

Möglichkeiten zur Steigerung der Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetondecken mit integrierter Leitungsführung

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

DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Christian Michael Keil

aus Fulda

Dekan:	Prof. Dr. rer. nat. R. Jüpner
1. Berichterstatterin:	Jun.-Prof. Dr.-Ing. C. Thiele
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. J. Schnell
Tag der mündlichen Prüfung:	22.09.2016

Kaiserslautern 2016

(D 386)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion der Technischen Universität Kaiserslautern.

Mein besonderer Dank gilt Frau Jun. Prof. Dr.-Ing. Catherina Thiele und Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell für die Betreuung und Begutachtung dieser Arbeit, das entgegengebrachte Vertrauen und die übertragenen Aufgaben im Bereich der Forschung, Industrieprojekte und Lehre.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kurz für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Einen unverzichtbaren Beitrag zur Fertigstellung dieser Arbeit hat das kollegiale und freundschaftliche Umfeld am Fachgebiet beigetragen. Hierfür möchte ich mich bei allen Kollegen und Hiwis und vor allem dem Team des Labors für konstruktiven Ingenieurbau bedanken.

Besonderer Dank gilt den Studenten die bei mir eine Studien- bzw. Diplomarbeit angefertigt haben. Namentlich sind dabei Karl Kopp, Marie Reichert, Christine Puhane, Christina Mauer, Florian Wendel, Nicole Schmeckeber, Evelyn Bulenda und Jonas Müller zu nennen. Ein Teil der Versuche die in dieser Dissertation beschrieben werden, wurden im Rahmen dieser studentischer Arbeiten durchgeführt.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner Familie, meinen Freunden und insbesondere bei meiner Frau Melanie. Ohne ihr Verständnis und ihre Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Mannheim, Mai 2016

Christian Keil

Dipl.-Ing. Christian Michael Keil

**Möglichkeiten zur Steigerung der
Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetondecken mit
integrierter Leitungsführung**

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	v
Abstract	vii
Bezeichnungen	ix
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik zur Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetondecken	3
2.1 Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung	3
2.1.1 Allgemeines	3
2.1.2 Versagensarten.....	5
2.1.3 Tragmodelle und Tragmechanismen	6
2.1.4 Bemessung	11
2.2 Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung mit Öffnungen.....	16
2.2.1 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	16
2.2.2 Abminderungsfaktor	18
2.3 Querkrafttragfähigkeit mit Querkraftbewehrung	23
2.3.1 Allgemeines	23
2.3.2 Versagensarten.....	24
2.3.3 Tragmodell	26
2.3.4 Bemessung	27
2.4 Querkrafttragfähigkeit mit Querkraftbewehrung und Öffnungen in Balken ..	35
2.5 Querkrafttragfähigkeit von Elementdecken mit Gitterträgern.....	37
2.5.1 Allgemeines	37
2.5.2 Tragverhalten	38
2.5.3 Bemessung	41
3 Ziele der Arbeit	43
4 Methodik	45
4.1 Allgemeines.....	45
4.2 Möglichkeiten zur Steigerung der Querkrafttragfähigkeit.....	45
4.2.1 Wendel.....	45
4.2.2 Gitterträger in Elementdecken mit Leitungen	46
4.2.3 Sonderlösungen	47
4.3 Dimensionierung	50
4.4 Herstellung	61
4.5 Versuchsaufbau und Messtechnik	62
4.6 Versuchsablauf	64
4.7 Besonderheiten bei der Auswertung	67
5 Wendel als Querkraftbewehrung um Leitungen	69
5.1 Versuche	69
5.1.1 Allgemeines	69

5.1.2	Betonfestigkeiten	71
5.1.3	Referenzversuche	71
5.1.4	Einfluss des Öffnungsdurchmessers und der Windungsanzahl	75
5.1.5	Einfluss der Lage der Öffnung im Bauteil	82
5.1.6	Einfluss des Stabdurchmessers der Wendel	84
5.2	FE-Simulationen	86
5.2.1	Werkstoffmodelle	86
5.2.2	Lösungsparameter	87
5.2.3	Ergebnisse	87
5.3	Interpretation der Ergebnisse und Bemessungskonzept	90
5.4	Empfehlungen für die Praxis	97
6	Leitungen in Elementdecken mit Gitterträgern	99
6.1	Versuche	99
6.1.1	Allgemeines	99
6.1.2	Betonfestigkeiten	100
6.1.3	Referenzversuche	101
6.1.4	Einfluss des Gitterträgerabstandes	107
6.1.5	Einfluss beschädigter Diagonalen	111
6.2	Interpretation der Ergebnisse und Bemessungskonzept	113
6.2.1	Elementdecken mit Gitterträgern	113
6.2.2	Elementdecken mit beschädigten Gitterträgerdiagonalen	115
6.3	Empfehlungen für die Praxis	116
6.3.1	Nachweis der Querkrafttragfähigkeit	116
6.3.2	Nachweis der Verbundfuge	118
7	Sonderlösungen	119
7.1	Gitterträger und Unterstützungskörbe parallel zu Leitungen	119
7.1.1	Versuche	119
7.1.2	Interpretation der Ergebnisse und Bemessungskonzept	123
7.1.3	Empfehlungen für die Praxis	125
7.2	Lokale Verbundstörung	127
7.2.1	Versuche	127
7.2.2	Empfehlungen für die Praxis	128
8	Zusammenfassung / Fazit	129
	Literaturverzeichnis	xii
	Anhang A: Protokolle zu den Versuchen mit Wendeln	A
	Anhang B: Protokolle zu den Versuchen mit Gitterträgern	B
	Lebenslauf	C

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Möglichkeiten zur Steigerung der Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetondecken mit integrierten Leitungen untersucht. Hierbei wurde der Einfluss auf die Tragfähigkeit von Wendeln um die Leitungen herum, der Einfluss von Gitterträgern in Elementdecken mit Leitungen, Gitterträger neben Leitungen als örtliche Zulagebewehrung und Unterstützungskörbe über Leitungen untersucht. Zudem wurden Versuche mit lokaler Verbundstörung der Biegebewehrung zur Vermeidung eines Biegeschubrisses im Bereich der Leitungen durchgeführt.

Die Wendel wird aus Betonstahl gebogen und mit handelsüblichen Betonabstandhaltern an der Leitung fixiert. Die Betondeckung zur Leitung soll sowohl die Kraftübertragung, als auch den Korrosionsschutz sicherstellen. In insgesamt 70 Bauteilversuchen wurden verschiedene Parameter variiert. Hierzu zählen der Leitungsdurchmesser, die Anzahl der Windungen der Wendel, der Stabdurchmesser der Wendel sowie die Lage der Öffnung im Bauteil. Mit relativ geringen Bewehrungsmengen konnte die Tragfähigkeit des ungeschwächten, unbewehrten Vollquerschnitts erreicht werden. Die Ergebnisse der Versuche führten abschließend zu einem an den Querkraftnachweis des Eurocode 2 angelehnten Bemessungsvorschlag, der die verschiedenen Einflussparameter der Wendel berücksichtigt.

Zur Untersuchung des Tragverhaltens von Elementdecken mit Gitterträgern und integrierten Leitungen in der Ortbetonergänzung wurde in 31 Versuchen der Querkraftbewehrungsgrad variiert. Der Öffnungsdurchmesser betrug dabei maximal 80 mm. Größere Leitungen können ohne Beschädigung der Diagonalen der Gitterträger nicht verbaut werden. Hierbei konnte eine Reduktion der Querkrafttragfähigkeit bezogen auf den ungeschwächten Querschnitt mit Gitterträgern festgestellt werden. Diese Reduktion wird in einem Bemessungskonzept durch Abminderung des Betontraganteils berücksichtigt. Ab einer Querkraftbewehrungsmenge von ca. $11 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ konnte die Querkrafttragfähigkeit des unbewehrten Vollquerschnitts erreicht werden. Diese Bewehrungsmenge entspricht in etwa dem Mindestquerkraftbewehrungsgrad nach Eurocode 2.

Des Weiteren wurden Versuche an Elementdecken mit Gitterträgern neben bzw. Unterstützungskörben über Leitungen durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurde sowohl der Fall des in das Fertigteil einbetonierten Bewehrungselements als auch der Fall des nachträglich auf die Fertigteilplatte aufgestellten Bewehrungselements untersucht. Die Versuchsergebnisse führten zu einem Bemessungsansatz, welcher an das Bemessungskonzept des Eurocode 2 anschließt. Durch zusätzliche Faktoren in Abhängigkeit des Bewehrungselements, Bewehrungsgrades und des Leitungsdurchmessers kann die Querkrafttragfähigkeit solcher Decken bemessen werden.

Eine lokale Verbundstörung der Biegebewehrung unterhalb der Öffnungen führt zu einer deutlich erhöhten Traglast. Ein Biegeschubversagen konnte in diesem Fall nicht herbeigeführt werden. Diese Versuche führen zwar zu keiner praxistauglichen Verstärkungsmethode, veranschaulichen aber sehr gut das Querkrafttragverhalten von Stahlbetondecken.

Abstract

Within this work possibilities to raise the shear load capacity of concrete floor slabs with integrated ducts had been investigated. To achieve that, helical reinforcement around the ducts, the influence of lattice girders in semi-precast slabs with ducts on the load-bearing behavior, lattice girders parallel to the ducts as local reinforcement element and chairs over ducts had been investigated. Additionally tests with local debonding of the bending reinforcement under the ducts to prevent a bending shear crack had been performed.

Helical reinforcement is bended of reinforcement steel and fixed at the duct with regular reinforcing bar spacers. The concrete cover protects the steel against corrosion and ensures the load transfer. In 70 tests different parameters had been varied. Which includes duct diameter, number of windings, diameter of reinforcement bar and the position within the specimen. The load bearing capacity of the non-weakened cross section without shear reinforcement could be reached with a small amount of reinforcement. The test results lead to a design approach in dependence on the shear force proof of Eurocode 2 under consideration of the different influences.

In addition to that, the shear load capacity of semi-precast slabs with lattice girders had been investigated. In 31 tests the shear reinforcement ratio respectively the lattice girder space had been varied. Within these tests, a reduction of the load capacity of such slabs had been detected. This reduction can be considered in the design of semi-precast slabs by reducing the load bearing capacity of the concrete. At a reinforcement ratio of about $11 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ the load capacity of a slab with non-weakened cross section without shear reinforcement could be achieved. This reinforcement ratio corresponds to the minimal shear reinforcement ratio of Eurocode 2.

Furthermore tests with slabs with lattice girders next to, respectively chairs over ducts had been performed. In these tests two cases had been differentiated. In case one the reinforcement element had been casted in the prefabricated slab element, in case two it had been placed on the surface of the prefabricated slab element. The design concept developed from these results, affiliates the design approach of Eurocode 2. With additional factors in dependence of the reinforcement element, ratio and duct diameter the shear load capacity can be calculated.

A local debonding of the bending reinforcement under the ducts leads to significant higher failure loads. A bending shear failure could not be generated. These results do not cause a practicable strengthening method, but they illustrate the shear loading behavior of concrete slabs without shear reinforcement.

Bezeichnungen

Lateinisch (kleine Buchstaben)

a	[m]	Abstand von Lasteinleitung zu Auflager
a \emptyset	[cm]	lichter Abstand zwischen Leitungen
b \square	[cm]	Breite einer rechteckigen Öffnung
b _w	[cm]	Stegbreite
c	[-]	Reibkoeffizient
c _{nom}	[cm]	nominelle Betondeckung
c _r	[mm]	Rippenabstand
d	[cm]	statische Höhe
d \square	[cm]	Höhe einer rechteckigen Öffnung
d _g	[mm]	Größtkorndurchmesser
d \emptyset	[mm]	Öffnungsdurchmesser
d _s	[mm]	Stabdurchmesser
f _{1c}	[MPa]	einachsiale Betondruckfestigkeit
f _{c,cube}	[MPa]	geprüfte Würfeldruckfestigkeit
f _{c,cyl}	[MPa]	Zylinderdruckfestigkeit
f _{c,test}	[MPa]	Betondruckfestigkeit im Bauteilversuch
f _{cd}	[MPa]	Bemessungswert der Betondruckfestigkeit
f _{ck}	[MPa]	charakteristischer Wert der Betondruckfestigkeit
f _{cm,cube}	[MPa]	mittlere Würfeldruckfestigkeit
f _{ct,eff}	[MPa]	effektive Betonzugfestigkeit
f _{ctm}	[MPa]	mittlere Betonzugfestigkeit
f _{yk}	[MPa]	Streckgrenze der Biegebewehrung
f _{yyk}	[MPa]	Streckgrenze der Querkraftbewehrung
h	[cm]	Deckenhöhe
h _r	[mm]	Rippenhöhe
k	[-]	Maßstabsfaktor
k _{dg}	[-]	Faktor zur Berücksichtigung des Größtkorndurchmessers
k \emptyset ,Gruppe	[-]	Abminderungsfaktor bei einer Gruppe von Öffnungen
k \emptyset n	[-]	Abminderungsfaktor bei Öffnungen
k _v	[-]	Faktor zur Berücksichtigung des Dehnungszustandes nach Model Code 2010
k _{Wendel}	[-]	Abminderungsfaktor der Wendeltragfähigkeit
l	[m]	Spannweite
l _b	[cm]	Verankerungslänge der Biegebewehrung
n	[-]	Anzahl der Windungen
r _u	[-]	Relativtragfähigkeit bzw. bezogene Tragfähigkeit
s \emptyset	[cm]	Achsabstand der Leitungen
s _w	[cm]	Abstand der Querkraftbewehrung zueinander
v _{cr}	[mm]	relative vertikale Verschiebung der Rissufer
v _{E_{di}}	[kN/m]	Bemessungswert der einwirkenden Schubkraft in der Fuge
v _{R_{di}}	[kN/m]	Schubwiderstand der Fuge
w	[mm]	Durchbiegung
w _{cr}	[mm]	Rissöffnung

Bezeichnungen

w_{\max}	[mm]	Schubrissbreiten
x	[cm]	Druckzonenhöhe
z	[cm]	innerer Hebelarm

Lateinisch (große Buchstaben)

A	[cm ²]	Querschnittsfläche
A_{sl}	[cm ²]	Querschnittsfläche der Biegebewehrung
A_{sw}	[cm ²]	Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung
$C_{Rd,c}$	[-]	Kalibrierfaktor zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit
CV	[%]	Streuung
D	[cm]	Durchmesser der sandigen Fläche zur Bestimmung der Rautiefe
Dia	[-]	Diagonalen der Gitterträger
F_c	[kN]	Druckkraft im Betongurt
F_{calc}	[kN]	rechnerische Traglast
F_s	[kN]	Zugkraft in der Biegebewehrung
F_{sw}	[kN]	Zugkraft in der Querkraftbewehrung
F_u	[kN]	Traglast im Bauteilversuch
$F_{u,40}$	[kN]	normierte Traglast (auf 40 N/mm ² normiert)
$F_{u,m,40}$	[kN]	Mittelwert der normierten Traglasten
$F_{u,m,Ref,40}$	[kN]	Mittelwert der normierten Traglasten der Referenzversuche
$F_{VRm,c}$	[kN]	Erfahrungswert der Traglast nach DAfStb Heft 600
M	[kNm]	Biegemoment
M_{Rd}	[kNm]	Bemessungswert des Biegebruchmoments
M_u	[kNm]	Biegemoment im Versuch
M_{uV}	[kNm]	Biegemoment bei Querkraftversagen
N	[kN]	Normalkraft
OG	[-]	Obergurt der Gitterträger
R_t	[-]	Rautiefe nach Kaufmann
S_k	[-]	Schubkonzentrationsfaktor
UG	[-]	Untergurt der Gitterträger
V	[kN]	Querkraft
V_{Sand}	[cm ³]	Sandvolumen zur Bestimmung der Rautiefe
V_{BPZ}	[kN]	Querkraftanteil der Bruchprozesszone
V_c	[kN]	Betontaganteil der Querkraft nach Mansur
V_{cc}	[kN]	Querkraftanteil der Biegedruckzone
V_{cr}	[kN]	Querkraftanteil aus der Rissverzahnung
V_d	[kN]	Querkraftanteil aus der Dübelwirkung der Längsbewehrung
V_{Ed}	[kN]	Bemessungswert der einwirkenden Querkraft
V_n	[kN]	Querkrafttragfähigkeit nach Mansur
$V_{Rd,cc}$	[kN]	Traganteil des Betons bei Bauteile mit Querkraftbewehrung
$V_{Rd,max}$	[kN]	Bemessungswert der Druckstrbentragfähigkeit
$V_{Rk,sy}$	[kN]	charakteristischer Wert der Tragfähigkeit der Querkraftbewehrung
$V_{Rm,c}$	[kN]	Mittelwert der Querkrafttragfähigkeit nach DAfStb Heft 600
V_{sw}	[kN]	Stahltraganteil lokaler Querkraftbewehrungselemente
W	[cm ³]	Widerstandsmoment
WA	[-]	Wegaufnehmer

Griechisch (kleine Buchstaben)

α_s	[-]	Verhältnis der E-Moduln von Bewehrung zu Beton
β	[°]	Neigung der Querkraftbewehrung in Tiefenrichtung
β	[°]	Neigung der Querkraftbewehrung in Bauteiltragrichtung
β_p	[°]	Rissneigung
ε_{c2}	[‰]	Betonstauchung
ε_{s1}	[‰]	Stahldehnung
ε_x	[‰]	Dehnungszustand nach Model Code 2010
γ_c	[-]	Teilsicherheitsbeiwert für bewehrten Beton
γ_F	[-]	Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen
γ_{mod}	[-]	Modellunsicherheit
λ_{LC}	[-]	Anpassungsfaktor für Leichtbeton nach ACI 318
λ	[-]	Schubslankheit
μ	[-]	Reibbeiwert
ν_1	[-]	Abminderungsfaktor für die Betonfestigkeit bei Schubrisen
θ	[°]	Druckstrebenneigungswinkel
ρ_l	[-]	Längsbewehrungsgrad
ρ_w	[-]	geometrischer Querkraftbewehrungsgrad
$\rho_{w,min}$	[-]	Mindestquerkraftbewehrungsgrad
σ_1	[MPa]	Hauptspannung
σ_2	[MPa]	Hauptspannung
σ_c	[MPa]	Betonspannungen
σ_{cr}	[MPa]	Normalspannung im Schubriss
σ_{cwd}	[MPa]	Bemessungswert der Spannung der Betondruckstrebe
σ_N	[MPa]	Normalspannung senkrecht zur Verbundfuge
σ_s	[MPa]	Stahlspannungen
σ_x	[MPa]	Längsspannung im Querschnitt
τ	[MPa]	Schubspannung im Querschnitt
τ_{cr}	[MPa]	Schubspannung im Riss
$\tau_{Rj,ad}$	[MPa]	Haftverbundspannung
$\tau_{Rj,r}$	[MPa]	Coulomb'sche Reibung
τ_{xy}	[MPa]	Schubspannung
ω_w	[-]	mechanischer Querkraftbewehrungsgrad

Griechisch (große Buchstaben)

Φ	[mm]	Stabdurchmesser der Bewehrung
Φ_{Wendel}	[mm]	Stabdurchmesser der Wendel

1 Einleitung

Die zunehmende Technologisierung von Gebäuden bringt neben den offenkundigen Vorteilen, wie die Nutzung energieeffizienter Heiz- und Kühlsysteme, moderner Lüftungstechnik und einer steigenden Behaglichkeit in den Gebäuden, auf Nachteile mit sich. Sie führt zu einer wachsenden Installationsdichte und einer Vergrößerung der Leitungsquerschnitte.

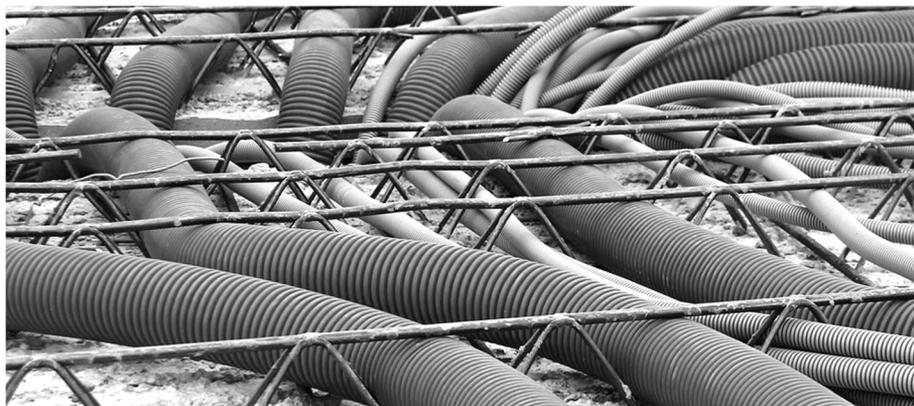


Abbildung 1-1: Beispiel für die praktische Anwendung von Leitungen in Elementdecken
[www.spitzer-installationen.at]

Werden Leitungen in Stahlbetondecken verbaut, wird bei einzelnen Leitungen ab einem Verhältnis von Öffnungsdurchmesser zu statischer Höhe von 0,1 die Querkrafttragfähigkeit dieser Bauteile reduziert. Für mehrere Leitungen nebeneinander muss in Abhängigkeit des Leitungsabstandes eine weitere Reduktion in Kauf genommen werden – dies gilt auch für sehr kleine Leitungen (z. B. Elektroleerrohre). Ein Nachweisverfahren für Leitungen in Stahlbetondecken ist mittlerweile etabliert und in der Schweiz bereits in die Normung eingeflossen (SIA 262 - 2013). In Deutschland wird ein Bemessungsvorschlag in den Erläuterungen zum Eurocode 2 (DAfStb Heft 600) gegeben. Ist die rechnerische Querkrafttragfähigkeit einer Stahlbetondecke gemäß dieses Nachweisverfahrens nicht ausreichend hoch, wird Querkraftbewehrung erforderlich. Aufgrund der Tatsache, dass die Querschnittsschwächung i. d. R. lokal ist und auf die gesamte Deckenfläche gesehen meist keine Querkraftbewehrung erforderlich ist, sind lokale Querkraftbewehrungselemente ein zentraler Schlüssel, um die Wirtschaftlichkeit solcher multifunktionalen Deckensysteme weiter zu gewährleisten. Daher werden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Bewehrungselemente (Wendeln, Gitterträger und Unterstützungskörbe) untersucht.

Des Weiteren wird der Einfluss von Leitungsführungen auf die Tragfähigkeit von Elementdecken mit Gitterträgern untersucht. Diese weisen bereits Querkraftbewehrung – in Form von Gitterträgern – auf, die oft nicht als tragende Bewehrung im Endzustand angesetzt wird. Diese Arbeit soll dazu beitragen, dass der tragfähigkeitssteigernde Einfluss der Gitterträger in Zukunft berücksichtigt werden kann.

2 Stand der Technik zur Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetondecken

2.1 Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung

Kapitel 2.1 wurde im Wesentlichen aus *Keil (2011)* entnommen.

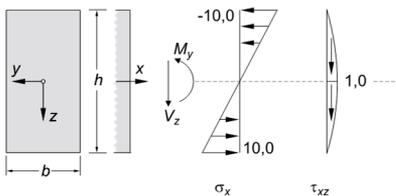
2.1.1 Allgemeines

Immer wenn Biegemomente über die Stablänge veränderlich sind treten Querkräfte auf. Die aus Biegebeanspruchungen entstehenden Druck- und Zuggurkräfte im Querschnitt ändern in Bereichen eines veränderlichen Biegemoments ihre Größe. Um Gleichgewicht herstellen zu können, sind Querkräfte erforderlich. Ist der Beton ungerissen (Zustand I), so gelten die Zusammenhänge der technische Biegetheorie, wie z. B.:

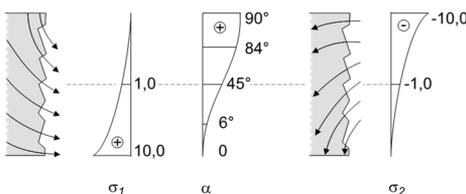
$$\text{Längsspannung: } \sigma_x = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} \quad (2.1)$$

$$\text{Schubspannung: } \tau_{xz} = \frac{V}{A} \quad (2.2)$$

Die so ermittelten Schubspannungen sind allerdings nur als Hilfsgröße zu verstehen. Es sind keine real auftretenden Spannungen. Tatsächlich wirken in einem Bauteil nur Zug- und Druckspannungen, die sog. Hauptspannungen. Schubspannungen beschreiben lediglich die Abweichung der Hauptspannungen vom gewählten Koordinatensystem. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 2-1 verdeutlicht. Unten sind die Hauptspannungen und die Hauptspannungsrichtung angegeben, oben die Längs- und Schubspannungen. Die Hauptspannungen σ_1 und σ_2 gleichen sich in Höhe der Schwerachse zu null aus (Spannungsnulllinie), daher ist die Längsspannung σ_x null. Da die Hauptspannungsrichtung $\alpha = 45^\circ$ beträgt, nimmt die Schubspannung τ_{xz} in Höhe der Schwerachse ihren Maximalwert von 1,0 an.



a Längs- und Schubspannungen



b Hauptspannungen und Hauptspannungsrichtung

Abbildung 2-1: Spannungen eines ungerissenen, biege- und querkraftbeanspruchten Trägersteiges nach der technischen Biegetheorie [*Zilch und Zehetmaier (2010)*]

Das Tragvermögen von Stahlbeton kann jedoch nur effektiv genutzt werden, wenn durch Rissbildung die eingebaute Bewehrung aktiviert wird. Sobald erste Risse auftreten verliert die technische Biegetheorie ihre Gültigkeit. Die in Abbildung 2-2-c betrachteten Spannungstrajektorien im Zustand I dienen hauptsächlich dem Verständnis der Rissentwicklung, nicht aber für die Bestimmung der Tragfähigkeit. Durch Kenntnis der Hauptspannungen und deren Richtungen kann bestimmt werden, an welchen Stellen wahrscheinlich Risse auftreten und wie diese gerichtet sind. Betrachtet man beispielsweise einen Einfeldträger der durch zwei Einzellasten belastet wird, so gelten die Zusammenhänge aus Abbildung 2-2.

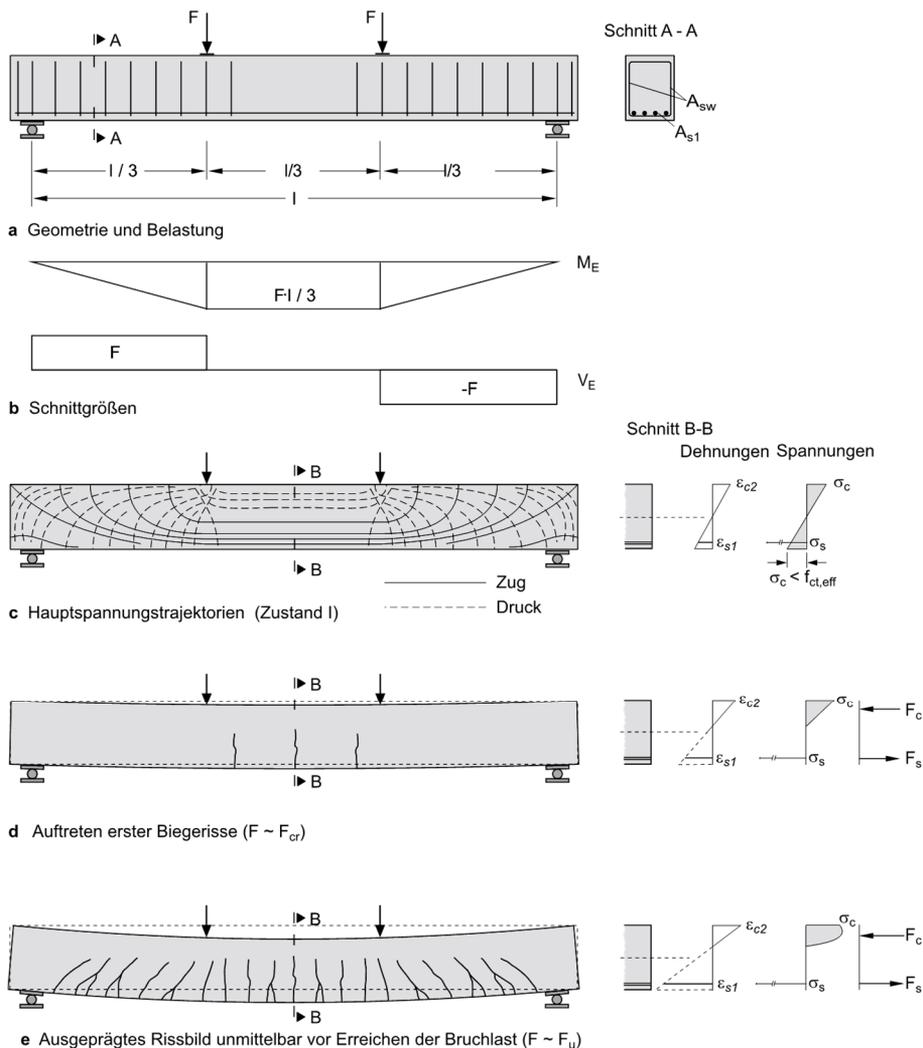


Abbildung 2-2: Hauptspannungstrajektorien eines Einfeldträgers [Zilch und Zehetmaier (2010)]

Wird bei zunehmender Belastung die Betonzugfestigkeit überschritten, so entstehen erste Risse, die annähernd senkrecht zu den Hauptzugspannungen verlaufen. Bei diesen Rissen handelt es sich um Biegerisse (Abbildung 2-2-d). Wird die Last weiter gesteigert, so bilden sich immer mehr Risse. Diese „wandern“ näher zum Auflager, also in den stärker durch Querkräfte beanspruchten Bereich (Abbildung 2-2-e). Durch diese Querkraftbeanspruchung entstehen aus den Biegerissen sog. Biegeschubrisse. Diese sind zur Lasteinleitung bzw. Feldmitte hin geneigt. Dieses Verhalten kann mit Hilfe der zuvor beschriebenen Hauptspannungen erklärt werden. Je weiter sich die Risse Richtung Auflager ausbilden, desto größer ist die Schubspannung und somit die Abweichung der Hauptspannungen von den Hauptspannungsrichtungen. Abbildung 2-2-c zeigt beispielhaft die Hauptspannungsrichtungen eines durch zwei Einzellasten beanspruchten Einfeldträgers im Zustand I. Die sich bildenden Risse stehen ungefähr senkrecht zu der Zugspannungsrichtung (Zugspannungstrajektorien). Somit neigen sich die Risse umso stärker, je näher diese zum Auflager „wandern“.

2.1.2 Versagensarten

Bei Versuchen an Bauteilen ohne Querkraftbewehrung können, als direkte Folge der Querkraftbeanspruchung, folgende Versagensarten auftreten.

Biegeschubversagen

Mit steigender Belastung setzt sich ein Biegeschubriss mit sehr geringer Neigung etwa in Höhe der Dehnungsnulllinie des gerissenen Querschnitts in Richtung der Lasteinleitung fort. Gleichzeitig schreitet dieser Riss in Höhe der Längsbewehrung horizontal auf das Auflager zu (siehe Abbildung 2-3). Dieser Riss wird als kritischer Schubriss bezeichnet. Er trennt Druck- und Zuggurt voneinander. Mit zunehmender Öffnung des Risses setzt eine Umlagerung der inneren Kräfte hin zu einem Sprengwerk ein. Bei Erreichen der kritischen Schubrisslast wächst der Schubriss in die Druckzone hinein. Die verbleibende Druckzone reicht nicht mehr aus, um die Beanspruchung aufzunehmen. Sie versagt auf Druck oder knickt nach oben aus. Die Maximallast entspricht demnach der Schubrisslast. Das instabile Wachstum des kritischen Biegeschubrisses ist die primäre Versagensursache, das Versagen der Druckzone lediglich eine Folge davon.

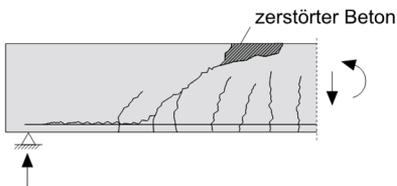


Abbildung 2-3: Biegeschubversagen von Trägern ohne Querkraftbewehrung [Zilch und Zehetmaier (2010)]

Stegzugversagen

Bei gegliederten Querschnitten mit dünnen Stegen kann die Hauptzugspannung im Steg die Betonzugfestigkeit überschreiten (siehe Abbildung 2-4). Der Zuggurt ist dabei noch ungerissen. Der Riss schreitet dann in den Zug- und Druckgurt fort und führt zu einem schlagartigen Versagen ähnlich dem Biegeschubversagen.



Abbildung 2-4: Stegzugversagen von Trägern ohne Querkraftbewehrung [Zilch und Zehetmaier (2010)]

Verankerungsversagen

Bei unzureichender Verankerung der Biegezugbewehrung über dem Auflager kann es aufgrund des Dübelrisses und der damit verbundenen Abplatzung der Betondeckung zu einem schlagartigen Anstieg der Stahlzugkraft im Auflagerbereich kommen (siehe Abbildung 2-5). Dies kann zum plötzlichen Herausziehen der Bewehrung führen. Das Biegeschubversagen und das Verankerungsversagen liegen oft sehr dicht beieinander. Häufig ist ein Verankerungsversagen als sekundäres Versagen nach dem Biegeschubversagen zu beobachten.

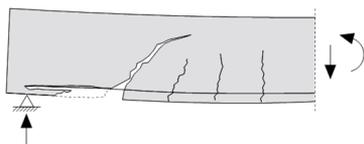


Abbildung 2-5: Verankerungsversagen von Trägern ohne Querkraftbewehrung [Zilch und Zehetmaier (2010)]

2.1.3 Tragmodelle und Tragmechanismen

Aufgrund der Komplexität der Vorgänge beim Biegeschubversagen ist es noch nicht gelungen ein allgemein anerkanntes, mechanisch begründetes Tragmodell zu entwickeln. Momentan existieren einige Modellvorstellungen die zumindest einzelne Tragmechanismen klar wiedergeben. Diese sind auch allgemein anerkannt. Es herrscht jedoch Uneinigkeit im Hinblick auf die Kombination dieser Tragmechanismen d. h. die Frage welcher Tragmechanismus wie viel zur Gesamttragfähigkeit beiträgt ist noch unbeantwortet.

Die nachfolgend beschriebenen Theorien sind nur zwei von vielen. Andere Theorien gehen zum Teil von anderen Tragmechanismen bzw. Modellen aus oder versuchen die nachfolgend beschriebenen Tragmechanismen zu quantifizieren. Hierfür wird auf die einschlägige Literatur verwiesen, z.B. *Reineck (1990)*, *Zink (2000)*, *Hegger und Görtz (2006)*, *Keller (2007)*, *Muttoni (2003)*, *Sigrist (2005)*, *Collins et al (1996)*. Die nachfolgende übersichtliche Zusammenstellung ist aus *Albrecht (2014)* entnommen:

2.1 Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung

Forscher	Uni/Jahr	Beitrag zu				Wertung der wesentlichen Traganteile						
		Traganteile	Bogen-Zugband-Modell	Kamm-Zahnmodell	Modelle auf Basis der Druckzone	empirische Modelle	Druckzone	Rissreibung	Dübelwirkung			
Leonhardt	Stuttgart/1962		definierte das Tragverhalten durch ein Bogen-Zugband-Modell									
Kahl	Toronto/1964		stellt in diesem Modell ein sekundäres Tragverhalten	entwickelte das Modell des eingespannten Betonzahns					++		--	
Fenwick & Pauley	Canterbury/1968			die Traganteile der Rissverzahnung und der Dübelwirkung sind nicht zu vernachlässigen wie bei					+		++	0
Baumann & Ritsch	München/1970	quantitative Bestimmung des Dübelwirkungseffizienzfaktors in einer Formel										
Taylor	London/1974			quantitative Beschreibung 20-40% Druckzone 33-50% Rissreibung 14-25% Dübelwirkung					+		++	0
Walraven	Deift/1980	erfasste die über übertragbaren Spannungen in einer Formel										
Reneck	Stuttgart/1980			wies 60% der Querkrafttragfähigkeit der Rissaufverzahnung zu					+		++	+
Specht/Scholz	Berlin/1995		entwickelten ein kombiniertes Fachwerk-Stützbojenmodell									
Fischer	Darmstadt/1997			bezeichnet den Ausfall der Dübelwirkung als maßgebend für das Versagen							+	+
Zink	Leipzig/1999											
Götz	Essen/2004		stellt in diesem Modell ein sekundäres Tragverhalten	führt die Querkrafttragfähigkeit auf die Tragwirkung der Druckzone zurück					++		--	--
Keller	Leipzig/2007		Vorschlag zur Ermittlung von Laststeigerung infolge einer Systemumlagerung in ein Sprengwerk	in dem Ansatz von Reneck wurde die Dübelwirkung unterschätzt und die Rissreibung überschätzt							+	+
				lieferte eine Erklärung für die Schragrisslast nach Zink					++		--	--

(++ sehr wichtig, + wichtig, 0 von geringer Bedeutung, -- unberücksichtigt)

Abbildung 2-6: Übersicht verschiedener Querkraftmodelle [Albrecht (2015)]

2.1.3.1 Sprengwerk und Bogen mit Zugband

Wird ein Balken durch Einzellasten beansprucht, so stellt das sog. Sprengwerk mit Zugband den wahrscheinlichsten Tragmechanismus dar. Hierbei leitet der Beton die Lasten über Druckstreben zu den Auflagern weiter. Die Bewehrung bildet das Zugband und erzeugt somit das statische Gleichgewicht. Ein solches Sprengwerk ist in Abbildung 2-7 dargestellt.

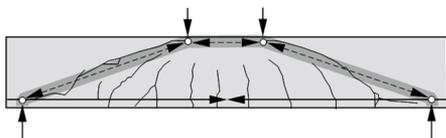


Abbildung 2-7: Sprengwerk mit Zugband [Zilch und Zehetmaier (2010)]

Bei einer Belastung durch eine Gleichstreckenlast stellt sich eine Bogenwirkung mit Zugband ein (siehe Abbildung 2-8). Aufgrund der günstigen Lastabtragung über Druckkräfte wird hierbei die Tragfähigkeit durch die Biegetragfähigkeit in Feldmitte begrenzt.

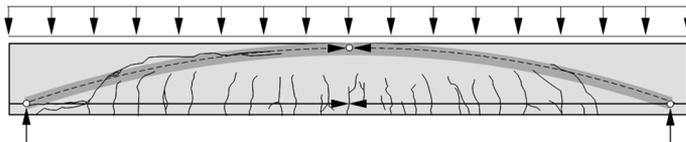


Abbildung 2-8: Bogenwirkung bei einer Gleichstreckenlast [Zilch und Zehetmaier (2010)]

2.1.3.2 Zahnmodell

Der Betonzahn ist das durch Biegeschubrisse begrenzte und mit der Druckzone kontinuierlich verbundene Betonelement, das den Abbau der Bewehrungszugkräfte ermöglicht und die Verbindung zwischen Druck- und Zuggurt herstellt.

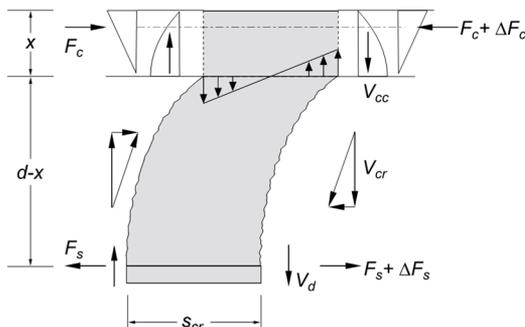


Abbildung 2-9: Zahnmodell zur Beschreibung des Tragverhaltens von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung [Zilch und Zehetmaier (2010)]

Die Querkraft wird hierbei hauptsächlich durch folgende Traganteile abgetragen (siehe auch Abbildung 2-9):

- V_{cc} Querkraftanteil der Biegedruckzone
- V_{cr} Querkraftanteil aus der Rissverzahnung
- V_d Querkraftanteil aus der Dübelwirkung der Längsbewehrung.

Der Anteil der jeweiligen Mechanismen an der Gesamttragwirkung hängt vom Verformungszustand des Balkens, d. h. von der Verformung der Betonzähne gegeneinander ab. Somit ist dieser mit der Belastung veränderlich. Eine Kopplung der einzelnen Tragmechanismen muss daher über Verträglichkeitsbedingungen der Verformungen erfolgen.

Querkrafttraganteil der Biegedruckzone V_{cc}

Dieser Traganteil stellt einen wesentlichen Teil der gesamten Querkrafttragwirkung dar. Wird die Druckspannungsverteilung der Druckzone als dreiecksförmig angenommen (siehe Abbildung 2-9), so kann für einen einfach bewehrten Rechteckquerschnitt die Druckzonenhöhe x aus der folgenden Gleichung bestimmt werden:

$$\xi = \frac{x}{d} = \sqrt{\alpha_s^2 \cdot \rho_l^2 + 2 \cdot \alpha_s \cdot \rho_l - \alpha_s} \cdot \rho_l \tag{2.3}$$

mit: $\alpha_s = \frac{E_s}{E_c}$; $\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d}$.

Die bezogene Druckzonenhöhe ξ ist in den für die Biegebemessung üblichen ω -Tafeln aufgeführt.

Rissverzahnung V_{cr}

Bei der Rissverzahnung handelt es sich um die Kräfteübertragung zwischen rauen Oberflächen eines Risses bei einer Vertikalverschiebung der Flächen gegeneinander. Aufgrund des gekrümmten Verlaufs des Biegeschubrisses bewirkt die Rissöffnung w_{cr} gleichzeitig eine vertikale Verschiebung v_{cr} der Rissufer relativ zueinander. Somit können sog. Rissverzahnungsspannungen - durch Kontakt der Körner im Beton - zwischen den Rissufern aktiviert werden, deren vertikale Komponenten einen Teil der einwirkenden Querkraft aufnehmen können. Schematisch ist dieser Zusammenhang in Abbildung 2-10 dargestellt. Einflussfaktoren für die Rissverzahnung sind unter anderem:

- der Betontyp (Normalbeton, Leichtbeton)
- die Druckfestigkeit von Zuschlag und Zementsteinmatrix
- Sieblinie und Größtkorn des Zuschlags.

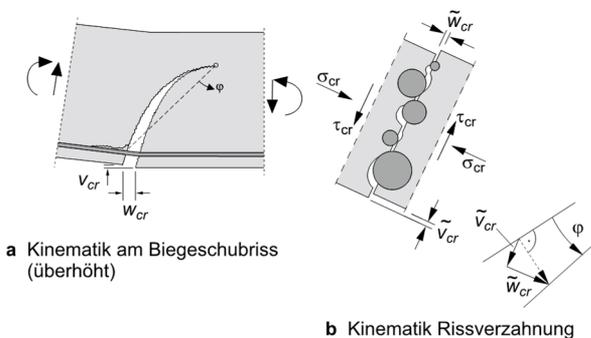


Abbildung 2-10: Verzahnung der Rissufer [Zilch und Zehetmaier (2010)]

Dübelwirkung der Längsbewehrung V_d

Die in einen Stahlbetonträger eingelegte Längsbewehrung verbindet benachbarte Betonzähne. Sie kann somit durch eine Art Dübelwirkung Querkräfte übertragen. Bevor diese Tragwirkung aktiviert werden kann, ist jedoch ein Versatz der Rissufer zueinander erforderlich.

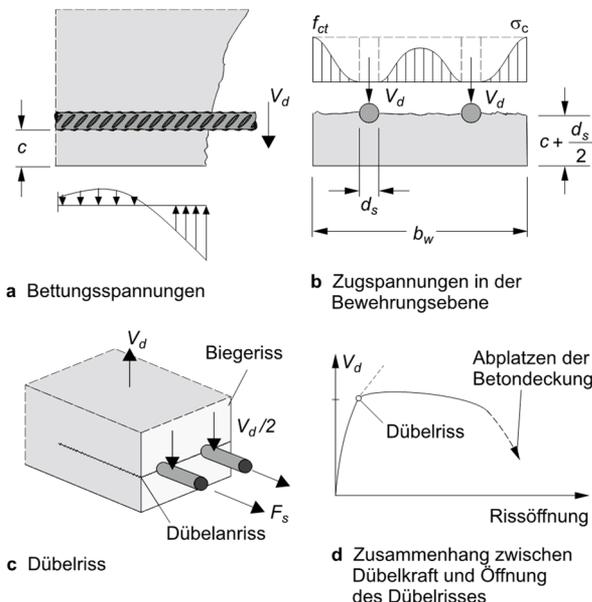


Abbildung 2-11: Dübelwirkung der Längsbewehrung [Zilch und Zehetmaier (2010)]

Die Dübelkraft V_d belastet die Betondeckung des benachbarten Zahns. Es entstehen die sog. Bettungsspannungen. Diese müssen über Betonzugspannungen nach oben gehängt werden (Abbildung 2-11 a + b). Bei hoher Dübelkraft kann sich ein horizontaler Riss – der sog. Dübelriss – bilden. Dieser verläuft entlang der Längsbewehrung und kann zum Abplatzen der Betondeckung führen (siehe Abbildung 2-11 c + d). Einflussfaktoren für diesen Traganteil sind:

- Betonzugfestigkeit
- Geometrie des Bauteilquerschnitts
- Biegesteifigkeit der Bewehrung.

Zahnbiegung

Aus der Einspannung des Betonzahns in der Druckzone entstehen Zugspannungen (siehe Abbildung 2-9 b). Der Zahn trägt wie eine Konsole. Wenn die Betonzugfestigkeit überschritten wird, pflanzt sich der Biegeschubriss annähernd parallel zum unteren Rand der Druckzone fort. Demnach geht der Ausfall der Biegeeingspannung dem Querkraftversagen als Folge des instabilen Schubrisswachstums voraus.

Maßstabeffekt – Querkraftanteil der Bruchprozesszone V_{BPZ}

Bei Bauteilen ohne Querkraftbewehrung steigt die Bruchlast nur unterproportional zur statischen Höhe d an. Diese Tatsache ist auf den sog. Maßstabeffekt zurückzuführen. Der Maßstabeffekt bezieht sich auf den Einfluss des Querkraftanteils der Bruchprozesszone. Die Bruchprozesszone bezeichnet die Risspitze des

Biegeschubrisse. In der Bruchprozesszone werden noch in begrenztem Umfang Zugspannungen übertragen (siehe Abbildung 2-12). Die vertikale Komponente dieser Zugspannungen steht zum Querkraftabtrag zur Verfügung. Die Länge dieser Bruchprozesszone ist lediglich von den Eigenschaften des Betons, nicht aber von der Geometrie und somit auch nicht von der statischen Höhe des Bauteils, abhängig. Somit wird der Anteil von V_{BPZ} an der Gesamttragfähigkeit bei höher werdenden Bauteilen immer geringer.

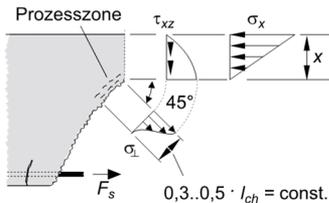


Abbildung 2-12: Maßstabseffekt und Bruchprozesszone [Zilch und Zehetmaier (2010)]

Einfluss von Längskräften

Längsdruckkräfte bewirken eine Vergrößerung der Druckzonenhöhe und führen damit zu einem besseren Querkrafttragverhalten. Die Übertragung der Querkräfte in der ungerissenen Druckzone wird somit deutlich gesteigert. Gleichzeitig führen Drucknormalkräfte zu tendenziell flacher geneigten Rissen. Im Gegensatz dazu führen Zugnormalkräfte zu einer Verminderung der Querkrafttragfähigkeit.

Zusammenwirken der verschiedenen Anteile

Um die verschiedenen Anteile der Querkrafttragfähigkeit zu aktivieren, sind Verformungen des Betonzahns gegenüber den benachbarten Zähnen bzw. gegenüber der Druckzone erforderlich. Die bei größer werdender Belastung entlang der Längsbewehrung fortschreitenden Risse oder der Ausfall der Zahneinspannung bewirken Umlagerungen von Kraftanteilen hin zur Rissverzahnung bzw. zum Druckgurt. Mit zunehmender Belastung orientiert sich der innere Kräftezustand hin zur Sprengwerk- bzw. Bogen-Zugband-Wirkung. Eine vollständige Umlagerung zu Sprengwerk oder Bogen ist allerdings abhängig von der Schubschlankheit des Bauteils und den ggf. wirkenden Längskräften. Eine Addition der einzelnen Anteile zur Gesamttragfähigkeit ist wegen der bei Laststeigerung teilweise versetzt wirksamen Mechanismen nicht möglich.

2.1.4 Bemessung

2.1.4.1 Eurocode 2

Bauteile ohne Querkraftbewehrung können durch die Entstehung eines Biegeschubrisse versagen. Es muss demnach nachgewiesen werden, dass die Beanspruchungen unter dem Niveau der Schubrislast bleiben.

Nachfolgend ist der Bemessungsansatz nach *DIN EN 1992-1-1* dargestellt. Es ist ein semi-empirischer Ansatz, der auf die Grundlagen des zuvor beschriebenen Zahnmodells aufbaut. Die in Kapitel 2.1.3.2 erläuterten Traganteile gehen hierbei wie folgt in die Bemessung ein.

Tabelle 2-1: Einflussfaktoren der Modelltraganteile auf die Bemessungsgleichung des EC 2

Traganteil	Einfluss in die Bemessungsgleichung
Rissbildung im Steg	Zugfestigkeit des Betons
Zahneinspannung	Zugfestigkeit des Betons
Dübelwirkung	Zugfestigkeit des Betons Längsbewehrungsgrad
Druckzonenhöhe	Längsbewehrungsgrad Längskraftbeanspruchung
Rissverzahnung	Längsbewehrungsgrad Längskraftbeanspruchung
Maßstabseffekt	Statische Höhe
Querschnittsgeometrie	Statische Höhe und Stegbreite

Für die Bemessung nach *DIN EN 1992-1-1 – Abschnitt 6.2* gilt folgende Gleichung für den Bemessungswert des Widerstands von Bauteilen ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung:

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + 0,12 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d \quad (2.4)$$

mit:

$C_{Rd,c} = 0,15 / \gamma_c$	Kalibrierfaktor
$\gamma_c = 1,5$	Teilsicherheitsbeiwert für bewehrten Beton
$k = 1 + \sqrt{200 / d} \leq 2,0$	Maßstabsfaktor
$\rho_l = A_{sl} / (b_w \cdot d)$	Längsbewehrungsgrad
A_{sl}	Fläche der Zugbewehrung
b_w	kleinste Querschnittsbreite innerhalb der Zugzone
d	statische Nutzhöhe der Biegebewehrung
f_{ck}	charakteristischer Wert der Betondruckfestigkeit
$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c$	Betonlängsspannung in Höhe des Schwerpunkts (Zug neg.)

