | $s_m$      | [cm] | 12,2 |
|   | $s_x$      | [cm] | 2,4  |
|   | $V_x$      | [-]  | 0,19 |
|   | $n$        | [-]  | 15   |
|   | $k_n$      | [-]  | 0,90 |
|   | $s_{0,75}$ | [cm] | 14,3 |