Es darf jedoch eine Mindestquerkrafttragfähigkeit nach folgender Gleichung angesetzt werden:

$$V_{Rd,c} = [v_{min} + 0,12 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d \quad (2.5)$$

mit:

$$v_{min} = \frac{0,0525}{\gamma_c} \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} \quad \text{für } d \leq 600 \text{ mm}$$

$$v_{min} = \frac{0,0375}{\gamma_c} \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} \quad \text{für } d > 800 \text{ mm}$$

Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden

2.1.4.2 Model Code 2010

Das Bemessungsmodell des *SIA 262 - 2013* basiert auf der Simplified Compression Field Theory (SMFT) nach *Bentz et al (2006)* und *Muttoni (2003)*. Nach *Sigrist et al (2013)* handelt es sich um ein mechanisch begründetes Modell. Eine Besonderheit gegenüber der Bemessung nach EC 2 ist die Möglichkeit zur Bemessung in unterschiedlichen Detaillierungsgraden (Level of Approximation (LOA)). Die Bemessung erfolgt in Abhängigkeit des Dehnungszustandes des Bauteils – dieser kann je nach LOA unterschiedlich genau berechnet werden. Für die Bemessungsgleichung der Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung gilt Gleichung (2.6).

$$V_{Rd,c} = k_v \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot z \cdot b_w \tag{2.6}$$

Für Stufe 1 (Level I Approximation) gelten die folgenden Bedingungen:

- $f_{yk} \leq 600 \text{ N/mm}^2$
- $f_{ck} \leq 64 \text{ N/mm}^2$
- keine nennenswerte zentrische Zugkraft
- Größtkorndurchmesser $\geq 10 \text{ mm}$
- Dehnungszustand

$$\varepsilon_x = \frac{500/2}{200000} = 0,125\%$$

(Annahme, dass Bewehrung mit $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$ bis zum halben Wert der Fließgrenze beansprucht ist)

- $k_v = \frac{180}{1000 + 1,25 \cdot z}$, mit: $z = 0,9 \cdot d$

Für Stufe 2 (Level II Approximation) gelten die folgenden Bedingungen:

- Größtkorn min. 16 mm
- $k_v = \frac{0,4}{1 + 1500 \cdot \varepsilon_x} \cdot \frac{1300}{1000 + k_{dg} \cdot z}$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{2 \cdot E_s \cdot A_s} \cdot \left(\frac{M_{Ed}}{z} + V_{Ed} + N_{Ed} \cdot \left(\frac{1}{2} \pm \frac{\Delta e}{z} \right) \right)$$

- | | | |
|-------|--------------------------|-------------------------------------|
| mit : | E_s | E – Modul der Bewehrung |
| | A_s | Querschnittsfläche der Bewehrung |
| | M_{Ed}, V_{Ed}, N_{Ed} | einwirkende Schnittgrößen |
| | Δe | Exzentrizität |
| | z | innerer Hebelarm (= $0,9 \cdot d$) |

$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} \geq 0,75$$

- | | | |
|-------|-------|--|
| mit : | d_g | Größtkorndurchmesser |
| | | für $f_{ck} > 70 \text{ N/mm}^2$ und Leichtbeton $d_g = 0$ |

$$z = 0,9 \cdot d$$

2.1.4.3 ACI 318-11

Die Bemessung nach *ACI 318-11* basiert auf der Modified Compression Field Theory (MCFT) nach *Vecchio und Collins (1986)*.

Der Vergleichbarkeit wegen werden die Bezeichnungen des *ACI 318-11* an die der *DIN EN 1992-1-1* angeglichen. Für die Berechnungen werden ebenfalls die gleichen Einheiten verwendet.

Nachfolgend ist die Bemessungsgleichung für Biegung mit Querkraft dargestellt. Für vorgespannte Bauteile oder Bauteile unter Zugbeanspruchung gelten andere Gleichungen, näheres hierzu ist der Norm zu entnehmen. Zur Anpassung der Betonfestigkeit vom amerikanischen Standard auf den Europäischen Standard wird gemäß *DAfStb Heft 597* der Summand 1,6 eingeführt.

$$V_{Rd,c} = (0,16 \cdot \lambda_{LC} \cdot \sqrt{f_{ck} + 1,6} + 17 \cdot \rho_l \frac{V_{Ed} \cdot d}{M_{Ed}}) \cdot b_w \cdot d \leq 0,29 \cdot \lambda_{LC} \cdot \sqrt{f_{ck} + 1,6} \cdot b_w \cdot d \quad (2.7)$$

mit :

λ_{LC}	Anpassungsfaktor für Leichtbeton (für Normalbeton = 1,0)
f_{ck}	charakteristischer Wert der Betondruckfestigkeit
ρ_l	Längsbewehrungsgrad
V_{Ed}	einwirkende Querkraft
M_{Ed}	einwirkendes Biegemoment
d	statische Nutzhöhe

$$V_{Ed} \leq \phi \cdot V_{Rd,c} \quad (2.8)$$

mit: $\phi = 0,75$

2.1.4.4 Vergleich der Bemessungsansätze nach Eurocode 2, Model Code 2010 und ACI 318

Nachfolgend werden die Einflussparameter der unterschiedlichen Normen verglichen und dargestellt welchen Einfluss zu haben

Tabelle 2-2: Vergleich Einflussparameter der verschiedenen Normen

Parameter	EC 2	MC 2010	ACI 318-11
Breite	b_w	b_w	b_w
statische Höhe	d	$z=0,9 \cdot d$	d
Betondruckfestigkeit	$f_{ck}^{1/3}$	$f_{ck}^{1/2}$	$f_{ck}^{1/2}$
Maßstabsfaktor	k	in k_v enthalten	-
Korngröße	-	k_{dg}	-
Längsbewehrungsgrad	ρ_l	in k_v enthalten	ρ_l
empirische Faktoren	Ja	Ja	Ja

Wie Tabelle 2-2 zu entnehmen ist, gehen die verschiedenen Parameter unterschiedlich in die Bemessungsansätze ein. Ein paar Parameter (wie z. B. die Korngröße) ist teilweise gar kein Bestandteil der Bemessungsgleichung. Andere Parameter (wie z. B. die Betondruckfestigkeit) haben einen unterschiedlich starken Einfluss auf die Bemessung. Darin spiegelt sich die Uneinigkeit der Forscher über die Einflussparameter und die genauen Tragmechanismen der Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung wider.

2.2 Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung mit Öffnungen

Stahlbetondecken werden immer häufiger als Installationsraum verwendet. Es werden Leitungen unterschiedlicher Größe, Form und Lage in Decken einbetoniert. Diese können Flüssigkeiten, Luft oder auch Strom- und Datenkabel führen. Besonders interessant ist diese Bauweise zur Nutzung von thermischer Bauteilaktivierung.

Je nach Lage und Abmessung der Leitungen kann jedoch eine Reduzierung der Querkrafttragfähigkeit auftreten. Um diesen Einfluss erfassen zu können, wurden in *Thiele (2010)* und *Keil (2011)* Bauteilversuche (3-Punkt-Biegeversuche) durchgeführt. Der daraus resultierende Bemessungsansatz baut auf das Bemessungskonzept des Eurocode 2 für Bauteile ohne Querkraftbewehrung (siehe Kapitel 2.1.4) auf. Der in Kapitel 2.2.2 beschriebene Abminderungsfaktor wurde aus *Thiele (2010)* entnommen. In *DAfStb Heft 600* wurden Anwendungsgrenzen des Bemessungsmodells in Teilen abgeändert.

2.2.1 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

2.2.1.1 Versuchsprogramm

Im Rahmen der Bauteilversuche wurden verschiedene Konfigurationen untersucht. Hierzu zählen kreisrunde Einzelöffnungen, Gruppen von kreisrunden Öffnungen und rechteckige Einzelöffnungen.

In Tabelle 2-3 werden die Parameter der Versuche mit runden Öffnungen inklusive ihrer Minimal- und Maximalwerte dargestellt.

Tabelle 2-3: Versuchparameter und zugehörige Minimal- und Maximalwerte aus *Thiele (2010)* und *Keil (2011)*

Parameter		Grenzen
Rohrdurchmesser / statische Höhe	d_\emptyset / d	0,09 bis 0,50
Achsabstand der Rohre	s	$2,0 \cdot d_\emptyset$ bis $4,0 \cdot d_\emptyset$
Lage in Bauteilhöhe	-	$0,1 d_\emptyset$ oberhalb der Schwerachse
Lage in Bauteillängsachse	-	kritisches Schubfeld und Momentennullpunkt
Betondruckfestigkeit	f_{ck}	28,5 bis 54,7

2.2.1.2 Runde Einzelöffnungen

Bei allen Versuchen aus *Thiele (2010)* stellte sich ein Biegeschubriss ein, der die Öffnung kreuzte (siehe Abbildung 2-13). Als entscheidender Versuchsparameter stellte sich das Verhältnis von Rohrdurchmesser zu statischer Höhe (d_\emptyset/d) heraus. Der genaue Einfluss von einzelnen kreisrunden Öffnungen auf die Querkrafttragfähigkeit wird in Abschnitt 2.2.2 in Form eines Abminderungsfaktors definiert.

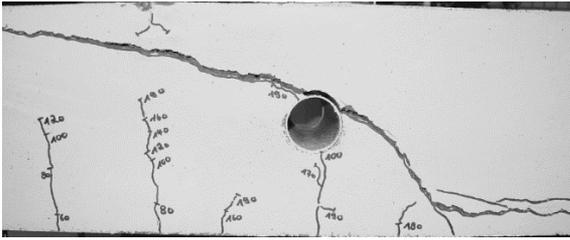


Abbildung 2-13: Versagensbild bei einer kreisrunden Einzelöffnung (Versuch T2 70_mitte aus Thiele (2010))

Die Betondruckfestigkeit hatte keinen signifikanten Einfluss auf diesen Abminderungsfaktor.

Wurde die Lage der Öffnung in Bauteillängsrichtung variiert, so zeigte sich mit größer werdendem Verhältnis von Moment zu Querkraft eine leicht abfallende Querkrafttragfähigkeit.

Bei Bauteilen mit kleinen Einzelöffnungen ($d_0/d \leq 0,1$) konnte keine Traglastreduzierung gegenüber einem Bauteil ohne Öffnungen festgestellt werden. Für $0,1 < d_0/d < 0,2$ konnte eine geringe Traglastreduzierung festgestellt werden. Diese wird ebenfalls durch einen Abminderungsfaktor berücksichtigt.

2.2.1.3 In Gruppen angeordnete runde Öffnungen [Keil (2011)]

Da in der Praxis jedoch nicht nur einzelne Leitungen verbaut werden, wurde der Einfluss einer Gruppenanordnung von Öffnungen auf die Querkrafttragfähigkeit untersucht. Hierbei wurde für verschiedene Leitungsdurchmesser der Achsabstand der Leitungen variiert. Es zeigte sich, dass ab einem bestimmten Abstand der Leitungen zueinander keine weitere Traglastreduzierung gegenüber einer Einzelöffnung auftritt. Für $0,2 \leq d_0/d \leq 0,5$ liegt dieser Achsabstand bei ca. $3 \cdot d_0$, für $d_0/d < 0,2$ liegt er bei ca. $4 \cdot d_0$. In Abbildung 2-14 sind beispielhaft drei Versagensbilder dargestellt.

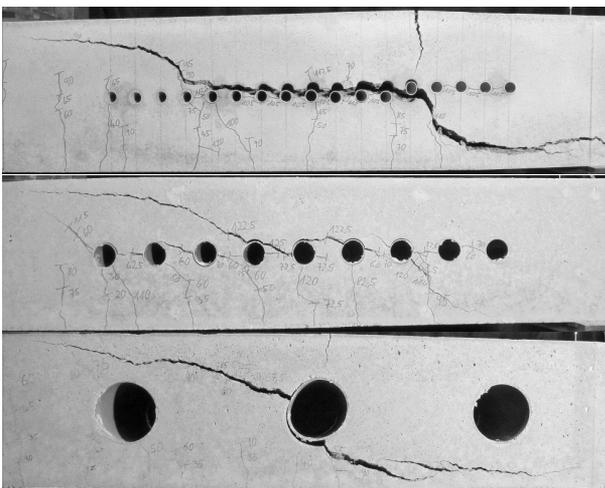


Abbildung 2-14: Typische Versagensbilder (Oben: D25_S2,0; Mitte: D50_S2,0; Unten: D125_S3,0) [Keil (2011)]

2.2.1.4 Rechteckige Öffnungen

Bei den Versuchen mit rechteckigen Öffnungen hat sich ebenfalls ein großer Einfluss der Öffnungsgröße auf die Tragfähigkeit gezeigt. Je breiter die Öffnung bei gleichbleibender Höhe ist, desto geringer ist die Tragfähigkeit. Näheres hierzu in *Thiele (2010)*.

2.2.2 Abminderungsfaktor

2.2.2.1 Runde Einzelöffnungen

Die Versuche aus *Thiele (2010)* zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Reduzierung der Querkrafttragfähigkeit und dem Leitungsdurchmesser auf. Bei großen Öffnungen kann für die Berechnung der Querkrafttragfähigkeit der Restquerschnitt verwendet werden. Berücksichtigt wird diese Tatsache über einen Abminderungsfaktor wie nachfolgend dargestellt wird.

Die nachfolgende Gleichung gilt für den Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung mit runden Einzelöffnungen bzw. in Gruppen angeordneten Öffnungen mit hinreichend großem Abstand. Die Gleichung entspricht, abgesehen vom zusätzlichen Abminderungsfaktor $k_{\varnothing n}$ der Bemessungsgleichung des Eurocode 2 (Gl. (2.4)). Für $k_{\varnothing n}$ ist $k_{\varnothing 1}$ bis $k_{\varnothing 4}$ einzusetzen, je nach Verhältnis von Rohrdurchmesser zu statischer Höhe d_{\varnothing}/d und der Höhenlage der Öffnungen im Bauteil.

Der Einfluss einer Längszug- oder -druckkraft wird von dem Abminderungsfaktor auf der sicheren Seite liegend nicht beeinflusst. Untersuchungen zum Einfluss von Längszugkräften auf die Tragfähigkeit von Stahlbetondecken mit integrierten Leitungen werden derzeit an TU Kaiserslautern sowie Uni Bochum durchgeführt. Erste Ergebnisse hierzu sind in *Eilers et al (2016)* zu entnehmen.

$$V_{Rd,c} = [k_{\varnothing n} \cdot C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d \quad (2.9)$$

mit:

$k_{\varnothing 1} = 1,0$	für	$d_{\varnothing}/d \leq 0,1$
$k_{\varnothing 2} = 1,2 - 2 \cdot d_{\varnothing}/d$	für	$0,1 < d_{\varnothing}/d < 0,2$
	und	$s_{\varnothing} \geq 4 \cdot d_{\varnothing}$
$k_{\varnothing 3} = 1,0 - d_{\varnothing}/d$	für	$0,2 \leq d_{\varnothing}/d \leq 0,5$
	und	die Öffnungen liegen im Bereich der Schwerachse oder darunter
	und	$s_{\varnothing} \geq 3 \cdot d_{\varnothing}$
$k_{\varnothing 4} = 1,1 - d_{\varnothing}/d$	für	$0,2 \leq d_{\varnothing}/d \leq 0,5$
	und	die Öffnungen liegen um mehr als $0,2 \cdot d_{\varnothing}$ über der Schwerachse
	und	$s_{\varnothing} \geq 3 \cdot d_{\varnothing}$

In Abbildung 2-15 sind diese Abminderungsfaktoren grafisch dargestellt. Hierbei sind die Abminderungsfaktoren $k_{\varnothing n}$ über das Verhältnis von Öffnungsdurchmesser zu statischer Höhe (d_{\varnothing}/d) dargestellt.

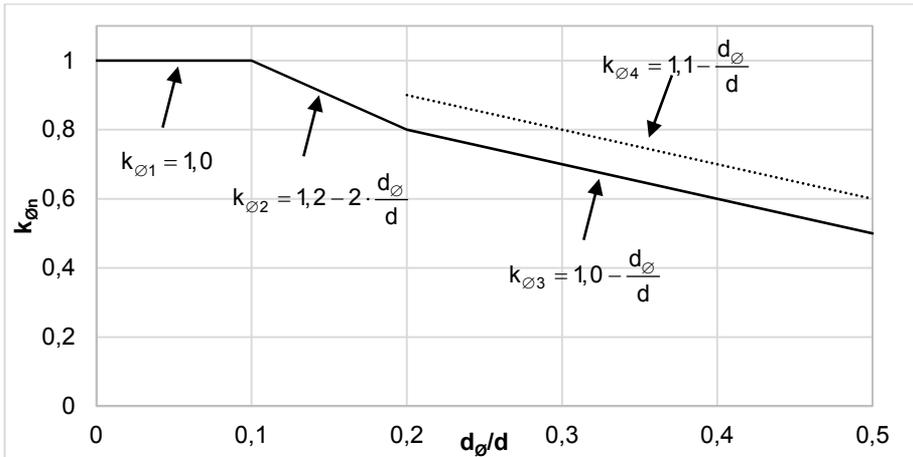


Abbildung 2-15: Abminderungsfaktoren $k_{\phi n}$ in Abhängigkeit vom Verhältnis d_{ϕ}/d

2.2.2.2 In Gruppen angeordnete runde Öffnungen

Nachfolgend sind die Versuchsergebnisse aus *Keil (2011)* grafisch dargestellt. In den Versuchen zeigte sich, zusätzlich zu dem Einfluss des Öffnungsdurchmessers, dass der Achsabstand s_{ϕ} der Öffnungen maßgeblich die Tragfähigkeit beeinflusst. Die in den Diagrammen dargestellte Linie zeigt den Abminderungsfaktor für in Gruppen angeordnete runde Öffnungen für unterschiedliche Achsabstände.

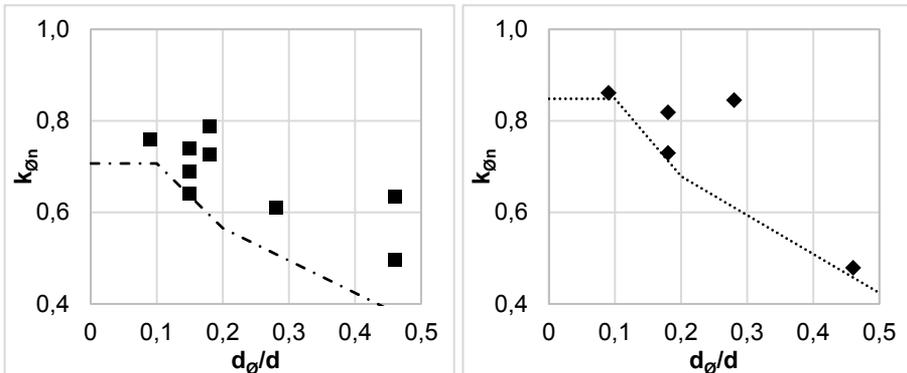


Abbildung 2-16: Versuchsergebnisse für $s_{\phi} = 2,0 \cdot d_{\phi}$ (links) und $s_{\phi} = 2,5 \cdot d_{\phi}$ (rechts) aus *Keil (2011)*

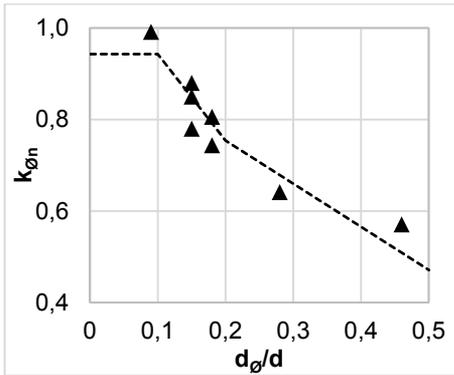


Abbildung 2-17: Versuchsergebnisse für $s_{\phi} = 3,0 \cdot d_{\phi}$ aus Keil (2011)

Ähnlich wie der Abminderungsfaktor für Einzelöffnungen basiert dieser Faktor auf der Berücksichtigung der Querschnittschwächung. Da die in Gruppen angeordneten Öffnungen eine Querschnittschwächung sowohl in Bauteilhöhen- als auch Längsrichtung darstellen (siehe Abbildung 2-18), müssen diese auch beide berücksichtigt werden. Der Querkraftnachweis des Eurocode 2 ist zwar ein reiner Querschnittsnachweis im kritischen Schnitt, soll jedoch durch einen geeigneten Abminderungsfaktor auf diese Gegebenheit angepasst werden. Die Querschnittschwächung im kritischen Schnitt wird wie zuvor auch über den Faktor $k_{\phi n}$ berücksichtigt. Die Schwächung in Bauteillängsachse wird über den Term $1 - d_{\phi}/s_{\phi}$ berücksichtigt. Da die in Gruppen angeordneten Öffnungen den Rissverlauf vorgeben und dieser um ca. 45° geneigt zu den Hauptzugspannungen verläuft, wird der oben genannte Term noch mit dem Faktor Wurzel aus 2 multipliziert (siehe Abbildung 2-18).

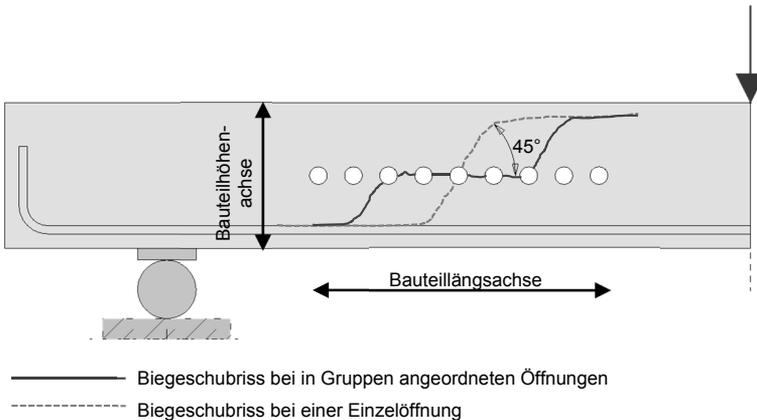


Abbildung 2-18: Beeinflussung des Rissbildes durch in Gruppen angeordnete Öffnungen

Der Abminderungsfaktor für in Gruppen angeordnete Öffnungen berechnet sich somit zu:

$$k_{\varnothing, \text{Gruppe}} = \sqrt{2} \cdot \left(1 - \frac{d_{\varnothing}}{s_{\varnothing}}\right) \cdot k_{\varnothing n} \leq k_{\varnothing n} \quad (2.10)$$

Dieser Faktor ist in den folgenden Grenzen anwendbar:

$$\frac{d_{\varnothing}}{d} \leq 0,2 \quad \Rightarrow \quad 2,0 \cdot d_{\varnothing} \leq s_{\varnothing} \leq 4,0 \cdot d_{\varnothing}$$

$$0,2 \leq \frac{d_{\varnothing}}{d} \leq 0,5 \quad \Rightarrow \quad 2,0 \cdot d_{\varnothing} \leq s_{\varnothing} \leq 3,0 \cdot d_{\varnothing}$$

Oberhalb dieser Grenzen gilt der Faktor für Einzelöffnungen. Dieser bildet generell die Obergrenze für den Gruppenfaktor.

In Abbildung 2-19 sind die Abminderungsfaktoren für drei verschiedene Rohrachsabstände und der Faktor für Einzelöffnungen dargestellt.

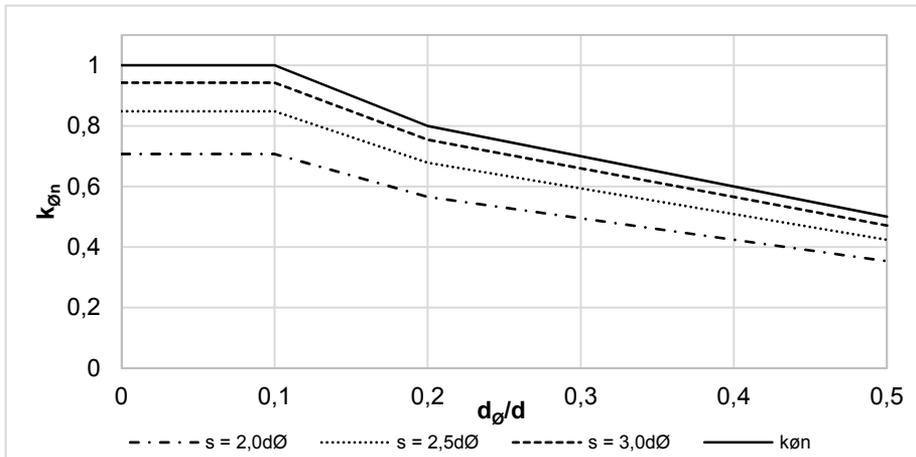


Abbildung 2-19: Abminderungsfaktor für in Gruppen angeordnete Öffnungen

Bei sehr kleinen Öffnungen ist darauf zu achten, dass der lichte Abstand der Öffnungen a_{\varnothing} in Analogie zu den Mindestabständen von Betonstahl die folgenden Werte nicht unterschreitet (Abbildung 2-20). Ein fehlerfreies Betonieren und Verdichten ist sonst nicht sichergestellt.

$$a_{\varnothing} \geq \max \begin{cases} d_{\varnothing} \\ 20 \text{ mm} \end{cases} \quad \text{für } d_g \leq 16 \text{ mm}$$

$$a_{\varnothing} \geq \max \begin{cases} d_{\varnothing} \\ d_g + 5 \text{ mm} \end{cases} \quad \text{für } d_g > 16 \text{ mm}$$

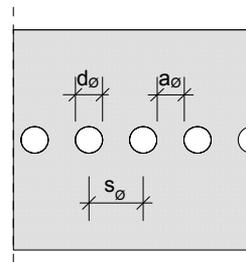


Abbildung 2-20: Mindestabstände der Leitungen

Werden die zuvor definierten Abstände unterschritten, so können die in Gruppen angeordneten Öffnungen auf der sicheren Seite liegend zu einer rechteckigen Öffnung zusammengefasst werden.

2.2.2.3 Rechteckige Öffnungen

Für rechteckige Öffnungen wird nach *Thiele (2010)* der Abminderungsfaktor $k_{\emptyset n}$ in Gleichung (2.9) durch den Faktor k_{\square} ersetzt. Dieser Abminderungsfaktor gilt jedoch nur für ein Verhältnis von Öffnungsbreite zu Öffnungshöhe von $b_{\square}/d_{\square} \leq 5$. Der Abminderungsfaktor für rechteckige Öffnungen lautet:

$$k_{\square} = 0,95 - \frac{d_{\square}}{d} - \left(\frac{d_{\square}}{d} - 0,03\right) \cdot \ln\left(\frac{b_{\square}}{d_{\square}}\right) \quad (2.11)$$

mit:

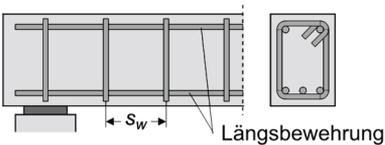
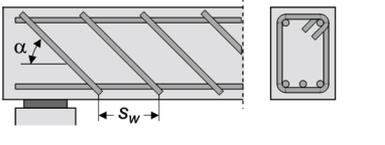
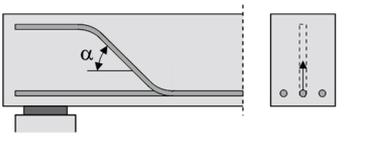
- d_{\square} = Öffnungshöhe
- b_{\square} = Öffnungsbreite
- d = statische Höhe

2.3 Querkrafttragfähigkeit mit Querkraftbewehrung

2.3.1 Allgemeines

Die in Balken und Platten eingebaute Querkraftbewehrung soll zum einen ein duktileres Versagen sicherstellen, zum anderen die Tragfähigkeit erhöhen. Zu diesen Zwecken stehen verschiedene Bewehrungselemente zur Verfügung. In Tabelle 2-4 sind diese Bewehrungselemente tabellarisch inkl. einiger Vor- und Nachteile dargestellt.

Tabelle 2-4: Übliche Bewehrungselemente einschließlich der Auflistung einiger Vor- und Nachteile [Bilder aus *Zilch und Zehetmaier (2010)*]

Bewehrungselement	Vor- und Nachteile
<p>senkrechte Bügel</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - einfacher Einbau - gute, aber nicht ideale Tragwirkung
<p>geneigte Bügel</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - komplizierter Einbau - das Verdichten des Betons wird erschwert - „perfekte“ Tragwirkung, da nahezu senkrecht zum Biegeschubriss
<p>aufgebogene Längsstäbe</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - nur an Endauflagern möglich - nur ein Teil der Biegezugbewehrung darf aufgebogen werden - Bügel sind zusätzlich erforderlich

Bei geringen Lasten unterscheidet sich das Tragverhalten querkraftbewehrter Bauteile nicht im Vergleich zu unbewehrten Bauteilen. Erst bei Bildung erster geneigter Schubrisse kommt die Querkraftbewehrung zum Tragen. Der Rissöffnung wird durch die Dehnsteifigkeit der Bewehrung entgegengewirkt. Die Querkraftbewehrung steigert aber nicht nur die Tragfähigkeit durch direkte Kraftaufnahme sondern erhöht zudem den Tragmechanismus der Rissverzahnung. Somit wird der eigentliche Versagensriss zusammengehalten und ein weiteres Öffnen des Risses wird verhindert bzw. verlangsamt. Abbildung 2-21 zeigt schematisch den Zusammenhang der Schubrissbreiten und der Versagenslasten für unterschiedliche Bewehrungskonfigurationen.

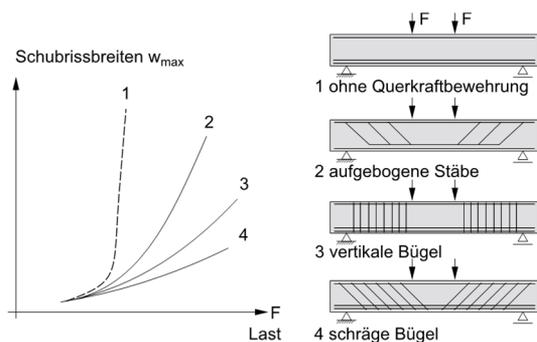


Abbildung 2-21: Wirksamkeit der Querkraftbewehrung in Abhängigkeit der Schubrissbreite [Zilch und Zehetmaier (2010)]

Zur Sicherstellung eines duktilen Bauteilversagens wird auch bei Bauteilen ohne statisch erforderliche Querkraftbewehrung – mit Ausnahmen von Platten - eine Mindestmenge an Querkraftbewehrung eingebaut. Die Mindestquerkraftbewehrung dient zur Aufnahme der Schubrisslast $V_{Rm,c}$ (siehe Abschnitt 2.3.4).

2.3.2 Versagensarten

Bei querkraftbewehrten Bauteilen können die folgenden Versagensarten auftreten.

Biegeschubversagen

Das Biegeschubversagen bei querkraftbewehrten Bauteilen gleicht dem von unbewehrten Bauteilen. Auch hier dringen Biegeschubrisse in die Druckzone vor. Reicht der verbleibende Druckzonenquerschnitt nicht mehr aus, versagt das Bauteil (siehe Abbildung 2-22). Dieser Mechanismus setzt ein Fließen der Querkraftbewehrung voraus, da sich ansonsten der Biegeschubriss nicht weit genug öffnen könnte.

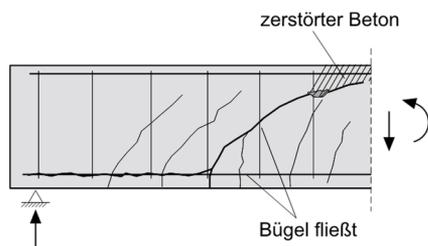


Abbildung 2-22: Biegeschubversagen von Trägern mit Querkraftbewehrung [Zilch und Zehetmaier (2010)]

Stegzugversagen

Bei Bauteilen mit profiliertem Querschnitt können infolge hoher Hauptzugspannungen im Steg Diagonalrisse auftreten. Die schrägen Risse dringen in den Zug- und Druckgurt vor und leiten das Biegeschubversagen ein (siehe Abbildung 2-23). Für dieses Versagen ist ebenfalls das Fließen der Querkraftbewehrung ausschlaggebend.

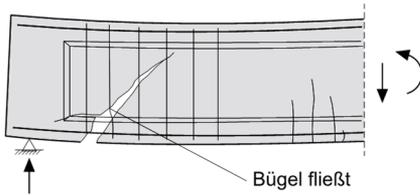


Abbildung 2-23: Stegzugversagen von Trägern mit Querkraftbewehrung bei profiliertem Steg [Zilch und Zehetmaier (2010)]

Stegdruckversagen

Bei dünnen, hochbewehrten Trägerstegen kann es zum Versagen der Druckstreben kommen. Hierbei platzt der Beton im Stegbereich ab und führt zum Versagen des Bauteils (siehe Abbildung 2-24).

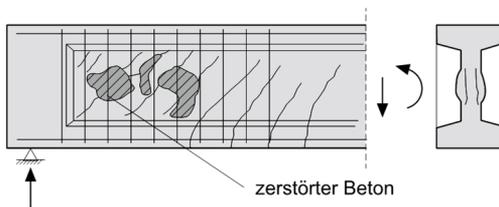


Abbildung 2-24: Stegdruckversagen von Trägern mit Querkraftbewehrung bei profiliertem Steg [Zilch und Zehetmaier (2010)]

Verankerungsversagen

Wie bei Bauteilen ohne Querkraftbewehrung ist auch bei Bauteilen mit Querkraftbewehrung ein Verankerungsversagen möglich. Dies gilt sowohl für die Biege- als auch die Querkraftbewehrung. Diese Versagensart ist durch konstruktive Maßnahmen zu verhindern.

Aufspalten des Stegs bei Aufbiegungen

Bei Aufbiegungen kann es aufgrund der Spannungskonzentrationen auf die einzelnen Stäbe zu Querkzugkräften kommen, die zu Spaltrissen und schlussendlich zum Versagen des Bauteils führen (siehe Abbildung 2-25). Daher müssen Aufbiegungen grundsätzlich mit Bügeln kombiniert werden.

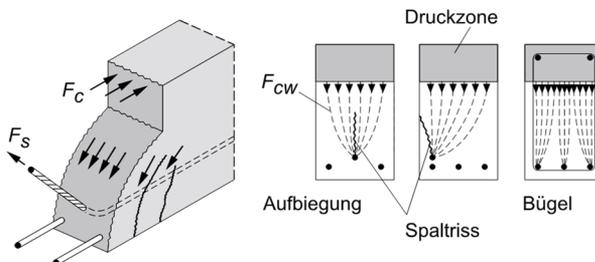


Abbildung 2-25: Aufspalten des Stegs bei Verwendung von Aufbiegungen [Zilch und Zehetmaier (2010)]

2.3.3 Tragmodell

Wird der idealisierte Kräfteverlauf eines Balkens betrachtet (Abbildung 2-26), so liegt es nahe, das Tragverhalten eines querkraftbewehrten Bauteils mittels Fachwerkanalogie abzubilden.

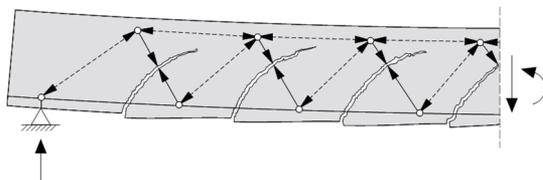


Abbildung 2-26: Idealisierter Kräftefluss bei einem Balken mit geneigten Biegeschubrisse
[Ziich und Zehetmaier (2010)]

Die klassische Fachwerkanalogie nach Moersch geht von einem parallelgurtigen Fachwerk mit 45° Druckstrebenneigung und senkrechten Zugpfosten aus. Der Biegelabstand s_w entspricht dem inneren Hebelarm z , die Kraft im Bügel F_{sw} entspricht der einwirkenden Last F . Das Stabwerk ist jedoch nicht ausreichend tragfähig, da sich auch Biegeschubrisse zwischen den Bügeln bilden können. Daher müssen die Bügel enger angeordnet werden. Hieraus hat sich das Netzfachwerk entwickelt. Es handelt sich dabei um überlagerte klassische Fachwerke. Da es sich um ein hochgradig statisch unbestimmtes Fachwerk handelt, kann es als Überlagerung zweier unabhängiger klassischer Stabwerke abgebildet werden. Der Biegelabstand s_w entspricht dem halben inneren Hebelarm z , die Kraft im Bügel F_{sw} entspricht der halben einwirkenden Last F . Im Vergleich zum klassischen Fachwerk nach Moersch werden doppelt so viele, dafür halb so starke Bügel verbaut. Die Überlagerung vieler, nur wenig gegeneinander versetzter Fachwerke führt zu den sog. Schubfeldmodellen. Hierbei erfolgt eine Aufteilung des Bauteils in D - und B - Bereiche. Die D - Bereiche sind die Diskontinuitätsbereiche (z.B. Lasteinleitung, Auflager, Störstellen) und müssen gesondert berechnet werden. Die B - Bereiche können über Stabwerkmodelle abgebildet werden. Die Druckstrebenneigung ist dabei im Gegensatz zur klassischen Fachwerkanalogie veränderlich.

Die Berechnung der Querkrafttragfähigkeit gemäß Fachwerkanalogie liefert allerdings deutlich zu hohe Bewehrungsmengen im Vergleich zu den in Bauteilversuchen ermittelten Bewehrungsmengen zur Erzielung dieser Tragfähigkeiten. Grund hierfür sind die in der Fachwerkanalogie vernachlässigten Tragwirkungen des Betons. Um diese Einflüsse zu berücksichtigen, werden für die Bemessung nach Eurocode 2 gegenüber der Rissneigung flacher geneigte Druckstreben verwendet. Des Weiteren wird das Nachweiskonzept um Ansätze aus der Plastizitätstheorie erweitert. Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Plastizitätstheorie ist ein ausreichendes Verformungsvermögen, d. h. ein Fließen der Bewehrung im GZT. Details zur Plastizitätstheorie ist der gängigen Literatur zu entnehmen (Bachmann und Thürlimann (1966); Marti (1985); Muttoni (1990)).

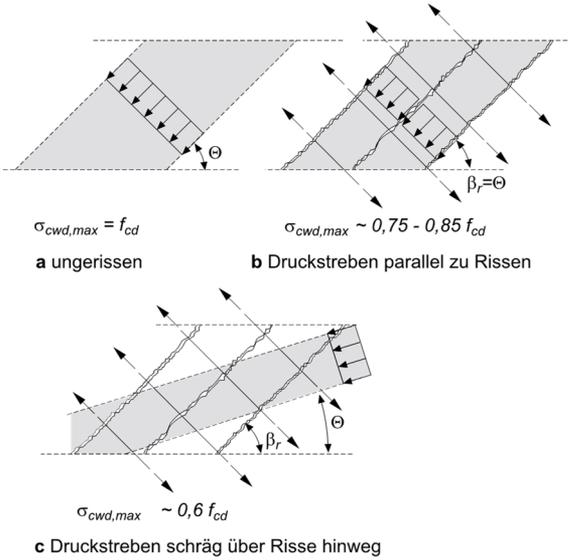


Abbildung 2-28: Effektive Betondruckfestigkeit der Druckstreben [Zilch und Zehetmaier (2010)]

Die Anwendung der Plastizitätstheorie setzt voraus, dass die eingebaute Bewehrung für den gewählten Druckstrebenneigungswinkel die Fließgrenze erreicht. Nur so können sich die inneren Kräfte umlagern, bis sich ein stabiles Gleichgewicht mit Druckstreben des gewählten Neigungswinkels einstellt. Da insbesondere der Beton nur eine eingeschränkte plastische Verformbarkeit zulässt, wird der Druckstrebenwinkel begrenzt. Zudem gibt es nach Reineck (1990) eine mechanisch begründete, am Fachwerkmodell mit Rissreibung hergeleitete untere Grenze des Druckstrebenwinkels.

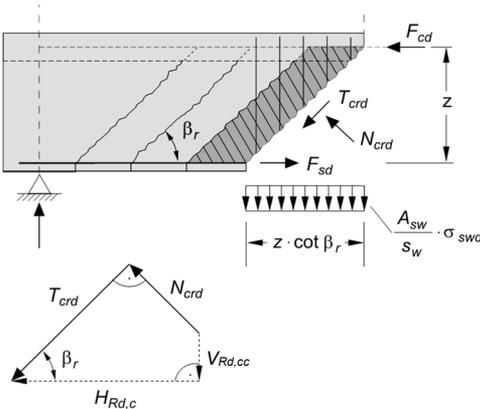


Abbildung 2-29: Kräfte am Biegeschubriss zur Herleitung Grenzwertes der Druckstrebenneigung nach Reineck (1990) [Zilch und Zehetmaier (2010)]

Abbildung 2-29 stellt die Kräfte am Biegeschubriss dar. Bildet man nun das Kräftegleichgewicht unter der Annahme, dass der Winkel des Biegeschubrisses 40°

beträgt und führt einige mathematische Operationen durch, so erhält man den Rechenwert für den Druckstrebenneigungswinkel.

$$0,58 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2 + 1,4 \cdot \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}}}{1 - \frac{V_{Rd,cc}}{V_{Ed}}} \leq 3,0 \quad (2.14)$$

mit:

σ_{cd}	= Betonlängsspannung
f_{cd}	= Betondruckfestigkeit
$V_{Rd,cc}$	= Traganteil des Betons
V_{Ed}	= einwirkende Querkraft

Der Traganteil $V_{Rd,cc}$ ist nicht mit $V_{Rd,c}$ gleichzusetzen. Bei Bauteilen ohne Querkraftbewehrung öffnet sich der Biegeschubriss sehr weit, was zum Bruch führt. Bei Bauteilen mit Querkraftbewehrung bilden sich unter Umständen mehrere eng beieinander liegende Schubrissse. Somit stellt sich ein völlig anderer Spannungs - Dehnungszustand ein. Der Betontraganteil ist – wie auch bei unbewehrten Bauteilen – empirisch ermittelt. Er kann als Vertikalkomponente der Reibungskräfte in schrägen Rissen gedeutet werden.

$$V_{Rd,cc} = \left[c \cdot 0,48 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot \left(1 - 1,2 \cdot \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}} \right) \right] \cdot b_w \cdot z \quad (2.15)$$

mit:

c	= 0,5
σ_{cd}	= Betonlängsspannung
f_{ck}	= Betondruckfestigkeit
b_w	= Stegbreite
z	= innerer Hebelarm (= 0,9 · d)

Wird für eine Bemessung $\cot \theta = 1,2$ angenommen, so wird der Betontraganteil $V_{Rd,cc}$ vernachlässigt, da der Druckstrebenneigungswinkel θ mit dem Neigungswinkel β des Biegeschubrisses gleichgesetzt wird. Somit gibt es theoretisch keine Rissverzahnungsspannungen.

Herleitung der Mindestquerkraftbewehrung des Eurocode 2:

Ist bei Balken rechnerisch keine Querkraftbewehrung erforderlich, so ist trotzdem eine Mindestquerkraftbewehrung einzubauen. Die Mindestquerkraftbewehrung muss bei unplanmäßigem Bauteilversagen die freiwerdende Schubrislast $V_{Rm,c}$ aufnehmen.

Nach *Hegger et al (12-1999)* gilt:

$$V_{Rm,c} = 0,197 \cdot \kappa \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d \quad (2.16)$$

mit: $\kappa = 2,0$
 $\rho_l = 1,4\%$

$$\Rightarrow V_{Rm,c} \approx 0,44 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot b_w \cdot d \quad (2.17)$$

Nach der Rissbildung muss die Schubrislast auf die Mindestbewehrung umgelagert werden. Aus dem Stabwerkmodell (Abbildung 2-27) folgt damit:

$$\begin{aligned} V_{Rk,sy} &= a_{sw} \cdot f_{yk} \cdot z \cdot \cot \theta \\ &= \rho_w \cdot b_w \cdot f_{yk} \cdot z \cdot \cot \theta \end{aligned} \quad (2.18)$$

Durch Gleichsetzen der Gleichungen (2.17) und (2.18) erhält man die Mindestquerkraftbewehrung. Es gilt demnach:

$$\begin{aligned} V_{Rm,c} &= V_{Rk,sy} \\ \Leftrightarrow 0,44 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot b_w \cdot d &= \rho_{w,min} \cdot b_w \cdot f_{yk} \cdot z \cdot \cot \theta \\ \Leftrightarrow \rho_{w,min} &= \frac{0,44 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot b_w \cdot d}{b_w \cdot f_{yk} \cdot z \cdot \cot \theta} \\ &= \frac{0,44 \cdot f_{ck}^{1/3}}{f_{yk} \cdot \underbrace{0,9 \cdot d}_{=0,9 \cdot d} \cdot \cot \theta} \approx 0,163 \cdot \frac{f_{ck}^{1/3}}{f_{yk}} = 0,163 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \end{aligned}$$

2.3.4.2 Model Code 2010

Die Bemessung für Bauteile mit Querkraftbewehrung kann – genau wie die Bemessung für Bauteile ohne Querkraftbewehrung - in unterschiedlichen Genauigkeitsstufen (Level of Approximation (LOA)) erfolgen. Das grundlegende Konzept lautet:

$$V_{Rd,sy} = \frac{A_{sw}}{s_w} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta \quad (2.19)$$

$$V_{Rd} = V_{Rd,sy} \leq V_{Rd,max} \quad (2.20)$$

$$V_{Rd,max} = b_w \cdot z \cdot k_c \cdot f_{cd} \cdot \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \alpha} \quad (2.21)$$

mit:

$$k_c = k_\varepsilon \cdot \eta_{f_c} = \text{Abminderungsfaktor der Festigkeit}$$

$$\text{mit: } \eta_{f_c} = \left(\frac{30}{f_{ck}} \right)^{1/3} \leq 1,0$$

k_ε Berücksichtigung des Dehnungszustands
in Abhängigkeit vom LOA

Für die Level I Approximation gilt:

- Der Druckstrebenneigungswinkel darf in den folgenden Grenzen frei gewählt werden:
 $\theta_{min} \leq \theta \leq 45^\circ$
 mit: $\theta_{min} = 25^\circ$ für Bauteile mit nennenswerter Druckspannung
 $\theta_{min} = 30^\circ$ für schlaffbewehrte Bauteile ohne Längsspannungen
 $\theta_{min} = 40^\circ$ für Bauteile mit nennenswerter Zugspannung
 - $k_\varepsilon = 0,55$
- $$V_{Rd,max} = b_w \cdot z \cdot 0,55 \cdot \left(\frac{30}{f_{ck}} \right)^{1/3} \cdot f_{cd} \cdot \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \alpha}$$

Für die Level II Approximation gilt:

- Der Druckstrebenneigungswinkel darf in den folgenden Grenzen frei gewählt werden:
 $\theta_{min} \leq \theta \leq 45^\circ$
 mit: $\theta_{min} = 20^\circ + 10000 \cdot \varepsilon_x$
 mit: ε_x siehe Abschnitt 2.1.4.2
- Berücksichtigung des Dehnungszustands

$$k_\varepsilon = \frac{1}{1,2 + 55 \cdot \varepsilon_1} \leq 0,65$$

 mit: $\varepsilon_1 = \varepsilon_x + (\varepsilon_x + 0,002) \cdot \cot^2 \theta$

Für die Level III Approximation setzt sich die Gesamttragfähigkeit aus dem Stahl- und dem Betontraganteil zusammen, es gilt dann:

$$V_{Rd} = V_{Rd,sy} + V_{Rd,c} \quad (2.22)$$

Die Berechnung von $V_{Rd,sy}$ und $V_{Rd,max}$ erfolgt analog zu Level II. Die Berechnung von $V_{Rd,c}$ erfolgt wie folgt:

$$V_{Rd,c} = k_v \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot z \cdot b_w$$

mit:

$$k_v = \frac{0,4}{1 + 1500 \cdot \varepsilon_x} \cdot \left(1 - \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \right) \geq 0$$

mit : ε_x nach Abschnitt 2.1.4.2

Mindestquerkraftbewehrung nach Model Code 2010

Für die Mindestquerkraftbewehrung gilt:

$$\rho_{w,min} = 0,08 \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \quad (2.23)$$

2.3.4.3 ACI 318-11

Die Bemessung nach *ACI 318-11* basiert auf der Modified Compression Filed Theory (MCFT) nach *Vecchio und Collins (1986)*.

Der Vergleichbarkeit wegen, werden die Bezeichnungen des *ACI 318-11* an die der *DIN EN 1992-1-1* angeglichen. Für die Berechnungen werden ebenfalls die gleichen Einheiten verwendet. Nachfolgend ist die Bemessungsgleichung für Biegung mit Querkraft dargestellt. Für vorgespannte Bauteile oder Bauteile unter Zugbeanspruchung gelten andere Gleichungen. Für den Betontraganteil gilt weiterhin die Gleichung für Bauteile ohne Querkraftbewehrung. Hier gibt es einen deutlichen Unterschied zur Bemessung nach *DIN EN 1992-1-1*. Zur Anpassung der Betonfestigkeit vom amerikanischen Standard auf den Europäischen Standard wird der Summand 1,6 nach *DAfStb Heft 597* eingeführt.

$$V_{Rd,c} = (0,16 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_{ck} + 1,6} + 17 \cdot \rho_l \frac{V_{Ed} \cdot d}{M_{Ed}}) \cdot b_w \cdot d \leq 0,29 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f_{ck} + 1,6} \cdot b_w \cdot d \quad (2.24)$$

mit :

λ	Anpassungsfaktor für Leichtbeton (für Normalbeton = 1,0)
f_{ck}	charakteristischer Wert der Betondruckfestigkeit
ρ_l	Längsbewehrungsgrad
V_{Ed}	einwirkende Querkraft
M_{Ed}	einwirkendes Biegemoment
d	statische Nutzhöhe

Für den Stahltraganteil gilt ähnlich wie nach Eurocode 2

$$V_{Rd,sy} = \frac{A_{sw} \cdot f_{ywd} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) \cdot d}{s_w} \quad (2.25)$$

$$V_{Ed} \leq \phi \cdot (V_{Rd,c} + V_{Rd,sy}) \quad (2.26)$$

mit: $\phi = 0,75$

Mindestquerkraftbewehrung nach ACI 318-11

Für die Mindestquerkraftbewehrung gilt:

$$\rho_{w,min} = 0,062 \cdot \frac{\sqrt{f_{ck} + 1,6}}{f_{yk}} \geq \frac{0,35}{f_{yk}} \quad (2.27)$$

2.3.4.4 Vergleich der Bemessungsansätze nach Eurocode 2, Model Code 2010 und ACI 318

Wie auch die Bemessungsansätze für Bauteile ohne Querkraftbewehrung weisen die Gleichung für Bauteile mit Querkraftbewehrung teils deutliche Unterschiede auf. Zwar ist hierbei der Traganteil der Querkraftbewehrung gleichermaßen berücksichtigt – dieser ist auch mechanisch begründet und hergeleitet – der Traganteil des Betons jedoch nicht. Für alle Bemessungsansätze wurde dieser empirisch ermittelt.

Deutliche Unterschiede sind in der Definition des Mindestquerkraftbewehrungsgrades zu finden.

Eurocode 2

$$\rho_{w,\min} = 0,163 \cdot \frac{f_{ck}^{1/3}}{f_{yk}}$$

Model Code 2010

$$\rho_{w,\min} = 0,08 \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}$$

ACI 318-11

$$\rho_{w,\min} = 0,062 \cdot \frac{\sqrt{f_{ck} + 1,6}}{f_{yk}}$$

Wie auch in den Bemessungsgleichungen für Bauteile ohne Querkraftbewehrung ist auch hier ein unterschiedlicher Exponent für die Umrechnung der Betondruckfestigkeit auf die Betonzugfestigkeit zu finden. Berechnet man den Mindestbewehrungsgrad für verschiedene Betonfestigkeiten relativiert sich der Unterschied ein wenig, siehe Tabelle 2-5.

Tabelle 2-5: Vergleich der Mindestbewehrungsgrade für EC2, MC2010 und ACI 318-11

Betondruckfestigkeit	$\rho_{w,\min}$		
	EC 2	MC 2010	ACI 318-11
25	0,95	0,80	0,64
35	1,07	0,95	0,75
45	1,16	1,07	0,85

2.4 Querkrafttragfähigkeit mit Querkraftbewehrung und Öffnungen in Balken

Bislang liegen ausschließlich Ergebnisse zur Querkrafttragfähigkeit von Balken mit Öffnungen und Bügeln oder Aufbiegungen als Querkraftbewehrung vor. Hierzu zählen die Arbeiten von *Mansur (2006)* und *Neff (2006)*. Eine Datenbank dieser Versuche wurde in *DAfStb Heft 566* zusammengefasst. Der aktuelle Stand der Forschung ist in *Neff (2006)* zusammengefasst dargestellt.

Die in diesen Arbeiten dargestellten Tragmodelle beschreiben den Bereich um die Öffnungen herum mittels Ober- und Untergurten und Pfosten zwischen den Öffnungen (siehe Abbildung 2-30).

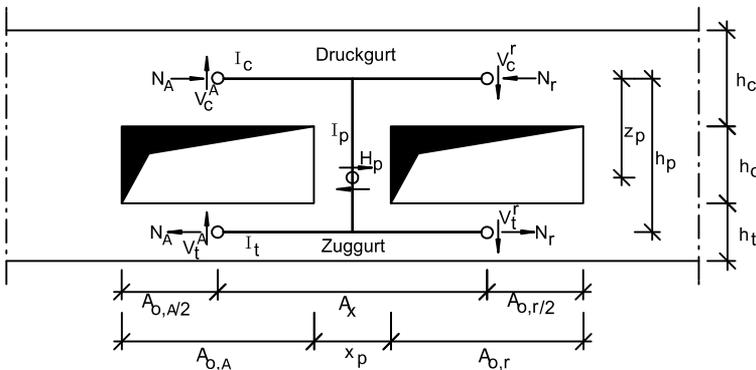


Abbildung 2-30: Tragmodell nach Schnellenbach-Held und Neff (2006)

Mit Hilfe dieser Modelle kann die Querkraftbewehrung berechnet und konstruiert werden. Sie besteht i. d. R. aus klassischen Bügeln um die Öffnung herum.

Mansur beschreibt in *Mansur (2006)* und *Mansur (09-2006)* zwei verschiedene Fälle (siehe Abbildung 2-31). Fall 1 (Beam-type failure), der Versagensriss verläuft durch die Öffnung mit einer Neigung von ca. 45° und verhält sich damit – auf das Rissbild bezogen - analog zu einem ungeschwächten Bauteil. Die Traglast ist jedoch geringer. Dieser Fall tritt meist bei Öffnungen mit $d_o/d < 0,4$ ein. In Fall 2 (Frame-type failure) verläuft der Schubriss durch den Obergurt und den Untergurt versetzt zueinander. Somit verhalten sich die beiden Gurte wie zwei voneinander getrennte Balken, die jeweils einen Teil der Gesamtlast abtragen. Das System funktioniert somit wie ein Rahmen. Dieser Fall tritt bei runden Öffnungen mit einem Durchmesser größer als $0,4 \cdot d$ und rechteckigen Öffnungen ein.

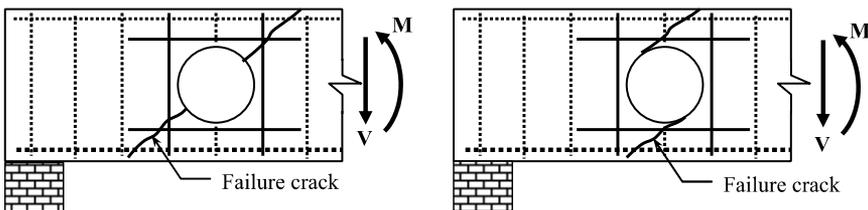


Abbildung 2-31: Links Fall 1, rechts Fall 2 [Mansur (09-2006)]

Für Fall 1 errechnet sich die Querkrafttragfähigkeit aus der Summe des Traganteils des Betons und der Bewehrung. Die wichtigsten Parameter sind in Abbildung 2-32 dargestellt. Es gilt:

$$V_n = V_c + V_{sw} \quad (2.28)$$

V_c ist dabei der Traganteil des Betons. Dieser errechnet sich wie folgt:

$$V_c = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot (d - d_0) \quad (2.29)$$

Die Berücksichtigung der Querschnittsschwächung erfolgt hierbei analog zu Kapitel 2.2.2. Der Stahltraganteil wird wie folgt berechnet:

$$V_{sw} = \frac{A_v \cdot f_{yv}}{s} \cdot (d_v - d_0) \quad (2.30)$$

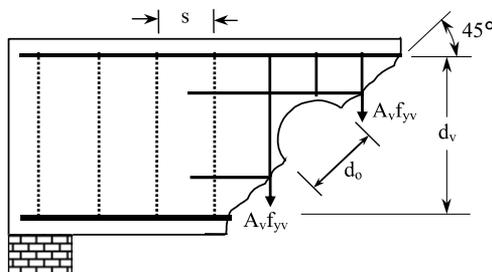


Abbildung 2-32: Fall 1 zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit eines geschwächten, querkraftbewehrten Stahlbetonbalkens nach Mansur (09-2006)

Bei Fall 2 werden der Obergurt und der Untergurt getrennt betrachtet. Die beiden Gurte übernehmen dabei den ihrer Fläche äquivalenten Anteil der einwirkenden Querkraft.

Der Nachweis erfolgt dann für den Obergurt als Querkraft mit Drucknormalkraft und für den Untergurt als Querkraft mit Zugnormalkraft nach Norm. Die Zug- bzw. Drucknormalkraft errechnet sich über das Verhältnis von einwirkendem Moment und innerem Hebelarm ($z = d - a/2$). Abbildung 2-33 zeigt das innere Kräftegleichgewicht, sowie die Definition der effektiven statischen Höhe.

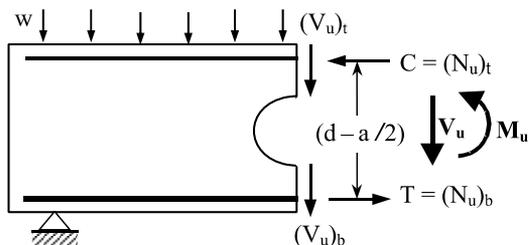


Abbildung 2-33: Fall 2 zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit eines geschwächten, querkraftbewehrten Stahlbetonbalkens nach Mansur (09-2006)

2.5 Querkrafttragfähigkeit von Elementdecken mit Gitterträgern

2.5.1 Allgemeines

Das Bauen mit Betonfertigteilen hat in den letzten Jahrzehnten immer mehr an Akzeptanz gewonnen. Die Vorteile der Wirtschaftlichkeit, Fertigungsqualität und Effizienz sind vergleichslos. Besonders die Elementbauweise bei Hochbaudecken spielt in der Baupraxis eine maßgebende Rolle. Etwa 70 % der Hochbaudecken in Deutschland werden in dieser Bauweise ausgeführt [Furche und Bauermeister (2009)].

Das Bauen mit Elementdecken bietet zahlreiche Vorteile. Die Verbindungen zu anderen Bauteilen sind nahezu wie bei Ortbetonlösungen möglich und bieten somit einen großen Vorteil gegenüber Vollfertigteilen. Elementdecken sind dabei sehr wirtschaftlich, da auf der Baustelle ein geringer Schalungsaufwand nötig ist und somit die Bauzeit verringert wird. Außerdem sind sie aufgrund der industriellen Herstellung mit Umlaufanlagen vergleichsweise günstig in der Produktion. Des Weiteren bieten sie eine hohe Variabilität und Herstellungsqualität.

Die in Elementdecken verwendeten Gitterträger erfüllen gleich mehrere Funktionen. Zum einen stellen sie als Fachwerk im Bau -, Transport - und Montagezustand die Tragfähigkeit sicher, zum anderen kann der Bewehrungsquerschnitt der Gurte zur statisch erforderlichen Bewehrung im Endzustand angerechnet werden. Außerdem stellen die Diagonalen den Verbund der Elementplatte mit der Ortbetongänzung sicher. Des Weiteren können sie als Querkraft- und Durchstanzbewehrung angesetzt werden.

In Deutschland haben sich folgende Maße und Eigenschaften als Standard etabliert [Furche und Bauermeister (2009)].

Elementplatte:

- Plattendicke 5 – 7 cm;
- Plattenbreite 2,50 m (transportbedingt).

Gitterträger:

- 2 Untergurte → ermöglicht Stapelbarkeit und einfachen Einbau;
- durchgehende Diagonalschlangen mit Knotenabständen von ca. 20 cm führen dazu, dass meist eine Diagonale auf dem Endauflager endet;
- Diagonalen und Obergurt aus glattem, kaltgezogenen Bewehrungsstahl (B 500 G), Streckgrenze von 420 N/mm;
- Untergurte aus geripptem Betonstahl (B 500 M);
- Diagonalen 5 – 7 mm; es werden jedoch fast ausschließlich 7 mm Diagonalen verwendet.

Die meisten Hersteller verwenden folgende Nomenklatur für die Gitterträger (hier am Beispiel der Firma Filigran): Typ Höhe – UG – Dia – OG

z.B.: Typ E 17 – 06710; dies entspricht einem Gitterträger Typ E, mit einer Höhe von 17 cm, 2 Untergurtstäben mit 6 mm, Diagonalen mit 7 mm und einem Obergurt mit 10 mm Durchmesser.

2.5.2 Tragverhalten

Das Biege- und Querkrafttragverhalten von Elementdecken unterscheidet sich bei einer ausreichend rauen Fuge nicht von monolithisch hergestellten Bauteilen. Daher ist das Tragverhalten der Verbundfuge maßgeblich für das Gesamttragverhalten verantwortlich.

2.5.2.1 Unbewehrte Fuge

Der Haftverbund einer unbewehrten Fuge setzt sich aus physikalisch-chemischen Wechselwirkungen und einer mikromechanischen Verzahnung zusammen. Er hängt maßgeblich von der Betonzugfestigkeit, der Haftfläche, der Rauigkeit und der Benetzungsfähigkeit des Frischbetons ab. Der Haftverbund berechnet sich nach *DIN EN 1992-1-1* zu:

$$\tau_{Rj,ad} = c \cdot f_{ct} \tag{2.31}$$

Zusätzlich zum Haftverbund wird bei Druckspannungen senkrecht zur Fuge wegen der Oberflächenrauigkeit eine Verzahnung der Rissufer und somit eine weitere Kräfteübertragung aktiviert. Dieser Traganteil wird als Coulomb'scher Reibungsanteil bezeichnet, und errechnet sich zu:

$$\tau_{Rj,r} = -\mu \cdot \sigma_N \tag{2.32}$$

2.5.2.2 Bewehrte Fuge

Nachdem die Haftreibung überwunden ist, treten drei durch die Bewehrung erzeugte Tragmechanismen auf:

1. Durch die Relativverschiebung werden die Bewehrungsstäbe quer zur Stabachse beansprucht und wirken so als Scherbolzen. Sie tragen die Kräfte über Stabbiegung und Leibungspressungen ab.
2. Durch die raue Oberfläche entsteht aufgrund der Relativverschiebung auch zwangsläufig ein Öffnen der Fuge. Dies erzeugt eine Normalkraft in den Bewehrungsstäben, was dem Öffnen der Fuge entgegenwirkt und gleichzeitig Drucknormalspannungen auf die Fuge erzeugt, was wiederum zu einem Coulomb'schen Reibungsanteil führt.
3. Bei Bewehrung die die Fuge nicht senkrecht schneidet erzeugt die Scherbewegung Längsdehnungen in der Bewehrung. Ein Teil der Schubbeanspruchung wird demnach unabhängig vom Öffnen der Fuge direkt von der Bewehrung aufgenommen.

Für den Traganteil der Bewehrung ergibt sich die nachfolgende Gleichung.

$$\tau_{Rj,sy} = \mu \cdot \rho_s \cdot f_{sy} \cdot \sin \alpha + \rho_s \cdot f_{sy} \cdot \cos \alpha \tag{2.33}$$

Alle Traganteile sind in Abbildung 2-34 dargestellt.

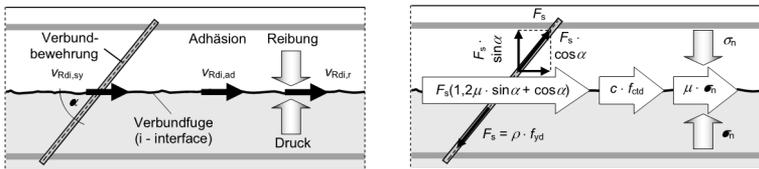


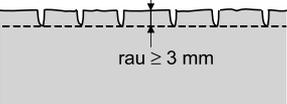
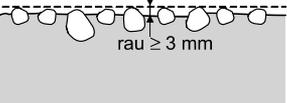
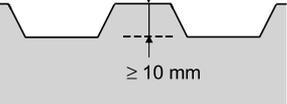
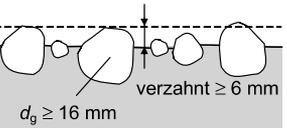
Abbildung 2-34: Tragmechanismen einer Verbundfuge [Zilch und Zehetmaier (2010)]

Die zuvor aufgeführten Traganteile bei bewehrten Verbundfugen sind abhängig von der Relativverschiebung. Daher ist eine Addition der einzelnen Traganteile nicht möglich. Die Reibkoeffizienten c und μ wurden daher in Versuchen ermittelt. Das Bemessungskonzept ist demnach ein semi-empirisches Konzept.

2.5.2.3 Fugenbeschaffenheit nach DAfStb Heft 600

In Tabelle 2-6 sind die Reibkoeffizienten c und μ sowie der Beiwert für die Festigkeitsabminderung v in Abhängigkeit der Fugenbeschaffenheit dargestellt gemäß DAfStb Heft 600 dargestellt.

Tabelle 2-6: Fugenbeschaffenheit nach DAfStb Heft 600

Fuge	Beschreibung	c	μ	v
sehr glatt	gegen Stahl, Kunststoff oder glatte Holzschalung betoniert  <p>↑ sehr glatt, fließfähiger Beton</p>	0	0,5	0
glatt	abgezogen oder im Gleit- bzw. Extruderverfahren hergestellt oder blieb nach dem Verdichten ohne weitere Behandlung  <p>↑ glatt < 3 mm, oder unbehandelter Beton</p>	0,2	0,6	0,2
rau	eine Oberfläche mit min. 3mm Rauigkeit, erzeugt durch einen Rechen mit ca. 40mm Zinkenabstand, Freilegen der Gesteinskörnungen oder andere Methoden, die ein äquivalentes Verhalten herbeiführen $R_t \geq 1,5 \text{ mm}$ bzw. $R_p \geq 1,1 \text{ mm}$  <p>↑ rau $\geq 3 \text{ mm}$</p>  <p>↑ rau $\geq 3 \text{ mm}$</p>	0,4	0,7	0,5
verzahnt	Verzahnung durch eine Geometrie, oder wie Rau, aber 6 mm Rauigkeit und Größtkorndurchmesser $d_g \geq 16 \text{ mm}$ $R_t \geq 3,0 \text{ mm}$ bzw. $R_p \geq 2,2 \text{ mm}$  <p>↑ $\geq 10 \text{ mm}$</p>  <p>↑ verzahnt $\geq 6 \text{ mm}$ $d_g \geq 16 \text{ mm}$</p>	0,5	0,9	0,7

Die Rauigkeit einer Fuge kann mit Hilfe des Sandflächenverfahrens nach Kaufmann [Kaufmann (1971)] überprüft werden. Hierbei wird eine definierte Sandmenge (Sandvolumen 25 – 50 cm³; trockener Quarzsand mit Körnung 0,1 – 0,5 mm) auf die trockene, saubere Oberfläche geschüttet und mit einer Scheibe spiralförmig ohne Druck verrieben. Anschließend wird der Durchmesser der mit Sand befüllten Fläche bestimmt und die Rautiefe mittels der nachfolgenden Gleichung bestimmt. Schematisch ist das Sandflächenverfahren in Abbildung 2-35 dargestellt.

$$R_t = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} \tag{2.34}$$

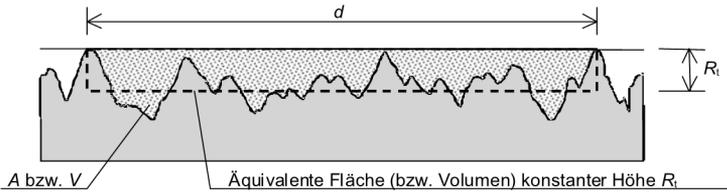


Abbildung 2-35: Sandflächenverfahren nach Kaufmann - Definition der Rautiefe [DAfStb Heft 600]

Das Sandflächenverfahren liefert leider keine exakt reproduzierbaren Ergebnisse, gibt jedoch relativ gute Richtwerte für die Rauigkeit der Fuge an. Aufgrund mangelhafter Praxistauglichkeit haben sich alternative Prüfverfahren (z.B. Laservermessung) bislang nicht etabliert.

2.5.2.4 Versagensarten

Die Versagensarten unterscheiden sich bei ausreichendem Verbund der Fuge nicht von denen monolithischer Bauteile. In Abbildung 2-36 ist das Biegeschubversagen für quasi-monolithisches Tragverhalten dem Versagen der Verbundfuge gegenübergestellt. Bei quasi-monolithischem Verhalten verläuft der schräge Schubriss auch in der Fertigteilplatte. Die Verbundfuge öffnet sich nur in einem kleinen Bereich des Schubfeldes. Beim Versagen der Verbundfuge gibt es zwar auch einen geneigten Schubriss, der befindet sich allerdings nur in der Ortbetonergänzung. Die Fuge öffnet sich über die gesamte Länge.

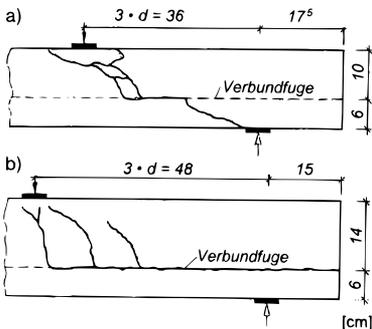


Abbildung 2-36: Biegeschubrisse im Bruchzustand von Platten mit Verbundfuge. (a) bei quasi-monolithischem Tragverhalten, (b) Ablösen des Ortbetons in der Verbundfuge [Furche und Bauermeister (2009)]

2.5.3 Bemessung

Die Nachweise der Zug- und Druckstreben­tragfähigkeit erfolgen analog zu Kapitel 2.3.4.1. Zusätzlich muss noch der Nachweis der Verbundfuge geführt werden.

Es gilt gemäß Eurocode 2:

$$V_{Edi} \leq V_{Rdi} \quad (2.35)$$

Der Bemessungswert der Schubkraft in der Fuge errechnet sich zu:

$$V_{Edi} = \beta \cdot \frac{V_{Ed}}{z \cdot b_i} \quad (2.36)$$

mit : β = Verhältnis der Normalkraft in der Betoner­gänzung und der Gesamtnormalkraft
 = 1,0 wenn die Verbundfuge in der Zugzone ist
 V_{Ed} = Bemessungswert der einwirkenden Querkraft
 z = innerer Hebelarm (= 0,9 · d)
 b_i = Breite der Fuge

$$V_{Rdi} = c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n + \rho \cdot f_{yd} \cdot (1,2 \cdot \mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 \cdot v \cdot f_{cd} \quad (2.37)$$

mit : c = Rauigkeitsbeiwert (siehe Tabelle 2-2)
 μ = Reibbeiwert (siehe Tabelle 2-2)
 f_{ctd} = Bemessungswert der Betonzugfestigkeit
 σ_n = Normalspannung senkrecht zur Fuge, die gleichzeitig mit der Querkraft wirken kann
 ρ = A_s / A_i
 A_s = Querschnittsfläche der Verbundbewehrung
 A_i = Fläche der Verbundfuge
 α = Neigungswinkel der Verbundbewehrung
 v = Festigkeitsabminderungsbeiwert für die Fugenrauigkeit (siehe Tabelle 2-2)

Damit die Nachweise der Verbundfuge Gültigkeit haben, sind einige konstruktive Regeln zu beachten.

Konstruktive Durchbildung

Der Abstand der Obergurte der Gitterträger zur Oberkante der Fertigteilplatte muss mindestens 2 cm betragen. Der Verankerungsnachweis der Diagonalen ist damit erbracht. Die Einbindetiefe der Untergurte in die Fertigteilplatte muss mindestens 1 cm sein. Der maximale Gitterträgerknotenabstand darf 75 cm bzw. das 5-fache der Deckendicke betragen. Der maximale Randabstand des Obergurts darf 37,5 cm nicht überschreiten.

3 Ziele der Arbeit

Bislang stehen dem Tragwerksplaner keine praxistauglichen Verfahren zur Verfügung, durch Leitungen geschwächte Stahlbetondecken einfach und zielführend bewehren und bemessen zu können. Die Querkrafttragfähigkeit von durch Leitungen geschwächte Decken muss gemäß Kapitel 2 abgemindert werden. Reicht diese abgeminderte Tragfähigkeit nicht aus, die Einwirkungen aufzunehmen, so wird Querkraftbewehrung erforderlich. Da eine flächige Anordnung von Bügeln sehr aufwändig und in Bereichen ohne Leitungen oftmals unnötig ist, sollen im Rahmen dieser Arbeit Möglichkeiten zur Steigerung der Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetondecken mit integrierten Leitungen entwickelt werden. Hierbei werden folgende Elemente untersucht: Wendeln aus Betonstahl um die Leitungen herum; Gitterträger neben den Leitungen sowie Unterstützungskörbe über den Leitungen. All diese Elemente sollen als lokale Bewehrungselemente im Bereich der Leitung eingesetzt werden. Eine Anwendung in Ortbeton- sowie Elementdecken wird angestrebt. Da die Bewehrung lediglich lokal im Bereich der Leitung trägt, kann die Querkrafttragfähigkeit maximal auf das Niveau des ungeschwächten, unbewehrten Vollquerschnitts angehoben werden.

Des Weiteren soll der Einfluss von Leitungen auf die Querkrafttragfähigkeit von Elementdecken mit Gitterträgern untersucht werden. Bislang stehen hierzu keine Regeln zur Verfügung. Auf der sicheren Seite liegend kann die Bemessung gemäß Kapitel 2.2 erfolgen. Im baupraktischen Alltag werden Gitterträger im Endzustand oft nicht als statisch wirksame Querkraftbewehrung angesetzt, da in Stahlbetondecken meist keine Querkraftbewehrung erforderlich ist. Daher soll in dieser Arbeit gezeigt werden, inwieweit die Gitterträger die Querkrafttragfähigkeit im Vergleich zur berechneten Tragfähigkeit gemäß Kapitel 2.2 erhöhen. Somit sollen die ohnehin verbauten Gitterträger als statisch wirksame Querkraftbewehrung in Ansatz gebracht werden.

Sowohl für die lokalen Bewehrungselemente als auch für die Elementdecken mit Gitterträgern sollen Bemessungsvorschläge erarbeitet werden. Diese sollen möglichst in die aktuellen Regeln des Eurocode 2 einbinden und so dem Tragwerksplaner in der Baupraxis ein einfaches Berechnungswerkzeug zur Verfügung stellen und somit die Lücke im aktuellen Stand der Technik schließen.

Als weitere Steigerungsmöglichkeit der Querkrafttragfähigkeit wird die lokale Verbundstörung der Biegebewehrung untersucht. Durch geschickte Störung des Verbundes der Biegebewehrung im Bereich unterhalb der Leitungen soll der innere Tragzustand des Fachwerks so verändert werden, dass im Beton im Bereich der Öffnungen keine Hauptzugspannungen auftreten. Eine baupraktische Anwendung wird nicht angestrebt.

4 Methodik

4.1 Allgemeines

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Versuchsprogramm erarbeitet und durchgeführt, das Erkenntnisse über den Einfluss verschiedener Steigerungsmöglichkeiten auf die Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetondecken mit integrierten Leitungen liefern soll. Im Folgenden werden die untersuchten Bewehrungselemente aufgeführt und die Randbedingungen zu den durchgeführten experimentellen Untersuchungen vorgestellt.

4.2 Möglichkeiten zur Steigerung der Querkrafttragfähigkeit

Die folgenden Möglichkeiten zur Steigerung der Querkrafttragfähigkeit im Bereich von Leitungen in Stahlbetondecken wurden untersucht:

- Wendel als Querkraftbewehrung um Leitungen;
- Gitterträger als Querkraftbewehrung in Elementdecken mit Leitungen;
- Sonderlösungen:
 - o Gitterträger und Unterstützungskörbe als lokale Bewehrungszulage parallel zu Leitungen;
 - o lokale Verbundstörung der Biegebewehrung.

4.2.1 Wendel

Bislang wird Wendelbewehrung aus Betonstahl in Stützen und Pfählen als adäquater Ersatz für runde Bügel verwendet. Ein Vorteil der Wendel ist, dass sie als Ganzes und nicht in mehreren Stücken montiert wird. Der geringere Montageaufwand der Wendel soll nun auch bei der Bewehrung von durch Öffnungen geschwächten Installationsdecken genutzt werden.

Die Wendel wird mit handelsüblichen Abstandhaltern an der Leitung befestigt und ist damit in ihrer Lage im Querschnitt und vor allem zur Leitung gesichert. Aufgrund des Abstandes zur Leitung ist sowohl die Kraftübertragung des Stahls in den Beton als auch der Korrosionsschutz der Wendel gesichert.

Die Wendel soll den kritischen Schubriss, der ohne Wendel zum Versagen führen würde, verdrängen (siehe Abbildung 4-1). Die infolge des Schubrisses freiwerdenden Spannungen sollen durch die Wendel aufgenommen und durch die geschlossene, dreidimensionale Form der Wendel und den Verbund zum Beton zur anderen Seite der Öffnung geleitet werden. Durch die runde Form der Wendel steht der Schubriss immer nahezu senkrecht zur Stabachse der Wendel, was zu einer guten Effizienz führen soll. Kritisch wird die fehlende Verankerung der Wendel in der Druck- und Zugzone sowie die Montagefähigkeit bei langen Leitungen betrachtet.

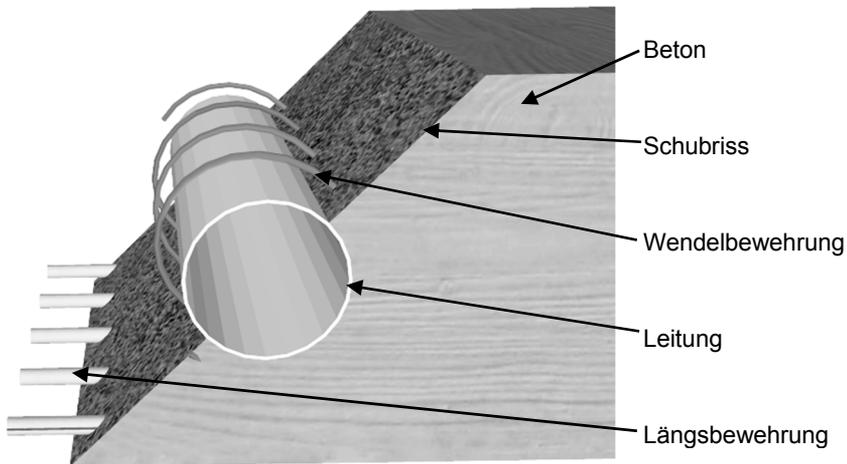


Abbildung 4-1: 3-D-Darstellung der Wendel im idealisierten Schubriss

Aufgrund dieser Überlegungen wird in Kapitel 5 ein Versuchsprogramm beschrieben, welches die Eignung der Wendel als Querkraftbewehrungselement in Installationsdecken verifizieren soll. Hierbei werden Parameter wie die Deckenhöhe, der Öffnungsdurchmesser, der Stabdurchmesser der Wendel sowie die Lage der Öffnung variiert.

4.2.2 Gitterträger in Elementdecken mit Leitungen

Die Kombination von Elementdecken mit im Aufbeton integrierten Leitungsführungen ist seit Jahren tägliche Baupraxis.



Abbildung 4-2: Beispiel für die praktische Anwendung von Leitungen in Elementdecken [www.spitzer-installationen.at (15.01.2014)]

Dem Tragwerksplaner fehlen jedoch Bemessungsansätze, die geeignet sind, die Querkrafttragfähigkeit solcher Decken bemessen zu können. Bisher muss diese im Bereich von Leitungsführungen gemäß *DAfStb Heft 600* (siehe Kapitel 2.2)

abgemindert werden. Das Potenzial der Gitterträger als tragfähigkeitssteigernde Querkraftbewehrungselemente bleibt dabei bislang unberücksichtigt. Daher wurden im Zusammenhang mit dieser Arbeit zahlreiche Traglastversuche an Elementdecken mit integrierten Leitungen durchgeführt. Ziel dieses Versuchsprogrammes war die Erstellung eines praktikablen Bemessungsmodells für Elementdecken mit integrierten Leitungen. Zudem soll der Gitterträgerabstand bzw. Bewehrungsgehalt bestimmt werden, bei dem die Tragfähigkeit des ungeschwächten, unbewehrten Vollquerschnitts erreicht wird.

4.2.3 Sonderlösungen

4.2.3.1 Gitterträger und Unterstützungskörbe parallel zu Leitungsführungen

Aufgrund der weiten Verbreitung und Akzeptanz von Gitterträgern stand die Idee im Raum, Gitterträger als örtliche Querkraftbewehrungselemente neben Leitungsführungen zu verwenden. Dies könnte eine praktikable Lösung für Ortbetondecken sein. Aber auch in Elementdecken könnten zusätzlich zu den üblichen Gitterträgern senkrecht zur Spannrichtung einbetonierte Gitterträger eine Steigerung der Querkrafttragfähigkeit bewirken. Zudem könnten sie dem Tragwerksplaner die Möglichkeit bieten, die spätere Leitungstrasse mit den Gitterträgern vorzugeben.

Des Weiteren soll untersucht werden, welche tragfähigkeitssteigernde Wirkung ein auf die Fertigteilplatte aufgestellter Gitterträger besitzt. Dies kann zum Beispiel bei unzureichender Vorausplanung oder bei einachsig gespannten Decken mit zu großem Gitterträgerabstand zur Anwendung kommen (siehe Abbildung 4-3). Ein Auslagern von Bewehrung aus der Fertigteilplatte heraus wird bislang bei Querbewehrung einachsig gespannter Decken und auch bei Biegebewehrung zweiachsig gespannter Decken praktiziert.

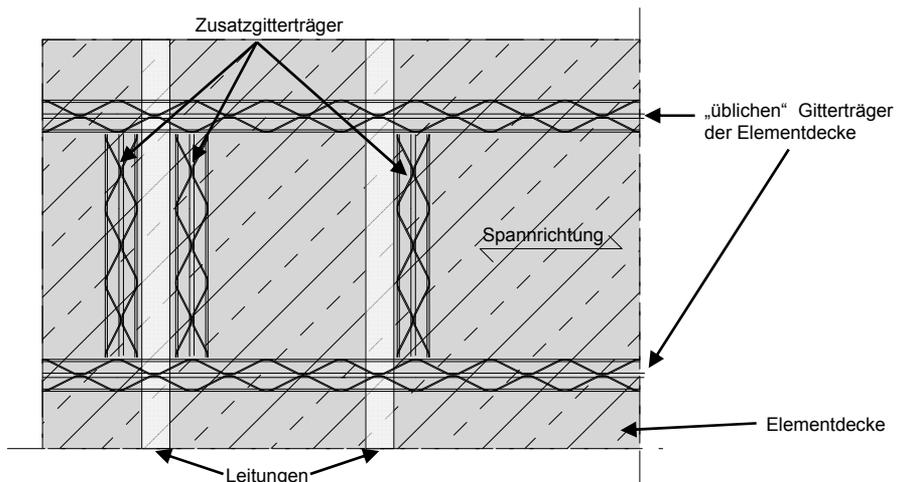


Abbildung 4-3: Schematische Draufsicht einer Decke mit Gitterträgern neben Leitungen als Zustellbewehrung in Elementdecken.

Da Gitterträger aufgrund ihrer Geometrie lediglich neben Leitungen platziert werden können, wurde nach Stahlelementen gesucht, die über eine Leitung geführt werden können. Hierbei haben sich Unterstützungskörbe angeboten. Diese werden zwar bislang nicht als tragende Bewehrungselemente eingesetzt, stellen aber aufgrund ihrer Form eine geeignete Bewehrungsführung für Leitungen dar. Auch hier wurde zusätzlich der Fall eines nachträglich aufgestellten Elements untersucht. In Abbildung 4-4 ist exemplarisch ein Unterstützungskorb dargestellt.

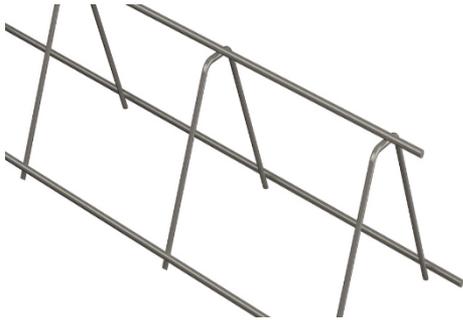


Abbildung 4-4: Unterstützungskorb nach DBV Merkblatt
[www.exte.de/schalungszubehoer/de/]

4.2.3.2 Lokale Verbundstörung

Verschiedene Forscher haben in der Vergangenheit Versuche zum Einfluss des Verbundes der Biegebewehrung auf das Tragverhalten von Stahlbetonbalken durchgeführt. Hierzu zählen unter anderem *Kani (1958)*, *Leonhardt und Walther DAfStb Heft 151*, *Rüsch und Mayer DAfStb Heft 145* und *Lorentsen (1965)*.

„Das Verbundverhalten zwischen Stahl und Beton ist neben den Materialeigenschaften die bestimmende Größe für das Tragverhalten von Stahlbetonbauteilen. Auffällig ist, dass in vielen früheren Versuchen an Stahlbetonbauteilen mit Glattstahlbewehrung nur selten die Versagensform des Schubversagens (Schrägrissbildung) erkennbar ist. Hier traten in aller Regel Biege- oder vor allem Verankerungsversagen ein“ (*Marx et al (2011) S.37*).

Man nimmt an, dass bei glattstahlbewehrten Balken das Bogen-Zugband-Modell bzw. die Sprengwerkwirkung den Kraftabtrag am besten beschreibt (siehe Abbildung 2-7). Hierbei wird die komplette Kraft über die Verankerung (Winkelhaken) in die Bewehrung eingeleitet. Die Kraft in der Bewehrung ist über die gesamte Stablänge konstant. Bei einem Balken mit geripptem Betonstahl baut sich die Zugkraft in der Längsbewehrung schrittweise bis hin zur Feldmitte auf. Der Grund hierfür liegt im Verbundverhalten der Bewehrung. Durch Bildung einzelner Biegerisse wird Kraft in die Bewehrung eingeleitet. *Kim und White (1999)* untersuchten Balken mit unterschiedlichem Verbundverhalten. Hierbei wurde der Verbund in unterschiedlicher Größenordnung gestört. Die Rissbilder, sowie die Last-Verformungskurven der Versuche sind in Abbildung 4-5 dargestellt.

4.2 Möglichkeiten zur Steigerung der Querkrafttragfähigkeit

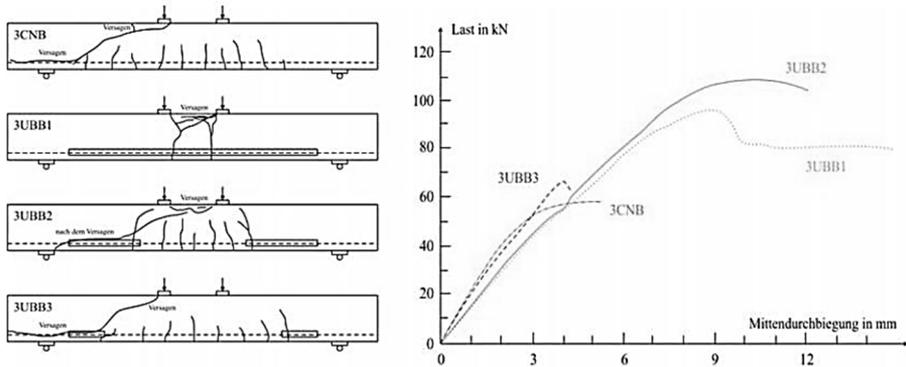


Abbildung 4-5: Rissbilder und Last-Verformungskurven der von Kim untersuchten Balken [Marx et al (2011)]

Balken „3CNB“ wies vollen Verbund auf und zeigte das klassische Biegeschubversagen. Die Versagenslast lag bei ca. 55 kN.

Bei Balken „3UBB1“ wurde der Verbund nahezu über die komplette Länge aufgehoben. Hierbei trat ein klassisches Biegeversagen mit einem klaffenden Biegeriss und einem Versagen der Druckzone ein. Die Traglast lag bei ca. 90 kN.

Bei dem Balken mit gestörtem Verbund im gesamten Schubfeld (3UBB2) wuchsen bei steigender Belastung die Biegerisse immer höher in die Druckzone hinein. Es bildete sich zwar ein Biegeriss im Schubfeld, der eine leichte Neigung in Richtung Lastseite aufwies und sich stark öffnete, doch hatte er keinen Einfluss auf das Versagen. Der Balken wies ein duktileres Bauteilverhalten auf und versagte in der Biegedruckzone. Der Schubriss bildete sich erst nach dem Versagen und hat somit keine Bedeutung für das Tragverhalten. Die Traglast konnte durch die Verbundstörung auf ca. 110 kN angehoben werden.

Der Balken mit einem kleinen verbundgestörten Bereich im Schubfeld (3UBB3) zeigte ein ähnliches Verhalten wie der Balken mit vollem Verbund (3CNB). Er versagte durch einen Biegeschubriss in Kombination mit einem Verankerungsversagen. Die Traglast lag mit ca. 65 kN in ähnlicher Größenordnung wie Balken „3CNB“.

Um einen Biegeschubriss bilden zu können muss sich im Bauteil ein Fachwerk ausbilden können. Um statisches Gleichgewicht zu erhalten benötigt die Bewehrung Verbund zum Beton, nur so können die Kräfte der Diagonalen in die Bewehrung eingeleitet werden. Bei Glattstahl kann dies so nicht funktionieren. Hierfür eignet sich ausschließlich unser heutzutage verwendeter gerippter Betonstahl. Daher kam die Idee auf, den Verbund der Biegebewehrung im Bereich der Öffnung zu aufzuheben. Somit soll die Zugstrebe die den Biegeschubriss auslösen würde, umgelenkt werden. Dieser Grundgedanke ist in Abbildung 4-6 skizziert.

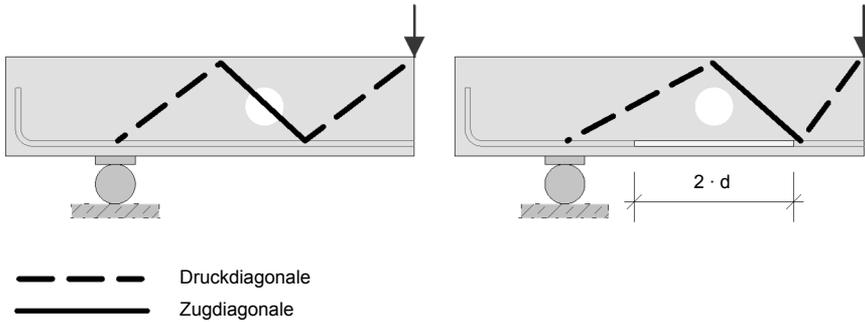


Abbildung 4-6: Schematische Darstellung der Tragwirkung eines Deckenelements mit Verbundstörung (rechts) im Vergleich zu einem Deckenelement mit vollem Verbund (links)

4.3 Dimensionierung

Die Querkrafttragfähigkeit steht in Abhängigkeit zahlreicher Einflussparameter, die zur Dimensionierung eines Bauteils berücksichtigt werden müssen. Im Folgenden werden diese Einflussfaktoren erläutert.

Erzwingen des Versagens im Öffnungsbereich

Um ein Querkraftversagen im Bereich der Öffnung in jedem Fall zu erzwingen, wurde das Verhältnis der Abstände zwischen Auflager und Lasteinleitung so gewählt, dass im Bereich der Öffnung eine ca. 20 % höhere Querkraft vorliegt, als im ungeschwächten Trägerende (siehe Abbildung 4-17).

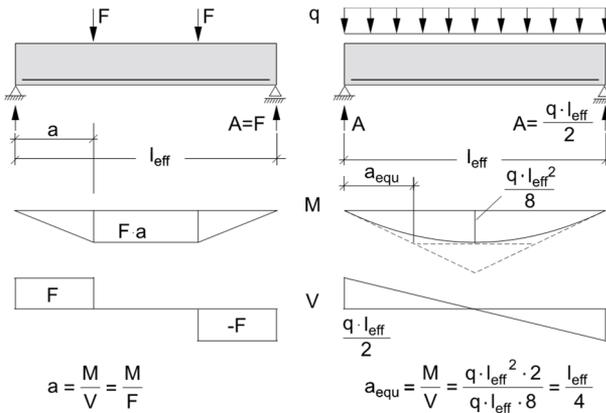
Schubslankheit

Um ein Bauteil hinsichtlich seiner Querkraftbeanspruchung einzuordnen, wird die Schubslankheit λ eingeführt. Diese beschreibt das Verhältnis vom Abstand a (Lasteinleitung - Auflager) zur statischen Höhe d , d.h.:

$$\lambda = \frac{a}{d} \quad (4.1)$$

Diese Beziehung gilt für eine Beanspruchung durch Einzellasten. Für Gleichstreckenlasten gilt Gleichung (4.2). Diese Zusammenhänge sind auch in Abbildung 4-7 dargestellt.

$$\lambda = \frac{a_{\text{equ}}}{d} = \frac{l_{\text{eff}}}{4 \cdot d} \quad (4.2)$$



a Belastung durch Einzellasten

b Belastung durch Gleichstreckenlasten

Abbildung 4-7: Definition der Schubschlankheit [Zilch und Zehetmaier (2010)]

Die Schubschlankheit stellt somit einen Zusammenhang zwischen Belastungssituation und Bauteilgeometrie her. Der Einfluss der Schubschlankheit auf die Versagensart wurde von *Kani (1966)* untersucht. Hierzu führte er zahlreiche Versuche mit Stahlbetonbalken durch, um das Verhalten dieser Balken mit unterschiedlichen Längsbewehrungsgraden und Schubschlankheiten zu beschreiben.

Als Kenngröße zur Beurteilung der Versuchsergebnisse führte er die Relativtragfähigkeit r_u ein. Diese gibt das Verhältnis von Biegemoment bei Versagen M_u (Versuchsergebnis) zum rechnerischen Moment bei Biegeversagen M_{Rd} (berechnetes Biegebruchmoment) an:

$$r_u = \frac{M_u}{M_{Rd}} \quad (4.3)$$

In Abbildung 4-8 wird deutlich, dass es abhängig von der Schubschlankheit λ und dem Längsbewehrungsgrad ρ Bauteile gibt, in denen das rechnerische Biegebruchmoment nicht erreicht wird. Hier versagt das Bauteil auf Schub. Der Bereich reduzierter Schubtragfähigkeit wird als „Schubtal von Kani“ bezeichnet. Bauteile mit einer Schubschlankheit zwischen zwei und drei sind besonders für Querkraftversagen gefährdet. Kani kam zu dem Ergebnis, dass für Träger mit einer Schubschlankheit $\lambda > 6,0$ ein Biegeversagen sichergestellt ist. Ist die Schubschlankheit besonders klein ($\lambda < 2,5$), steigert sich die Querkrafttragfähigkeit wieder, da die inneren Kräfte auf ein Sprengwerk umgelagert werden.

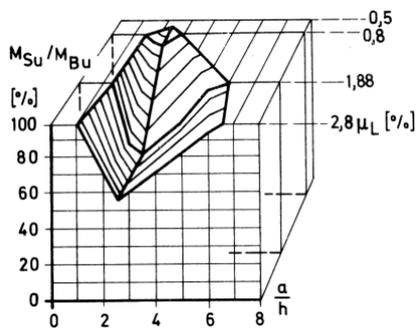


Abbildung 4-8: Schubtal von Kani [Kani (1966)]

Die Versuchsergebnisse von Kani können nach heutigem Forschungsstand weitestgehend bestätigt werden. Abbildung 4-9 zeigt ebenfalls das von Kani konzipierte „Schubtal“. Die Versuchsergebnisse von Kani sind hier durch das Moment bei der rechnerisch ermittelten Querkrafttragfähigkeit nach Gleichung (2.4) ersetzt. Es folgt:

$$r_u = \frac{V_{Rd,c} \cdot a}{M_{Rd}} = \frac{M_{uV}}{M_{Rd}} \quad (4.4)$$

Wird die Biegetragfähigkeit M_{Rd} maßgebend, ergibt sich für den Quotient aus Querkrafttragfähigkeit und Biegetragfähigkeit ein Wert ≥ 1 . Dies ist gleichbedeutend mit einer Relativtragfähigkeit nach Kani von 100 %. In *Zilch und Zehetmaier (2010)* ist das „Schubtal“ auf Grundlage der Querkrafttragfähigkeiten nach Gleichung (2.4) grafisch dargestellt (siehe Abbildung 4-9).

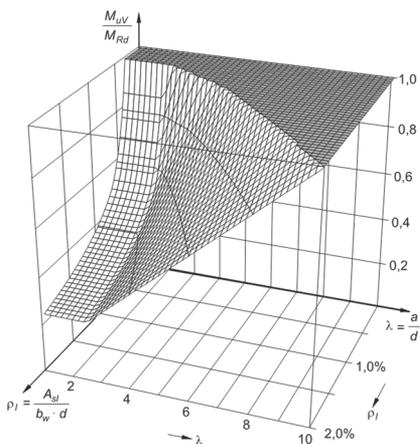


Abbildung 4-9: Schubtal von Kani nach Zilch und Zehetmaier [Zilch und Zehetmaier (2010)]

Aufgrund der fehlenden Berücksichtigung des positiven Einflusses auflagernaher Einzellasten auf die Querkrafttragfähigkeit in Gleichung (2.4) nach Eurocode 2, steigt die Kurve nach Erreichen des Minimums nicht wieder an. Es ist lediglich eine Reduktion des Querkraftanteils V_{Ed} der Einzellast zulässig. In Abbildung 4-9 ist dies am Knick bei einer Schubslankheit $\lambda = 2$ zu erkennen.

Um aus diesen Ergebnissen eine Schlussfolgerung für die Wahl einer geeigneten Schubslankheit zur Dimensionierung von Versuchskörpern für Querkraftuntersuchungen zu erzielen, wurde eine Schubslankheit von $\lambda = 4,5$ gewählt. Diese ermöglicht ein Querkraftversagen bei einer relativ großen, realitätsnahen Spannweite.

Belastungsart

Die Bauteilversuche werden als Dreipunkt-Biegeversuche durchgeführt. Die Prüfung mit einer Einzellast hat versuchstechnische Vorteile und liefert Ergebnisse auf der sicheren Seite liegend. Das Prüfen mit Gleichstreckenlasten führt i. d. R. zu 20 bis 40 % höheren Schubtragfähigkeiten (*DAfStb Heft 151*).

Breite der Versuchskörper

Die Breite der Versuchskörper wurde - mit Ausnahme der Versuchskörper in Kapitel 6 (Leitungen in Elementdecken) - zu 40 cm gewählt. Diese Breite ist wesentlich geringer, als $5,0 \cdot h$, dem Grenzkriterium für Platten ohne Mindestquerkraftbewehrung nach *DIN EN 1992-1-1*. Dies wird durch folgende Überlegungen gerechtfertigt:

- Bereits Kani konnte nachweisen, dass eine lineare Abhängigkeit zwischen der Bauteilbreite und der Querkrafttragfähigkeit besteht [*Kani (1958)*].
- Die Versuche liegen in Bezug auf mögliche Fehlstellen im Beton auf der sicheren Seite.
- Tragfähigkeitssteigernde Einflüsse aus Querdehnungsbehinderungen werden nahezu ausgeschlossen.

Die Ergebnisse von Versuchen an balkenartigen Bauteilen liegen im Vergleich zu Platten auf der sicheren Seite.

Bauteilhöhe

Die Versuche wurden – je nach Querkraftbewehrungselement – mit einer Deckenstärke von 20, 25 oder 30 cm durchgeführt, was praxisüblichen Abmessungen von Installationsdecken entspricht.

Beton

Für alle Versuche wurde ein Beton der Festigkeitsklasse C30/37 verwendet. Dieser wurde als Transportbeton geliefert und eingebaut. Der Beton wurde der Konsistenzklasse F3 zugeordnet. Als Zuschläge wurde Rundkorn mit einem Größtkorn von 16 mm verwendet. Dies führt zu Ergebnissen auf der sicheren Seite liegend, da der Traganteil der Rissverzahnung reduziert wird.

Die Festigkeiten wurden anhand von Betonwürfeln, welche zusammen mit dem Bauteil gelagert wurden, zeitnah zu den Bauteilversuchen geprüft. Die genauen Festigkeitskennwerte sind in den jeweiligen Versuchsauswertungen angegeben. Die Traglasten werden mit Hilfe des Faktors

$$k_{\text{Beton}} = \frac{40^{1/3}}{f_{c,\text{test}}^{1/3}} \quad (4.5)$$

auf eine Referenzdruckfestigkeit von 40 N/mm² normiert.

Längsbewehrung

Um ein vorzeitiges Biegeversagen zu vermeiden, wurden die Stahlbetonträger so konzipiert, dass die erforderliche Belastung des Versuchskörpers für ein Biegeversagen ca. 20 % über der eines Querkraftversagens liegt. Dies setzt einen ausreichend großen Längsbewehrungsgrad voraus.

Aufgrund der Schubrissbildung bei einem Querkraftversagen tritt ein vertikaler Versatz der Rissufer und somit eine Scherbeanspruchung der Längsbewehrung auf. Die Querkrafttragfähigkeit der Längsbewehrung V_d , die sich auf der unteren Betondeckung abstützt, entsteht aus der Dübelwirkung. Die Effizienz der Dübelwirkung ist abhängig von der Dehnsteifigkeit des Zuggurtes, der Festigkeit der Betondeckung, dem Längsbewehrungsgrad und dem Durchmesser der Längsbewehrung.

Gemäß *DAfStb Heft 151* ist die Querkrafttragfähigkeit abhängig vom Längsbewehrungsgrad und damit auch von der Zugdehnung der Stäbe an den Rissen im Schubbereich. Der Zusammenhang des Längsbewehrungsgrades zu dem bezogenen Schubbruchmoment wird in Abbildung 4-10 dargestellt. Mit einem Anstieg des Längsbewehrungsgrades steigt das bezogene Schubbruchmoment und somit die Schubtragfähigkeit. Die Rissbreiten werden folglich durch einen hohen Gehalt an Längsbewehrung begrenzt. Des Weiteren zeigt die Querkrafttragfähigkeit eine Abhängigkeit vom Durchmesser und der Verteilung der Längsbewehrungsstäbe. Günstig in Bezug auf die Rissbreitenbeschränkung und die damit verbundene Schubtragfähigkeit ist die Verteilung der Bewehrung auf dünne Stäbe in kleinen Abständen. In Abbildung 4-10 sinkt mit größerem Durchmesser das bezogene Schubbruchmoment.

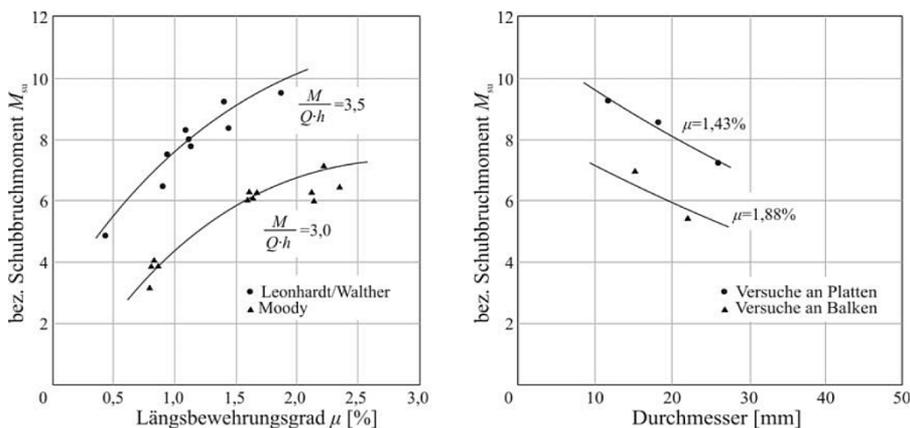


Abbildung 4-10: Einfluss des Längsbewehrungsgrades und der Stabdurchmessers auf die Schubtragfähigkeit [DAfStb Heft 151]

Für die Versuche der vorliegenden Arbeit sollte ein baupraktischer Bewehrungsgrad von 1 % verwendet werden. Um bei diesem Längsbewehrungsgrad und der gewählten Schubschlankheit von 4,5 ein Querkraftversagen hervorrufen zu können, reicht die Festigkeit von üblichem Betonstahl B500 nicht aus. Daher wurde der Ankerstabstahl St 900/1100 (AWM 1100) der Firma Annahütte mit einem Durchmesser von 15 mm gewählt [Z-12.5-96]. Die geringfügig abweichende Rippengeometrie sowie bezogene

Rippenfläche wurde toleriert. Ein Vergleich der bezogenen Rippenfläche wird in Tabelle 4-1 aufgezeigt.

Tabelle 4-1: Vergleich der bezogenen Rippenfläche verschiedener Stähle

Material	Durchmesser Φ [mm]	Rippenhöhe h_r [mm]	Rippenabstand c_r [mm]	bezogene Rippenfläche $f_R = h_r / c_r$ [-]
B500	14	0,91	8,4	0,108
AWM 1100	15	1,00	10,0	0,100
B500	16	1,04	9,6	0,108

Für handelsüblichen Betonstahl ist gemäß *DIN 488-2* ein 5%-Quantil für die bezogene Rippenfläche von $f_R = 0,056$ festgelegt.

Die Verwendung eines höherfesten Stahls erhöht den mechanischen Bewehrungsgrad und damit auch die Biegetragfähigkeit. Die Querkrafttragfähigkeit bleibt aufgrund der Abhängigkeit vom geometrischen Bewehrungsgrad weitestgehend unbeeinflusst. Zwar erhöht sich die Steifigkeit des Zuggurtes (Dübelwirkung der Längsbewehrung) bei hohen Lasten (Stahlspannung größer als 500N/mm^2) im Vergleich zu handelsüblichem Betonstahl, dies wird im Rahmen dieser Arbeit aber toleriert. Untersuchungen zum Einfluss von höherfestem Stahl auf die Querkrafttragfähigkeit ist z. B. in *Rajagopalan und Ferguson (1968)* oder *Mathey und Watstein (1963)* zu finden.

Betondeckung

Für die gesamten Versuchskörper wurde die minimal zulässige Betondeckung nach *DIN EN 1992-1-1* gewählt. Hieraus ergab sich für die Längsbewehrung aufgrund der Verbundwirkung des Längsstabes mit einem Durchmesser von 15 mm ein c_{nom} von 25 mm. An allen anderen Rändern des Versuchskörpers wurde ebenfalls c_{nom} zu 25 mm gewählt.

Größe und Lage der Öffnungen

Die Höhe der Öffnungen variiert, soll aber maximal der Hälfte der statischen Nutzhöhe entsprechen, was ebenfalls eine mögliche Grenze in der Baupraxis darstellen soll.

Einzelöffnungen werden in Höhe der Schwerachse und in der Mitte des Abstandes von Lasteinleitung und Auflagerachse eingebaut. Bei den Elementdecken werden die Leitungen auf das Fertigteil aufgelegt. Die maximale Öffnungsgröße wird hierbei auch an den Gitterträger angepasst. Bei einem Abstand der Gitterträgerknoten von 20 cm ergibt sich ein maximaler Öffnungsdurchmesser von 80 mm. Mehrere Leitungen nebeneinander werden der Gitterträgergeometrie passend angeordnet.

Traganteil der Rohre

Der Eigentraganteil der verwendeten Kunststoffrohre wird im Rahmen dieser Arbeit als vernachlässigbar angenommen.

Wendel

Zur Herstellung der Wendel wurde handelsüblicher gerippter Betonstahl B500 verwendet. Dieser wurde mit der entsprechenden Windungsanzahl, der Ganghöhe und natürlich dem Biegedurchmesser hergestellt (siehe hierzu Abbildung 4-11).

Zum Einbau um die Leitung wurde die Wendel mit handelsüblichen Betonabstandhaltern an der Leitung fixiert (siehe Abbildung 4-12). Die gewünschte Betondeckung lag dabei bei $c_{nom} = 2,0$ cm.

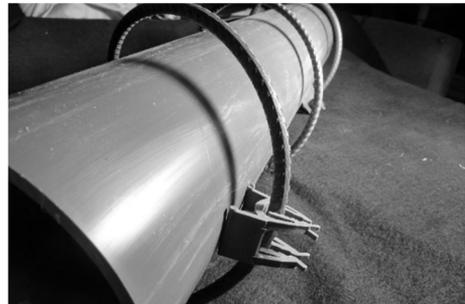
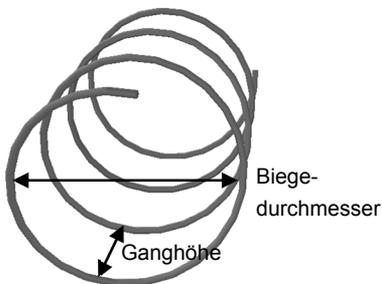


Abbildung 4-11: Wendel mit Bezeichnungen

Abbildung 4-12: Befestigung der Wendel mit Betonabstandhaltern an der Leitung

Gitterträger

Bei der Wahl der Gitterträger wurden die in der Praxis am häufigsten verbauten Gitterträger verwendet. Dabei handelt es sich um den Typ E von Filigran (Z-15.1-147) bzw. den Typ KT 800 der Badischen Drahtwerke (Z-15.1-1). Laut Informationen der Hersteller sind das die meistverkauften Gitterträger zur Anwendung in Elementdecken (siehe auch *Furche und Bauermeister (2009)*). Diese Gitterträger bestehen aus einem Obergurt, zwei Diagonalen und zwei Untergurten. Im Gegensatz zu den Untergurten und dem Obergurt sind die Diagonalen aus Glattstahl hergestellt. Der Obergurt hat einen Durchmesser von 10 bzw. 12 mm, die Untergurte haben einen Stabdurchmesser von 6 mm und die Diagonalen von 6 bzw. 7 mm. Die genauen Abmessungen sind in Kapitel 6 aufgeführt. Der charakteristische Wert Streckgrenze der Diagonalen liegt bei 420 N/mm^2 .

Die Einbindetiefe der Gitterträger in die Elementplatte betrug ca. 3 cm. Die Höhe wurde so gewählt, dass zwischen Obergurt und Oberkante der Ortbetonergänzung noch Platz für Mattenbewehrung wäre. Dies stellt die realitätsnahe Bewehrungssituation dar. Der Einbau der Gitterträger entspricht demnach den konstruktiven Randbedingungen für Elementdecken.

Verbundfuge

Die Verbundfuge wurde mittels eines Rechens mit 40 mm Zinkenabstand aufgeraut und entspricht gemäß Tabelle 2-6 der Fugenbeschaffenheit „rau“. Eine genauere Überprüfung mit Hilfe des Sandflächenverfahrens nach Kaufmann oder Ähnlichem fand nicht statt.

Unterstützungskörbe

Als Unterstützungskörbe wurden der Typ BT 16 und BT 18 nach *DBV - Merkblatt "Unterstützungen nach Eurocode 2"* verwendet. Die Abmessungen der Unterstützungskörbe sowie die konstruktiven Randbedingungen wurden analog zu den Gitterträgern gewählt (siehe Abschnitt Gitterträger).

Die Stahlfestigkeit ist nicht geregelt, da es sich bei Unterstützungskörben um ein Hilfsmittel für den Bauzustand und nicht um ein tragendes Element handelt. Die Stahlfestigkeit wurde in Stahlzugversuchen ermittelt. Details hierzu sind Kapitel 7.1 zu entnehmen.

Querkraftbewehrungsgrad

Zur Beschreibung des Querkraftbewehrungsgrads kann auf drei verschiedene Definitionen zurückgegriffen werden. Auf den geometrischen Bewehrungsgrad, den mechanischen Bewehrungsgrad, oder den sog. Schubkonzentrationsfaktor.

Der geometrische Bewehrungsgrad berechnet sich aus dem Quotienten von Stahlquerschnitt zu Betonquerschnitt im kritischen Schnitt.

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s_w \cdot b_w} \quad (4.6)$$

Der mechanische Bewehrungsgrad berücksichtigt zusätzlich zur geometrischen Bewehrungsmenge das Verhältnis der Stahlfestigkeit zur Betonfestigkeit.

$$\omega_w = \frac{A_{sw} \cdot f_{ywd}}{s_w \cdot b_w \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{cd}} = \rho_w \cdot \frac{f_{ywd}}{\alpha_{cc} \cdot f_{cd}} \quad (4.7)$$

Der Schubkonzentrationsfaktor berechnet sich aus dem Verhältnis der Stahltragfähigkeit zur Betontragfähigkeit. Dieser wurde bereits in *Mansur (2006)* und *Neff (2006)* zur Beschreibung des Bewehrungsgrades verwendet. Bei der Wendel muss dabei die berechnete Bewehrungsmenge beidseitig der Öffnungen eingebaut werden.

$$S_k = \frac{f_{ywk} \cdot A_{sw}}{V_{Rm,c}} \quad (4.8)$$

Aufgrund der im Rahmen dieser Arbeit unterschiedlichen Streckgrenzen der Querkraftbewehrungselemente (Gitterträger 420 N/mm², Wendel 500 N/mm²) eignen sich der Schubkonzentrationsfaktor und der mechanische Bewehrungsgrad besser zur Beschreibung der Bewehrungsmenge als der geometrische Bewehrungsgrad.

Berechnung der Tragfähigkeit

Nachfolgend werden beispielhaft die Berechnungsschritte für einen 30 cm hohen und 40 cm breiten Versuchskörper dargestellt.

Um ein Querkraftversagen sicherzustellen, muss die Biegetragfähigkeit der Versuchskörper größer als die Querkrafttragfähigkeit sein. Die für eine Versuchsdimensionierung notwendige mittlere Querkrafttragfähigkeit berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$V_{Rm,c} = \left[c_m \cdot \eta_1 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (4.9)$$

Der Wert c_m ist dabei ein aus empirischen Werten ermittelter Vorfaktor. Für die Bemessung der Querkrafttragfähigkeit nach Eurocode 2 (vgl. Gleichung(2.4)) wurde dieser Kalibrierfaktor auf $c_{Rd,c} = 0,10$ festgelegt. In Abbildung 4-13 sind der Mittelwert des Vorfaktors c_m , der charakteristische Vorfaktor c_k und der Bemessungswert $c_{Rd,c}$ dargestellt. Der Mittelwert liegt bei $c_m = 0,20$.

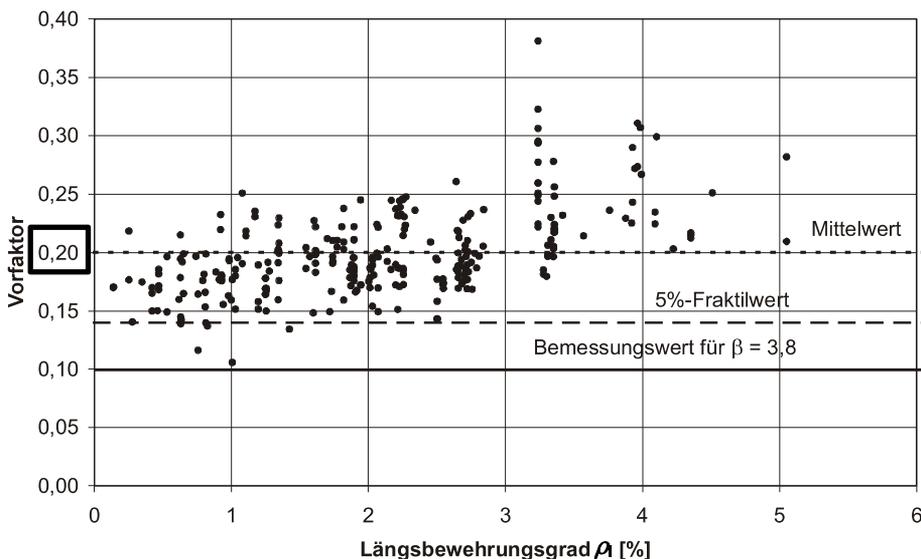


Abbildung 4-13: Empirische Ermittlung des Kalibrierfaktors c_m [DAfStb Heft 600]

Der Korrekturbeiwert η_1 beträgt nach Eurocode 2 für Normalbeton 1,0.

Der Einfluss der Bauteilhöhe wird durch den Maßstabsfaktor k berücksichtigt. Er ist abhängig von der statischen Nutzhöhe d , es gilt:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad \text{mit } d = 267 \text{ mm,}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{267}} = 1,865$$

Als Längsbewehrung werden fünf Stäbe mit einem Durchmesser von $\Phi = 15$ mm verwendet. Daraus ergibt sich ein Längsbewehrungsgrad ρ_l von:

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} = \frac{5 \cdot \pi \cdot (0,5 \cdot \Phi)^2}{b_w \cdot d} = \frac{5 \cdot \pi \cdot (0,5 \cdot 15)^2}{400 \cdot 267} = 0,0083$$

Dies entspricht in etwa dem angestrebten Bewehrungsgehalt von 1%.

Die Betondruckfestigkeit wird zu $f_{ck} = 40$ N/mm² angenommen.

Da die Versuche ohne aufgebrauchte Längsspannung durchgeführt werden, ist das Produkt aus dem Beiwert zur Anrechnung der Normalspannung k_1 und dem Bemessungswert der Betonspannung σ_{cp} gleich null.

Die anzurechnende Betonquerschnittsfläche aus Stegbreite b_w und statischer Höhe d , beträgt:

$$b_w \cdot d = 400 \cdot 267 = 106.800 \text{ mm}^2$$

Für die Querkrafttragfähigkeit ergibt sich mit den zuvor erläuterten Parametern:

$$V_{Rm,c} = \left[0,2 \cdot 1,0 \cdot 1,865 \cdot (100 \cdot 0,0083 \cdot 40)^{\frac{1}{3}} + 0 \right] \cdot 106.800 = 128,0 \text{ kN}$$

Bei einem Abstand der Lasteinleitung zum Auflager von 1,225 m gilt für das zur Querkraft äquivalente Biegemoment M_{UV} :

$$M_{UV} = V_{Rm,c} \cdot 1,225 = 156,8 \text{ kNm}$$

Die mit den gewählten Kenngrößen für Abmessungen und Bewehrungsgehalt erreichbare Biegetragfähigkeit kann zur Vorbemessung mit Hilfe des Spannungsblocks ermittelt werden.

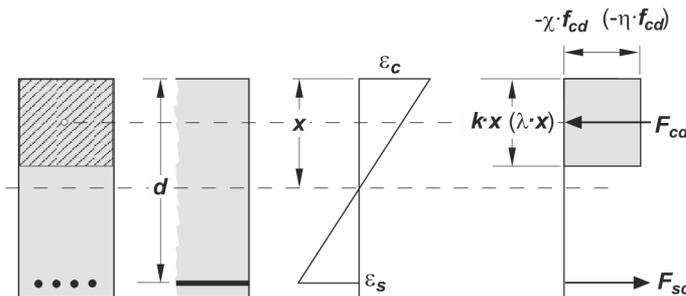


Abbildung 4-14: Bilineare Spannungs-Dehnungslinie und Spannungsblock [Zilch und Zehetmaier (2010)]

Mittels eines Spannungsblocks wird der parabelförmige Verlauf der Betondruckspannungen über die Bauteilhöhe durch ein Rechteckmodell ersetzt. Die Druckzonenhöhe x wird dabei durch den Faktor k abgemindert, die Betondruckfestigkeit f_{cd} durch den Faktor χ . Nach Eurocode 2 gilt:

$$f_{ck} \leq 50 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \quad k = 0,80 \text{ und } \chi = 0,95$$

Um das Gleichgewicht der inneren Kräfte zu erfüllen muss die resultierende Betondruckspannung F_c der Stahlzugspannung F_s entsprechen. Die Gleichgewichtsbedingung nach Spannungsblocktheorie ist mit Gleichung (4.10) angegeben.

$$F_c = F_s$$

$$\chi \cdot f_{cm} \cdot k \cdot x \cdot b = f_{sd} \cdot A_s \tag{4.10}$$

Für die reduzierte Druckzonenhöhe gilt demnach:

$$k \cdot x = \frac{f_{sd} \cdot A_s}{\chi \cdot f_{cm} \cdot b} = \frac{90 \cdot 883,57}{40 \cdot 0,95 \cdot 400} = 52,32 \text{ mm}$$

Das Moment bei Biegebruchversagen nach Spannungsblochtheorie ergibt sich aus dem Produkt der resultierenden Stahlzugkraft F_{sd} mit dem inneren Hebelarm z .

$$M_{Rd} = F_{sd} \cdot z$$

$$\text{mit : } z = d - \frac{k \cdot x}{2}$$

$$M_{Rd} = 90 \cdot 8,8357 \cdot \left(26,75 - \frac{5,232}{2} \right) = 191,9 \text{ kNm}$$

$$> M_{uV} = 157,1 \text{ kNm}$$

Somit ist ein Querkraftversagen sichergestellt. Die Versagenslast für ein Biegeversagen liegt ca. 20 % über der des Querkraftversagens.

4.4 Herstellung

Die Herstellung der Probekörper aus Ortbeton erfolgte in den folgenden Schritten:

1. Herstellung der Bewehrungskörbe
2. Herstellung der Schalung
3. Einbau der Bewehrungskörbe und der Rohre inkl. Querkraftbewehrungselement in die Schalung (siehe Abbildung 4-15)
4. Betonieren des Versuchskörpers, Verdichten mit Hilfe einer Rüttelflasche und Abziehen der Betonoberseite
5. nach einem Tag ausschalen

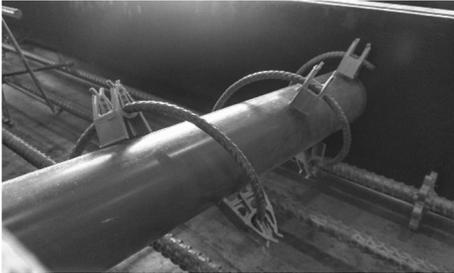


Abbildung 4-15: Wendel um eine Leitung mit Abstandhaltern befestigt

Die Herstellung der Probekörper aus Halbfertigteilen erfolgte in den folgenden Schritten:

1. Herstellung der Bewehrungskörbe
2. Herstellung der Schalung
3. Einbau der Bewehrungskörbe und der Rohre in die Schalung
4. Betonieren der Elementplatte, Verdichten mit Hilfe einer Rüttelflasche, Aufrauen mit Hilfe eines Rechens (Zinkenabstand 40 mm)
5. ein Tag später Betonieren der Ortbetonerfüllung, Verdichten mit Hilfe einer Rüttelflasche und Abziehen der Betonoberseite
6. nach einem Tag ausschalen

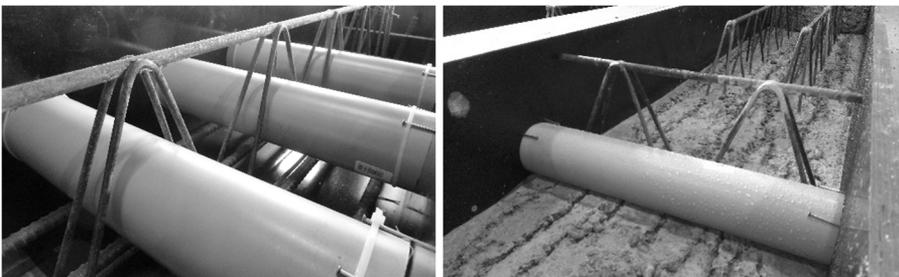


Abbildung 4-16: Bewehrungskörbe vor der Betonage der Fertigteilplatte (links), aufgeraute Fertigteilplatte (rechts)

4.5 Versuchsaufbau und Messtechnik

Für die 3-Punkt-Biegeversuche wurden die Stahlbetonbalken auf zwei Rollenlagern positioniert. Um eine Auflagerverdrehung zu ermöglichen, wurde das eine Auflager als unverschieblich und das andere als verschieblich eingestellt. Zwischen den Rollenlagern und dem Balken wurde jeweils eine Stahlplatte mit Elastomerlager eingebaut. Die Stahlplatte soll die Auflagerkraft auf 10 cm verteilen, das Elastomer eine gleichmäßige Spannungsverteilung gewährleisten. Die Lastaufbringung erfolgte mithilfe eines Servohydraulikzylinders und wurde in ein Lastverteilungsträger weitergeleitet, der eine Linienlast senkrecht zur Tragrichtung des Balkens erzeugte. Zwischen dem Zylinder und dem Lastverteilungslager wurde eine Kalotte angebracht, um eine Verdrehung des Bauteils zu ermöglichen. Zur Dokumentation der Versuche wurden verschiedene Messtechniken angewendet. Die Messdaten der Zylindersteuerung sowie der Wegaufnehmer wurden kontinuierlich während des Versuches aufgezeichnet. Die Rissbreiten wurden zudem zusätzlich unter Verwendung einer Risskarte dokumentiert. Zusätzlich wurde eine Fotodokumentation erstellt. Der Versuchsaufbau, sowie die Anordnung der Messtechnik ist in Abbildung 4-17 dargestellt.

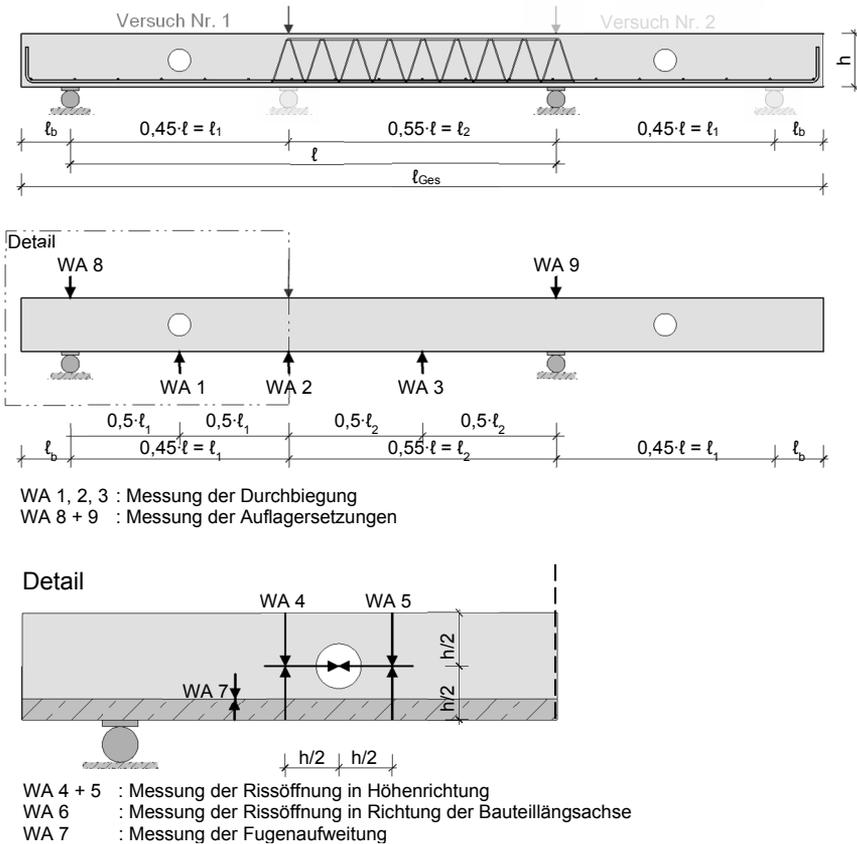


Abbildung 4-17: Schematischer Versuchsaufbau (oben), schematische Anordnung der Messtechnik (mitte) und Messtechnik-Detail (unten)

Insgesamt wurden sieben Wegaufnehmer (WA) verwendet. Anhand der Messdaten von WA 1 - 3, die unter dem Versuchskörper angebracht waren, wurde die Durchbiegung gemessen und so eine Biegelinie erstellt. Bei den Wegaufnehmern handelte es sich um den Typ W50 (Messbereich: 50mm) der Firma HBM. WA 4 und 5 wurden rechts und links neben der Öffnung im Abstand von $h/2$ angebracht. Dies entspricht dem Bereich des zu erwartenden Versagensrisses. Diese sollten den horizontalen Anteil des Schubrisses im Bereich der Öffnung messen. WA 6 wurde auf Höhe der Schwerachse angebracht und misst den vertikalen Anteil des Schubrisses im Bereich des zu erwartenden Schubrisses. Wegaufnehmer Nr. 7 wurde angebracht, um bei den Versuchen an Elementdecken das Öffnen der Elementfuge zu messen. Für WA 4 - 7 wurde der Typ WA20 (Messbereich: 20mm) der Firma HBM verwendet.

Bei einigen Versuchen wurden zusätzlich Dehnmessstreifen (DMS) an der Querkraftbewehrung eingesetzt. Allerdings lieferte diese Messmethode keine für die weitere Arbeit relevanten und weiterführenden Messdaten.

Da die Wegaufnehmer 4 und 5 über die komplette Bauteilhöhe messen, wurde nicht die exakte Rissbreite des kritischen Schubrisses gemessen, sondern die Summe aller horizontalen Rissanteile über die Bauteilhöhe in diesem Bereich. Gleiches gilt für WA 6 und die vertikalen Anteile der Risse. Mit diesen Messwerten kann die Last bestimmt werden, bei der das instabile Risswachstum beginnt.

Aufgrund der Erkenntnisse von *Marx et al (2011)* wurde im Rahmen dieser Arbeit auf die Anwendung weiterführender Messverfahren wie z.B. Schallemission und Photogrammetrie verzichtet. Diese Verfahren liefern zwar detailliertere Informationen über die Mikrorissbildung, jedoch ermöglichen sie keine bessere Beurteilung der Eignung der getesteten Bewehrungselemente als herkömmliche Messtechnik und stehen somit im Zusammenhang mit dieser Arbeit in keinem sinnvollen Kosten-Nutzen-Verhältnis.

4.6 Versuchsablauf

Die Bauteile wurden stufenweise (10 bzw. 5 kN Schritte) belastet. Zwischen den einzelnen Laststufen wurde der Zylinder für ca. 3 - 5 Minuten in der angesteuerten Position gehalten (siehe Abbildung 4-18). Durch die Belastungspausen sollen Kriechverformungen ermöglicht werden. Diese führten zu geringen Lastabfällen während der Belastungspausen.

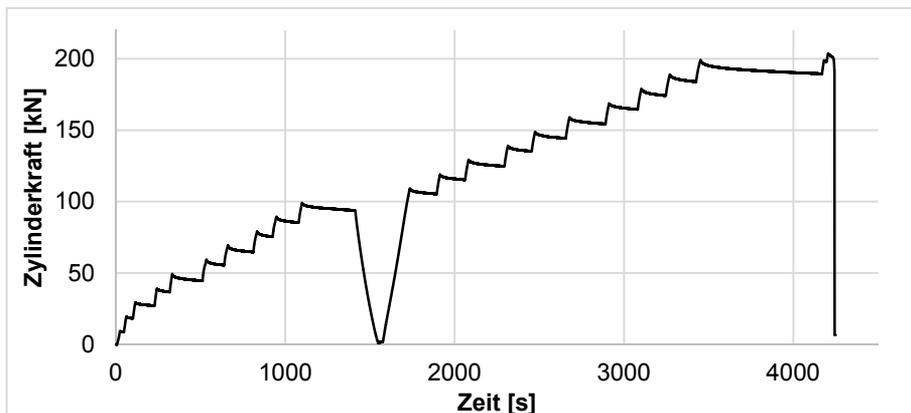


Abbildung 4-18: Belastungsschema am Beispiel von S5_V1-1

Bevor das Bauteil bis zum Versagen belastet wurde, fand eine Entlastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus statt. Dies führt im Allgemeinen zu einer Verschlechterung des Verbundes zwischen Biegebewehrung und Beton. Das Gebrauchslastniveau war erreicht, wenn die Bemessungslast auf dem Versuchskörper aufgebracht ist. Die Berechnung der Gebrauchslast erfolgte durch Division der erwarteten Querkrafttragfähigkeit mit den bemessungsüblichen Teilsicherheitsbeiwerten.

$$V_{\text{GZG}} = \frac{V_{\text{u,erwartet}}}{\gamma_{\text{c}} \cdot \gamma_{\text{F}}}$$

mit :

$$\gamma_{\text{c}} = 1,5$$

Teilsicherheitsbeiwert Beton

$$\gamma_{\text{F}} = (1,35 + 1,5) / 2 = 1,425 \text{ mittlerer Teilsicherheitsbeiwert Last}$$

Die berechnete Querkraft wurde mit dem Faktor 0,55 auf die Zylinderkraft umgerechnet. Dieser Faktor ergibt sich aus der gewählten Position der Belastungseinrichtung.

$$F_{\text{Zylinder,GZG}} = \frac{V_{\text{GZG}}}{0,55}$$

Üblicherweise finden die Be- und Entlastung für den GZG zehnmals statt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf diese Vorgehensweise angesichts der hohen Versuchsanzahl aus Zeitgründen verzichtet. Die Versuche werden untereinander verglichen, sodass dieser Einfluss keine Rolle spielt. Zudem sind zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung die Traglast und damit auch die Gebrauchslast noch nicht genau bekannt. Zwar ist eine ungefähre Abschätzung möglich, eine Über- oder

Unterschätzung der Gebrauchslast würde zu nicht angemessenen Vorbelastungen führen und somit die Ergebnisse schwer vergleichbar machen.

Neben der Betrachtung des Bemessungszustands zur Ermittlung des Gebrauchslastniveaus kann auch die Grenzdurchbiegung zur Festlegung der Gebrauchslast zum Ansatz gebracht werden. Für die Verformungsbegrenzung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit für Bauteile mit erhöhten Anforderungen an die Durchbiegung gilt nach *DIN EN 1992-1-1*:

$$w = \frac{L}{500} .$$

Sowohl bei Erreichen der errechneten Gebrauchslast als auch bei Erreichen der Grenzdurchbiegung wurden alle relevanten Werte (Verformungen, Rissbreiten, optische Auffälligkeiten) notiert und gemessen.

Nach Entlastung und erneuter Belastung bis zum Gebrauchslastniveau wurde die Last wieder in 10 kN Schritten mit Pausen von 3 - 5 min gesteigert. Die letzten Laststufen (ab 2/3 der zu erwartenden Last) wurden auf 5 kN reduziert.

Ein typisches Last-Verformungsdiagramm ist in Abbildung 4-19 dargestellt. Hier sind zudem die plastische Verformung, der Zustand I und II, die Grenzdurchbiegung, die Gebrauchslast und die Traglast gekennzeichnet.

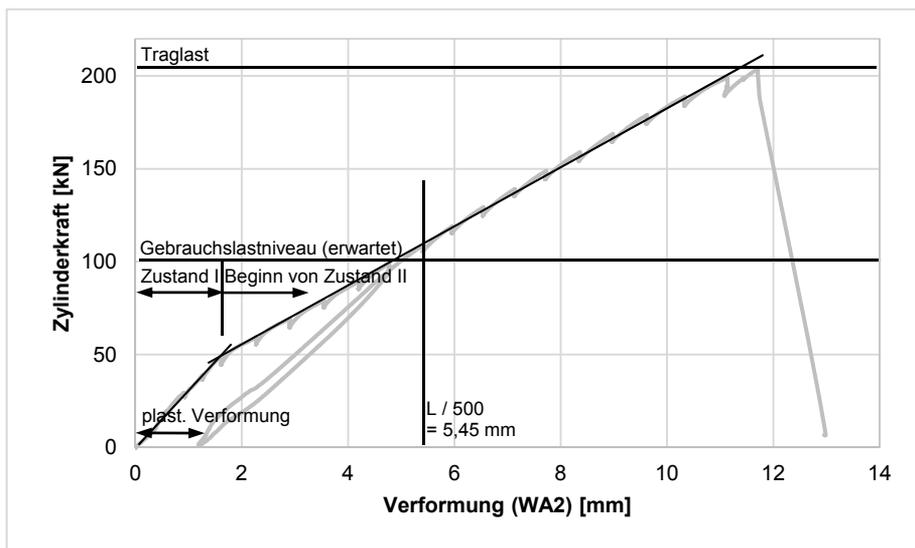


Abbildung 4-19: Last-Verformungskurve am Beispiel von S5_V1-1

Das Versagen des Bauteils kündigte sich durch die Entstehung von Schubrisse an. Um die Entwicklung der Biegerisse in Schubrisse besser beobachten zu können, wurde das Rissbild nach jeder Laststufe auf den Versuchskörpern angezeichnet und dokumentiert. Die Rissbreite des Versagensrisses wurde durch Wegaufnahme aufgezeichnet (siehe Abbildung 4-20). Der Zeitpunkt des Querkraftversagens konnte auf diese Weise gut abgeschätzt werden.

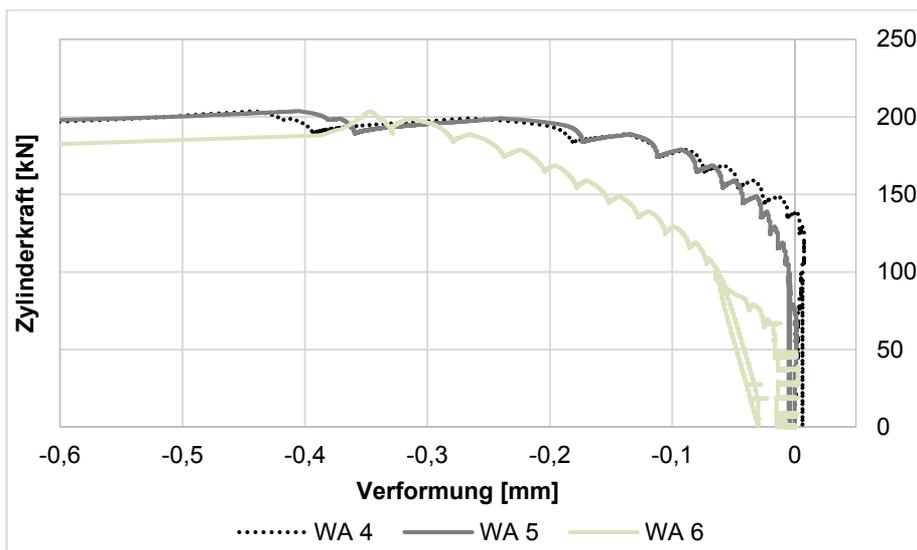


Abbildung 4-20: Rissbreiten-Last Diagramm am Beispiel des Versuchs S5_V1-1

Der Versuch endete i. d. R. mit dem Querkraftversagen des Bauteils. Das genaue Bruchbild wurde anschließend vermaßt und protokolliert. Der Vermaßung zu Grunde gelegt wurde das in Abbildung 4-21 dargestellte idealisierte Bruchbild.

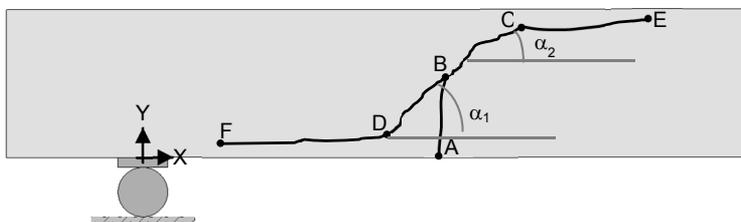


Abbildung 4-21: Idealisiertes Rissbild inklusive aller Messpunkte für die Rissvermaßung

Aufgenommen wurde der horizontale Abstand zwischen Auflagerpunkt und dem Rissbeginn des den Schubriss einleitenden Biegerisses „A“ sowie die Stelle an der sich die Richtung des Biegerisses deutlich neigte „B“ in x- und y-Richtung. Außerdem wurden die Neigungswinkel des Schubrisses α_1 und α_2 gemessen. Der Punkt, an dem sich der Neigungswinkel änderte, wurde ebenfalls in x- und y-Richtung vermessen und ist mit „C“ gekennzeichnet. Der Rissverlauf in Richtung Zugzone wurde durch die Punkte „D“ (Riss traf auf die Biegebewehrung) und „F“ (Ende des Dübelrisses) festgehalten. Außerdem wurde die Höhe der verbliebenen Druckzone „E“ notiert.

4.7 Besonderheiten bei der Auswertung

4.7.1 Berücksichtigung der Eigenlast

Da die Eigenlast in Bauteilversuchen messtechnisch nicht erfasst wird, trotzdem aber Schnittgrößen– wenn auch relativ kleine –erzeugt, wird im Rahmen der Auswertung die Querkraft infolge Eigenlast bei den Rechenwerten (z.B. $V_{Rm,c}$) abgezogen. Somit ist eine direkte Vergleichbarkeit gegeben.

4.7.2 Berücksichtigung von Modellunsicherheiten und Teilsicherheitsbeiwerten

Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung

Für den Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Erfahrungswert $V_{Rm,c}$ wird bei einem Bewehrungsgrad von ca. 1 % gemäß *DAfStb Heft 600* ein Kalibrierfaktor $c_m = 0,19$ verwendet. Auf charakteristischem Bemessungsniveau beträgt dieser $c_k = 0,15$. Somit errechnet sich die Modellunsicherheit von Mittelwert zu charakteristischem Wert zu:

$$\gamma_{\text{mod}} = \frac{V_{Rm,c}}{V_{Rk,c}} = \frac{0,19}{0,15} = 1,27$$

Für den Bemessungswert wird der Kalibrierfaktor zusätzlich durch 1,5 (Teilsicherheitsbeiwert) dividiert. Die Modellunsicherheit beträgt dann:

$$\gamma_{\text{mod}} = \frac{V_{Rm,c}}{V_{Rd,c}} = \frac{0,19}{0,15 / 1,5} = 1,9$$

Querkrafttragfähigkeit mit Querkraftbewehrung

Die Modellunsicherheit zwischen 5%-Fraktile und Mittelwert für Bauteile mit senkrechten Bügeln und einer Betonfestigkeit von $f_{c,cyl} = 32 \text{ N/mm}^2$ liegt bei ca. 1,2 (*DAfStb Heft 597*). Dieser Wert gilt jedoch nicht für schräge Bewehrungsstäbe, wie sie bei den Versuchen an Elementdecken angewendet werden. Daher soll die Modellunsicherheit näherungsweise über Versuche bestimmt werden (siehe hierzu Abschnitt 6).

4.7.3 Beurteilung der Versuche auf systematische Fehler und Vergleich mit Erfahrungswerten aus der Literatur

Um systematische Fehler auszuschließen, werden die Versuchsergebnisse mit Ergebnissen aus der Literatur verglichen (*DAfStb Heft 600*; *DAfStb Heft 597*; *Keil (2011)*; *Thiele (2010)*). Hierzu werden neben der Traglast auch das Rissbild und die Versagensart verglichen.

5 Wendel als Querkraftbewehrung um Leitungen

Die grundlegenden Gedanken zur Tragwirkung der Wendel als Querkraftbewehrung um Leitungen in Stahlbetondecken wurden in Abschnitt 4.2.1 beschrieben. Nachfolgend wird detailliert auf die durchgeführten Versuche, sowie auf die Konzeption eines Bemessungsansatzes eingegangen.

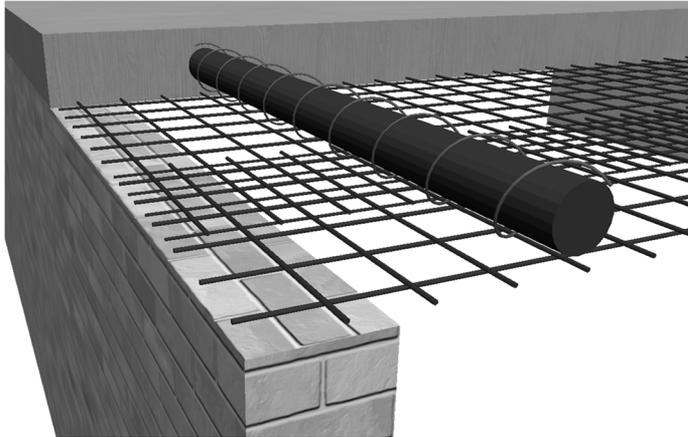


Abbildung 5-1: Beispielhafte Darstellung einer Wendel

5.1 Versuche

5.1.1 Allgemeines

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden insgesamt 70 Bauteilversuche durchgeführt. In mehreren Versuchsserien wurden unterschiedliche Parameter variiert. In Tabelle 5-1 sind diese Serien zusammengefasst. Hierbei sind die untersuchten Parameter sowie die Minimal- und Maximalwerte der wichtigsten Parameter aufgeführt. Da diese Versuche im Rahmen studentischer Arbeiten durchgeführt wurden, ist in der letzten Spalte die Referenzarbeit angegeben. Die detaillierten Versuchsprogramme der einzelnen Serien werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit dargestellt.

Tabelle 5-1: Versuchsprogramm zur Untersuchung der Wendel

Serie	untersuchter Parameter	h [cm]	d_{ϕ}/d [-]	S_k [-]	Φ_{Wendel} [mm]	n [-]	Referenz
1	Öffnungsdurchmesser und Windungszahl	20	0,18 – 0,53	0,16 – 0,49	6	1 - 5	Mauer (2014a)
2	Öffnungsdurchmesser und Windungszahl	30	0,19 – 0,46	0,67 – 1,11	8	3 - 5	Puhane (2014)
3	Lage des Öffnung inkl. Wendel	30	0,33	0,89	8	4	Reichert (2014)
4	Stabdurchmesser der Wendel	30	0,33	0,87 – 1,04	6 – 10	3 - 7	Reichert (2014)
5	Öffnungsdurchmesser und Windungszahl	30	0,28	0,37 – 0,75	6	3 - 6	Müller (2015)
6	Öffnungsdurchmesser und Windungszahl	20	0,37 – 0,53	0,33 – 0,82	6	2 - 5	Mauer (2014b)
7	Öffnungsdurchmesser und Windungszahl	30	0,18 – 0,46	0,25 – 0,50	6	2 - 4	Müller (2015)

5 Wendel als Querkraftbewehrung um Leitungen

Um eine eindeutige Zuordnung der Versuchsdaten zu gewährleisten, wurde eine einheitliche Versuchsbezeichnung eingeführt. Diese enthält alle wichtigen Versuchsparameter. Nachfolgend wird die Bezeichnung anhand eines Beispiels erläutert:

S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,4-30_V6

S3	Serie 3	
C30/37	Betonfestigkeitsklasse	
30	Deckenhöhe in cm	h
0,33	Öffnungsdurchmesser / statische Höhe	d_{ϕ}/d
0,89	Schubkonzentrationsfaktor	S_k
8	Stabdurchmesser der Wendel in mm	Φ_{Wendel}
4	Anzahl der Windungen	n
0,4	Abstand der Öffnungsachse vom Auflager	$0,4 \cdot a$
30	Abstand der Öffnungsachse von der Schwerachse in mm (+ in Richtung Zugzone)	
V6	Versuchsnummer innerhalb dieser Serie	

Um eine bessere Verweisbarkeit zu erhalten wurde zudem eine Kurzbezeichnung eingeführt. Hierbei wird bei der Bezeichnung der mittlere Teil weggelassen. Somit ergibt sich für oben genanntes Beispiel die folgende Kurzbezeichnung:

S3_V6

Diese Kurzbezeichnungen werden im weiteren Verlauf für Verweise und Diagramme verwendet.

Die Versuchskonzeption, Messtechnik, Dimensionierung und der Ablauf sind in Kapitel 4 dargestellt. In Abbildung 5-2 ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt.

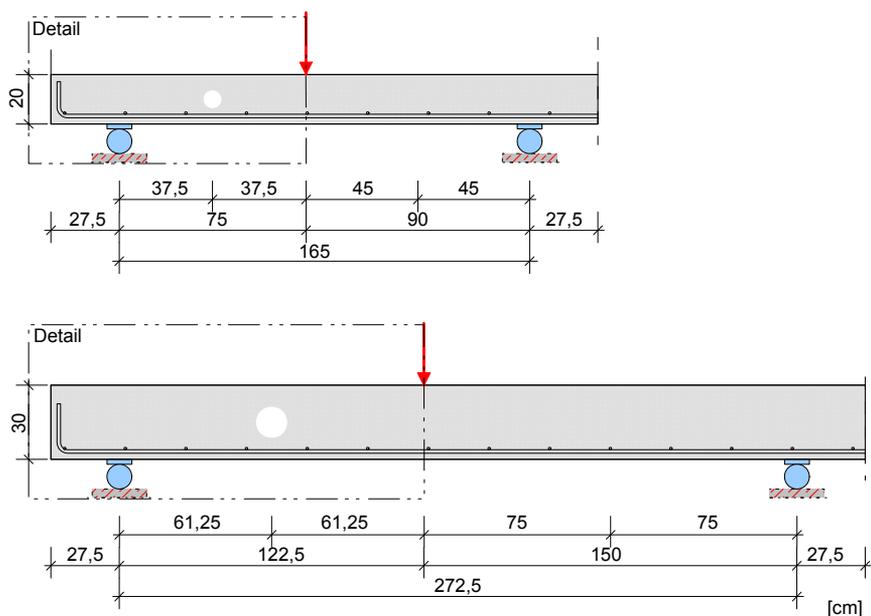


Abbildung 5-2: Schematischer Versuchsaufbau der 3-Punkt-Biegeversuche mit Ortbetondecken (oben: Deckenhöhe = 20 cm, unten: Deckenhöhe = 30 cm). Der Detailrahmen zeigt den im weiteren Verlauf der Arbeit dargestellten Bereich.

5.1.2 Betonfestigkeiten

Für eine spätere Auswertung werden alle Versuche auf eine Referenzbetonfestigkeit von 40 N/mm^2 gemäß Kapitel 4.3 normiert. Als Referenzversuch wird der Mittelwert aller normierten Versuche am unbewehrten Vollquerschnitt mit gleichen Abmessungen verwendet.

In Tabelle 5-2 wird die Betonfestigkeit der einzelnen Serien tabellarisch dargestellt. Die Festigkeit wurde mittels Würfel – die zusammen mit den Versuchskörpern gelagert wurden – zeitnah (± 1 Tag) zu den Versuchen geprüft. Daher wird auf eine tagesgenaue Anpassung der Festigkeiten der einzelnen Versuche verzichtet.

Tabelle 5-2: Betondruckfestigkeiten der Serien 1 bis 7

Serie	Betonierdatum	Prüfdatum	Alter [Tage]	$f_{c,cube1}$ [N/mm ²]	$f_{c,cube2}$ [N/mm ²]	$f_{c,cube3}$ [N/mm ²]	$f_{cm,cube}$ [N/mm ²]
S1	03.07.2013	19.07.2013	16	43,9	45,2	45,6	44,9
S2	10.09.2013	07.10.2013	27	53,5	50,6	55,3	53,1
	23.09.2013	15.10.2013	22	50,6	47,7	49,7	49,3
	18.09.2013	10.10.2013	22	55,0	55,9	55,0	55,3
S3	23.09.2013	15.10.2013	22	50,6	47,7	49,7	49,3
S4	18.09.2013	10.10.2013	22	55,0	55,9	55,0	55,3
S5	26.06.2014	15.07.2014	19	54,3	54,6	55,0	54,6
S6	31.07.2014	28.08.2014	28	48,7	50,7	51,1	50,1
S7	16.09.2014	05.11.2014	50	38,6	37,7	38,4	38,2

5.1.3 Referenzversuche

Als Referenzversuche werden zum einen Deckenstreifen ohne Querkraftbewehrung und ohne Öffnung geprüft. Diese sollen eine Einordnung in Versuchsdatenbanken wie z.B. *DAfStb Heft 597* ermöglichen und somit systematische Fehler ausschließen. Zum anderen werden Versuche mit Deckenstreifen ohne Querkraftbewehrung mit Öffnungen durchgeführt. Diese Versuche sollen die Versuche aus *Thiele (2010)* bestätigen.

5.1.3.1 Vollquerschnitt

Bevor die Ergebnisse der Versuche mit Wendeln ausgewertet werden, werden zuerst die Referenzversuche dargestellt. Die Normierung der Traglasten erfolgt hierbei gemäß Abschnitt 4.3.

Tabelle 5-3: Traglasten der Referenzversuche der Serien 1 bis 7

Kurzbezeichnung	Deckenhöhe h [cm]	Traglast F_u [kN]	Betonfestigkeit $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	normierte Traglast $F_{u,40}$ [kN]	Mittelwert $F_{u,m,40}$ [kN]	Streuung CV [%]
S1_V1	20	158	44,9	152	156,3	6,8
S1_V11		150	44,9	144		
S1_V12		180	44,9	173		
S6_V1		170	50,1	157		
S6_V6		167	50,1	154		
S2_V1		30	236	53,1		
S2_V13	227		49,3	212		
S2_V14	229		55,3	206		
S5_V3-1	217		54,6	196		
S7_V1	198		38,2	201		

Wie Tabelle 5-3 zu entnehmen ist, sind die Streuungen der einzelnen Versuche aus den verschiedenen Serien gering. Bei Betrachtung der Last-Verformungskurven stellt man zudem fest, dass sowohl die Maximallast als auch die Steifigkeit und das Verformungsverhalten sehr ähnlich sind (siehe Abbildung 5-3 und 5-3). Alle Versuchskörper versagten infolge eines Biegeschubrisse. Dieser verlief im zu erwartenden Bereich ($0,4 \cdot a$ bis $0,6 \cdot a$) der Versuchskörper. Daher ist eine Vergleichbarkeit der einzelnen Serien gegeben und die Versuche können zusammen ausgewertet werden. Die Last-Verformungskurven, sowie die Rissbilder und Versuchsprotokolle aller Versuche sind in Anhang A dargestellt.

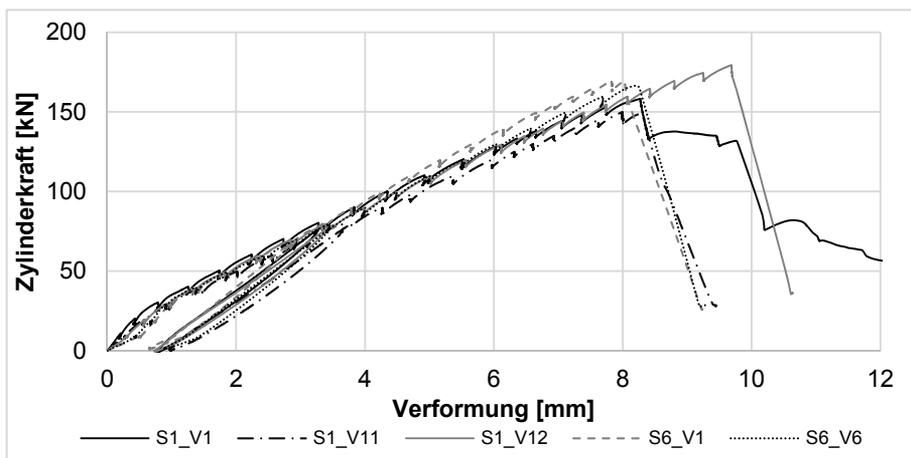


Abbildung 5-3: Vergleich der Last-Verformungskurven der Referenzversuche der Versuchskörper mit $h = 20$ cm

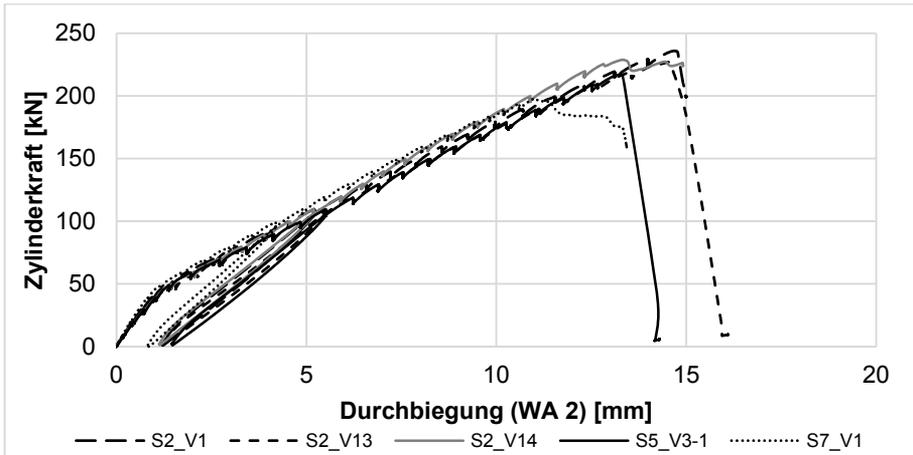


Abbildung 5-4: Vergleich der Last-Verformungskurven der Referenzversuche der Versuchskörper mit $h = 30$ cm

Um systematische Fehler im Versuchsaufbau und der Versuchskörperkonzeption auszuschließen, werden die Versuchsergebnisse mit Erfahrungswerten verglichen (*DAfStb Heft 600*; *DAfStb Heft 597*).

$$V_{Rm,c} = \left[c_m \cdot \eta_1 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{1c})^{1/3} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (5.1)$$

$$F_{V_{Rm,c}} = \frac{V_{Rm,c} - V_{g, \text{Versuchskörper}}}{0,55}$$

Bei dem hier verwendeten Bewehrungsgrad von ca. 1 % liegt der Kalibrierfaktor C_m bei ca. 0,17 – 0,20 (siehe hierzu Abbildung 4-13). Somit ergeben sich die in Tabelle 5-4 dargestellten Traglasten. Hierbei wurde bei $F_{V_{Rm,c}}$ die Eigenlast des Versuchskörpers subtrahiert, da diese in den Traglasten der Versuche messtechnisch nicht enthalten ist. Die Querkraft wurde mittels Gl. (5.1) auf die Zylinderlast umgerechnet. Als Betonfestigkeit wurde die aus der Würfeldruckfestigkeit errechnete Zylinderdruckfestigkeit ($f_{c,cyl} = 0,8 \cdot f_{c,cube}$) verwendet und auf die einachsiale Festigkeit gemäß *DAfStb Heft 597* umgerechnet $f_{1c} = 0,95 \cdot f_{c,cyl}$.

Tabelle 5-4: Gegenüberstellung der Traglasten der Referenzversuche der Serien 1 bis 7 mit den Erfahrungswerten

Deckenhöhe h [cm]	Mittelwert $F_{u,m,40}$ [kN]	Streuung CV [%]	Erfahrungswert $F_{V_{Rm,c}}$ [kN]
20	156,3	6,8	136 - 154
30	205,7	3,8	183 - 205

Die erzielten Traglasten der Referenzversuche stimmen sehr gut mit den Erfahrungswerten aus *DAfStb Heft 597* und *DAfStb Heft 600* überein. Somit ist ein systematischer Fehler in der Versuchseinrichtung, der Messtechnik oder ähnlichem auszuschließen. Des Weiteren bestätigt dies die Verwendbarkeit des höherfesten Stahls als Biegebewehrung.

5.1.3.2 Versuche mit Öffnungen ohne Wendeln

Nach der Bewertung der Referenzversuche am Vollquerschnitt, werden hier die Versuche mit Öffnungen ohne Wendel ausgewertet (siehe Tabelle 5-5). Diese wurden zur Verifizierung des Bemessungskonzepts nach Kapitel 2.2.2 durchgeführt. Auch diese Versuchskörper versagten infolge eines Biegeschubrisses. Wie erwartet verlief dieser mitten durch die Öffnung. Für die anschließende Bewertung wird die bezogene Tragfähigkeit verwendet. Diese bildet sich aus dem Quotienten der Traglast des betrachteten Versuchsergebnisses zur Referenztraglast des zugehörigen Versuchs am Vollquerschnitt.

Tabelle 5-5: Traglasten der Versuche mit Öffnungen ohne Wendel

Kurzbezeichnung	Deckenhöhe h [cm]	d_0/d [-]	Traglast $F_{u,test}$ [kN]	Betonfestigkeit $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	normierte Traglast $F_{u,40}$ [kN]	normierte Referenzlast $F_{u,m,Ref,40}$ [kN]	bezogene Tragfähigkeit r_u [-]
S1_V2	20	0,18	142	44,9	137	156,3	0,87
S1_V4		0,37	115	44,9	111		0,71
S1_V7		0,53	82	44,9	79		0,50
S6_V2		0,37	110	50,1	102		0,65
S6_V7		0,53	84	50,1	78		0,50
S2_V2	30	0,19	178	53,1	162	205,7	0,79
S2_V4		0,33	189	53,1	172		0,84
S2_V9		0,46	141	53,1	128		0,62
S5_V3-2		0,28	136	54,6	123		0,60

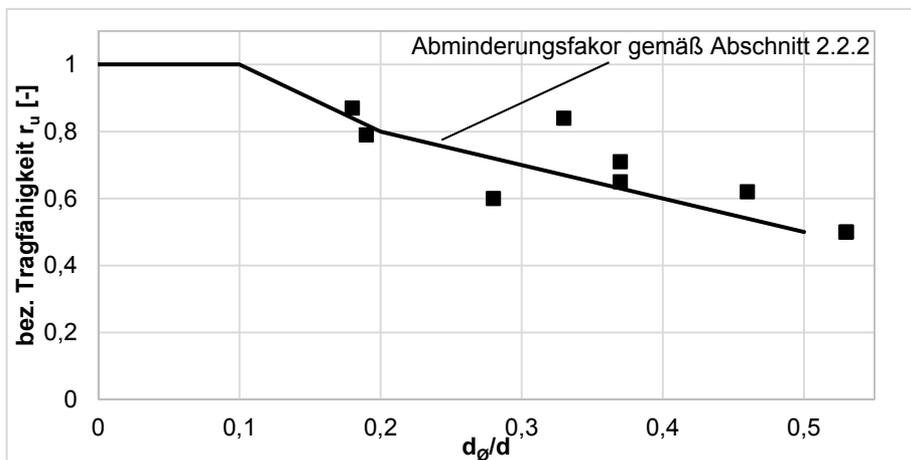


Abbildung 5-5: Bezogene Tragfähigkeiten der Versuche aus Tabelle 5-5 inkl. des Abminderungsfaktors k_{0n} in Abhängigkeit vom Verhältnis d_0/d

Wie Abbildung 5-5 zu entnehmen ist, stimmen die Versuchsergebnisse (schwarze Punkte) sehr gut mit dem Bemessungskonzept für Öffnungen in Decken (Abminderungsfaktor gemäß Abschnitt 2.2.2) überein. Somit liegen genügend verifizierte Versuchsdaten vor, um die Ergebnisse mit Wendeln bewerten zu können.

5.1.4 Einfluss des Öffnungsdurchmessers und der Windungsanzahl

5.1.4.1 Versuchsprogramm

In den Serien 1 und 6 wurden der Einfluss des Öffnungsdurchmessers, sowie der Einfluss der Anzahl der Windungen bei einer Deckenhöhe von 20 cm untersucht. In Tabelle 5-6 werden die Versuche dieser beiden Serien tabellarisch aufgeführt. Konstante Parameter sind:

- Deckenhöhe 20 cm;
- Betonfestigkeitsklasse C30/37;
- Lage der Öffnungen bei $0,5 \cdot a$ und auf Höhe der Schwerachse.

Die in der Nummerierung fehlenden Versuche sind Referenzversuche. Diese wurden in Kapitel 5.1.3 ausgewertet.

Tabelle 5-6: Übersicht der Versuche aus den Serien 1 und 6

Serie	$d\phi/d$ [-]	S_k [-]	Φ_{Wendel} [mm]	n [-]	Versuchs- nummer	Kurz- bezeichnung	Langbezeichnung
S1	0,18	0,16	6	1	V3	S1_V3	S1_C30/37-20-0,18-0,16-6-1_V3
S1	0,37	0,16	6	1	V5	S1_V5	S1_C30/37-20-0,37-0,16-6-1_V5
S1	0,37	0,33	6	2	V6	S1_V6	S1_C30/37-20-0,37-0,33-6-2_V6
S1	0,53	0,16	6	1	V8	S1_V8	S1_C30/37-20-0,53-0,16-6-1_V8
S1	0,53	0,33	6	2	V9	S1_V9	S1_C30/37-20-0,53-0,33-6-2_V9
S1	0,53	0,49	6	3	V10	S1_V10	S1_C30/37-20-0,53-0,49-6-3_V10
S6	0,37	0,33	6	2	V3-1	S6_V3-1	S6_C30/37-20-0,37-0,33-6-2_V3-1
S6	0,37	0,33	6	2	V3-2	S6_V3-2	S6_C30/37-20-0,37-0,33-6-2_V3-2
S6	0,37	0,49	6	3	V4-1	S6_V4-1	S6_C30/37-20-0,37-0,49-6-3_V4-1
S6	0,37	0,49	6	3	V4-2	S6_V4-2	S6_C30/37-20-0,37-0,49-6-3_V4-2
S6	0,37	0,66	6	4	V5-1	S6_V5-1	S6_C30/37-20-0,37-0,66-6-4_V5-1
S6	0,37	0,66	6	4	V5-2	S6_V5-2	S6_C30/37-20-0,37-0,66-6-4_V5-2
S6	0,53	0,49	6	3	V8-1	S6_V8-1	S6_C30/37-20-0,53-0,49-6-3_V8-1
S6	0,53	0,49	6	3	V8-2	S6_V8-2	S6_C30/37-20-0,53-0,49-6-3_V8-2
S6	0,53	0,66	6	4	V9-1	S6_V9-1	S6_C30/37-20-0,53-0,66-6-4_V9-1
S6	0,53	0,66	6	4	V9-2	S6_V9-2	S6_C30/37-20-0,53-0,66-6-4_V9-2
S6	0,53	0,82	6	5	V10-1	S6_V10-1	S6_C30/37-20-0,53-0,82-6-5_V10-1
S6	0,53	0,82	6	5	V10-2	S6_V10-2	S6_C30/37-20-0,53-0,82-6-5_V10-2

In den Serien 2, 5 und 7 wurden der Einfluss des Öffnungsdurchmessers, sowie der Einfluss der Anzahl der Windungen bei einer Deckenhöhe von 30 cm untersucht. In Tabelle 5-7 werden diese Serien aufgeführt. Hierbei konstante Parameter sind:

- Deckenhöhe 30 cm;
- Betonfestigkeitsklasse C30/37;
- Lage der Öffnungen bei $0,5 \cdot a$ und auf Höhe der Schwerachse.

Die in der Nummerierung fehlenden Versuche sind Referenzversuche Diese wurden in Kapitel 5.1.3 ausgewertet.

Tabelle 5-7: Übersicht der Versuche aus den Serien 2, 5 und 7

Serie	d_0/d [-]	S_k [-]	Φ_{Wendel} [mm]	n	Versuchs- nummer	Kurz- bezeichnung	Langbezeichnung
S2	0,19	0,67	8	3	V3	S2_V3	S2_C30/37-30-0,19-0,67-8-3_V3
S2	0,33	0,67	8	3	V5	S2_V5	S2_C30/37-30-0,33-0,67-8-3_V5
S2	0,33	0,89	8	4	V6	S2_V6	S2_C30/37-30-0,33-0,89-8-4_V6
S2	0,33	0,89	8	4	V7	S2_V7	S2_C30/37-30-0,33-0,89-8-4_V7
S2	0,33	0,89	8	4	V8	S2_V8	S2_C30/37-30-0,33-0,89-8-4_V8
S2	0,46	0,67	8	3	V10	S2_V10	S2_C30/37-30-0,46-0,67-8-3_V10
S2	0,46	0,89	8	4	V11	S2_V11	S2_C30/37-30-0,46-0,89-8-4_V11
S2	0,46	1,11	8	5	V12	S2_V12	S2_C30/37-30-0,46-1,11-8-5_V12
S5	0,28	0,37	6	3	V1-1	S5_V1-1	S5_C30/37-30-0,28-0,37-6-3_V1-1
S5	0,28	0,50	6	4	V1-2	S5_V1-2	S5_C30/37-30-0,28-0,50-6-4_V1-2
S5	0,28	0,62	6	5	V2-1	S5_V2-1	S5_C30/37-30-0,28-0,62-6-5_V2-1
S5	0,28	0,75	6	6	V2-2	S5_V2-2	S5_C30/37-30-0,28-0,75-6-6_V2-2
S7	0,18	0,25	6	2	V2	S7_V2	S7_C30/37-30-0,18-0,25-6-2_V2
S7	0,18	0,37	6	3	V3	S7_V3	S7_C30/37-30-0,18-0,37-6-3_V3
S7	0,33	0,25	6	2	V4	S7_V4	S7_C30/37-30-0,33-0,25-6-2_V4
S7	0,33	0,37	6	3	V5	S7_V5	S7_C30/37-30-0,33-0,37-6-3_V5
S7	0,33	0,50	6	4	V6	S7_V6	S7_C30/37-30-0,33-0,50-6-4_V6
S7	0,46	0,25	6	2	V7	S7_V7	S7_C30/37-30-0,46-0,25-6-2_V7
S7	0,46	0,37	6	3	V8	S7_V8	S7_C30/37-30-0,46-0,37-6-3_V8

5.1.4.2 Ergebnisse

Alle Versuchskörper versagten durch Entstehung eines Biegeschubrisses. Dieser verlief bei einer Tragfähigkeit unterhalb der des Vollquerschnitts i. d. R. durch die Öffnung hindurch. D. h., die Wendel konnte den Schubriss nicht bzw. nicht ausreichend zusammenhalten (siehe Abbildung 5-6 oben). Bei den Versuchen die die Tragfähigkeit des Vollquerschnitts erreicht haben, verlief der zum Versagen führende Schubriss an der Öffnung und an der Wendel vorbei. Die Wendel konnte demnach ihr Potential voll entfalten und den Riss um die Öffnung herumführen. Der Riss durch die Öffnung hindurch bildet sich zwar (Riss A), wird aber zusammengehalten. Es bildet sich ein neuer Biegeschubriss (Riss B) neben der Öffnung, der zum Versagen führt (siehe Abbildung 5-6 unten). Diese Versuche liefern den Bewehrungsgehalt / Schubkonzentrationsfaktor bei dem die volle Tragfähigkeit erreicht wird. Die Versuche

bei denen das nicht der Fall war führen im weiteren Verlauf dieser Arbeit zu einem Bemessungskonzept für die Wendel.

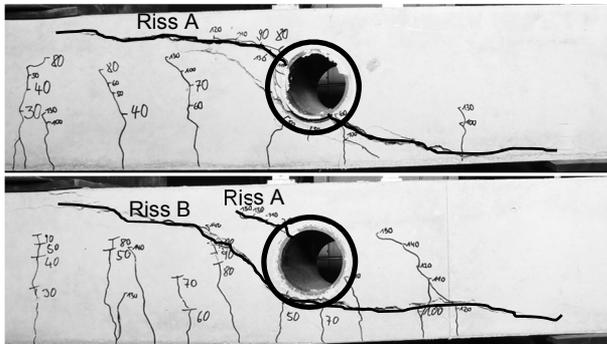


Abbildung 5-6: Rissbilder der Versuche S6_V8-2 (oben) und S6_V10-1 (unten)

Die Versuche bei denen der Versagensriss durch die Öffnung hindurch verlief, weisen ein duktileres Nachbruchverhalten als unbewehrte Bauteile auf. Bei den Versuchen in denen die volle Tragfähigkeit erreicht wurde, verlief der Riss um die Wendel herum und das Bauteil versagte ebenso spröde wie ein unbewehrtes Bauteil. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5-7 am Beispiel der Versuche S6_V8-2 (Versuch mit Wendel) und S6_V7 (Versuch ohne Wendel) dargestellt.

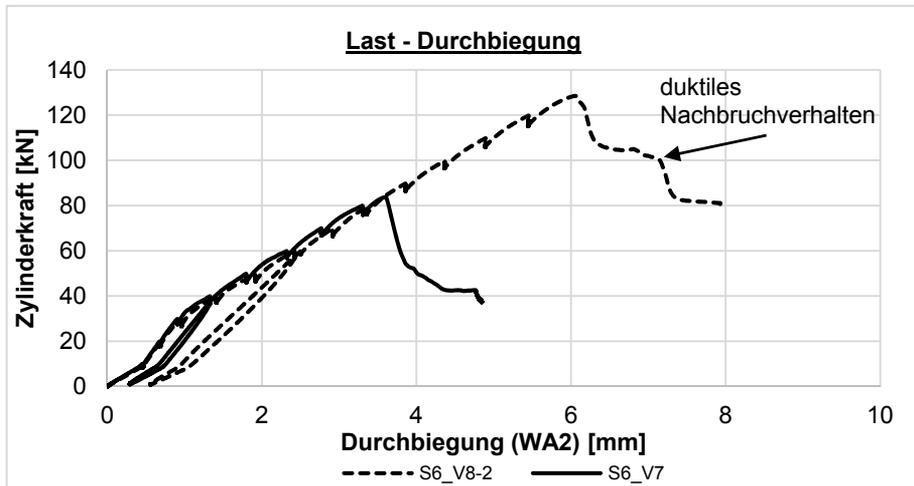


Abbildung 5-7: Vergleich der Last-Verformungskurven der Versuche S6_V8-2 und S6_V7

In Tabelle 5-8 sind die Ergebnisse aller Versuche der Serien 1 und 6 (Deckendicke 20 cm) aufgeführt. Die Versagenslast wird auch bei diesen Versuchen auf eine Referenzdruckfestigkeit von 40 N/mm^2 normiert. Als Referenzversuch dient der Mittelwert aller Versuche mit Vollquerschnitt (siehe Abschnitt 5.1.3, Tabelle 5-3). Zur Beurteilung der Ergebnisse wird die bezogene Tragfähigkeit r_u – Quotient aus betrachtetem Versuch zu Referenzversuch – gebildet. Außerdem wird geprüft, ob der Riss durch die Öffnung oder an ihr vorbei verlief.

Tabelle 5-8: Übersicht der Wendelversuche der Serien 1 und 6 (h = 20 cm)

Kurz- bezeichnung	d ₀ /d [-]	k _{Øn} [-]	S _k [-]	n	F _u [kN]	f _{cm,cube} [N/mm ²]	F _{u,40} [kN]	F _{u,m,Ref,40} [kN]	r _u = F _{u,40} / F _{u,m,Ref,40} [-]	Versagensriss durch die Öffnung
S1_V3	0,18	0,84	0,16	1	130	44,9	125	156	0,80	ja
S1_V5	0,37	0,63	0,16	1	128	44,9	123		0,79	ja
S1_V6	0,37	0,63	0,33	2	110	44,9	106		0,68	ja
S6_V3-1	0,37	0,63	0,33	2	150	50,1	139		0,89	ja
S6_V3-2	0,37	0,63	0,33	2	117	50,1	109		0,69	ja
S6_V4-1	0,37	0,63	0,49	3	155	50,1	144		0,92	ja
S6_V4-2	0,37	0,63	0,49	3	138	50,1	128		0,82	ja
S6_V5-1	0,37	0,63	0,66	4	154	50,1	143		0,91	nein
S6_V5-2	0,37	0,63	0,66	4	145	50,1	135		0,86	nein
S1_V8	0,53	0,47	0,16	1	92	44,9	89		0,57	ja
S1_V9	0,53	0,47	0,33	2	110	44,9	106		0,68	ja
S1_V10	0,53	0,47	0,49	3	115	44,9	111		0,71	ja
S6_V8-1	0,53	0,47	0,49	3	134	50,1	124		0,80	ja
S6_V8-2	0,53	0,47	0,49	3	128	50,1	119		0,76	ja
S6_V9-1	0,53	0,47	0,66	4	120	50,1	111		0,71	nein
S6_V9-2	0,53	0,47	0,66	4	160	50,1	148		0,95	nein
S6_V10-1	0,53	0,47	0,82	5	155	50,1	144		0,92	nein
S6_V10-2	0,53	0,47	0,82	5	158	50,1	147		0,94	nein

Abbildung 5-8 ist zu entnehmen, dass mit steigendem Schubkonzentrationsfaktor die Tragfähigkeit nur unterproportional ansteigt. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Wendel bei größeren Öffnungen die Tragfähigkeit deutlicher erhöht als bei kleineren Öffnungen. Dieser Unterschied ist damit begründet, dass die Tragfähigkeit von Decken mit großen Öffnungen deutlicher im Vergleich zum Vollquerschnitt absinkt, als bei kleineren Öffnungen. Dieser Zusammenhang wird auch nochmal an Abbildung 5-9 verdeutlicht. Hierbei wurde die Differenz der bezogenen Tragfähigkeit mit dem Abminderungsfaktor für die verbaute Öffnung gebildet. Auf der y-Achse ist demnach die reine Tragfähigkeitssteigerung der Wendel dargestellt, es gilt:

$$\text{Tragfähigkeitssteigerung} = r_u - k_{\varnothing n} \quad (5.2)$$

Die Tragfähigkeit des Vollquerschnitts (100 %) wird in keinem der Versuche mit Wendel erreicht. Bezogene Tragfähigkeiten größer als 90 % liegen jedoch im üblichen Streubereich von Querkraftversuchen von ca. 15 % (Huber et al (Juni 2014); DAfStb Heft 597). Bei diesen Versuchen verlief der Versagensriss meist um die Öffnung bzw. Wendel herum, was für die maximal mögliche Tragfähigkeit spricht.

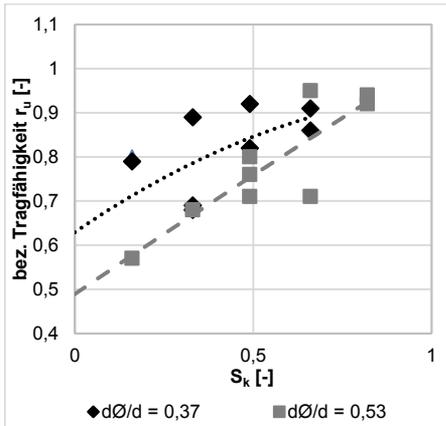


Abbildung 5-8: Bezojene Tragfähigkeit in Abhängigkeit des Schubkonzentrationsfaktors S_k für eine 20 cm dicke Decke

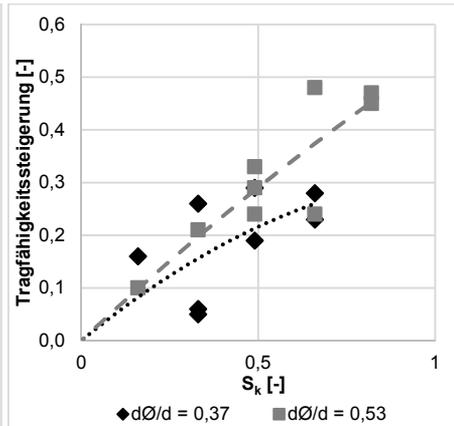


Abbildung 5-9: Tragfähigkeitssteigerung der Wendel in Abhängigkeit des Schubkonzentrationsfaktors S_k für eine 20 cm dicke Decke

In Tabelle 5-9 sind die Ergebnisse aller Versuche der Serien 2, 5 und 7 (Deckendicke 30 cm) aufgeführt. Die Versagenslast wird auch bei diesen Versuchen auf eine Referenzdruckfestigkeit von 40 N/mm² normiert. Als Referenztragfähigkeit dient der Mittelwert aller Versuche mit Vollquerschnitt (siehe Abschnitt 5.1.3, Tabelle 5-3). Zur Beurteilung der Ergebnisse wird wie zuvor die bezogene Tragfähigkeit r_u gebildet. Außerdem wird geprüft, ob der Riss durch die Öffnung oder an ihr vorbei verlief. Bei allen Versuchen mit einer bezogenen Tragfähigkeit größer als 92 % verlief der Schubriss an der Öffnung bzw. Wendel vorbei. Diese Tatsache spricht für das Erreichen der maximalen Tragfähigkeit.

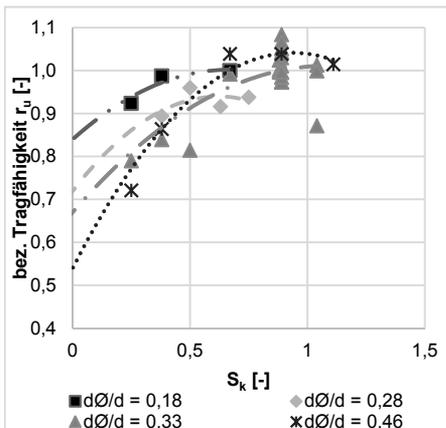


Abbildung 5-10: Bezojene Tragfähigkeit in Abhängigkeit des Schubkonzentrationsfaktors S_k für eine 30 cm dicke Decke

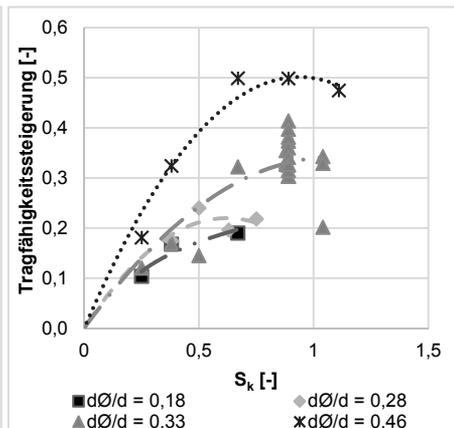


Abbildung 5-11: Tragfähigkeitssteigerung der Wendel in Abhängigkeit des Schubkonzentrationsfaktors S_k für eine 30 cm dicke Decke

5 Wendel als Querkraftbewehrung um Leitungen

Tabelle 5-9: Übersicht der Wendelversuche der Serien 2, 5 und 7 (h = 30 cm)

Kurz- bezeichnung	d_0/d [-]	k_{0n} [-]	S_k [-]	Φ_{Wendel} [mm]	n [-]	F_u [kN]	$f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	$F_{u,40}$ [kN]	$F_{u,m,Ref,40}$ [kN]	$r_u = F_{u,40} / F_{u,m,Ref,40}$ [-]	Versagensriss durch die Öffnung
S7_V2	0,18	0,84	0,25	6	2	187	38,2	190	205,7	0,92	ja
S7_V3	0,18	0,84	0,37	6	3	200	38,2	203		0,99	nein
S2_V3	0,19	0,86	0,67	8	3	226	53,1	206		1,00	nein
S5_V1-1	0,28	0,72	0,37	6	3	204	54,6	184		0,89	ja
S5_V1-2	0,28	0,72	0,50	6	4	219	54,6	197		0,96	nein
S5_V2-1	0,28	0,72	0,62	6	5	209	54,6	188		0,92	nein
S5_V2-2	0,28	0,72	0,75	6	6	214	54,6	193		0,94	nein
S7_V4	0,33	0,67	0,25	6	2	160	38,2	162		0,79	ja
S7_V5	0,33	0,67	0,37	6	3	170	38,2	173		0,84	ja
S7_V6	0,33	0,67	0,50	6	4	165	38,2	168		0,81	ja
S2_V5	0,33	0,67	0,67	8	3	224	53,1	204		0,99	nein
S2_V6	0,33	0,67	0,89	8	4	225	53,1	205		1,00	nein
S2_V7	0,33	0,67	0,89	8	4	239	49,3	223		1,08	nein
S2_V8	0,33	0,67	0,89	8	4	239	55,3	215		1,04	nein
S7_V7	0,46	0,54	0,25	6	2	146	38,2	148		0,72	ja
S7_V8	0,46	0,54	0,37	6	3	175	38,2	178		0,86	ja
S2_V10	0,46	0,54	0,67	8	3	235	53,1	214		1,04	nein
S2_V11	0,46	0,54	0,89	8	4	235	53,1	214		1,04	nein
S2_V12	0,46	0,54	1,11	8	5	229	53,1	209		1,01	nein

Abbildung 5-10 ist zu entnehmen, dass mit steigendem Schubkonzentrationsfaktor die Tragfähigkeit nur unterproportional ansteigt. Ein klarer Trend des steigenden Einflusses der Wendel in Abhängigkeit des Öffnungsdurchmessers ist hier nicht auszumachen. Daher ist in Abbildung 5-11 die Tragfähigkeitssteigerung gemäß Gl. (5.2) dargestellt. Hier ist die höhere Effizienz der Wendel bei größeren Öffnungen sichtbar.

Vergleicht man nun die Ergebnisse der Versuche an 20 cm dicken Decken mit denen an 30 cm dicken Decken, so stellt man fest, dass die Wendel bei größeren Deckendicken effizienter ist, als bei geringeren Dicken. Dieser Zusammenhang ist beispielhaft in Abbildung 5-12 dargestellt. Hier wurden die Ergebnisse der 20er Decke mit $d_0/d = 0,53$ mit den Ergebnissen der 30er Decke mit $d_0/d = 0,46$ verglichen.

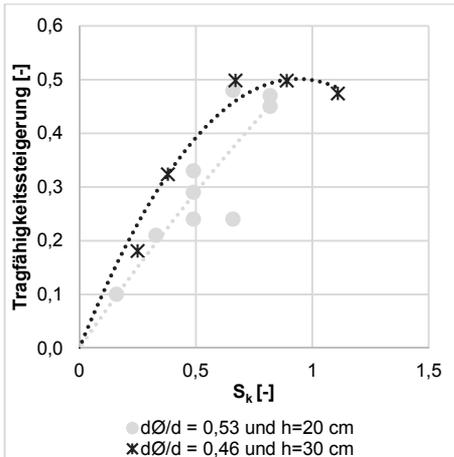


Abbildung 5-12: Vergleich der Effizienz der Wendel bei 20er und 30er Decken

Vereinfacht gesagt, erhält man bei einer 20er Decke mit 4 Windungen (Stabdurchmesser 6 mm) auf einer Breite von 40 cm die Tragfähigkeit des Vollquerschnitts. Bei einer 30er Decke benötigt man ca. 3,5 Windungen (6er Stab) auf eine Breite von 40 cm. Eine genaue Beurteilung und Differenzierung erfolgt in Kapitel 5.3 (Interpretation der Ergebnisse und Bemessungskonzept).

5.1.5 Einfluss der Lage der Öffnung im Bauteil

5.1.5.1 Versuchsprogramm

Im Rahmen dieses Versuchsprogramms wurde die Lage der Öffnung in Bauteillängs- und Höhenrichtung variiert. Dabei wurde die Öffnung in Längsrichtung innerhalb des zu erwarteten Bereichs des Schubrisses ($0,4 \cdot a$ bis $0,6 \cdot a$) verschoben. In Bauteilhöhenrichtung wurde die Öffnung von der Schwerachse aus um 3 cm nach oben bzw. unten verschoben. Eine Verschiebung um 3 cm nach unten führt dazu, dass die Wendel die Biegebewehrung berührt. Eine Verschiebung nach oben führt dazu, dass die Wendel bis in die Druckzone hineinreicht. Die in dieser Serie konstanten Parameter sind nachfolgend aufgeführt:

- $h = 30 \text{ cm}$;
- $d\phi/d = 0,33 \rightarrow k_{\phi n} = 0,67$;
- $S_k = 0,89$;
- $\Phi_{\text{Wendel}} = 8 \text{ mm}$;
- $n = 4$.

Eine grafische, sowie tabellarische Übersicht der Versuche ist nachfolgend dargestellt (Abbildung 5-13 und Tabelle 5-10).

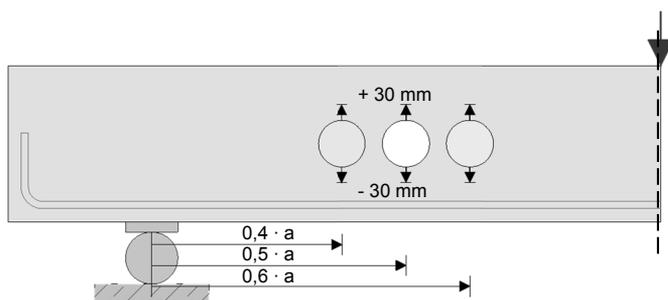


Abbildung 5-13: Schematische Darstellung der Versuche zum Einfluss der Lage der Öffnungen

Die in der Nummerierung fehlenden Versuche sind Referenzversuche. Diese wurden in Kapitel 5.1.3 ausgewertet.

Tabelle 5-10: Übersicht der Versuche aus Serie 3

Serie	Lage längs [-]	Lage Quer [mm]	Versuchsnummer	Kurzbezeichnung	Langbezeichnung
S3	0,4	-30	V1	S3_V1	S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,4--30_V1
S3	0,5	-30	V2	S3_V2	S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,5--30_V2
S3	0,6	-30	V3	S3_V3	S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,6--30_V3
S3	0,4	0	V4	S3_V4	S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,4-0_V4
S2	0,5	0	V7	S2_V7	S2_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,5-0_V7
S3	0,6	0	V5	S3_V5	S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,6-0_V5
S3	0,4	30	V6	S3_V6	S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,4-30_V6
S3	0,5	30	V7	S3_V7	S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,5-30_V7
S3	0,6	30	V8	S3_V8	S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,6-30_V8

5.1.5.2 Ergebnisse

Alle Versuchskörper versagten durch einen Biegeschubriss. Dieser verlief bei allen Versuchen um die Öffnung / Wendel herum. Die Tragfähigkeit des Vollquerschnitts wurde in allen Versuchen erreicht. In Tabelle 5-11 sind die Versuchsergebnisse zusammengestellt.

Tabelle 5-11: Übersicht der Versuche aus Serie 3

Kurz- bezeichnung	Lage längs [-]	Lage Quer [mm]	F_u [kN]	$f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	$F_{u,40}$ [kN]	$F_{u,m,Ref,40}$ [kN]	$r_u = F_{u,40} / F_{u,m,Ref,40}$ [-]
S3_V1	0,4	-30	215	49,3	200	206	0,97
S3_V2	0,5	-30	215	49,3	200		0,97
S3_V3	0,6	-30	232	49,3	216		1,05
S3_V4	0,4	0	227	49,3	212		1,03
S2_V8	0,5	0	239	49,3	223		1,08
S3_V5	0,6	0	235	49,3	219		1,07
S3_V6	0,4	30	223	49,3	208		1,01
S3_V7	0,5	30	217	49,3	202		0,98
S3_V8	0,6	30	220	49,3	205	1,00	

Da in allen Versuchen die volle Tragfähigkeit erreicht wurde, kann kein Einfluss der Lage der Öffnung auf die Tragwirkung der Wendel bestimmt werden. In dieser Serie lag der Schubkonzentrationsfaktor deutlich über dem Minimalwert um die Tragfähigkeit des Vollquerschnitts zu erreichen. Theoretisch dürfte die Lage der Wendel – selbst bei geringeren Schubkonzentrationsfaktoren als hier getestet – keinen Einfluss auf die Effizienz der Wendel haben, da die Wendel immer den Schubriss kreuzt, unabhängig von der Lage der Öffnung im Bauteil. Die Bedingung hierfür ist, dass die Betondruckzone für den Nachweis auf Biegung in ausreichendem Maße erhalten bleibt.

5.1.6 Einfluss des Stabdurchmessers der Wendel

5.1.6.1 Versuchsprogramm

In dieser Serie wurde der Stabdurchmesser der Wendel variiert. Der Schubkonzentrationsfaktor sollte dabei möglichst konstant bleiben. Diese Versuche wurden wie Serie 3 an Bauteilen mit einer Höhe von $h = 30$ cm und einem Verhältnis $d\phi/d = 0,33$ durchgeführt. Durch die Variation des Stabdurchmessers muss, um den Schubkonzentrationsfaktor möglichst konstant zu halten, die Windungsanzahl entsprechend variiert werden. In Tabelle 5-12 ist die Übersicht der durchgeführten Versuche dargestellt. Die in der Nummerierung fehlenden Versuche waren Referenzversuche, diese wurden in Kapitel 5.1.3 ausgewertet.

Tabelle 5-12: Übersicht der Versuche aus Serie 2 und 4

Serie	S_k [-]	Φ_{Wendel} [mm]	n [-]	Versuchs- nummer	Kurz- bezeichnung	Langbezeichnung
S4	0,87	6	7	V1	S4_V1	S4_C30/37-30-0,33-0,87-6-7_V1
S4	0,87	6	7	V2	S4_V2	S4_C30/37-30-0,33-0,87-6-7_V2
S4	0,87	6	7	V3	S4_V3	S4_C30/37-30-0,33-0,87-6-7_V3
S2	0,89	8	4	V6	S2_V6	S2_C30/37-30-0,33-0,89-8-4_V6
S2	0,89	8	4	V7	S2_V7	S2_C30/37-30-0,33-0,89-8-4_V7
S2	0,89	8	4	V8	S2_V8	S2_C30/37-30-0,33-0,89-8-4_V8
S4	1,04	10	3	V4	S4_V4	S4_C30/37-30-0,33-1,04-10-3_V4
S4	1,04	10	3	V5	S4_V5	S4_C30/37-30-0,33-1,04-10-3_V5
S4	1,04	10	3	V6	S4_V6	S4_C30/37-30-0,33-1,04-10-3_V6

5.1.6.2 Ergebnisse

Alle Versuchskörper versagten durch einen Biegeschubriss. Dieser verlief bei allen Versuchen um die Öffnung / Wendel herum. Es wurde immer die Tragfähigkeit des Vollquerschnitts erreicht. Nachfolgend sind die Versuchsergebnisse tabellarisch zusammengestellt (Tabelle 5-13).

Tabelle 5-13: Übersicht der Versuchsergebnisse aus Serie 2 und 4

Kurz- bezeichnung	S_k [-]	Φ_{Wendel} [mm]	n [-]	F_u [kN]	$f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	$F_{u,40}$ [kN]	$F_{u,m,Ref,40}$ [kN]	$r_u = F_{u,40} / F_{u,m,Ref,40}$ [-]
S4_V1	0,87	6	7	229	55,3	206	206	1,00
S4_V2	0,87	6	7	235	55,3	211		1,02
S4_V3	0,87	6	7	228	55,3	205		1,00
S2_V6	0,89	8	4	225	53,1	205		1,00
S2_V7	0,89	8	4	239	49,3	223		1,08
S2_V8	0,89	8	4	239	55,3	215		1,04
S4_V4	1,04	10	3	232	55,3	208		1,01
S4_V5	1,04	10	3	229	55,3	205		1,00
S4_V6	1,04	10	3	200	55,3	179		0,87

Tabelle 5-14: Berechnung der Mittelwerte und Streuungen der Versuchsergebnisse aus Serie 2 und 4

Kurzbezeichnung	Φ_{Wendel} [mm]	n	$r_u = F_{u,40} / F_{u,m,Ref,40}$ [-]	Mittelwert r_{um} [-]	Streuung CV [%]
S4_V1	6	7	1,00	1,00	1,15
S4_V2	6	7	1,02		
S4_V3	6	7	1,00		
S2_V6	8	4	1,00	1,04	3,85
S2_V7	8	4	1,08		
S2_V8	8	4	1,04		
S4_V4	10	3	1,01	0,96	8,14
S4_V5	10	3	1,00		
S4_V6	10	3	0,87		

In allen Versuchen wurde die Tragfähigkeit des Vollquerschnitts erreicht. Eine Ausnahme bildet hierbei S4_V6. Dieser Versuch wird als Ausreißer gewertet, da er im üblichen Streuband von ca. 15 % bei Querkraftversuchen liegt. Da der Schubriss wie bei allen anderen Versuchen dieser Serien um die Wendel herum verlief, kann nur eine „Schwachstelle“ im Beton für die reduzierte Tragfähigkeit verantwortlich sein. Ein exakter Einfluss des Stabdurchmessers auf die Effizienz der Wendel kann aufgrund des zu hohen Bewehrungsgrads nicht ausgemacht werden. Aus den Versuchsergebnissen kann man entnehmen, dass bei kleiner werdendem Stabdurchmesser – und demnach steigender Anzahl der Windungen – die Streuungen der Traglasten sinken (siehe Tabelle 5-14 und Abbildung 5-14). Hierbei handelt es sich allerdings aufgrund der geringen Versuchsanzahl nur um eine Tendenz.

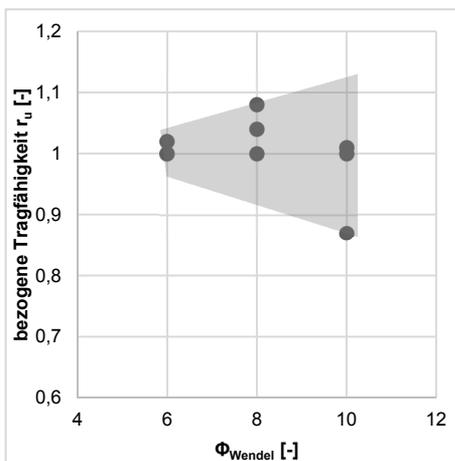


Abbildung 5-14: Einfluss des Stabdurchmessers auf die Effizienz der Wendel

5.2 FE-Simulationen

Um das Tragverhalten der Wendel zu verdeutlichen und zur Durchführung einer über die Laborversuche hinausgehende Parameterstudie wurden in *Keil (2011)* und *Wendel (2015)* Finite-Elemente-Simulationen mit dem Programm Atena 2D [*Cervenka Consulting*] durchgeführt.

Auf die Grundlagen solcher FE-Programme wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen. Diese sind der einschlägigen Literatur zu entnehmen, z.B. *Basche; Bathe (2002); Hegger et al (24.08.2006); Rombach (2007); Werkle (2008)*.

In vorausgegangenen Arbeiten (*Keil (2011); Ruppert (2010)*) wurde das Tragverhalten von querschnittsgeschwächten Stahlbetonbalken untersucht. Die daraus gewonnenen Eingabeparameter, die Werkstoffgesetze sowie die Vernetzung wurden für die nachfolgenden Simulationen weiter verwendet.

5.2.1 Werkstoffmodelle

5.2.1.1 Beton

Für Beton wurde das Materialmodell „3D Non Linear Cementitious 2“ verwendet. Hierbei handelt es sich um ein nichtlineares Werkstoffgesetz, welches von Atena für die Berechnung von Betontragwerken - insbesondere für Querkraftprobleme - empfohlen wird. Die Festigkeitskennwerte wurden aus den Versuchen übernommen. Das Werkstoffmodell beinhaltet folgende Punkte:

- nichtlineares Tragverhalten inklusive Verfestigung und Entfestigung;
- Rissverhalten des Betons unter Zugbeanspruchung;
- mehrachsiale Festigkeit;
- Reduktion der Betondruckfestigkeit nach Rissentstehung;
- Tension-Stiffening Effekt;
- Reduktion der Schubsteifigkeit nach Rissbildung;
- fixierte Rissrichtung.

Um die Zusammenhänge der verschiedenen Betonkennwerte herzustellen, nutzt das Programm die Formeln des CEB-FIP Model Code 90.

Weitere Details sind *Červenka et al (2014)* zu entnehmen.

5.2.1.2 Bewehrung

Sowohl die Biegebewehrung, als auch die Wendeln, wurden als diskrete Bewehrung eingegeben. Die Wendeln wurden hierbei als Kreise abgebildet, da eine Wendel in Atena 2D nicht möglich ist. Als Werkstoffgesetz kam ein bilineares Verhalten mit Nachverfestigung zum Einsatz.

Als Verbundgesetz wurde das Modell von Bigaj 1999 verwendet. Es stellt einen Zusammenhang zwischen Schlupf und Verbundspannung her und hat sich in vorausgehenden Arbeiten (*Keil (2011); Ruppert (2010)*) als gut geeignet erwiesen.

Weitere Details sind *Červenka et al (2014)* zu entnehmen.

5.2.2 Lösungsparameter

Als Iterationsverfahren wurde das Bogenlängenverfahren (Arc Length) gewählt. Es hat sich in Vergleichsrechnungen in vorausgehenden Arbeiten (Keil (2011); Ruppert (2010)) als gut geeignet erwiesen.

Weitere Details sind Červenka et al (2014) zu entnehmen.

5.2.3 Ergebnisse

Im ersten Schritt werden die Spannungsverteilung sowie die Rissbildung der Simulationsergebnisse auf ihre Sinnhaftigkeit hin überprüft. Bei Steigerung der Last entsteht ein erster Biegeriss in Feldmitte (Abbildung 5-15). Nach weiterer Laststeigerung entstehen weitere Biegerisse, diese „wandern“ weiter in Richtung Auflager. Ein erster Biegeriss kreuzt die Öffnung, sowie die Wendel (siehe Abbildung 5-16).

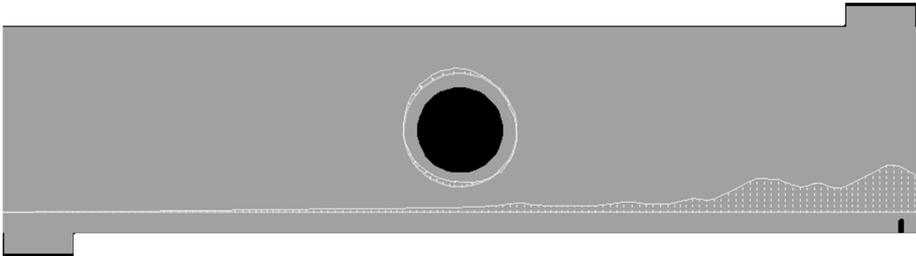


Abbildung 5-15: Entstehung erster Biegerisse in Feldmitte (dargestellt werden nur Risse mit einer Rissbreite $>0,1$ mm)

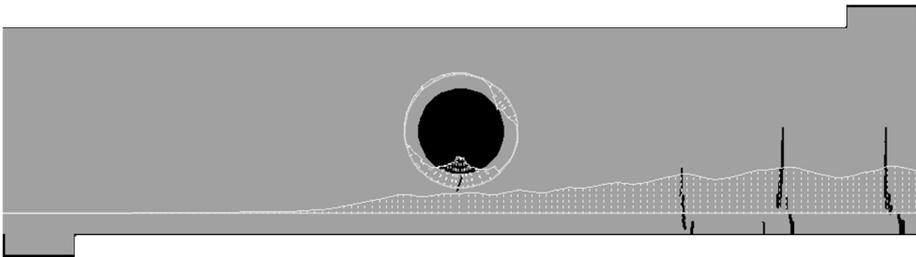


Abbildung 5-16: Entstehung weiterer Biegerisse Feldmitte (dargestellt werden nur Risse mit einer Rissbreite $>0,1$ mm)

In Abbildung 5-17 ist ein erster geneigter Riss im Bereich der Öffnung zu erkennen. Dieser bildet sich wie auch in den Bauteilversuchen von der Öffnung aus. Die Spannung in der Wendel steigt an dieser Stelle an. Bei Laststeigerung weitet sich dieser Schubriss auf. Die Stahlspannung in der Wendel steigt dabei an (Abbildung 5-18). Anschließend bilden sich bei erneuter Laststeigerung weitere Schubrisse außerhalb der Öffnung (Abbildung 5-19). Dieses Rissverhalten ist analog zu den Bauteilversuchen. Generell ist demnach eine Abbildung der Wendeltragwirkung mit diesem FE-Programm möglich.

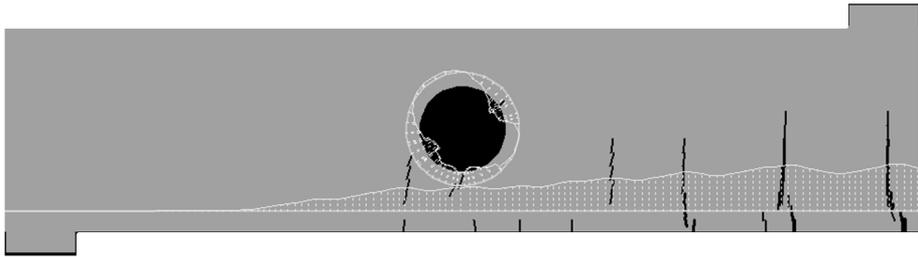


Abbildung 5-17: Entstehung eines geneigten Risses (Schubriss) von der Öffnung aus Feldmitte (dargestellt werden nur Risse mit einer Rissbreite $>0,1$ mm)

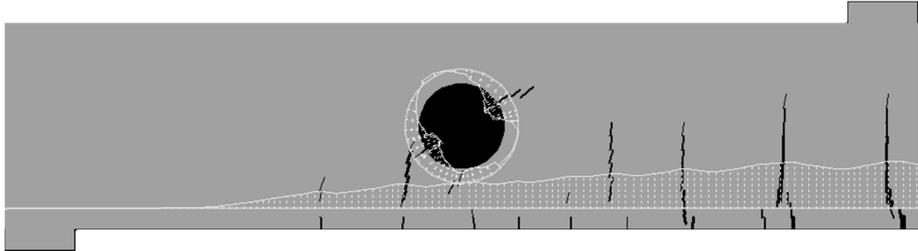


Abbildung 5-18: Aufweitung des Schubrisses im Bereich der Öffnung Feldmitte (dargestellt werden nur Risse mit einer Rissbreite $>0,1$ mm)

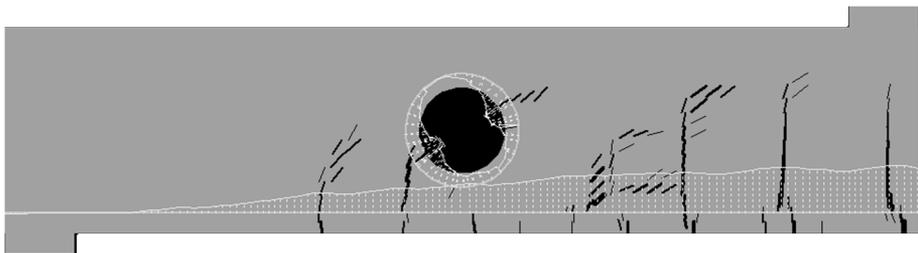


Abbildung 5-19: Entstehung weiterer Schubriss Feldmitte (dargestellt werden nur Risse mit einer Rissbreite $>0,1$ mm)

Als weiterer Vergleich zu den Bauteilversuchen wird exemplarisch eine Last-Verformungskurve des Versuchs mit der Simulation verglichen.

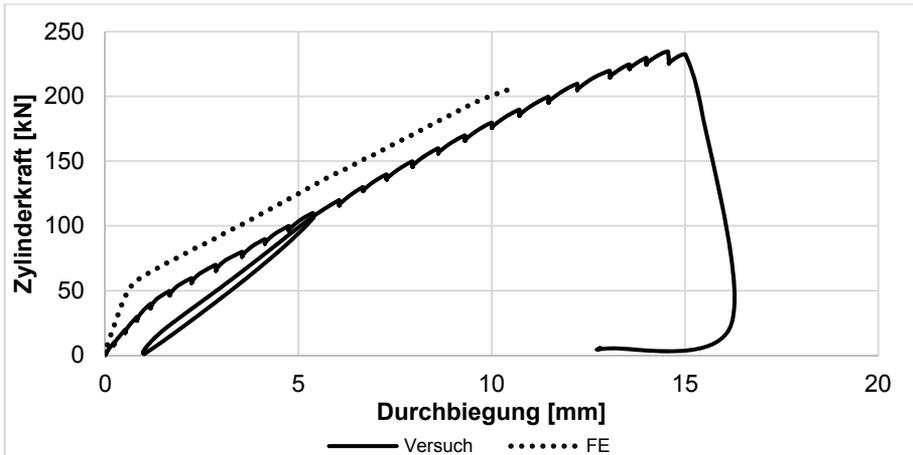


Abbildung 5-20: Vergleich der Last-Verformungskurven eines Bauteilversuchs mit der zugehörigen FE-Simulation

Wie Abbildung 5-20 zu entnehmen ist, sind die Last-Verformungskurven des Versuchs und der FE-Simulation sehr ähnlich. Die FE-Simulation weist zwar eine höhere Steifigkeit im Zustand I auf, im Zustand II ist die Steifigkeit jedoch identisch. Auch wenn die Ermittlung von Traglasten mit FE-Programmen problematisch ist, weisen diese beiden Last-Verformungskurven eine ähnlich hohe Maximallast auf. Die Maximallast galt als erreicht, wenn die Berechnung abgebrochen wurde, die Maximalzahl an Iterationsschritten erreicht war oder die Last-Verformungskurve eine Unstetigkeit aufwies.

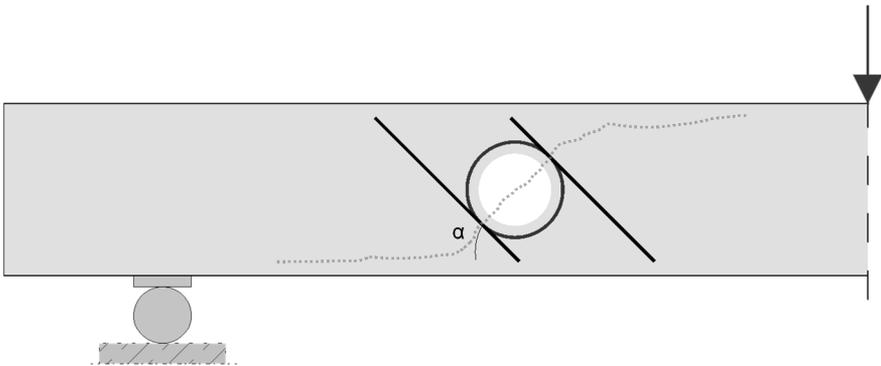
Trotz der zuvor beschriebenen guten Ergebnisse der Simulation, konnte eine konsistente und schlüssige Parameterstudie im Rahmen dieser FE-Simulationen nicht erzielt werden. Zwar konnte in den Simulationen eine Wirksamkeit der Wendel festgestellt werden und die Spannungen sowie das Rissverhalten sind in sich schlüssig, allerdings sind einige Zusammenhänge - wie z. B. eine steigende Tragfähigkeit mit Erhöhung der Windungsanzahl - widersprüchlich und spiegeln nicht die Versuchsergebnisse wider. Daher wird auf eine detaillierte Darlegung der Simulationsergebnisse an dieser Stelle verzichtet.

5.3 Interpretation der Ergebnisse und Bemessungskonzept

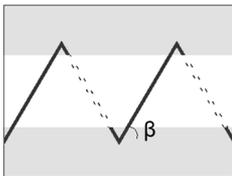
Die Grundidee des Bemessungskonzepts für Wendeln besteht darin, die Wendeln durch zwei geneigte Bügel, einer rechts und einer links der Öffnung, rechnerisch zu ersetzen. Die Bügel sollen um 45° geneigt zur Schwerachse sein, da sie dann wie die Wendel auch den Schubriss annähernd senkrecht schneiden. Eine Wendel mit n-Windungen entspricht dann einem Bügel rechts und einem Bügel links der Öffnung mit n-Stäben, also ein n-schnittiger Bügel. Somit kann das Bemessungskonzept des Eurocode 2 (siehe Kapitel 2.3.4) verwendet werden. Dieses berücksichtigt jedoch nicht die Neigung der Wendel in Tiefenrichtung oder die fehlende Verankerung in der Druck- und Zugzone. Daher werden Anpassungen des Bemessungskonzepts vorgenommen. Der Betontraganteil $V_{Rd,cc}$ (Gleichung (2.15)) soll mittels des Abminderungsfaktors für Öffnungen (siehe Kapitel 2.2.2) reduziert werden.

Zur Beschreibung der Bewehrungsmenge soll der Schubkonzentrationsfaktor zum Einsatz kommen (siehe Abschnitt 4.3). Dieser berechnet sich in diesem Anwendungsfall pro Öffnungsseite, d.h.:

$$S_k = \frac{A_{sw} \cdot f_{ywK}}{V_{Rm,c}} = \frac{n \cdot \pi \cdot d^2 / 4 \cdot f_{ywK}}{V_{Rm,c}} \tag{5.3}$$



Wendelbewehrung im Querschnitt



Ersatzsystem im Querschnitt

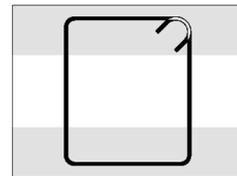


Abbildung 5-21: Ersatzsystem zur Wendelbemessung

Die Tragfähigkeit des wendelbewehrten Bauteils setzt sich aus einem Betontraganteil und einem Traganteil der Wendel zusammen. Der Betontraganteil ist aus *DIN EN 1992-1-1* bekannt, wird jedoch wie bereits erwähnt mit Hilfe des Abminderungsfaktors

für Öffnungen reduziert. Somit steht folgende Gleichung für den Betontraganteil zur Verfügung:

$$V_{Rm,cc} = k_{\varnothing n} \cdot 0,24 \cdot f_{1c}^{1/3} \cdot b_w \cdot z \quad (5.4)$$

Die Betondruckfestigkeit ist hier die einachsiale Druckfestigkeit gemäß *DAfStb Heft 597*. Es gilt: $f_{1c} = 0,95 \cdot 0,8 \cdot f_{c,cube}$.

Der Traganteil der Wendel wird in Anlehnung an *ACI 318-11* (siehe Gleichung (5.5)) berechnet. Diese Gleichung gilt für lokale Bewehrungselemente. Im Gegensatz zur Gleichung der *DIN EN 1992-1-1* fällt hierbei das „verschmieren“ der Bewehrung auf die Breite des Schubfeldes ($z \cdot \cot \theta$) weg.

$$V_s = A_v \cdot f_{ywk} \cdot \sin \alpha \quad (5.5)$$

Für die Gesamttragfähigkeit gilt dann: $F_{calc} = (V_{Rm,cc} + V_s) / 0,55$

Nachfolgend wird das Verhältnis der Traglast im Versuch F_u zu der rechnerischen Tragfähigkeit über den Schubkonzentrationsfaktor aufgetragen.

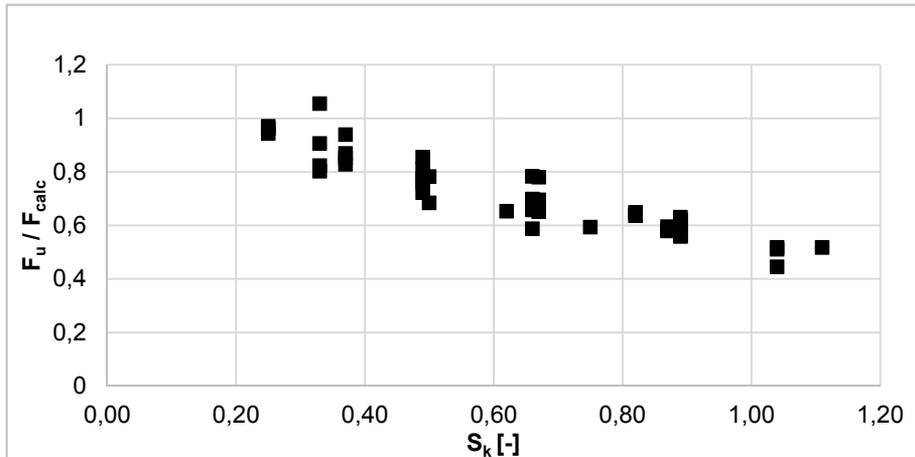


Abbildung 5-22: Verhältnis der Traglast im Versuch und der Summe des Betontraganteils gemäß Gleichung (5.4) und des Stahltraganteils gemäß Gleichung (5.5) über den Schubkonzentrationsfaktor

Wie Abbildung 5-22 zu entnehmen ist, überschätzt der Rechenwert der Traglast mit steigendem Schubkonzentrationsfaktor die Tragfähigkeit zunehmend. Grund für diese Überschätzung ist zum einen, dass die Wendel nicht den konstruktiven Randbedingungen des gewählten Ersatzsystems genügt (fehlende Verankerung in der Druck- und Zugzone, Umschließen der Biegebewehrung). Zum anderen ist die Wendel in Tiefenrichtung geneigt. Wie aus Abschnitt 5.1 hervorgeht, ist die Wendel bei größeren Öffnungen aber gleicher Windungsanzahl, d.h. bei steilerem Neigungswinkel β effizienter als bei flacheren Winkeln. Ein Beispiel für zwei Wendeln mit gleicher Windungszahl aber unterschiedlichem Neigungswinkel ist in Abbildung 5-23 dargestellt.

Zudem gibt es einen Einfluss der Bauteilhöhe (siehe Abbildung 5-12). Dieser ist zwar gering, soll aber trotzdem im Bemessungskonzept berücksichtigt werden.

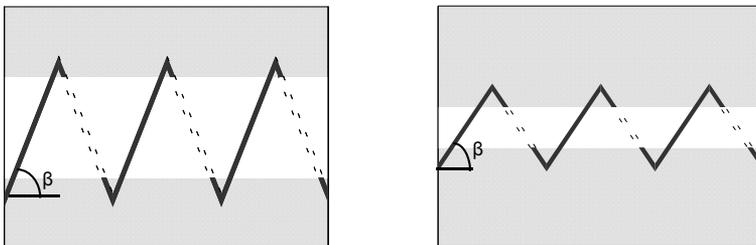


Abbildung 5-23: Schematischer Vergleich zweier Wendeln mit gleicher Windungsanzahl aber unterschiedlichen Neigungswinkeln

Daher muss der Schubkonzentrationsfaktor in die Bemessungsgleichung mit einbezogen werden. Da der Betontraganteil unabhängig vom Schubkonzentrationsfaktor ist, wird ein Abminderungsfaktor für den Stahltraganteil eingeführt. Dieser Faktor beinhaltet den Schubkonzentrationsfaktor S_k , den Neigungswinkel in Tiefenrichtung β , sowie die Bauteilhöhe h . Im weiteren Verlauf wird dieser Faktor als k_{Wendel} bezeichnet. Der Faktor wird anhand der Versuche, deren Tragfähigkeit geringer war als die des Vollquerschnitts, empirisch ermittelt und ergibt sich zu:

$$k_{\text{Wendel}} = 0,4 \cdot S_k^{-\left(0,8 + \frac{30-h}{100}\right)} \cdot \sin\beta \quad (5.6)$$

Der Exponent von $-0,8$ beschreibt die sinkende Effizienz der Wendel mit steigendem Schubkonzentrationsfaktor. Der Term $(30 + h) / 100$ berücksichtigt den Einfluss der Bauteilhöhe auf die Tragwirkung der Wendel. Für $h = 30$ cm ist der Term gleich Null, für $h = 20$ cm ist er gleich $0,1$ und erhöht somit den Faktor k_{Wendel} . Der Vorfaktor von $0,4$ skaliert den kompletten Term entsprechend der Versuchsergebnisse. Die Winkelbeziehung $\sin(\beta)$ berücksichtigt die Neigung der Wendel in Tiefenrichtung. Da die Wendel beidseitig der Öffnung wirkt, wird zusätzlich noch der Faktor 2 hinzugefügt.

Somit ergibt sich folgende Gleichung für den Traganteil der Wendel:

$$V_{Rm,Wendel} = k_{Wendel} \cdot 2 \cdot A_{Wendel} \cdot f_{yk} \cdot \sin \alpha \quad (5.7)$$

mit :

$$k_{Wendel} = 0,4 \cdot S_k^{-\left(0,8 + \frac{30-h}{100}\right)} \cdot \sin \beta$$

$$S_k = \frac{A_{Wendel} \cdot f_{yk}}{V_{Rm,c}}$$

$$A_{Wendel} = \pi \cdot n \cdot \frac{\phi_{Wendel}^2}{4}$$

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha = 45^\circ$$

= Neigungswinkel der Bewehrung

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{d_\emptyset + 2 \cdot c_{nom}}{b_w / 2 \cdot n} \right)$$

= Neigungswinkel der Wendel in Bauteiltiefenrichtung

Für die Gesamttragfähigkeit gilt dann die Summe der beiden Anteile. Da es sich bei der Wendel um ein lokales Bewehrungselement handelt, kann die Tragfähigkeit nicht über der des Vollquerschnitts liegen. Somit stellt die Tragfähigkeit des Vollquerschnitts $V_{Rm,c}$ den oberen Grenzwert dar. Als unterer Grenzwert wird die Tragfähigkeit des geschwächten, unbewehrten Querschnitts verwendet. Dieser ist notwendig, weil der Betontraganteil $V_{Rm,cc}$ des bewehrten Querschnitts nicht dem Wert $k_{\emptyset n} \cdot V_{Rm,c}$ entspricht (siehe Kapitel 2.3).

$$V_{Rm} = V_{Rm,cc} + V_{Rm,Wendel} \quad \begin{aligned} &\leq V_{Rm,c} \\ &\geq k_{\emptyset n} \cdot V_{Rm,c} \end{aligned} \quad (5.8)$$

In Tabelle 5-15 und Tabelle 5-16 werden die durchgeführten Versuche mit den Rechenwerten verglichen.

5 Wendel als Querkraftbewehrung um Leitungen

Tabelle 5-15: Vergleich der Rechenwerte des gewählten Bemessungsmodells mit den Versuchsergebnissen (Teil 1)

	S_k	$F_{u,40}$	$F_{u,m,40,Ref}$	$\gamma_u = F_{u,40} / F_{u,m,Ref,40}$	k_{\emptyset}	$k_{\emptyset} \cdot V_{Rm,cc}$	k_{Wendel}	$V_{Rm,Wendel}$	$F_{calc} = (k_{\emptyset} \cdot V_{Rm,cc} + V_{Rm,Wendel}) / 0,55$	$F_{u,40} / F_{calc}$
	[-]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[kN]	[-]	[kN]	[kN]	
S1_V6	0,33	106	156	0,68	0,63	32,6	0,79	31,4	116,3	0,91
S1_V9	0,33	106	156	0,68	0,47	24,3	0,86	34,4	106,7	0,99
S1_V10	0,49	111	156	0,71	0,47	24,3	0,68	40,6	117,9	0,94
S2_V3	0,67	206	206	1,00	0,82	66,9	0,44	47,2	207,6	0,99
S2_V5	0,67	204	206	0,99	0,67	54,7	0,49	52,3	194,5	1,05
S2_V6	0,89	205	206	1,00	0,67	54,7	0,41	58,3	205,4	1,00
S2_V7	0,89	223	206	1,08	0,67	54,7	0,41	58,3	205,4	1,09
S2_V8	0,89	215	206	1,04	0,67	54,7	0,41	58,3	205,4	1,04
S2_V10	0,67	214	206	1,04	0,54	44,1	0,51	54,5	179,2	1,19
S2_V11	0,89	214	206	1,04	0,54	44,1	0,42	59,7	188,8	1,13
S2_V12	1,11	209	206	1,01	0,54	44,1	0,36	63,6	195,7	1,07
S3_V1	0,89	200	206	0,97	0,67	54,7	0,41	58,3	205,4	0,97
S3_V2	0,89	200	206	0,97	0,67	54,7	0,41	58,3	205,4	0,97
S3_V3	0,89	216	206	1,05	0,67	54,7	0,41	58,3	205,4	1,05
S3_V4	0,89	212	206	1,03	0,67	54,7	0,41	58,3	205,4	1,03
S3_V5	0,89	219	206	1,07	0,67	54,7	0,41	58,3	205,4	1,07
S3_V6	0,89	208	206	1,01	0,67	54,7	0,41	58,3	205,4	1,01
S3_V7	0,89	202	206	0,98	0,67	54,7	0,41	58,3	205,4	0,99
S3_V8	0,89	205	206	1,00	0,67	54,7	0,41	58,3	205,4	1,00
S4_V1	0,87	206	206	1,00	0,67	54,7	0,44	61,1	210,6	0,98
S4_V2	0,87	211	206	1,02	0,67	54,7	0,44	61,1	210,6	1,00
S4_V3	0,87	205	206	1,00	0,67	54,7	0,44	61,1	210,6	0,97
S4_V4	1,04	208	206	1,01	0,67	54,7	0,34	57,5	203,9	1,02
S4_V5	1,04	205	206	1,00	0,67	54,7	0,34	57,5	203,9	1,01
S4_V6	1,04	179	206	0,87	0,67	54,7	0,34	57,5	203,9	0,88

Tabelle 5-16: Vergleich der Rechenwerte des gewählten Bemessungsmodells mit den Versuchsergebnissen (Teil 2)

	S_k	$F_{u,40}$	$F_{u,m,40,Ref}$	$\bar{r}_u = F_{u,40} / F_{u,m,Ref,40}$	k_{\emptyset}	$k_{\emptyset} \cdot V_{Rm,cc}$	k_{Wendel}	$V_{Rm,Wendel}$	$F_{calc} = (k_{\emptyset} \cdot V_{Rm,cc} + V_{Rm,Wendel}) / 0,55$	$F_{u,40} / F_{calc}$
	[-]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[kN]	[-]	[kN]	[kN]	
S5_V1-1	0,37	184	206	0,89	0,72	58,8	0,77	46,0	190,5	0,97
S5_V1-2	0,50	197	206	0,96	0,72	58,8	0,64	51,1	199,7	0,99
S5_V2-1	0,62	188	206	0,92	0,72	58,8	0,55	55,4	207,5	0,91
S5_V2-2	0,75	193	206	0,94	0,72	58,8	0,48	58,0	212,4	0,91
S6_V3-1	0,33	139	156	0,89	0,63	32,6	0,79	31,4	116,3	1,20
S6_V3-2	0,33	109	156	0,69	0,63	32,6	0,79	31,4	116,3	0,93
S6_V4-1	0,49	144	156	0,92	0,63	32,6	0,64	38,5	129,2	1,11
S6_V4-2	0,49	128	156	0,82	0,63	32,6	0,64	38,5	129,2	0,99
S6_V5-1	0,66	143	156	0,91	0,63	32,6	0,52	42,0	135,5	1,05
S6_V5-2	0,66	135	156	0,86	0,63	32,6	0,52	42,0	135,5	0,99
S6_V8-1	0,49	124	156	0,80	0,47	24,3	0,68	40,6	117,9	1,05
S6_V8-2	0,49	119	156	0,76	0,47	24,3	0,68	40,6	117,9	1,01
S6_V9-1	0,66	111	156	0,71	0,47	24,3	0,54	43,4	123,1	0,90
S6_V9-2	0,66	148	156	0,95	0,47	24,3	0,54	43,4	123,1	1,21
S6_V10-1	0,82	144	156	0,92	0,47	24,3	0,46	45,7	127,2	1,13
S6_V10-2	0,82	147	156	0,94	0,47	24,3	0,46	45,7	127,2	1,15
S7_V2	0,25	190	206	0,92	0,84	68,6	0,81	32,4	183,7	1,03
S7_V3	0,37	203	206	0,99	0,84	68,6	0,71	42,7	202,3	1,00
S7_V4	0,25	162	206	0,79	0,67	54,7	0,96	38,4	169,3	0,96
S7_V5	0,37	173	206	0,84	0,67	54,7	0,79	47,3	185,4	0,93
S7_V6	0,50	168	206	0,81	0,67	54,7	0,65	52,0	194,0	0,86
S7_V7	0,25	148	206	0,72	0,54	44,1	1,04	41,5	155,6	0,95
S7_V8	0,37	178	206	0,86	0,54	44,1	0,82	49,3	169,8	1,05

Um die Genauigkeit des Bemessungsmodells übersichtlicher aufzuzeigen, werden die nachfolgenden Abbildungen verwendet.

Abbildung 5-24 zeigt den Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Rechenwerten. Hierbei werden allerdings lediglich die Versuchsergebnisse dargestellt, die für die Bildung des Abminderungsfaktors k_{Wendel} verwendet wurden (Tragfähigkeit kleiner als die des Vollquerschnitts). Wie zu sehen ist, streuen die Werte um 1,0 herum. Der Mittelwert beträgt 1,00, die Streuung 9,2 %.

Abbildung 5-25 zeigt den gleichen Zusammenhang wie Abbildung 5-24, hier werden jedoch alle Versuchsergebnisse dargestellt. Der Mittelwert liegt bei 1,01, die Streuung bei 7,9 %.

In Abbildung 5-26 werden zusätzlich die Grenzwerte eingeführt. Als obere Grenze gilt die Tragfähigkeit des Vollquerschnitts (V_{Rmc}), als untere Grenze die Tragfähigkeit des

geschwächten Querschnitts ($k_{\emptyset} \cdot V_{Rm,c}$). Unter Berücksichtigung dieser Grenzwerte liegen die Versuchsergebnisse im Vergleich zu den Rechenwerten im Mittel bei 0,99 und streuen mit 7,6 %.

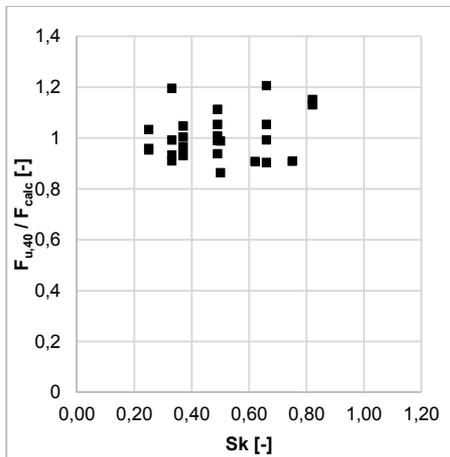


Abbildung 5-24: Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Rechenwerten (nur die Versuche mit $V_{test} < V_{Rm,c}$)

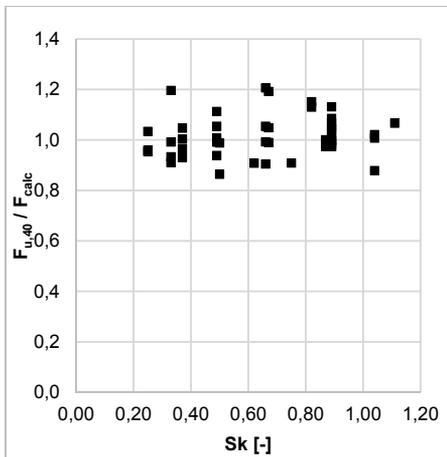


Abbildung 5-25: Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Rechenwerten (alle Versuche)

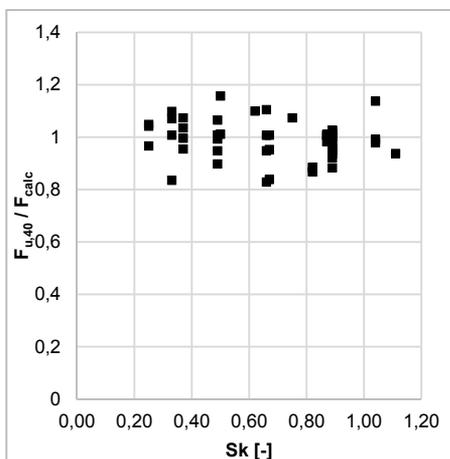


Abbildung 5-26: Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Rechenwerten unter Einbeziehung der Grenzwerte $V_{Rm,c}$ und $k_{\emptyset} \cdot V_{Rm,c}$

Zur Überprüfung des Bemessungsansatzes wird zudem ein Versuch aus *Albrecht und Schnell (2011)* nachgerechnet. Die Parameter waren dabei wie folgt:

Wendel: Stabdurchmesser 10 mm; 4 Windungen; B500

Versuchskörper: 63 cm breit; statische Höhe 26,8 cm; Betonfestigkeit 30,36 N/mm²; $d\phi/d = 0,5$; Versagenslast 146 kN

Berechnung:

$$\begin{aligned}
 V_{Rm} &= V_{Rm,cc} + V_{Rm,Wendel} \leq V_{Rm,c} \\
 &\geq k_{\phi n} \cdot V_{Rm,c} \\
 V_{Rm,cc} &= k_{\phi n} \cdot 0,24 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot b_w \cdot z \\
 &= 0,5 \cdot 0,24 \cdot 30,36^{1/3} \cdot 63 \cdot 0,9 \cdot 26,8 \\
 &\approx 57 \text{ kN} \\
 V_{Rm,Wendel} &= k_{Wendel} \cdot 2 \cdot A_{Wendel} \cdot f_{yk} \cdot \sin \alpha \\
 &= 0,4 \cdot \underbrace{1,0^{-(0,8+30-30/100)}}_{1,0} \cdot \sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{12,5 + 2 \cdot 3,0}{63 / 2 \cdot 4} \right) \right] \cdot 2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot \frac{1,0^2}{4} \cdot 500 \cdot \sin 45 \\
 &= 0,4 \cdot \sin(67) \cdot 2 \cdot \pi \cdot 500 / \sqrt{2} \\
 &\approx 82 \text{ kN} \\
 \Rightarrow V_{Rm} &= V_{Rm,cc} + V_{Rm,Wendel} \\
 &= 57 + 82 \\
 &= 139 \text{ kN} \\
 \Rightarrow V_{test} / V_{Rm} &= 146 / 139 = \underline{\underline{1,05}}
 \end{aligned}$$

Auch hierbei zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung des konzipierten Bemessungskonzepts.

5.4 Empfehlungen für die Praxis

Da es sich bei der Wendel um eine Art Mindestquerkraftbewehrung zur Sicherstellung des Traglastniveaus des ungeschwächten Vollquerschnitts bzw. zur Aufnahme der Schubrislast $V_{Rm,c}$ analog zur Mindestquerkraftbewehrung des Eurocode 2 handelt (siehe Abschnitt 2.3.4), wird der Nachweis bzw. die Bemessung auf Mittelwertniveau durchgeführt. Aufgrund der Komplexität des Faktors zur Berücksichtigung der Wendel muss die Bemessung iterativ gelöst werden. Als Richt- bzw. Startwert kann bei einem Stabdurchmesser von 6 mm eine Windungsanzahl von ca. 6 – 10 Windungen pro Meter angenommen werden.

Zu beachten ist, dass die Wendeln bislang lediglich in Deckenstärken von 20 – 30 cm getestet wurden. Zudem gilt der Bemessungsansatz nur für Einzelöffnungen, bzw. mehrere Öffnungen mit genügend großem Abstand ($s > 4 \cdot d\phi$ gemäß Abschnitt 2.2.2). Der Einfluss von Längskräften wurde bislang nicht untersucht. Ein vom aktuellen Stand der Technik abweichender Einfluss (Erhöhung bzw. Reduktion des Betontraganteils / Druckstrebenneigungswinkels) wird jedoch nicht erwartet. Nachfolgend ist der Bemessungsansatz für die Wendeln zusammengefasst.

5 Wendel als Querkraftbewehrung um Leitungen

Es gilt:

$$V_{Ed} \leq V_{Rm} = V_{Rm,cc} + V_{Rm,Wendel} \leq V_{Rm,c} \\ \geq k_{\varnothing n} \cdot V_{Rm,c}$$

mit: $V_{Rm,c} = 0,197 \cdot \kappa \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d$

$$V_{Rm,cc} = k_{\varnothing n} \cdot 0,24 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot b_w \cdot z$$

$$V_{Rm,Wendel} = k_{Wendel} \cdot 2 \cdot A_{Wendel} \cdot f_{yk} \cdot \sin \alpha$$

wobei :

$$k_{Wendel} = 0,4 \cdot S_k^{-(0,8 + \frac{30-h}{100})} \cdot \sin \beta$$

$$S_k = \frac{A_{Wendel} \cdot f_{yk}}{V_{Rm,c}}$$

$$A_{Wendel} = \pi \cdot n \cdot \frac{\phi_{Wendel}^2}{4}$$

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha = 45^\circ$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{d_{\varnothing} + 2 \cdot c_{nom}}{b_w / 2 \cdot n} \right)$$

= Neigungswinkel der Wendel in Bauteiltiefenrichtung

Des Weiteren ist bei Leitungen in Beton generell darauf zu achten, dass die Druckzonenhöhe für die Biegebemessung in ausreichendem Maße erhalten bleibt. Außerdem ist es empfehlenswert, die Leitungen wenn möglich nicht in dem am stärksten durch Querkräfte beanspruchten Bereich zu verlegen.

6 Leitungen in Elementdecken mit Gitterträgern

Aufgrund der weiten Verbreitung von Elementdecken mit Gitterträgern in Deutschland und das alltägliche Verlegen von Leitungen in der Ortbetonergänzung solcher Decken sind Versuche zu dieser Thematik von baupraktischer Bedeutung. Eine Bemessung von Elementdecken mit Gitterträgern und Leitungen im Ortbeton ist derzeit nicht möglich. Daher wird aufbauend auf Bauteilversuchen ein Bemessungskonzept erarbeitet.



Abbildung 6-1: Beispiel für Leitungen in Elementdecken
[www.rauscher-heizung.de (16.06.2016)]

6.1 Versuche

6.1.1 Allgemeines

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden insgesamt 31 Bauteilversuche durchgeführt. In mehreren Versuchsserien wurden unterschiedliche Parameter variiert. In Tabelle 6-1 sind diese Serien zusammengefasst dargestellt. Hierbei sind die untersuchten Parameter, sowie die Minimal- und Maximalwerte der wichtigsten Parameter aufgeführt. Da diese Versuche zum Teil im Rahmen studentischer Arbeiten durchgeführt wurden ist in der letzten Spalte die Referenzarbeit angegeben. Die detaillierten Versuchsprogramme der einzelnen Serien werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit dargestellt.

Tabelle 6-1: Versuchsprogramm zur Untersuchung des Einflusses von Leitungen in Elementdecken

Serie	untersuchter Parameter	Breite [cm]	Anzahl der Gitterträger [-]	Gitterträgertyp [-]	Obergurt [mm]	Diagonale [mm]	Referenz
GT	Gitterträgerabstand	40	2	E	12	7	-
GT	beschädigte Diagonalen	40	2	E	12	7	-
1GT	Gitterträgerabstand	30 - 45	1	E	12	7	Schmeckebier (2015)
3GT	Gitterträgerabstand	25 - 30	1	E	10 - 12	6 - 7	Schmeckebier (2015)

Um eine eindeutige Zuordnung der Versuchsdaten zu gewährleisten, wurde eine einheitliche Versuchsbezeichnung eingeführt. Diese enthält alle wichtigen Versuchsparameter. Nachfolgend wird die Bezeichnung anhand eines Beispiels erläutert:

1GT_C30/37-25-40-0,33-3-7-1-Längs_V3-1

1GT	Serie 1	
C30/37	Betonfestigkeitsklasse	
25	Deckenhöhe in cm	h
40	Deckenbreite in cm	b
0,33	Öffnungsdurchmesser / statische Höhe	$d\phi/d$
3	Anzahl der Öffnungen	
7	Stabdurchmesser der Diagonalen in mm	Φ_{Dia}
1	Anzahl der Gitterträger	n
Längs	Orientierung der Gitterträger	
V3-1	Versuchsnummer innerhalb dieser Serie	

Um eine bessere Verweisbarkeit zu erhalten wurde zudem eine Kurzbezeichnung eingeführt. Hierbei wird bei der Bezeichnung der mittlere Teil weggelassen. Somit ergibt sich für oben genanntes Beispiel die folgende Kurzbezeichnung:

1GT_V3-1

Diese Kurzbezeichnungen werden im weiteren Verlauf für Verweise und Diagramme verwendet.

Der Aufbau und die Durchführung der Versuche entspricht dem Vorgehen aus Kapitel 4. Lediglich die Abmessungen der Probekörper unterscheiden sich.

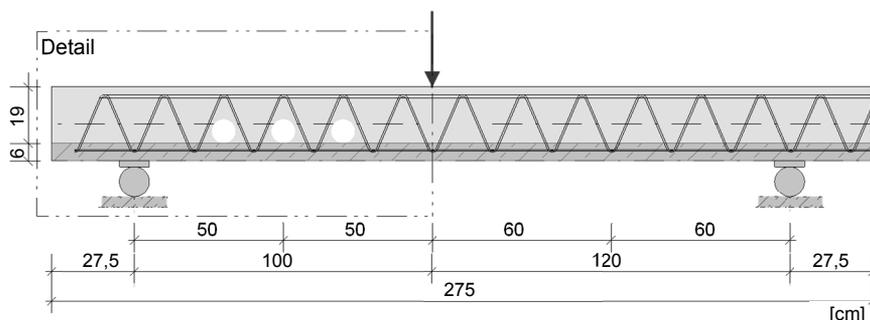


Abbildung 6-2: Schematischer Versuchsaufbau der 3-Punkt-Biegeversuche mit Elementdecken (der Detailrahmen zeigt den Ausschnitt der im weiteren Verlauf dargestellt wird)

6.1.2 Betonfestigkeiten

Für eine spätere Auswertung werden alle Versuche auf eine Referenzbetonfestigkeit von 40 N/mm² nach Kapitel 4.3 normiert. Als Referenzversuch wird der Mittelwert aller normierten Traglasten am unbewehrten Vollquerschnitt mit gleichen Abmessungen verwendet. In Tabelle 6-2 wird die Betondruckfestigkeit der einzelnen Serien dargestellt. Die Festigkeit wurde mittels Würfeln – die zusammen mit den Versuchskörpern gelagert wurden – zeitnah (± 1 Tag) zu den Versuchen geprüft.

Daher wird auf eine tagesgenaue Anpassung der Festigkeiten der einzelnen Versuche verzichtet. Bei den Festigkeitsuntersuchungen werden nachfolgend sowohl die Festigkeit des Fertigteils (FT), als auch die der Ortbetonergänzung (OB) aufgeführt.

Tabelle 6-2: Betondruckfestigkeit

Serie	Fertigteil / Ortbeton	Betonierdatum	Prüfdatum	Alter [Tage]	$f_{c,cube1}$ [N/mm ²]	$f_{c,cube2}$ [N/mm ²]	$f_{c,cube3}$ [N/mm ²]	$f_{cm,cube}$ [N/mm ²]
GT	FT	27.11.2013	18.12.2013	21	54,6	60,8	46,4	53,9
	OB	26.11.2013	18.12.2013	22	44,3	54,8	41,2	46,8
1GT	FT	27.06.2014	15.07.2014	18	50,7	53,3	51,0	51,7
2GT	OB	26.06.2014	15.07.2014	19	54,3	54,6	55,0	54,6
3GT	FT	17.09.2014	30.10.2014	43	41,0	42,4	44,6	42,7
4GT	OB	16.09.2014	30.10.2014	44	38,6	37,7	38,4	38,2

6.1.3 Referenzversuche

Als Referenzversuche werden zum einen Deckenstreifen ohne Querkraftbewehrung und ohne Öffnung geprüft. Diese sollen eine Einordnung in Versuchsdatenbanken wie z.B. *DAfStb Heft 597* ermöglichen und somit systematische Fehler ausschließen. Zum anderen werden Versuche mit Deckenstreifen ohne Querkraftbewehrung mit Öffnungen durchgeführt. Diese Versuche sollen die Versuche aus *Thiele (2010)* bestätigen. Des Weiteren werden Versuche an Deckenstreifen ohne Öffnungen mit Gitterträgern durchgeführt.

6.1.3.1 Vollquerschnitt

Die Versuche GT_V5-1, GT_V5-2, 1GT_V5-1, 2GT_V3-2, 3GT_V4-1 sowie 4GT_V4-1 dienen zur Einordnung der Ergebnisse in Versuchsdatenbanken. Es soll gezeigt werden, dass die Versuche in die Erfahrungswerte – z. B. $V_{Rm,c}$ aus *DAfStb Heft 600* - passen. Bis auf 3GT_V4-1 wurde bei allen Versuchen Deckenstreifen mit einer Breite von 40 cm geprüft. Bei diesem Versuch waren es 30 cm. Dieses Ergebnis wird anschließend zur Vergleichbarkeit auf 40 cm hochgerechnet. Die Traglast dieses Versuchs (3GT_V4-1) beträgt 137 kN. Rechnet man diesen Wert auf 40 cm hoch, so erhält man einen Wert von $137 \cdot 40 / 30 = 183$ kN.

Tabelle 6-3: Traglasten der Referenzversuche am Vollquerschnitt

Kurz- bezeichnung	Deckenhöhe h [cm]	Traglast F_u [kN]	Betonfestigkeit $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	normierte Traglast $F_{u,40}$ [kN]	Mittelwert $F_{u,m,40}$ [kN]	Streuung CV [%]
GT_V5-1	25	170	53,9	154	177	9,4
GT_V5-2		190	53,9	172		
1GT_V5-1		189	51,7	174		
2GT_V3-2		195	51,7	179		
3GT_V4-1		183	42,7	179		
4GT_V3-1		210	42,7	205		

Wie Tabelle 6-3 zu entnehmen ist, sind die Streuungen der Traglasten aus den verschiedenen Serien gering. Bei Betrachtung der Last-Verformungskurven stellt man zudem fest, dass sowohl die Maximallast als auch die Steifigkeit und das Verformungsverhalten sehr ähnlich sind. Daher ist eine Vergleichbarkeit der einzelnen Serien gegeben und die Versuche können zusammen ausgewertet werden. Alle Versuchskörper versagten infolge eines Biegeschubrisses. Die Last-Verformungskurven, sowie die Rissbilder und Versuchsprotokolle sind im Anhang B dargestellt.

Um systematische Fehler im Versuchsaufbau und der Versuchskörperkonzeption auszuschließen, werden die Versuchsergebnisse mit Erfahrungswerten verglichen (*DAfStb Heft 597*; *DAfStb Heft 600*).

$$V_{Rm,c} = \left[c_m \cdot \eta_1 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{1c})^{1/3} \right] \cdot b_w \cdot d$$

$$F_{V_{Rm,c}} = \frac{V_{Rm,c} - V_{g, \text{Versuchskörper}}}{0,55} \quad (6.1)$$

Bei dem hier verwendeten Bewehrungsgrad von ca. 1 % liegt der Kalibrierfaktor C_m bei ca. 0,17 – 0,20 (siehe hierzu Abbildung 4-13). Somit ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle dargestellten Traglasten. Hierbei wurde bei $F_{V_{Rm,c}}$ die Eigenlast des Versuchskörpers subtrahiert, da diese in den Traglasten der Versuche messtechnisch nicht enthalten ist. Die Querkraft wurde mittels Gl. (5.1) auf die Zylinderlast umgerechnet. Als Betonfestigkeit wurde die aus der Würfeldruckfestigkeit errechnete Zylinderdruckfestigkeit ($f_{c,cyl} = 0,8 \cdot f_{c,cube}$) verwendet und auf die einachsiale Festigkeit gemäß *DAfStb Heft 597* umgerechnet $f_{1c} = 0,95 \cdot f_{c,cyl}$.

Tabelle 6-4: Gegenüberstellung der Traglasten der Referenzversuche mit den Erfahrungswerten

Deckenhöhe h [cm]	Breite b [cm]	Mittelwert $F_{u,m,40}$ [kN]	Streuung CV [%]	Erfahrungswert $F_{V_{Rm,c}}$ [kN]
25	40	177	9,4	165 - 185
25	30	134	-	125 - 141

Die erzielten Traglasten der Referenzversuche stimmen sehr gut mit den Erfahrungswerten aus *DAfStb Heft 597* und *DAfStb Heft 600* überein. Somit ist ein systematischer Fehler in der Versuchseinrichtung, der Messtechnik oder ähnlichem auszuschließen. Des Weiteren bestätigt dies die Verwendung des härtesten Stahls als Biegebewehrung.

Somit werden für die unterschiedlichen Bauteilbreiten die nachfolgenden Werte (Tabelle 6-5) als Traglast der Bauteile mit Vollquerschnitt verwendet. Diese ergeben sich über eine lineare Interpolation in Abhängigkeit der Bauteilbreiten.

Tabelle 6-5: Tragfähigkeit der Versuche mit Vollquerschnitt

Deckenhöhe h [cm]	Breite b [cm]	Tragfähigkeit $F_{u,40}$ [kN]	
25	25	111	hochgerechnet
	30	134	Versuchsergebnis
	35	155	hochgerechnet
	40	177	Versuchsergebnis
	45	199	hochgerechnet

6.1.3.2 Versuche mit Öffnungen

Die Versuche 1GT-V5-2, 2GT_V3-1 und 4GT_V3-2 dienen zur Überprüfung des Bemessungskonzepts für geschwächte Querschnitte nach *Thiele (2010)* und *Keil (2011)*. Auch hier wird das Ergebnis des Versuchs 4GT_V3-2 von 30 cm auf 40 cm hochgerechnet. In Abbildung 6-3 ist eine schematische Ansicht des Versuchskörpers mit 40 cm Breite dargestellt.

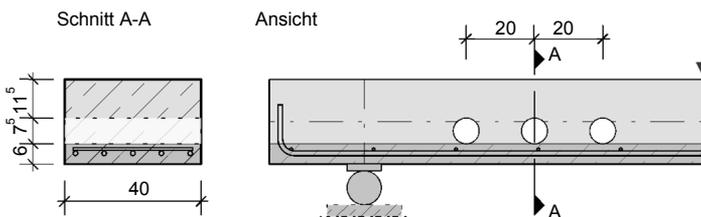


Abbildung 6-3: Schematische Darstellung der Referenzversuche mit Öffnungen am Beispiel des 40 cm breiten Versuchskörpers

In Tabelle 6-6 sind die Traglasten sowie die Auswertung der Versuche mit Öffnungen ohne Gitterträger dargestellt. Auch diese Versuchskörper versagten infolge eines Biegeschubrisses. Wie erwartet verlief dieser mitten durch die Öffnungen. Für die anschließende Bewertung wird die bezogene Tragfähigkeit r_u verwendet. Diese bildet sich aus dem Quotienten der Traglast des betrachteten Versuchs zur Referenztraglast des zugehörigen Vollquerschnitts. Die bezogene Tragfähigkeit ist gleichbedeutend mit dem Abminderungsfaktor $k_{\varnothing n}$ aus Kapitel 2.2.2. Da bei diesen Versuchen eine Gruppe von Öffnungen mit einem Achsabstand von 20 cm geprüft wurde, kommt hier der Abminderungsfaktor für eine Gruppenanordnung zur Anwendung.

Der Faktor berechnet sich zu:

$$k_{\varnothing n} = \sqrt{2} \cdot (1 - 75 / 200) \cdot (1 - 0,33) = 0,59 \quad (6.2)$$

6 Leitungen in Elementdecken mit Gitterträgern

Tabelle 6-6: Traglasten der Versuche mit Öffnungen ohne Gitterträger

Kurzbezeichnung	Deckenhöhe h [cm]	d_{ϕ}/d [-]	$k_{\phi n}$ [-]	Traglast $F_{u, \text{test}}$ [kN]	Betonfestigkeit $f_{cm, \text{cube}}$ [N/mm ²]	normierte Traglast $F_{u, 40}$ [kN]	normierte Referenzlast $F_{u, m, \text{Ref}, 40}$ [kN]	bezogene Tragfähigkeit r_u [-]
1GT_V5-2	25	0,33	0,59	135	51,7	123,9	177	0,70
2GT_V3-1		0,33	0,59	129	51,7	118,4		0,67
4GT_V3-2		0,33	0,59	110	42,7	107,6		0,61

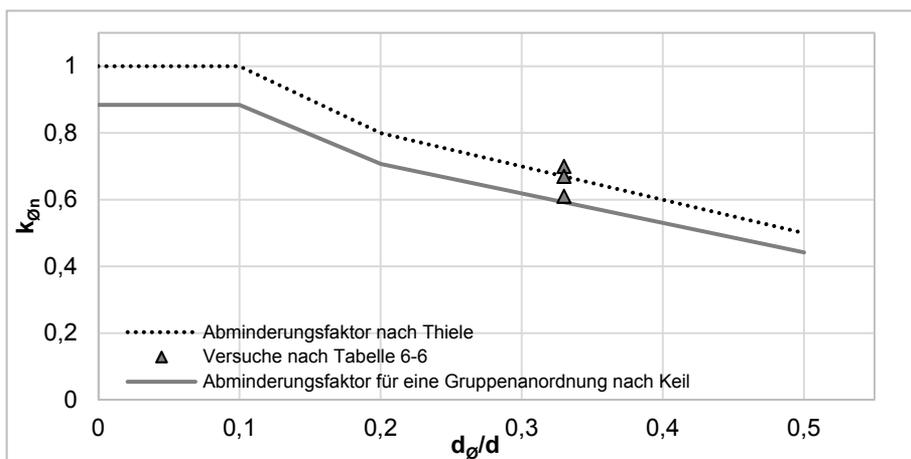


Abbildung 6-4: Abminderungsfaktor $k_{\phi n}$ nach *Thiele* (2010) und *Keil* (2011) in Abhängigkeit vom Verhältnis d_{ϕ}/d inkl. der Versuche aus Tabelle 6-6

Wie Abbildung 6-4 zu entnehmen ist, stimmen die Versuchsergebnisse sehr gut mit dem Bemessungskonzept für Öffnungen in Decken überein. Somit liegen genügend verifizierte Versuchsdaten vor, um die Ergebnisse mit Gitterträgern und Öffnungen bewerten zu können. Außerdem können Vergleichsdaten aus Rechenwerten verwendet werden, ohne weitere Versuche durchführen zu müssen.

6.1.3.3 Versuche am Vollquerschnitt mit Gitterträgern

Die Versuche GT_V6-1 und GT_V6-2 sollen die maximale Traglast eines ungeschwächten Querschnitts mit Gitterträger aufzeigen. Für diesen Versuch wurden zwei Gitterträger Typ E-19 (UG/Dia/OG = 6/7/12) der Firma Filigran verwendet.

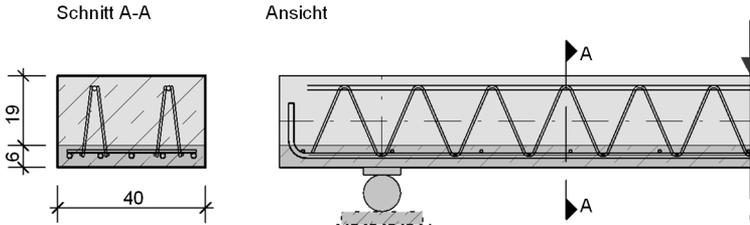


Abbildung 6-5: Schematische Darstellung der Referenzversuche mit Gitterträgern

Die Versuche GT_V6-1 und GT_V6-2 sollen die maximale Traglast eines ungeschwächten Querschnitts mit Gitterträger aufzeigen (siehe Tabelle 6-7). Für diesen Versuch wurden zwei Gitterträger Typ E-19 (UG/Dia/OG = 6/7/12) der Firma Filigran verwendet. Diese Versuche dienen zur Überprüfung der Abweichungen gegenüber dem Bemessungskonzept der *DIN EN 1992-1-1*.

Tabelle 6-7: Traglasten der Referenzversuche am Vollquerschnitt

Kurzbezeichnung	Deckenhöhe h [cm]	Traglast F_u [kN]	Betonfestigkeit $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	normierte Traglast $F_{u,40}$ [kN]	Mittelwert $F_{u,m,40}$ [kN]
GT_V6-1	25	296	53,9	268	260
GT_V6-2		279	53,9	253	

Der Rechenwert des Eurocode 2 setzt sich aus dem Beton- und dem Stahltraganteil zusammen. Für den inneren Hebelarm wird die Gitterträgerhöhe (Abstand Obergurt zur Biegebewehrung / Untergurt) verwendet. Für den Druckstrebenneigungswinkel wird ein üblicher Wert von 40° angenommen. Zu beachten ist, dass durch die Wahl der Druckstrebenneigung der Rechenwert maßgeblich beeinflusst wird. Des Weiteren wird auf Mittelwertniveau gerechnet, d.h. die Teilsicherheitsbeiwerte werden vernachlässigt, sowie mit den Mittelwerten der Festigkeiten gerechnet.

6 Leitungen in Elementdecken mit Gitterträgern

$$\begin{aligned}
 V_{Rm,cc} &= \left[c \cdot 0,48 \cdot f_{lc}^{1/3} \cdot \left(1 - 1,2 \cdot \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}} \right) \right] \cdot b_w \cdot z \\
 &= \left[0,5 \cdot 0,48 \cdot 30,4^{1/3} \cdot (1-0) \right] \cdot 40 \cdot 19 \\
 &= 57 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{Rm,sy} &= \frac{A_{sw}}{s_w} \cdot f_{ywm} \cdot z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \\
 &= 2 \cdot 3,84 \text{ cm}^2 / \text{m} \cdot 420 \cdot 19 \cdot (\cot 40 + \cot 67) \cdot \sin 67 \\
 &= 91,5 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{Rm} &= V_{Rm,cc} + V_{Rm,sy} \\
 &= 57,0 + 91,5 = 148,5 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow F_{V_{Rm}} = V_{Rm} / 0,55 = 270 \text{ kN}$$

Der Rechenwert stimmt sehr gut mit den Versuchsdaten überein. Somit können für die Auswertung weitere Rechenwerte (wegen anderer Bauteilbreiten, Bewehrungsmenge etc.) verwendet werden. In Tabelle 6-8 sind diese dargestellt.

Tabelle 6-8: Tragfähigkeit der Vollquerschnitte mit Gitterträgern

Deckenhöhe h [cm]	Breite b [cm]	Anzahl Gitterträger [-]	Diagonale Φ_{Dia} [mm]	Betontraganteil $V_{Rm,cc}$ [kN]	Stahltraganteil $V_{Rm,sy}$ [kN]	Tragfähigkeit $F_{u,40} =$ $(V_{Rm,cc} + V_{Rm,sy}) / 0,55$ [kN]
25	25	1	7	35,6	45,8	148
	30	1	7	42,7	45,8	161
	30	1	6	42,7	33,6	139
	35	1	7	50,0	45,8	174
	40	1	7	57,0	45,8	186
	40	2	7	57,0	91,0	270
	45	1	7	64,2	45,8	200

6.1.4 Einfluss des Gitterträgerabstandes

6.1.4.1 Versuchsprogramm

Ziel dieser Versuchsreihe ist die Bestimmung des minimalen Gitterträgerabstandes, bei dem die Tragfähigkeit des Vollquerschnitts ohne Gitterträger erreicht wird. Da in der Praxis auch eine Querkrafttragfähigkeit unterhalb des Niveaus des Vollquerschnitts zur Aufnahme der Einwirkungen ausreichend sein kann, werden zudem Versuche mit größeren Gitterträgerabständen durchgeführt und die Tragfähigkeit wird ermittelt. Diese Ergebnisse sollen zu einem Bemessungskonzept führen.

Um Material zu sparen, wurden anstelle von handelsüblichen Elementdecken (Breite ca. 2,50 m) Deckenstreifen mit einer Breite entsprechend dem zu untersuchenden Gitterträgerabstand hergestellt. D. h., sollte ein Gitterträgerabstand von 30 cm untersucht werden, so wurde ein Versuchskörper mit einer Breite von 30 cm und einem Gitterträger in der Mitte hergestellt. Eine Ausnahme bildet hierbei Versuch GT_V1. Hier wurde eine Bauteilbreite von 40 cm mit zwei Gitterträgern in einem Abstand von 20 cm geprüft. Alle untersuchten Abstände bzw. Deckenbreiten sind in Tabelle 6-9 dargestellt. Diese Vorgehensweise liegt auf der sicheren Seite, da Einflüsse wie die Querdehnungsbehinderung oder die Spannungsüberlagerung benachbarter Gitterträger ausgeschlossen werden. Die Leitungen wurden entsprechend der Knotenabstände des Gitterträgers verbaut (siehe Abbildung 6-6).

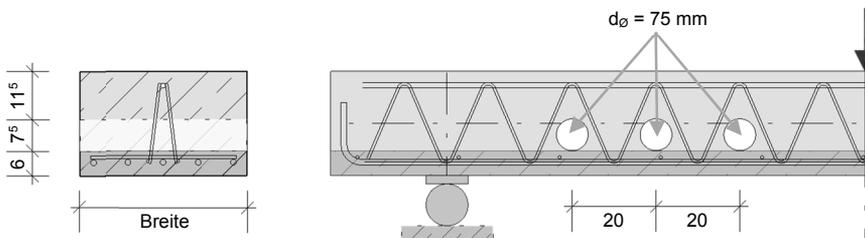


Abbildung 6-6: Schematische Darstellung der Versuche zum Gitterträgerabstand

Tabelle 6-9: Übersicht der Bauteilbreiten und der verwendeten Gitterträger

Versuch [-]	Versuchs- anzahl [-]	Breite [cm]	Anzahl der Gitterträger [-]	Gitterträgertyp [-]	Obergurt [mm]	Diagonale [mm]	Untergurte [mm]
GT_V1	3	40	2	E	12	7	6
3GT_V1	2	25	1	E	12	7	6
3GT_V2	2	30	1	E	12	7	6
3GT_V3	2	30	1	E	10	6	6
1GT_V1	2	30	1	E	12	7	6
1GT_V2	2	35	1	E	12	7	6
1GT_V3	2	40	1	E	12	7	6
1GT_V4	2	45	1	E	12	7	6

6.1.4.2 Ergebnisse

In Tabelle 6-10 werden die wichtigsten Parameter sowie die Traglasten der einzelnen Versuche dargestellt. Alle Versuchskörper versagten durch einen Biegeschubriss. Dieser verlief durch die Öffnungen hindurch.

Tabelle 6-10: Übersicht der wichtigsten Parameter sowie der im Versuch erzielten Traglasten

Versuch [-]	Breite [cm]	Anzahl der Gitterträger [-]	Diagonalen-durchmesser [mm]	Bewehrungs-menge [cm ² /m ²]	F _u [kN]	f _{cm,cube} [N/mm ²]	F _{u,40} [kN]
GT_V1-1	40	2	7	19,2	269	53,9	244
GT_V1-2					179		253
GT_V1-3					284		257
3GT_V1-1	25	1	7	15,4	143	42,7	140
3GT_V1-2					154		151
3GT_V2-1	30	1	7	12,8	160	42,7	156
3GT_V2-2					160		156
1GT_V1-1					149	51,7	137
1GT_V1-2					152		139
3GT_V3-1	30	1	6	9,4	135	42,7	132
3GT_V3-2					140		137
1GT_V2-1	35	1	7	11,0	157	51,7	144
1GT_V2-2					154		141
1GT_V3-1	40	1	7	9,6	178	51,7	163
1GT_V3-2					161		148
1GT_V4-1	45	1	7	8,5	169	51,7	155
1GT_V4-2					169		155

Um den Einfluss von Öffnungen auf die Tragfähigkeit von Elementdecken beurteilen zu können, müssen die Traglasten mit der Tragfähigkeit des jeweiligen Vollquerschnitts mit Gitterträger verglichen werden. Ein solcher Vergleich wird in Tabelle 6-11 sowie in Abbildung 6-7 angestellt. Im Vergleich zum bewehrten Vollquerschnitt sinkt die Tragfähigkeit leicht ab. Die Reduktion der Traglast zeigt keinen nennenswerten Unterschied in Abhängigkeit der Bewehrungsmenge. Bei sehr hohen Bewehrungsmengen wird der Einfluss jedoch etwas geringer. Dieser Tragfähigkeitsabfall kann nur durch die Öffnungen hervorgerufen worden sein, da dieser Parameter als einziger einen negativen Einfluss auf die Tragfähigkeit hat.

Abbildung 6-8 sowie Tabelle 6-11 zeigen die tragfähigkeitssteigernde Wirkung der Gitterträger bezogen auf den durch Öffnungen geschwächten Querschnitt. Die Tragfähigkeit wird mit wachsendem Bewehrungsquerschnitt nahezu linear gesteigert.

Abbildung 6-9 zeigt den Zusammenhang der auf den unbewehrten Vollquerschnitt bezogenen Tragfähigkeit in Abhängigkeit vom Gitterträgerabstand. Da Gitterträger mit unterschiedlichen Durchmessern der Diagonalen verwendet wurden, wird in Abbildung 6-10 dieser Zusammenhang nochmals in Abhängigkeit vom Bewehrungsquerschnitt dargestellt. Die Berechnung dieser Werte erfolgt in Tabelle 6-11.

Tabelle 6-11: Vergleich der Versuche mit verschiedenen Referenzwerten

Versuch	$F_{u,40}$	Vollquerschnitt ohne Gitterträger $F_{u,Voll,40}$	$r_{u,Voll} = F_{u,40} / F_{u,Voll,40}$	geschwächter Querschnitt ohne Gitterträger $F_{u,\emptyset,40}$	$r_{u,\emptyset} = F_{u,40} / F_{u,\emptyset,40}$	Vollquerschnitt mit Gitterträger $F_{u,Voll+GT,40}$	$r_{u,Voll+GT} = F_{u,40} / F_{u,Voll+GT,40}$
[-]	[kN]	[kN]	[-]	[kN]	[-]	[kN]	[-]
GT_V1-1	244	177	1,38	118	2,06	270	0,90
GT_V1-2	253		1,43		2,14		0,94
GT_V1-3	257		1,45		2,18		0,95
3GT_V1-1	140	111	1,26	74	1,89	148	0,95
3GT_V1-2	151		1,36		2,03		1,02
3GT_V2-1	156	133	1,18	89	1,76	161	0,97
3GT_V2-2	156		1,18		1,76		0,97
1GT_V1-1	137		1,03		1,54		0,95
1GT_V1-2	139		1,05		1,57	0,87	
3GT_V3-1	132		1,00		1,49	139	0,95
3GT_V3-2	137		1,03		1,54		0,99
1GT_V2-1	144	155	0,93	104	1,39	174	0,83
1GT_V2-2	141		0,91		1,36		0,81
1GT_V3-1	163	177	0,92	118	1,38	186	0,88
1GT_V3-2	148		0,84		1,25		0,79
1GT_V4-1	155	199	0,78	133	1,16	200	0,78
1GT_V4-2	155		0,78		1,16		0,78

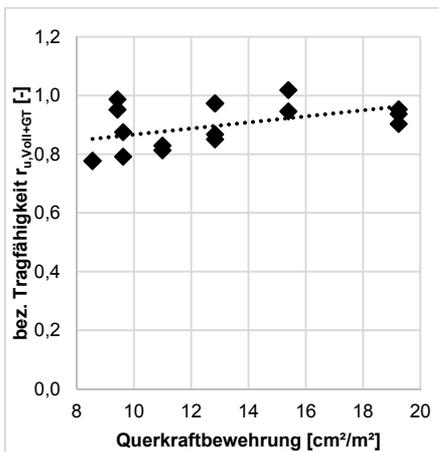


Abbildung 6-7: Ergebnisse der Versuche bezogen auf den Vollquerschnitt inkl. Gitterträger in Abhängigkeit des Bewehrungsquerschnitts

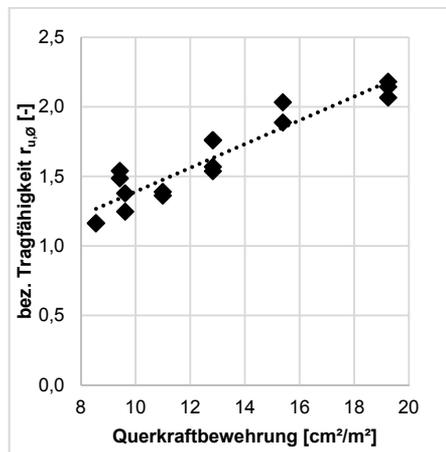


Abbildung 6-8: Ergebnisse der Versuche bezogen auf den geschwächten Querschnitt ohne Gitterträger in Abhängigkeit des Bewehrungsquerschnitts

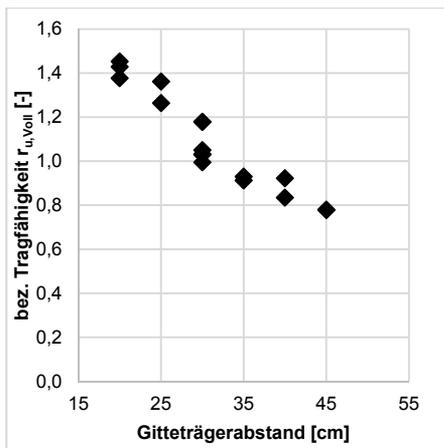


Abbildung 6-9: Ergebnisse der Versuche bezogen auf den Vollquerschnitt in Abhängigkeit des Gitterträgerabstandes

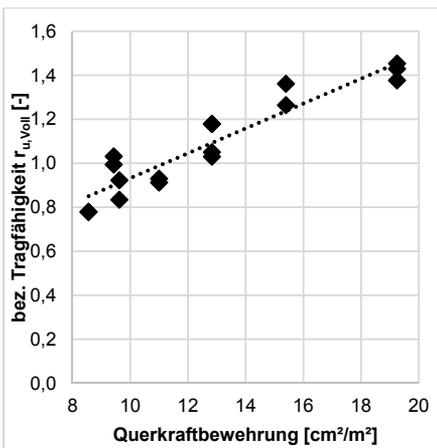


Abbildung 6-10: Ergebnisse der Versuche bezogen auf den Vollquerschnitt in Abhängigkeit des Bewehrungsquerschnitts

Es kann festgehalten werden, dass Gitterträger die Tragfähigkeit bezogen auf den geschwächten Querschnitt steigern. Ab einem Bewehrungsquerschnitt von ca. $11 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ wird die Tragfähigkeit des Vollquerschnitts erreicht (siehe Abbildung 6-10). Dies entspricht in etwa der Mindestquerkraftbewehrung nach *DIN EN 1992-1-1*:

$$\begin{aligned}
 a_{sw,min} &= \rho_{w,min} \cdot \frac{f_{ck}^{1/3}}{f_{yk}} \cdot \sin \alpha \\
 &= 0,163 \cdot \frac{40^{1/3}}{420} \cdot \sin 67 \\
 &= 10,56 \text{ cm}^2 / \text{m}^2
 \end{aligned}$$

Die Tragfähigkeit von Elementdecken wird durch Leitungen reduziert und muss daher bemessungstechnisch erfasst werden. Dies verdeutlichen zusätzlich zu den obigen Messwerten die Rissbilder (siehe Abbildung 6-11).

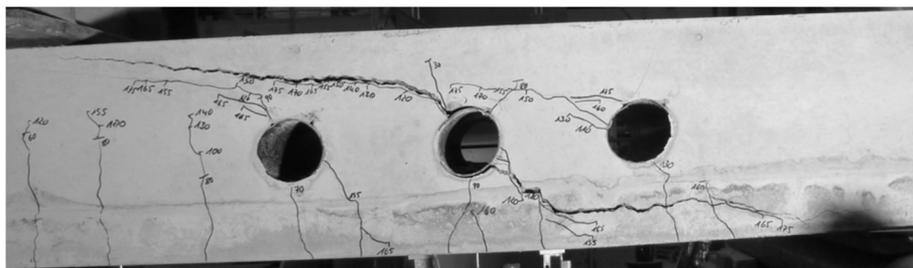


Abbildung 6-11: Rissbild einer Elementdecke mit Leitungen am Beispiel von Versuch 1GT_V3-1

6.1.5 Einfluss beschädigter Diagonalen

Häufig werden im Baualltag inakzeptabler Weise Gitterträgerdiagonalen verbogen oder gar komplett herausgeschnitten (siehe Abbildung 6-12). Grund hierfür ist der Einbau zu großer Leitungen (Durchmesser größer als 80 mm), fehlende Kommunikation der verschiedenen Planer und Ausführenden oder eine mangelhafte Vorausplanung. Fehlende oder zerstörte Diagonalen können nicht nur zu Tragfähigkeitsproblemen im Endzustand, sondern vor allem im Montagezustand der Elementdecken führen. Die Diagonalen bilden zusammen mit der unteren Fertigteilplatte und dem Obergurt ein Fachwerkmodell. Das Fehlen einer oder gar mehrerer Diagonalen kann im Montagezustand (z. B.: während des Betonierens) fatale Folgen haben.

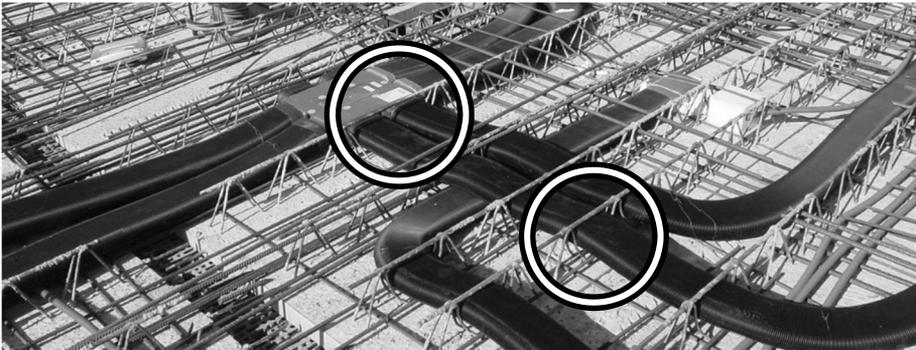


Abbildung 6-12: Zerstörte Gitterträgerdiagonalen

Deshalb wurden Versuche mit rechteckigen Öffnungen und zerstörten Diagonalen im Bereich der Öffnungen durchgeführt. Es wurden auf eine Breite von 40 cm zwei Gitterträger Typ E-19 (UG/Dia/OG = 6/7/12) der Firma Filigran mit einem Abstand von 20 cm verbaut. Im Bereich der Öffnung ($b \times h = 25 \times 10$) wurden die Diagonalen entfernt.

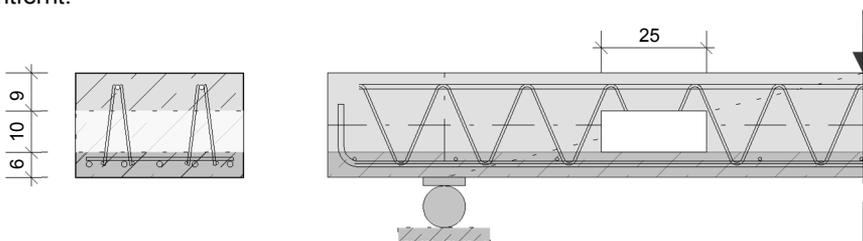


Abbildung 6-13: Schematische Darstellung des Versuchskörpers zur Untersuchung des Einflusses zerstörter Diagonalen

Die Versuchskörper versagten durch einen Biegeschubriss durch die rechteckige Öffnung hindurch (siehe Abbildung 6-14).

6 Leitungen in Elementdecken mit Gitterträgern

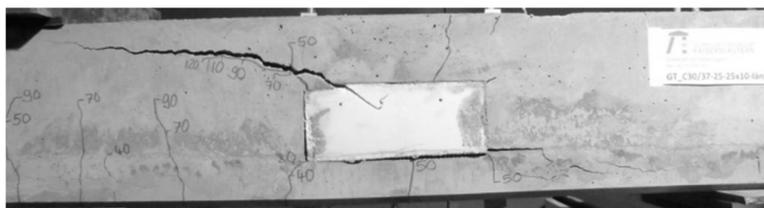


Abbildung 6-14: Bruchbild eines Elementdeckenstreifens mit zerstörten Diagonalen im Öffnungsbereich (GT_V2-2)

Aufgrund der relativ großen Querschnittsschwächung zeigt der Traglastversuch ein im Zustand II etwas weiches Last-Verformungsverhalten als der vergleichbare Vollquerschnitt (siehe Abbildung 6-15).

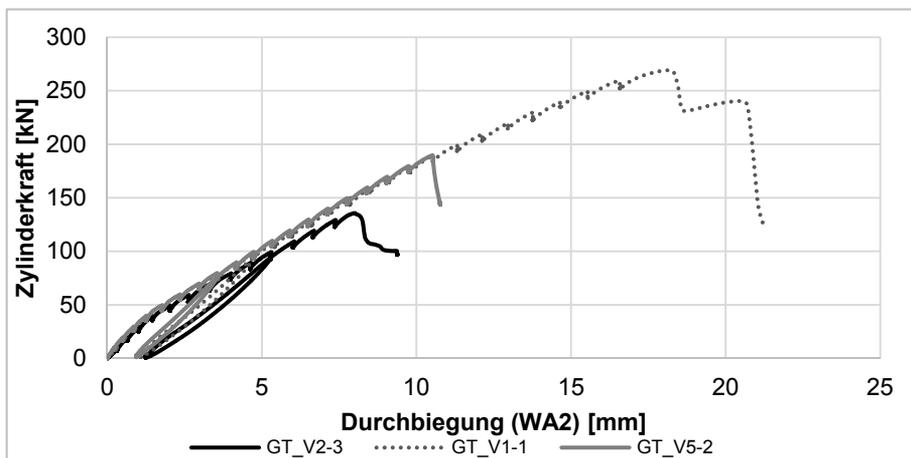


Abbildung 6-15: Vergleich der Last-Verformungskurven der Versuche GT_V1-1 (Vollquerschnitt mit Gitterträgern), GT_V2-3 (geschwächter Querschnitt mit Gitterträgern) und GT_V5-2 (Vollquerschnitt)

Die Tragfähigkeit liegt unterhalb der des Vollquerschnitts trotz eines Gitterträgerabstands von 20 cm. Jedoch liegt sie noch deutlich über dem Erwartungswert eines auf diese Weise geschwächten Querschnitts. Dieser ist bei etwa 40 % des Vollquerschnitts. Dieses Ergebnis wurde im Rahmen eines Projekts außerhalb dieser Arbeit gewonnen. Hierbei wurden zwei Leitungen ($d_{\emptyset} = 125$ mm) direkt nebeneinander eingebaut (siehe Abbildung 6-16). Die Querschnittsschwächung entspricht etwa einem einhüllenden Rechteck von 10 x 24 cm.

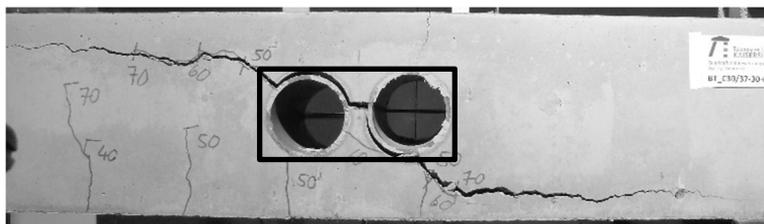


Abbildung 6-16: Bruchbild eines Versuchs mit 2 Leitungen $d_{\emptyset} = 125$ mm direkt nebeneinander

Da die Tragfähigkeit des unbewehrten Vollquerschnitts nicht erreicht wird, liegt die Tragfähigkeit des geschwächten Querschnitts auch deutlich unterhalb der des Vollquerschnitts mit gleichen Gitterträgern. Eine Übersicht der Traglasten sowie der bezogenen Tragfähigkeiten ist in Tabelle 6-12 dargestellt.

Tabelle 6-12: Traglasten der Versuche mit rechteckiger Öffnung

Kurzbezeichnung	Traglast F_u [kN]	Betonfestigkeit $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	normierte Traglast $F_{u,40}$ [kN]	Mittelwert $F_{u,m,40}$ [kN]	Streuung CV [%]	Referenztragfähigkeit $F_{u,m,Ref,40}$ [kN]	bezogene Tragfähigkeit $r_u = F_{u,40} / F_{u,m,Ref,40}$ [-]
GT_V2-1	136	53,9	123	123	5,7	177	0,77
GT_V2-2	129	53,9	117				0,73
GT_V2-3	145	53,9	131				0,82

6.2 Interpretation der Ergebnisse und Bemessungskonzept

6.2.1 Elementdecken mit Gitterträgern

Öffnungen reduzieren die Tragfähigkeit von Elementdecken (siehe Kapitel 6.1.4.2). Ein Einfluss der Öffnungen auf den Betontraganteil ist klar ersichtlich. Daher soll der Betontraganteil des Bemessungskonzepts nach *DIN EN 1992-1-1* entsprechend des Abminderungsfaktors gemäß Kapitel 2.2.2 reduziert werden. Der Traganteil der Gitterträger bleibt durch den Einbau von Öffnungen unbeeinflusst, solange die Diagonalen der Gitterträger unversehrt bleiben.

Die Bemessungsgleichung lautet:

$$V_{Rm} = V_{Rm,cc} + V_{Rm,sy} \quad (6.3)$$

Der Betontraganteil wird folgendermaßen bestimmt:

$$V_{Rm,cc} = k_{\varnothing n} \cdot 0,24 \cdot f_{1c}^{1/3} \cdot b_w \cdot z \quad (6.4)$$

Bei den in den Versuchen verwendeten Abmessungen ($d_\varnothing/d = 0,33$ und $s_\varnothing = 2,6 \cdot d_\varnothing$) wird ein Abminderungsfaktor für den Betontraganteil von 0,59 zur Anwendung gebracht.

$$k_{\varnothing,Gruppe} = \sqrt{2} \cdot \left(1 - \frac{7,5}{20}\right) \cdot 0,67 = 0,59 \leq k_{\varnothing n} = 0,67 \quad (6.5)$$

Der Stahltraganteil errechnet sich zu:

$$V_{Rm,sy} = a_{sw} \cdot f_{ywk} \cdot z \cdot \sin \alpha \cdot (\cot \beta_r + \cot \alpha) \quad (6.6)$$

mit :

$$\cot \beta_r = 1,2 \quad (\beta_r = 40^\circ)$$

$$\alpha = 67^\circ \quad (\text{für den hier verwendeten Gitterträger})$$

$$z = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,9 \cdot d \\ h - c_{nom,oben} - c_{nom,unten} \end{array} \right.$$

6 Leitungen in Elementdecken mit Gitterträgern

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche ergeben sich die in Tabelle 6-13 aufgeführten rechnerischen Traglasten. Zudem werden die Rechenwerte mit den Versuchsergebnissen verglichen, um das Bemessungskonzept zu verifizieren. Dieser Vergleich ist in Abbildung 6-17 dargestellt. Wie zu erkennen ist, liegen die Rechenwerte im Mittel leicht unterhalb der Versuchsergebnisse. Grund hierfür ist die, trotz der Verwendung von Mittelwerten für die Berechnungen, im Bemessungsmodell der *DIN EN 1992-1-1* enthaltene Modellunsicherheit (siehe Kapitel 4.7.2).

Im Mittel liegt der Vergleich der Versuchsergebnisse zu den Rechenwerten bei 1,09 und weist eine Streuung von 9,1 % auf. Somit ist das gewählte Bemessungskonzept für den Nachweis von durch Öffnungen geschwächte Elementdecken sehr gut geeignet.

Tabelle 6-13: Vergleich der Versuche mit den Rechenwerten

Versuch [-]	$F_{u,40}$ [kN]	Betontraganteil $V_{Rm,cc}$ [kN]	Stahltraganteil $V_{Rm,sy}$ [kN]	Tragfähigkeit $F_{u,40,calc} =$ $(V_{Rm,cc} + V_{Rm,sy}) / 0,55$ [kN]	$F_{u,40} / F_{u,40,calc}$ [-]
GT_V1-1	244	33,6	91,5	227,5	1,07
GT_V1-2	253				1,11
GT_V1-3	257				1,13
3GT_V1-1	140	21,0	45,8	121,4	1,15
3GT_V1-2	151				1,24
3GT_V2-1	156	25,2	45,8	129,0	1,21
3GT_V2-2	156				1,21
1GT_V1-1	137				1,06
1GT_V1-2	139				1,08
3GT_V3-1	132		33,6	106,9	1,24
3GT_V3-2	137				1,28
1GT_V2-1	144	29,4	45,8	136,7	1,05
1GT_V2-2	141				1,03
1GT_V3-1	163	33,6	45,8	144,3	1,13
1GT_V3-2	148				1,02
1GT_V4-1	155	37,8	45,8	151,9	1,02
1GT_V4-2	155				1,02

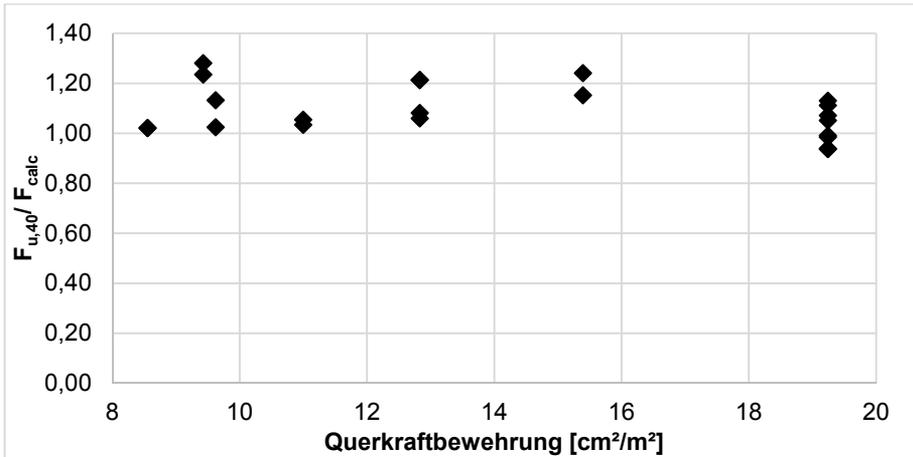


Abbildung 6-17: Vergleich der Rechen- und Versuchsergebnisse

Wird „lediglich“ die Tragfähigkeit des unbewehrten Vollquerschnitts benötigt, so kann diese durch Einbau der Mindestquerkräftbewehrung nach *DIN EN 1992-1-1* in Form von Gitterträgern sichergestellt werden (siehe Abschnitt 6.1.4.2).

Werden für die spätere baupraktische Bemessung die üblichen Teilsicherheitsbeiwerte verwendet, so bietet das abgewandelte Bemessungskonzept das gleiche Sicherheitsniveau wie das ursprüngliche Bemessungskonzept aus *DIN EN 1992-1-1*. Der einzige veränderte Parameter ist die Leitung. Diese erzeugt keine zusätzlichen Streuungen und Unsicherheiten.

Da die Bemessungskonzepte des *Model Code 2010* und des *ACI 318-11* ähnlich aufgebaut sind, wie die Bemessung der *DIN EN 1992-1-1* kann die Abminderung des Betontraganteils für diese Normen ebenfalls übernommen werden.

6.2.2 Elementdecken mit beschädigten Gitterträgerdiagonalen

Von einer Beschädigung oder einem Entfernen von Gitterträgerdiagonalen wird in jedem Falle dringend abgeraten. Sollten jedoch Gitterträgerdiagonalen beschädigt, oder komplett entfernt worden sein, so ist der folgende Nachweis zu erbringen:

$$V_{Ed} \leq V_{Rm,cc} + V_{sw} \quad (6.7)$$

$$V_{Rm,cc} = k_{\varnothing n} \cdot 0,24 \cdot f_{tc}^{1/3} \cdot b_w \cdot z \quad (6.8)$$

$$V_{sw} = A_{sw} \cdot f_{yw} \cdot \sin \alpha \quad (6.9)$$

Als Bewehrungsquerschnitt A_{sw} ist hierbei die unbeschädigte Bewehrungsmenge neben der Öffnung einzusetzen. Hierbei darf A_{sw} nur von einer Seite neben der Öffnung verwendet werden, da bei großen Öffnungen der Versagensriss nur auf einer Seite der Öffnung die Bewehrung kreuzt (siehe Abbildung 6-14). Auf der anderen Seite verlief der Riss im Versuch bereits horizontal entlang der Längsbewehrung.

Somit ergibt sich für die hier getestete Konfiguration folgende Tragfähigkeit:

$$V_{Rm,cc} = 0,40 \cdot 0,24 \cdot (0,95 \cdot 0,8 \cdot 40)^{1/3} \cdot 40 \cdot 19 = 23 \text{ kN}$$

$$V_{sw} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot 7^2}{4} \cdot 420 \cdot \sin 67 = 30 \text{ kN}$$

$$F_{u,40,calc} = \frac{V_{Rm,cc} + V_{sw}}{0,55} = \frac{23 + 30}{0,55} = 97 \text{ kN}$$

Die errechnete Traglast liegt zwar deutlich unterhalb des Versuchsergebnisses von im Mittel 123 kN, bietet aber eine unkomplizierte und auf der sicheren Seite liegende Berechnungsmethode, bei der die tragfähigkeitssteigernde Wirkung des Gitterträgers berücksichtigt werden kann. Zu beachten ist, dass bislang lediglich ein Versuch durchgeführt wurde. Ein Zerstören oder Beschädigen der Diagonalen ist in jedem Fall nicht zu empfehlen, da neben der Tragfähigkeit im Endzustand vor allem die Tragfähigkeit im Bauzustand nicht sichergestellt sein kann.

Näheres zur Berechnung von Querschnitten mit rechteckigen Öffnungen und Querkraftbewehrung ist in *Mansur (2006)* zu finden.

6.3 Empfehlungen für die Praxis

6.3.1 Nachweis der Querkrafttragfähigkeit

Grundsätzlich gilt, dass der Leitungsdurchmesser der Gitterträgergeometrie oder die Gitterträgergeometrie dem Leitungsdurchmesser angepasst werden muss. Aufgrund eines Knotenabstands der Gitterträger von ca. 20 cm beträgt der maximal mögliche Leitungsdurchmesser ca. 80 mm. Dieser könnte lediglich durch Verwendung von Schubgitterträgern erhöht werden. Eine Beschädigung der Diagonalen ist zu vermeiden.

Die Bemessung für Elementdecken mit Gitterträgern und integrierten Leitungen soll folgendermaßen durchgeführt werden:

1. Überprüfung des Querkraftwiderstands ohne Querkraftbewehrung unter Berücksichtigung der Querschnittsschwächung

$$V_{Rd,c} = k_{\varnothing n} \cdot \frac{0,15}{\gamma_c} \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot (\rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d$$

Ist der Widerstand größer als die Einwirkung V_{Ed} , so ist die Bemessung abgeschlossen. Ist der Widerstand kleiner, dann können die Gitterträger als tragende Querkraftbewehrung mit angesetzt werden.

2. Entspricht die eingelegte Querkraftbewehrung dem Mindestquerkraftbewehrungsgehalt nach Eurocode 2 und die Tragfähigkeit des ungeschwächten Vollquerschnitts ist ausreichend für die Bemessung, dann sind keine weiteren Nachweise erforderlich.

3. Wenn nicht, so ist der folgende Nachweis zu erbringen:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} = V_{Rd,cc} + V_{Rd,sy}$$

$$V_{Rd,cc} = k_{\varnothing n} \cdot 0,24 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot b_w \cdot z$$

$$V_{Rd,sy} = a_{sw} \cdot f_{ywd} \cdot z \cdot \sin \alpha \cdot (\cot \beta_r + \cot \alpha)$$

$$\text{mit: } \cot \beta_r = 1,2 \quad (\beta_r = 40^\circ)$$

4. Des Weiteren ist der Widerstand der Druckstrebe nachzuweisen. Hierbei muss die Druckstrebenfläche reduziert werden. Dies soll über eine den Abminderungsfaktor für Öffnungen gemäß Abschnitt 2.2 erfolgen:

$$V_{Rd,max} = k_{\varnothing n} \cdot \frac{b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha)}{1 + \cot^2 \theta}$$

Wird der Nachweis der erforderlichen Querkraftbewehrung über

$$a_{sw} = \frac{V_{Ed}}{z \cdot f_{ywd} \cdot \sin \alpha \cdot (\cot \alpha + \cot \theta)}$$

erbracht, mit der Annahme eines Druckstrebenneigungswinkels von 40° ($\cot \theta = 1,2$), wird der Betontraganteil quasi vernachlässigt. Da sich Querschnittsschwächungen lediglich auf den Betontraganteil auswirken, gilt der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit mit Querkraftbewehrung somit als erbracht. Allerdings liefert diese Berechnung sehr unwirtschaftliche Bewehrungsmengen.

Von einer Beschädigung bzw. einer Entfernung von Gitterträgerdiagonalen wird dringend abgeraten. Sollten jedoch Gitterträgerdiagonalen beschädigt, oder komplett entfernt worden sein, so kann mit Hilfe der Gleichungen aus Abschnitt 6.2.2 eine Bemessung erfolgen.

6.3.2 Nachweis der Verbundfuge

Da neben der Querkrafttragfähigkeit auch die Tragfähigkeit der Elementfuge durch Öffnungen beeinflusst wird, ist nachfolgend eine Ansatz für ein vom Eurocode 2 abgewandeltes Bemessungskonzept dargestellt. Da keine Versuche hierzu durchgeführt wurden, handelt es sich um eine rein theoretische Überlegung. Die theoretischen Grundlagen zur Tragfähigkeit von Verbundfugen sind in Kapitel 2.5.2 aufgeführt.

Für den Nachweis nach *DIN EN 1992-1-1* soll der Traganteil der Adhäsion sowie der Coulomb'sche Reibungsanteil um die fehlende Verbundfläche abgemindert werden. Hierbei soll auf der sicheren Seite liegend der Rohrdurchmesser verwendet werden. Zwar berühren die Rohre nur in einem sehr kleinen Bereich die Verbundfuge, es kann jedoch theoretisch zu einer schlechteren Verdichtung des Betons im Bereich der Rohre kommen. Der Traganteil der Verbundbewehrung bleibt unbeeinflusst. Daher soll gelten:

$$V_{Rdi} = \frac{A_{\text{bond,red}}}{A_{\text{bond}}} \cdot (c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_N) + \rho \cdot f_{yd} \cdot (1,2 \cdot \mu \sin \alpha + \cos \alpha)$$

mit :

$$A_{\text{bond,red}} = \left(1 - \sum d_{\emptyset}\right) \cdot b$$
$$A_{\text{bond}} = l \cdot b$$
(6.10)

7 Sonderlösungen

7.1 Gitterträger und Unterstützungskörbe parallel zu Leitungen

Im Vergleich zu den Versuchen aus Abschnitt 6 (Leitungen in Elementdecken mit Gitterträgern) bei denen die Leitungen senkrecht zu den Gitterträgern bzw. zur Deckenspannrichtung verlegt wurden, wird in diesem Abschnitt die Möglichkeit zur Steigerung der Querkrafttragfähigkeit durch Gitterträger bzw. Unterstützungskörbe parallel zu Leitungen untersucht. Die Leitungen, sowie die Bewehrungselemente verlaufen analog zu den Versuchen aus Abschnitt 6 senkrecht zur Deckenspannrichtung. Leitungen parallel zur Deckenspannrichtung bewirken keine Reduktion der Querkrafttragfähigkeit.

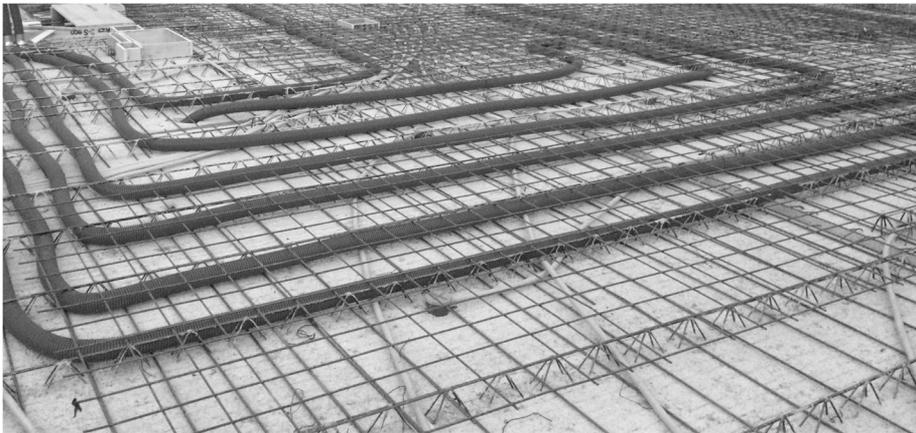


Abbildung 7-1: Beispiel für Leitungen neben Gitterträgern
[www.riemerling.blogspot.com (16.06.2016)]

7.1.1 Versuche

Aufbau und Durchführung

Die Versuche wurden an 25 cm dicken und 40 cm breiten Deckenstreifen durchgeführt, analog zu den Versuchen mit Elementdecken (siehe Kapitel 6.1). Alle weiteren Randbedingungen sind in Kapitel 4 aufgeführt.

Referenzversuche

Die Referenzversuche sind in Kapitel 6 zu finden. Die Traglast des Vollquerschnitts beträgt im Mittel 177 kN. Die Traglast des geschwächten Querschnitts beträgt gemäß Kapitel 2.2.2.1 ca. $(1 - 0,33) \cdot 177 = 115$ kN.

Untersuchte Konstellationen

Es wurden insgesamt 12 Versuche mit Gitterträgern und Unterstützungskörben durchgeführt. Hierbei wurden jeweils der Fall des ins Fertigteil einbetonierten Elements und der Fall des auf das Fertigteil aufgestellten Elements unterschieden. Als

7 Sonderlösungen

Gitterträger wurden Typ E – 17 (6/7/12) und Typ E-19 (6/7/12) der Firma Filigran verwendet (AbZ Z-15.1-147). Die verwendeten Unterstützungskörbe DBV-BT 16 und DBV-BT 18 entsprechen dem DBV - Merkblatt "Unterstützungen nach Eurocode 2". Die durchgeführten Versuche sind in Tabelle 7-1, sowie in Abbildung 7-2 zusammengestellt. Da diese Versuche zum Teil im Rahmen studentischer Arbeiten durchgeführt wurden ist in der letzten Spalte die Referenzarbeit angegeben.

Tabelle 7-1: Übersicht der Versuche mit Gitterträgern und Unterstützungskörben als Zustellbewehrung neben Leitungen

Serie	Bezeichnung in Abbildung 7-2	Kurzbezeichnung	Bewehrungselement	Anzahl	$\Phi_{\text{Diagonale}}$ [mm]	Aufgestellt / Einbetoniert	Referenz
1	2 Gitterträger h = 19 (in FT einbetoniert)	GT_V3-1	KT 819 6/7/12	2	7	Einbetoniert	-
		GT_V3-2					
		GT_V3-3					
2	Gitterträger h = 19 (in FT einbetoniert)	GT_V4-1	KT 819 6/7/12	1	7	Einbetoniert	-
		GT_V4-2					
		GT_V4-3					
		2GT_V1-2	E 19 - 6/7/12	1	7	Einbetoniert	<i>Bulenda (2015)</i>
3	Gitterträger h = 17 cm (auf FT ausgestellt)	2GT_V1-1	E 17 - 6/7/12	1	7	Aufgestellt	<i>Bulenda (2015)</i>
4	BT 16 (auf FT aufgestellt)	2GT_V2-1	BT 16	1	6	Aufgestellt	<i>Bulenda (2015)</i>
		4GT_V1-2					
5	BT 18 (in FT einbetoniert)	2GT_V2-2	BT 18	1	6	Einbetoniert	<i>Bulenda (2015)</i>
		4GT_V1-1					

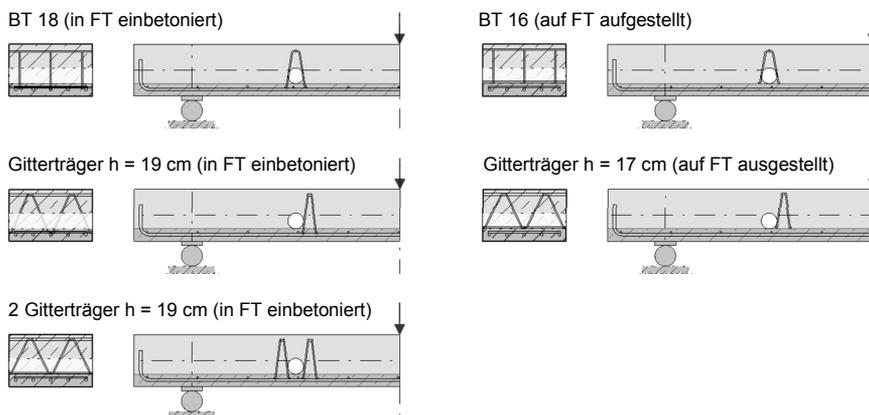


Abbildung 7-2: Schematische Darstellung der Versuchskörper

Ergebnisse

In allen Versuchen wurde das Traglastniveau des Vollquerschnitts erreicht (siehe Tabelle 7-2 und Abbildung 7-3). Alle Versuchskörper versagten durch einen Biegeschubriss.

Tabelle 7-2: Übersicht der Ergebnisse der Versuche mit Gitterträgern und Unterstützungskörben als Zustellbewehrung

Serie	Kurzbezeichnung	Traglast	Betonfestigkeit	normierte Traglast	Mittelwert	Streuung	Referenztragfähigkeit	bezogene Tragfähigkeit $r_u = F_{u,40} / F_{u,m,Ref,40}$ [-]
		F_u [kN]	$f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	$F_{u,40}$ [kN]	$F_{u,m,40}$ [kN]	CV [%]	$F_{u,m,Ref,40}$ [kN]	
1	GT_V3-1	210	53,9	190	195	2,4	177	1,07
	GT_V3-2	217	53,9	197				1,11
	GT_V3-3	219	53,9	198				1,12
2	GT_V4-1	200	53,9	181	186	2,1		1,02
	GT_V4-2	205	53,9	185				1,05
	GT_V4-3	210	53,9	190				1,07
	2GT_V1-2	204	51,7	187				1,06
3	2GT_V1-1	210	51,7	193	-	-		1,09
4	2GT_V2-1	199	51,7	183	177	4,6		1,03
	4GT_V1-2	175	42,7	171				0,97
5	2GT_V2-2	194	51,7	178	184	4,5	1,01	
	4GT_V1-1	194	42,7	190			1,07	

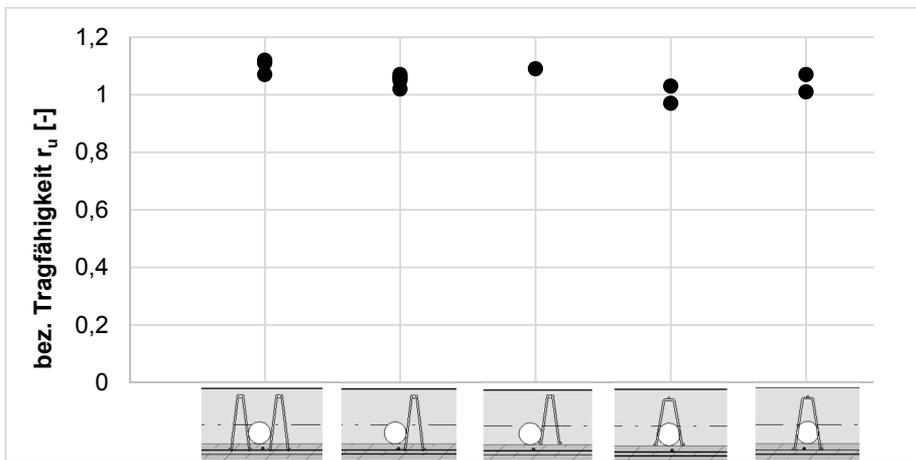


Abbildung 7-3: Grafische Übersicht der bezogenen Tragfähigkeiten

Bei Serie 1 (Gitterträger auf beiden Seiten der Öffnung) verläuft der Schubriss auf der lastzugewandten Seite vor dem Gitterträger auf die Biegebewehrung (siehe Abbildung 7-4 links). Die Gitterträger sind nicht bis zur Fließgrenze ausgenutzt. Der Gitterträger auf der lastabgewandten Seite ist aus statischen Gründen nicht notwendig, das zeigt auch Serie 2. Bei diesen Versuchen wurde ebenfalls die Tragfähigkeit des Vollquerschnitts erreicht. Ein Fließen der Gitterträgerdiagonalen konnte nicht

festgestellt werden. Der Schubriss verlief in einigen Versuchen vor dem Gitterträger auf die Biegebewehrung, in anderen Versuchen wurde er über der Öffnung entlang geführt (siehe Abbildung 7-4 rechts). Da aber auf Baustellen nicht zwingend ersichtlich ist, welches die lastzugewandte Seite ist, ist die beidseitige Bewehrungsführung, wenn auch unwirtschaftlich, praxistauglicher. Die Gitterträger können dann als klar definierte Leitungstrasse vom Tragwerksplaner vorgesehen werden. Vor allem in Ortbetondecken stellt das eine unkomplizierte und schnelle Bewehrungsart von durch Leitungen geschwächten Decken dar.



Abbildung 7-4: Vergleich der Bruchbilder der Versuche mit Gitterträgern beidseitig der Leitungen (links) und einseitig (rechts)

Ist die Tragfähigkeit einer durch Leitungen geschwächten Elementdecke nicht ausreichend, weil der Gitterträgerabstand zu groß ist, so kann durch Zulage von Gitterträgern neben der Leitung die Tragfähigkeit gezielt erhöht werden. Die Versuche der Serie 3 belegen dies. Durch Aufstellen eines Gitterträgers neben der Leitung wird die Tragfähigkeit auf das Niveau des Vollquerschnitts angehoben. Dies gilt jedoch nur, wenn die Elementfuge als rau eingestuft werden kann. Bei diesen Versuchen verläuft der Schubriss teils oberhalb, teils unterhalb des Gitterträgers (siehe Abbildung 7-5). Der Gitterträger ist nicht bis zur Fließgrenze ausgenutzt. Auch hier ist eine zweiseitige Bewehrungsanordnung im baupraktischen Einsatz sinnvoll.

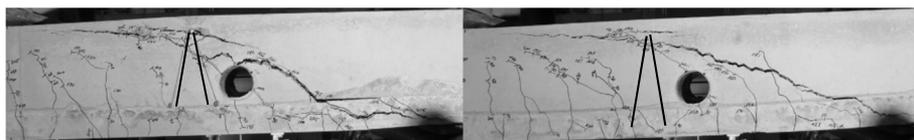


Abbildung 7-5: Vergleich der Bruchbilder mit Gitterträger neben der Leitung (links: auf das Fertigteile aufgestellt; rechts: ins Fertigteile einbetoniert)

Da die Gitterträger neben den Leitungen nicht bis zu ihrer Fließgrenze ausgenutzt sind, wurde Serie 4 und 5 durchgeführt. Hierbei wurde ein Unterstützungskorb nach *DBV - Merkblatt "Unterstützungen nach Eurocode 2"* über die Leitung gestellt. Auch bei diesen Versuchen konnte die Tragfähigkeit des Vollquerschnitts erreicht werden. Allerdings wurden die Unterstützungskörbe bis zum Stahlversagen beansprucht. Der Schubriss verlief durch die Öffnung und damit durch den Unterstützungskorb hindurch und führte abschließend zum Stahlversagen der Bewehrung (Abbildung 7-6 und 7-6). Die Bewehrungsmenge (3 Stäbe mit $\Phi = 6 \text{ mm}$) liegt etwas oberhalb des Mindestbewehrungsgrads nach *DIN EN 1992-1-1*. Allerdings handelt es sich bei dem verwendeten Stahl der Unterstützungskörbe um Glattstahl. Zudem ist die Festigkeit nicht genormt, da es bislang nicht als tragendes Element eingesetzt wird.



Abbildung 7-6: Vergleich der Bruchbilder mit Unterstützungskörben über der Leitung (links: auf das Fertigteil aufgestellt; rechts: ins Fertigteil einbetoniert)

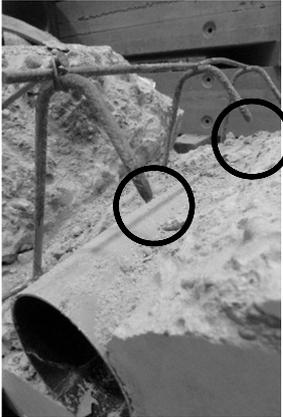


Abbildung 7-7: Stahlversagen der Unterstützungskörbe

7.1.2 Interpretation der Ergebnisse und Bemessungskonzept

Das Nachweiskonzept soll in Anlehnung an den Nachweis von Gitterträgern als Aufhängebewehrung bei indirekten Auflagern erfolgen (siehe Abbildung 7-8). Anstatt die Kräfte über die Fuge zwischen Elementdecke und Unterzug zu übertragen, müssen in diesem Fall die Kräfte über bzw. um die Öffnung geführt werden. Hierbei wird mittels eines Stabwerks die hochzuhängende Kraft berechnet.

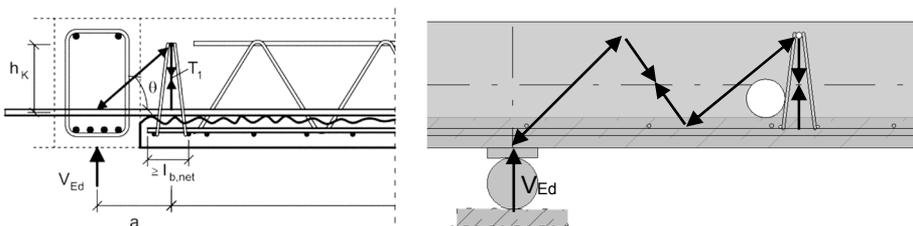


Abbildung 7-8: Links: Auflagerung von Elementdecken mittels Aufhängebewehrung. [Furche und Bauermeister (2009)]; Rechts: Nachweisschema für Gitterträger parallel zu Leitungen

In die Bemessung gehen beide Neigungswinkel der Gitterträgerdiagonalen mit ein. Zudem wird der Betontraganteil wie zuvor auch abgemindert. Der Nachweis erfolgt somit über:

7 Sonderlösungen

$$V_{Ed} \leq V_{Rm,Gitterträger} + V_{Rm,cc} \leq V_{Rm,c}$$

$$= n \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot f_{yk} \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta + k_{\varnothing n} \cdot 0,24 \cdot f_{1c}^{1/3} \cdot b_w \cdot z \leq V_{Rm,c}$$

$$V_{Rm,c} = 0,197 \cdot \kappa \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d$$

Hierbei ist n die Anzahl der wirksamen Diagonalen, α der Neigungswinkel in Bauteillängsachse und β der Neigungswinkel in Tiefenrichtung (wie bei den Wendeln). Als wirksame Diagonalen werden alle Diagonalen rechts und links der Öffnung angesetzt, da die Schubrisse in den Versuchen all diese Diagonalen kreuzten und somit die Diagonalen aktivierten. Für die Berechnung des Stahltraganteils wird für die Gitterträger eine Fließgrenze von 420 N/mm² angesetzt. Für die Festigkeit der Stäbe der Unterstüzungskörbe wurden Stahlzugprüfungen durchgeführt. Hierbei wurde die Fließgrenze in Zugversuchen zu 470 N/mm² bestimmt. Auf der sicheren Seite liegend wird aber auch ein Wert von 420 N/mm² verwendet.

Tabelle 7-3: Vergleich der Versuche mit den Rechenwerten

Versuch [-]	$F_{u,40}$ [kN]	Betontraganteil $V_{Rm,cc}$ [kN]	Stahltraganteil $V_{Rm,sy}$ [kN]	Tragfähigkeit $F_{u,40,calc} =$ $(V_{Rm,cc} + V_{Rm,sy}) / 0,55$ [kN]	$F_{u,40} / F_{u,40,calc}$ [-]	$F_{u,40} / F_{u,40,calc}$ unter Berücksichtigung des Grenzwertes $V_{Rm,c}$
GT_V3-1	190	33,6	234,4	268,0	0,39	1,08
GT_V3-2	197				0,40	1,12
GT_V3-3	198				0,41	1,12
GT_V4-1	181		117,2	150,8	0,66	1,03
GT_V4-2	185				0,67	1,05
GT_V4-3	190				0,69	1,08
2GT_V1-2	187		117,2	150,8	0,68	1,06
2GT_V1-1	193				0,70	1,09
2GT_V2-1	183		68,8	102,4	0,98	1,04
4GT_V1-2	171				0,92	0,97
2GT_V2-2	178		68,8	102,4	0,96	1,01
4GT_V1-1	190				1,02	1,08

Wie das Verhältnis von $F_{u,40}$ zu $F_{u,40,calc}$ in Tabelle 7-3 zeigt, wird die Tragfähigkeit teils deutlich überschätzt. Die Stahltragfähigkeit des Standardgitterträgers kann bei Weitem nicht ausgenutzt werden. Lange bevor die Fließgrenze erreicht wird, versagt der Versuchskörper im unbewehrten Bereich neben dem Gitterträger. Daher wird eine Begrenzung der Gesamttragfähigkeit auf $V_{Rm,c}$ eingeführt. Da es sich um lokale Zulagebewehrung handelt, kann die Tragfähigkeit des Vollquerschnitts nicht überschritten werden. Bei den Versuchen mit Unterstüzungskörben wird die Stahltragfähigkeit erreicht (siehe Abbildung 7-7). Hier liefert die Bemessung realitätsnahe Werte.

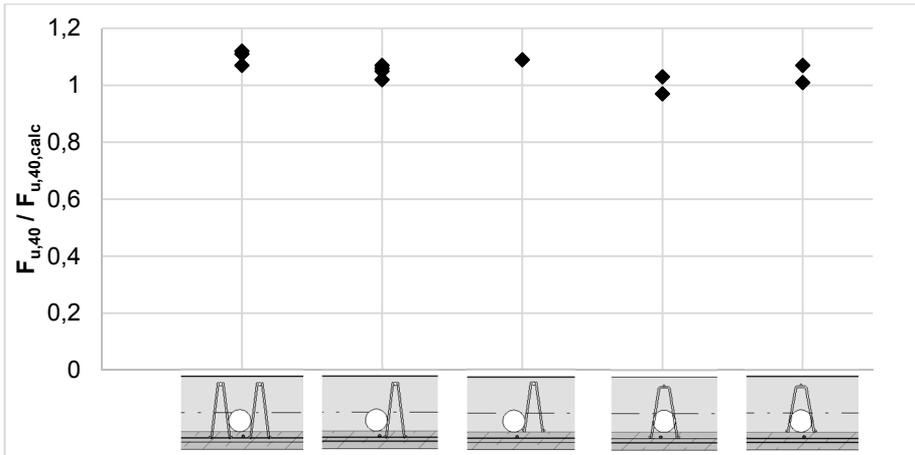


Abbildung 7-9: Verhältnis der Versuchsergebnisse zu den Rechenwerten gemäß des Bemessungskonzepts unter Berücksichtigung des Grenzwertes

Da die Tragfähigkeit auf das Niveau von $V_{Rm,c}$ gebracht werden soll, ist als weiterer Lösungsansatz der Nachweis über die Mindestquerkraftbewehrung möglich. Diese wird verbaut, um die beim Versagen freiwerdende Schubrislast aufzunehmen. Aufgrund der Tatsache, dass die Gitterträger und Unterstützungskörbe glatte Diagonalen aufweisen, muss die Gültigkeit jedoch in Frage gestellt werden. Eine ungefähre Abschätzung der Bewehrungsmenge ist jedoch möglich.

Beim Fugennachweis muss der Öffnungsdurchmesser abgezogen werden, hier kann der Verbund wegen schlechter Verdichtung o.ä. gestört.

7.1.3 Empfehlungen für die Praxis

7.1.3.1 Nachweis der Querkrafttragfähigkeit

Gitterträger in Ortbetondecken neben Leitungen sind eine einfache, kostengünstige Lösung die Tragfähigkeit von Installationsdecken zu erhöhen. Da es sich hierbei um ein lokales Bewehrungselement handelt, kann maximal die Tragfähigkeit des ungeschwächten, unbewehrten Vollquerschnitts erreicht werden.

In Halbfertigteilen können die Gitterträger senkrecht zur Tragrichtung bereits mit einbetoniert werden. Somit können die üblichen Gitterträgerabstände der Gitterträger in Tragrichtung beibehalten werden. Es ist auf ein ausreichendes aufrauen der Verbundfuge im Bereich der Gitterträger zu achten. Es gelten sowohl für die Ortbeton- als auch die Halbfertigteillösung die folgenden Nachweise.

$$\begin{aligned}
 V_{Ed} &\leq V_{Rd,sy} + V_{Rd,cc} \leq V_{Rm,c} \\
 &= n \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot f_{yd} \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta + k_{\varnothing n} \cdot 0,24 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot b_w \cdot z
 \end{aligned}$$

$$V_{Rm,c} = 0,197 \cdot \kappa \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d$$

Auf Verwendung von Unterstützungskörben als Querkraftbewehrung sollte verzichtet werden, solange diese Elemente nicht in einer Zulassung geregelt sind.

Ein nachträgliches Aufstellen von Gitterträgern auf das Fertigteil erhöht ebenfalls die Tragfähigkeit auf das Niveau des Vollquerschnitts, entspricht aber wegen der fehlenden Verankerung auf Höhe der Biegebewehrung nicht den Regeln des Eurocode 2.

Des Weiteren ist der Widerstand der Druckstrebe nachzuweisen. Hierbei muss die Druckstrebenfläche reduziert werden. Dies soll über eine den Abminderungsfaktor für Öffnungen gemäß Abschnitt 2.2 erfolgen:

$$V_{Rd,max} = k_{\varnothing n} \cdot \frac{b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha)}{1 + \cot^2 \theta}$$

7.1.3.2 Nachweis der Verbundfuge

Da neben der Querkrafttragfähigkeit auch die Tragfähigkeit der Elementfuge durch Öffnungen beeinflusst wird, ist nachfolgend eine Ansatz für ein vom EC 2 abgewandeltes Bemessungskonzept dargestellt. Da keine Versuche hierzu durchgeführt wurden, handelt es sich um eine rein theoretische Überlegung. Die theoretischen Grundlagen zur Tragfähigkeit von Verbundfugen sind in Kapitel 2.5.2 aufgeführt.

Für den Nachweis nach *DIN EN 1992-1-1* soll der Traganteil der Adhäsion sowie der Coulomb'sche Reibungsanteil um die fehlende Verbundfläche abgemindert werden. Hierbei soll auf der sicheren Seite liegend der Rohrdurchmesser verwendet werden. Zwar berühren die Rohre nur in einem sehr kleinen Bereich die Verbundfuge, es kann jedoch theoretisch zu einer schlechteren Verdichtung des Betons im Bereich der Rohre kommen. Der Traganteil der Verbundbewehrung bleibt unbeeinflusst. Daher soll gelten:

$$V_{Rdi} = \frac{A_{\text{bond,red}}}{A_{\text{bond}}} \cdot (c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_N) + \rho \cdot f_{yd} \cdot (1,2 \cdot \mu \sin \alpha + \cos \alpha)$$

$$\text{mit: } \begin{aligned} A_{\text{bond,red}} &= (l - \sum d_{\varnothing}) \cdot b \\ A_{\text{bond}} &= l \cdot b \end{aligned} \quad (7.1)$$

7.2 Lokale Verbundstörung

Die Grundlagen zu der Idee der lokalen Verbundstörung der Biegebewehrung im Bereich der Leitungen werden in Abschnitt 4.2.3 beschrieben. Nachfolgend wird detailliert auf die Versuche eingegangen.

7.2.1 Versuche

Aufbau und Durchführung

Die Versuche wurden an 30 cm dicken und 40 cm breiten Deckenstreifen durchgeführt, analog zu den Versuchen mit Wendeln (siehe Kapitel 5.1). Alle weiteren Randbedingungen sind in Kapitel 4 aufgeführt.

Untersuchte Konstellationen

Es wurden drei Versuche durchgeführt. Ein Referenzversuch mit Vollquerschnitt, ein geschwächter Querschnitt mit vollem Verbund und ein geschwächter Querschnitt mit gestörtem Verbund mit der Länge $2 \cdot d$. Der Bereich der Verbundstörung ist in Abbildung 4-6 dargestellt.

Ergebnisse

Der Versuchskörper mit Vollquerschnitt (S2_V13) sowie der mit Öffnung und vollem Verbund (VS1_V2) weisen erwartungsgemäß die gleiche Steifigkeit, sowie die nach Abschnitt 2 zu erwartenden Lasten auf. Sie versagten beide durch einen klassischen Biegeschubriss.

Der Versuch mit Verbundstörung (VS1_V1) musste bei einer Last von 270 kN abgebrochen werden, da die Biegebewehrung bereits bis nahe an die Fließgrenze beansprucht war. Die Last-Verformungskurven dieser drei Versuche sind in Abbildung 7-10 dargestellt.

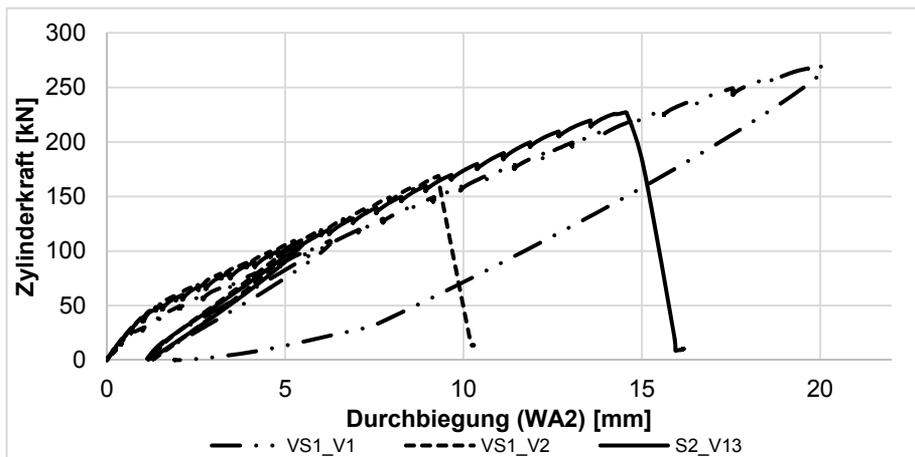


Abbildung 7-10: Last-Verformungskurven der Versuche zur Verbundstörung

Die Tragfähigkeit des Vollquerschnitts sowie des geschwächten Querschnitts konnte deutlich übertroffen werden. Allerdings ist die Gebrauchstauglichkeit eines solchen

Balkens stark eingeschränkt. Wie der Last-Verformungskurve zu entnehmen ist, ist die Steifigkeit im Zustand II deutlich geringer als die der Vergleichsversuche. Grund hierfür ist der große Biegeriss der sich bereits auf Erstrissniveau im Anfangsbereich der Verbundstörung bildet. Auf Gebrauchslastniveau weist dieser Riss bereits eine Rissbreite von 0,5 mm auf. Bei Versuchsabbruch lag die Rissbreite bei ca. 1,5 mm. Der Bereich um die Öffnung herum bleibt ungerissen. Das Rissbild ist in Abbildung 7-11 dargestellt.

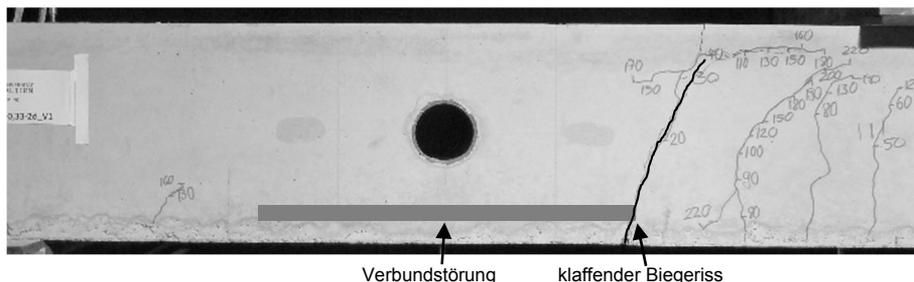


Abbildung 7-11: Rissbild des Versuchskörpers mit Verbundstörung

In Abbildung 7-12 wird das angenommene Tragverhalten grafisch veranschaulicht. Gestrichelt sind die Druckstreben, durchgezogen die Zugstreben dargestellt. Es wird angenommen, dass sich bei dem Versuch mit Verbundstörung ein Bogenzugbandmodell einstellt. Die von der Lasteinleitung kommende Druckstrebe verläuft bogenförmig um die Öffnung herum.

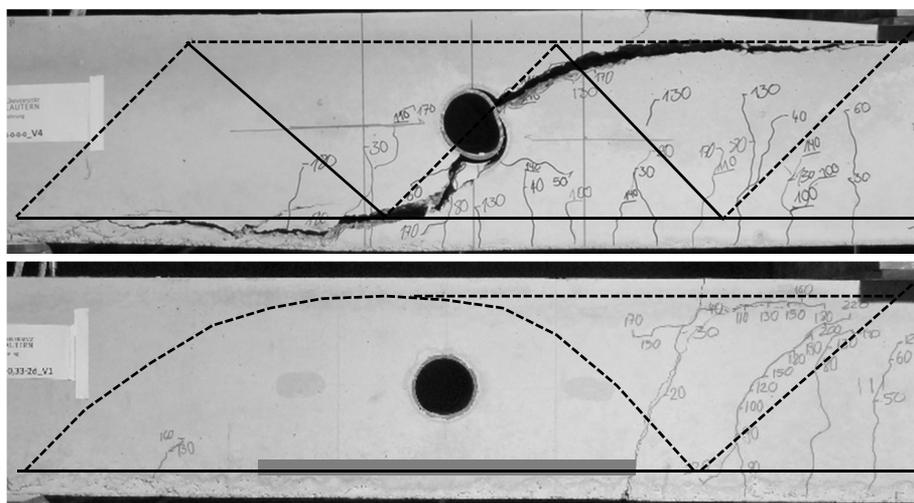


Abbildung 7-12: Tragverhalten des Versuchskörpers mit Verbundstörung (unten) im Vergleich zum Fachwerkmodell (oben)

7.2.2 Empfehlungen für die Praxis

Diese Möglichkeit zur Laststeigerung wird für die Praxis nicht empfohlen. Es handelt sich hierbei um eine akademische Idee zur Veranschaulichung des Querkrafttragverhaltens von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung.

8 Zusammenfassung / Fazit

Wendel

Die Tragfähigkeit von durch Leitungen geschwächte Stahlbetondecken kann durch Einbau von Wendeln um die Leitungen erhöht werden. Die Traglast des Vollquerschnitts kann dabei erreicht werden. Die Wendel als Querkraftbewehrung um Leitungen stellt eine sehr wirtschaftliche Verstärkungsmethode dar. Es wird nur eine geringe Menge Betonstahl benötigt, um die Tragfähigkeit auf das Niveau des Vollquerschnitts zu erhöhen. Die Verarbeitung ist dabei sehr unkompliziert. Es ist kein Schweißen oder eine andere kostenintensive Vorarbeit nötig. Die Wendel muss lediglich aus handelsüblichem Betonstahl gebogen werden.

Der Nachteil der Wendel liegt sicherlich im baupraktischen Einbau. Werden lange Leitungsführungen verbaut, so ist der Einbau der Wendel recht mühsam. Abhilfe könnte hierbei ein fertiges Produkt aus Wendel und Rohr schaffen, bei dem die Wendel mit dem Rohr fest verbunden ist.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte ein an das Bemessungsmodell der *DIN EN 1992-1-1* anlehndes Berechnungskonzept entwickelt werden. Hierbei muss lediglich ein Zusatzfaktor, der das Tragverhalten der Wendel im Vergleich zu üblichen Bügeln beschreibt, berücksichtigt werden.

Eine Anwendung in Elementdecken sollte ohne weiteres möglich sein. Versuche hierzu wurden jedoch nicht durchgeführt.

Leitungen in Elementdecken

Reicht bei einer durch Leitungen geschwächten Elementdecke die Querkrafttragfähigkeit nach *DAfStb Heft 600* nicht aus, so können die verbauten Gitterträger als tragfähigkeitssteigernde Querkraftbewehrung angesetzt werden. Bei einem Querkraftbewehrungsgrad von ca. $11 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ wird die Tragfähigkeit des Vollquerschnitts erreicht. Dies entspricht in etwa dem Mindestbewehrungsgrad nach *DIN EN 1992-1-1*. Bewehrungsgrade die darüber hinausgehen, steigern die Tragfähigkeit bezogen auf den Vollquerschnitt ohne Querkraftbewehrung. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Bemessungskonzept baut auf dem Bemessungsmodell der *DIN EN 1992-1-1* auf und ergänzt dieses um einen Abminderungsfaktor des Betontraganteils.

Sonderlösungen

Werden Gitterträger neben, bzw. Unterstützungskörbe über Leitungen platziert, so wird die Querkrafttragfähigkeit des geschwächten Querschnitts deutlich gesteigert. Ist der Bewehrungsgrad hoch genug wird die Tragfähigkeit des Vollquerschnitts erreicht. Das Platzieren eines Unterstützungskorbes über einer Leitung ist dabei die wirtschaftlichste Lösung. Hierbei entspricht der Stahlquerschnitt ungefähr der erforderlichen Mindestquerkraftbewehrung nach *DIN EN 1992-1-1*. Zu beachten ist dabei allerdings, dass die Stahlfestigkeit der Unterstützungskörbe bislang nicht Teil der Zulassung oder Norm ist und damit nicht garantiert werden kann. Ein Gitterträger auf der lastzugewandten Seite neben der Leitung ist zwar überdimensioniert, stellt aber eine sehr praktikable Bewehrungsführung dar. Aufgrund der Fehleranfälligkeit auf

Baustellen wird jedoch empfohlen, Gitterträger beidseitig der Leitungen anzuordnen. Für alle untersuchten Bewehrungsformen gilt, dass sie ebenfalls funktionieren, wenn sie nachträglich auf die Elementplatte aufgestellt werden. Somit stehen sowohl für Ortbetondecken, als auch für Elementdecken Bewehrungsführungen sowie Bemessungsansätze zur Verfügung.

Bei der in dieser Arbeit vorgestellten Idee der lokalen Verbundstörung, handelt es sich eher um eine akademische Idee, die das Tragverhalten von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung verdeutlicht, als um einen Vorschlag für die Praxis. Zwar konnte die Querkrafttragfähigkeit deutlich gesteigert werden, allerdings ist die Gebrauchstauglichkeit wegen des großen Biegerisses stark eingeschränkt. Theoretisch kann der Bereich der Verbundstörung und damit auch die Rissbreite noch reduziert werden. Allerdings ist ein baupraktischer Einsatz eher unwahrscheinlich.

Literaturverzeichnis

ACI 318-11

Building code requirements for structural concrete (ACI 318-11) and commentary; ACI Committee 318; Farmington Hills, MI.

Albrecht 2014

Albrecht, C.; Bemessung von Stahlbetondecken mit abgeflachten rotationssymmetrischen Hohlkörpern und ein Beitrag zum besseren Verständnis der Querkrafttragfähigkeit, ISBN 978-3-943995-54-1; Dissertation; Kaiserslautern, betreut durch: Schnell, Jürgen, 2014

Albrecht und Schnell 2011

Albrecht, C.; Schnell, J.; Wirksamkeit örtlicher Bewehrungselemente zur Querkrafttragfähigkeit von Deckenplatten mit integrierten Leitungsführungen. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 106, Nr. 6, 2011, S. 522–530.

Bachmann und Thürlimann 1966

Bachmann, H.; Thürlimann, B.; Schubbemessung von Balken und Platten aus Stahlbeton, Stahlbeton mit Spannzulagen und Spannbeton. Schweizerische Bauzeitung, Vol. 84, Nr. 33, 1966.

Basche 2004

Basche, H.; Berechnung schubslanker Balken mittels Finiter Elemente. Forschungsbericht; Colorado, 2004.

Bathe 2002

Bathe, K.-J.; Finite-Elemente-Methoden; Berlin [u.a.], 2002.

Bentz et al 2006

Bentz, E. C.; Vecchio, F.; Collins, M.; Simplified Modified Compression Field Theory for Calculating Shear Strength of Reinforced Concrete Elements. ACI Structural Journal, 2006.

Bulenda 2015

Bulenda, E.; Möglichkeiten zur Steigerung der Querkrafttragfähigkeit von Decken mit integrierten Leitungen. Studienarbeit, betreut durch: Keil, Christian; Thiele, Catherina, 2015.

Červenka et al 2014

Červenka, V.; Jendele, L.; Červenka, J. ATENA Program Documentation Part 1 - Theory; Prag, 2014.

Cervenka Consulting

Cervenka Consulting; Atena 2D; Prag.

Collins et al 1996

Collins, M.; Mitchell, D.; Adebare, P.; Vecchio, F.A.; General shear design method. ACI Structural Journal, Vol. 1996, 1996.

DAfStb Heft 145

H. Rüsç, F. R. Haugli und H. Mayer; Schubversuche an Stahlbeton-Rechteckbalken mit gleichmäßig verteilter Belastung und Stahlbetonbalken bei gleichzeitiger Einwirkung von Querkraft und Moment; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 1962.

DAfStb Heft 151

Leonhardt, Fritz; Walther, Rene; Schubversuche an einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 1962.

DAfStb Heft 566

M. Schnellenbach-Held, S. Ehmann, C. Neff; Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens von Stahlbetonbalken mit großen Öffnungen; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2007.

DAfStb Heft 597

Karl-Heinz Reineck, Daniel A. Kuchma, Birol Fitik; Erweiterte Datenbanken zur Überprüfung der Querkraftbemessung für Konstruktionsbauteile mit und ohne Bügel; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2012.

DAfStb Heft 600

Eräuterungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (Eurocode 2); Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2012.

DBV - Merkblatt "Unterstützungen nach Eurocode 2"

DBV - Merkblatt "Unterstützungen nach Eurocode 2"; Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., 2011-01.

DIN 488-2

Betonstahl - Betonstabstahl; DiBT; Berlin, 2009.

DIN EN 1992-1-1

Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton und Spannbetontragwerken, Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; DiBT; Berlin, 2011.

Eilers et al 2016

Eilers, S.; Albert, A.; Schnell, J.: Stahbetondecken mit integrierten Hohlräumen - Quertragfähigkeit unter Längszug, in: 60. BetonTage Neu-Ulm, Tagungsband, 2016, S. 109-111.

Furche und Bauermeister 2009

Furche, J.; Bauermeister, U.; Elementbauweise mit Gitterträgern. Betonkalender 2009; Berlin, 2009.

Hegger et al 12-1999

Hegger, J.; Görtz, S.; Beutel, R.; König, G.; Schenk, G.; Kliver, J.; Dehn, F.; Zilch, K.; Staller, M.; Reineck, K.-H.; Überprüfung und Vereinheitlichung der Bemessungsansätze für querkraftbeanspruchte Stahlbeton- und Spannbetonbauteile aus normalfesten und hochfesten Beton nach DIN 1045-1, für das DiBT - Forschungsvorhaben IV 1-5-876 / 98, 12-1999.

Hegger et al 24.08.2006

Hegger, J.; Beutel, R.; Karakas, A.; Häusler, F.; Ersatz oder Teilersatz von Querkraftversuchen durch Finite-Elemente-Berechnungen; Aachen, 24.08.2006.

Hegger und Görtz 2006

Hegger, J.; Görtz, S.; Querkraftmodell für Bauteile aus Normalbeton und Hochleistungsbeton. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 101, Nr. 9, 2006, S. 695–705.

Huber et al 2014

Huber, P.; Kollegger, J.; Nguyen, V. T.; Nguyen, D. T.; Mechanisch konsistentes Schubfeldmodell für Bestandsbrücken ohne bzw. mit geringer Querkraftbewehrung - Schubfeldmodell, Ein Projekt finanziert im Rahmen der Verkehrsinfrastrukturforschung (VIF2011), Juni 2014.

Kani 1958

Kani, G.; Über das Wesen der sogenannten Schubsicherung. Der Bauingenieur, Vol. 33, 1958.

Kani 1966

Kani, G.; Basic Facts Concerning Shear Failure. ACI Journal, 1966.

Kaufmann 1971

Kaufmann, N.; Das Sandflächenverfahren. Straßenbautechnik, Vol. 24, Nr. 3, 1971.

Keil 2011

Keil, C.; Querkrafttragverhalten von Decken mit integrierter Leitungsführung. Diplomarbeit; Kaiserslautern, betreut durch: Schnell, Jürgen; Thiele, Catherina, 2011.

Keller 2007

Keller, C.; Ein Beitrag zum Querkrafttragverhalten von Stahl- und Spannbetonbauteilen; Leipzig, 2007.

Kim und White 1999

Kim, W.; White, R. N.; Hypothesis for localized horizontal shearing failure mechanism of slender RC beams. Journal of Structural Engineering, 1999, S. 1126–1135.

Lorentsen 1965

Lorentsen, M.; Theory for the Combined Action of Bending Moment and Shear in Reinforced and Prestressed Concrete Beams. ACI Journal, Vol. 62, 1965, S. 403–420.

Mansur 2006

M. A. Mansur; Analysis of concrete beams with circular web openings using strut and tie models, 2006.

Mansur 09-2006

M. A. Mansur; Design of reinforced concrete beams with web openings. Proceedings of the 6th Asia-Pacific Structural Engineering and Construction Conference (APSEC 2006), 09-2006, 09-2006.

Marti 1985

Marti, P.; Basic tools of reinforced concrete beam design. ACI Journal, Vol. 1985, Nr. 82, 1985, S. 46–56.

Marx et al 2011

Marx, S.; Schacht, G.; Maas, H.-G.; Koschnitzki, R.; Bolle, G.; Versuchsgrenzlastindikatoren bei Belastungsversuchen, Zukunft Bau Forschungsvorhaben. Forschungsbericht; Dresden, 2011.

Mathey und Watstein 1963

Mathey, R. C.; Watstein, D.; Shear Strength of Beams Without Web Reinforcement Containing Deformed Bars of Different Yield Strengths. ACI Journal, Vol. 60, 1963, S. 183–205.

Mauer 2014a

Mauer, C.; Wendel als Querkraftbewehrungselement um Leitungen – Einfluss des Leitungsdurchmessers und der Windungsanzahl. Studienarbeit, betreut durch: Keil, Christian; Thiele, Catherina, 2014.

Mauer 2014b

Mauer, C.; Wendel als Querkraftbewehrungselement um Leitungen – Einfluss des Leitungsdurchmessers und der Windungsanzahl. Diplomarbeit, betreut durch: Keil, Christian; Thiele, Catherina, 2014.

Model Code 2010

Model code for concrete structures 2010; fib; Berlin.

Müller 2015

Müller, J.; Wendel als Querkraftbewehrung um Leitungen in Stahlbetondecken – ein Bemessungskonzept. Studienarbeit, betreut durch: Keil, Christian; Thiele, Catherina, 2015.

Muttoni 1990

Muttoni, A.; Die Anwendbarkeit der Plastizitätstheorie in der Bemessung von Stahlbeton; Basel und Stuttgart, 1990.

Muttoni 2003

Muttoni, A.; Schubfestigkeit und Durchstanzen von Platten ohne Querkraftbewehrung. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 98, Sonderdruck, 2003, S. 74–84.

Neff 2006

Neff, C.; Ein Ingenieurmodell zur Bemessung von Stahlbeton- und Spannbetonträgern mit Öffnungen. Dissertation; Darmstadt, betreut durch: Keuser, Manfred; Schnellenbach-Held, Martina, 2006.

Puhane 2014

Puhane, C.; Wendel als Querkraftbewehrungselement um Leitungen – Einfluss des Leitungsdurchmessers und der Windungsanzahl. Studienarbeit, betreut durch: Keil, Christian; Thiele, Catherina, 2014.

Rajagopalan und Ferguson 1968

Rajagopalan, K. S.; Ferguson, P. M.; Exploratory Shear Tests Emphasizing Percentage of Longitudinal Steel. Journal of the American Concrete Institute, Vol. 63, 1968, S. 634–638.

Reichert 2014

Reichert, M.; Wendel als Querkraftbewehrungselement um Leitungen – Einfluss des Stabdurchmessers und der Lage der Öffnung. Studienarbeit, betreut durch: Keil, Christian; Thiele, Catherina, 2014.

Reineck 1990

Reineck, K.-H.; Ein mechanisches Modell für den Querkraftbereich von Stahlbetonbauteilen; Stuttgart, betreut durch: Schlaich, Jörg; Rehm, Gallus, 1990.

Rombach 2007

Rombach, G. A.; Anwendung der Finite-Elemente-Methode im Betonbau, Fehlerquellen und ihre Vermeidung; Berlin, 2007.

Ruppert 2010

Ruppert, T.; Theoretische und experimentelle Untersuchungen zu Installationsdecken mit örtlichen Querkraft-Bewehrungselementen; Kaiserslautern, 2010.

Schmeckeber 2015

Schmeckeber, N.; Leitungen in Elementdecken. Studienarbeit, betreut durch: Keil, Christian; Thiele, Catherina, 2015.

Schnellenbach-Held und Neff 2006

Schnellenbach-Held, M.; Neff, C.; Stahlbetonträger mit Öffnungen. Ein vereinfachtes Bemessungskonzept. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 101, Nr. 7, 2006, S. 499–510.

SIA 262 - 2013

Betonbau; Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein Zürich (SIA); Zürich, 2013.

Sigrist 2005

Sigrist, V.; Zur Querkraftbemessung von Stahlbetonträgern. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 100, Nr. 5, 2005, S. 390–397.

Sigrist et al 2013

Sigrist, V.; Bentz, E.; Ruiz, M. F.; Foster, S.; Muttoni, A.; Background to the fib Model Code 2010 shear provisions - part I: beams and slabs. Structural concrete, Vol. 14, Nr. 3, 2013, S. 195–203.

Thiele 2010

Thiele, C.; Zum Tragverhalten von Stahlbetonplatten ohne Querkraftbewehrung mit integrierten Leitungsführungen. Dissertation; Kaiserslautern, betreut durch: Schnell, Jürgen, 2010.

Vecchio und Collins 1986

Vecchio, F.; Collins, M.; The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear. ACI Journal, 1986, S. 219–231.

Wendel 2015

Wendel, F.; Nachbildung von querschnittsgeschwächten Deckenstreifen mit örtlicher Wendelbewehrung unter Verwendung der FE-Software ATENA. Studienarbeit, betreut durch: Keil, Christian; Thiele, Catherina, 2015.

Werkle 2008

Werkle, H.; Finite Elemente in der Baustatik, Statik und Dynamik der Stab- und Flächentragwerke; Wiesbaden, 2008.

Z-12.5-96

Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung Z-12.5-118 - Stahlwerk Annahütte Max Aicher GmbH & Co. KG - Ankerstabstahl St900/1100 mit Gewinderippen AWM 1100, Nenndurchmesser 15 und 20 mm; DiBT; Berlin, 01.10.2010.

Z-15.1-1

Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung Z-15.1-1 - Badische Drahtwerke - Kaiser-Gitterträger KT 800 für Elementplatten mit statisch mitwirkender Ortbetonschicht; DiBT; Berlin, 13.03.2015.

Z-15.1-147

Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung Z-15.1-147 - Filigran - Elementdecke - E/EV; DiBT; Berlin, 01.01.2014.

Zilch und Zehetmaier 2010

Zilch, K.; Zehetmaier, G.; Bemessung im konstruktiven Betonbau; Heidelberg, 2010.

Zink 2000

Zink, M.; Zum Biegeschubversagen schlanker Bauteile aus Hochleistungsbeton mit und ohne Vorspannung; Leipzig, 2000.

Anhang A: Protokolle zu den Versuchen mit Wendeln

Nachfolgend sind die Protokolle aller Versuche dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass manche Versagensbilder spiegelverkehrt zu dem schematischen Rissverlauf dargestellt sind.

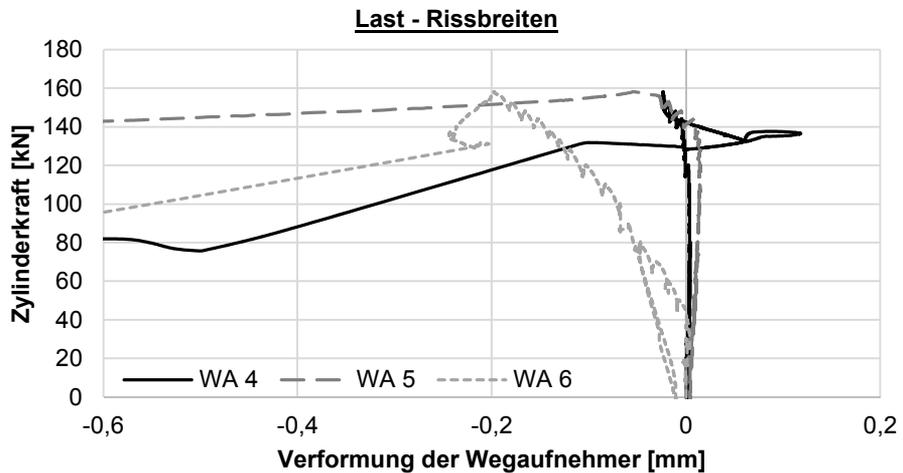
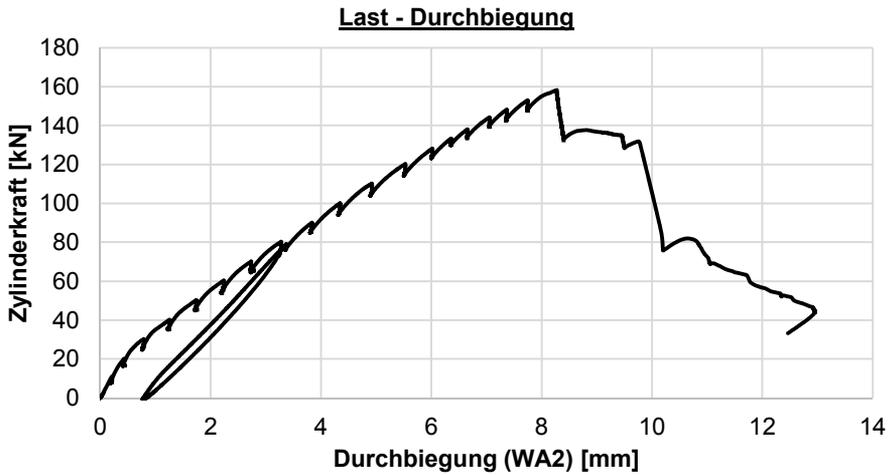
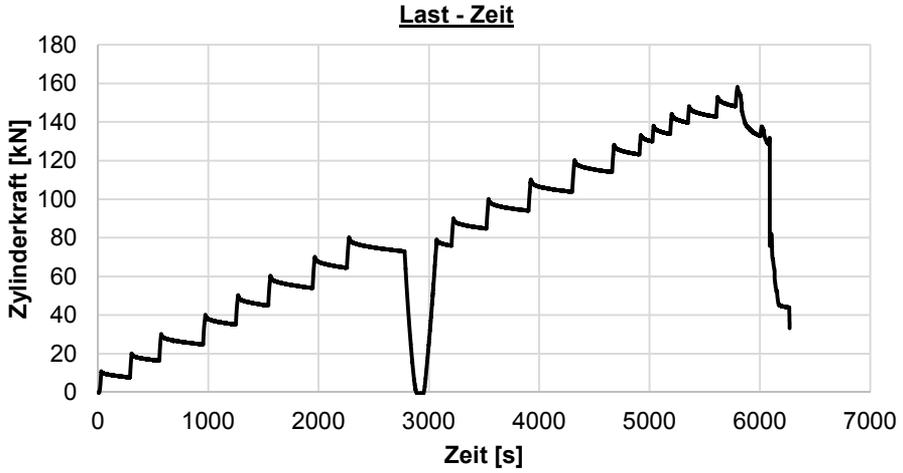
Anhang A – Versuchsprotokolle, Last-Verformungskurven, Rissbreitenentwicklung und Rissbilder

S1_V1 = S1_C30/37-20-0-0-0-0_V1	3
S1_V2 = S1_C30/37-20-0,18-0-0-0_V2	6
S1_V3 = S1_C30/37-20-0,18-0,16-6-1_V3	9
S1_V4 = S1_C30/37-20-0,37-0-0-0_V4	12
S1_V5 = S1_C30/37-20-0,37-0,16-6-1_V5	15
S1_V6 = S1_C30/37-20-0,37-0,33-6-2_V6	18
S1_V7 = S1_C30/37-20-0,53-0-0-0_V7	21
S1_V8 = S1_C30/37-20-0,53-0,16-6-1_V8	24
S1_V9 = S1_C30/37-20-0,53-0,33-6-2_V9	27
S1_V10 = S1_C30/37-20-0,53-0,49-6-3_V10	30
S1_V11 = S1_C30/37-20-0-0-0-0_V11	33
S1_V12 = S1_C30/37-20-0-0-0-0_V12	36
S2_V1 = S2_C30/37-30-0-0-0-0_V1	39
S2_V2 = S2_C30/37-30-0,19-0-0-0_V2	42
S2_V3 = S2_C30/37-30-0,19-0,67-8-3_V3	45
S2_V4 = S2_C30/37-30-0,33-0-0-0_V4	48
S2_V5 = S2_C30/37-30-0,33-0,67-8-3_V5	51
S2_V6 = S2_C30/37-30-0,33-0,89-8-4_V6	54
S2_V7 = S2_C30/37-30-0,33-0,89-8-4_V7	57
S2_V8 = S2_C30/37-30-0,33-0,89-8-4_V8	60
S2_V9 = S2_C30/37-30-0,46-0-0-0_V9	63
S2_V10 = S2_C30/37-30-0,46-0,67-8-3_V10	66
S2_V11 = S2_C30/37-30-0,46-0,89-8-4_V11	69
S2_V12 = S2_C30/37-30-0,46-1,11-8-5_V12	72
S2_V13 = S2_C30/37-30-0-0-0-0_V13	75
S2_V14 = S2_C30/37-30-0-0-0-0_V14	78
S3_V1 = S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,4--30_V1	81
S3_V2 = S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,5--30_V2	84
S3_V3 = S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,6--30_V3	87
S3_V4 = S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,4-0_V4	90
S3_V5 = S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,6-0_V5	93
S3_V6 = S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,4-30_V6	96
S3_V7 = S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,5-30_V7	99
S3_V8 = S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,6-30_V8	102
S4_V1 = S4_C30/37-30-0,33-0,87-6-7_V1	105
S4_V2 = S4_C30/37-30-0,33-0,87-6-7_V2	108
S4_V3 = S4_C30/37-30-0,33-0,87-6-7_V3	111
S4_V4 = S4_C30/37-30-0,33-1,04-10-3_V4	114
S4_V5 = S4_C30/37-30-0,33-1,04-10-3_V5	117
S4_V6 = S4_C30/37-30-0,33-1,04-10-3_V6	120

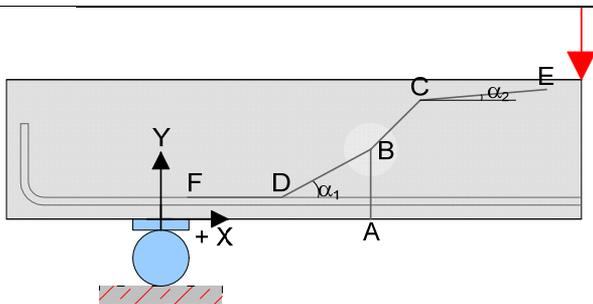
S5_V1-1 = S5_C30/37-30-0,28-0,37-6-3_V1-1	123
S5_V1-2 = S5_C30/37-30-0,28-0,50-6-4_V1-2	126
S5_V2-1 = S5_C30/37-30-0,28-0,62-6-5_V2-1	129
S5_V2-2 = S5_C30/37-30-0,28-0,75-6-6_V2-2	132
S5_V3-1 = S5_C30/37-30-0-0-0-0_V3-1	135
S5_V3-2 = S5_C30/37-30-0,28-0-0-0_V3-2	138
S6_V1 = S6_C30/37-20-0-0-0-0_V1	141
S6_V2 = S6_C30/37-20-0,37-0-0-0_V2	144
S6_V3-1 = S6_C30/37-20-0,37-0,33-6-2_V3-1	147
S6_V3-2 = S6_C30/37-20-0,37-0,33-6-2_V3-2	150
S6_V4-1 = S6_C30/37-20-0,37-0,49-6-3_V4-1	153
S6_V4-2 = S6_C30/37-20-0,37-0,49-6-3_V4-2	156
S6_V5-1 = S6_C30/37-20-0,37-0,66-6-4_V5-1	159
S6_V5-2 = S6_C30/37-20-0,37-0,66-6-4_V5-2	162
S6_V6 = S6_C30/37-20-0-0-0-0_V6	165
S6_V7 = S6_C30/37-20-0,53-0-0-0_V7	168
S6_V8-1 = S6_C30/37-20-0,53-0,49-6-3_V8-1	171
S6_V8-2 = S6_C30/37-20-0,53-0,49-6-3_V8-2	174
S6_V9-1 = S6_C30/37-20-0,53-0,66-6-4_V9-1	177
S6_V9-2 = S6_C30/37-20-0,53-0,66-6-4_V9-2	180
S6_V10-1 = S6_C30/37-20-0,53-0,82-6-5_V10-1	183
S6_V10-2 = S6_C30/37-20-0,53-0,82-6-5_V10-2	186
S7_V1 = S7_C30/37-30-0-0-0-0_V1	189
S7_V2 = S7_C30/37-30-0,18-0,25-6-2_V2	192
S7_V3 = S7_C30/37-30-0,18-0,37-6-3_V3	195
S7_V4 = S7_C30/37-30-0,33-0,25-6-2_V4	198
S7_V5 = S7_C30/37-30-0,33-0,37-6-3_V5	201
S7_V6 = S7_C30/37-30-0,33-0,50-6-4_V6	204
S7_V7 = S7_C30/37-30-0,46-0,25-6-2_V7	207
S7_V8 = S7_C30/37-30-0,46-0,37-6-3_V8	210

S1_V1 = S1_C30/37-20-0-0-0-0_V1

Datum	16.07.2013	Beginn	15:10	Ende	17:10
Bezeichnung	S1_C30/37-20-0-0-0-0_V1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	44,9 N/mm ²	Betonalter	21 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine Elastomere an den Auflagern					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	80 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	3,28 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	0,70 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,2 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,05 mm				
Grenzdurchbiegung	L / 500 =			3,30 mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	80 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	170 kN	erreichte Zylinderlast	158 kN		
		Durchbiegung	8,2 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



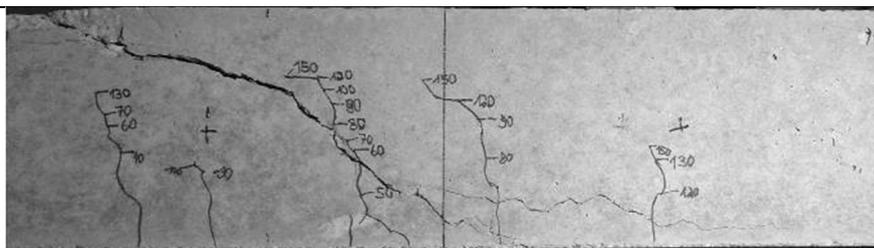
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	45 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	45 cm	7,4 cm
C	zweite Richtungsänderung	51 cm	13 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	37,5 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	17,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	7,6 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		45 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		35 °

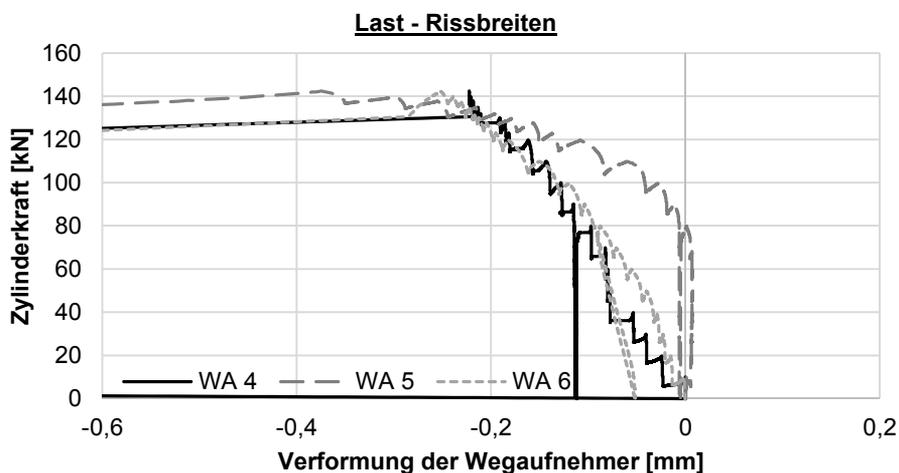
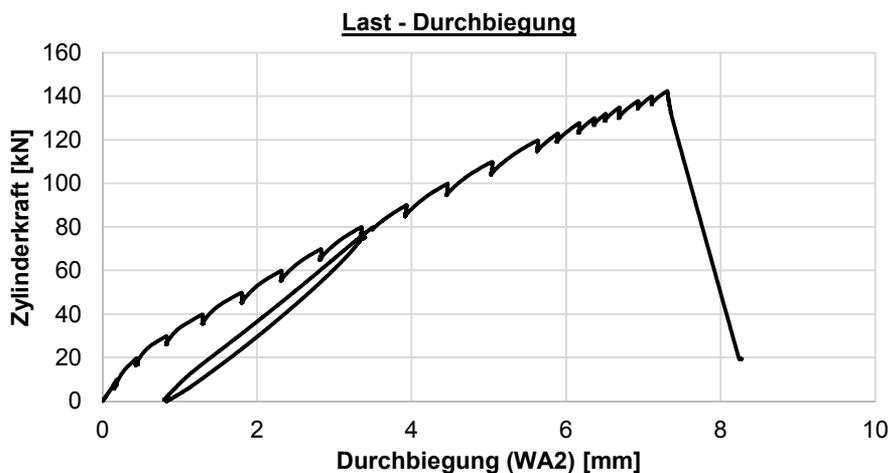
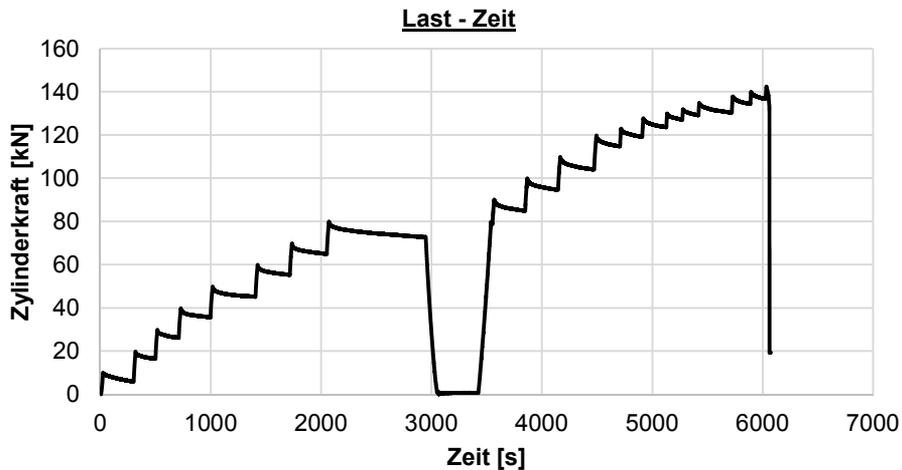
Hinweise zum Rissbild

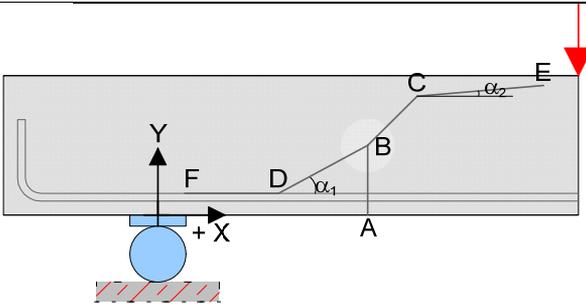
keine Auffälligkeiten



S1_V2 = S1_C30/37-20-0,18-0-0-0_V2

Datum	17.07.2013	Beginn	14:00	Ende	16:00
Bezeichnung	S1_C30/37-20-0,18-0-0-0_V2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	44,9 N/mm ²	Betonalter	22 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine Elastomere an den Auflagern					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	80 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	3,34 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	0,80 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,15 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,05 mm				
Grenzdurchbiegung	L / 500 =			3,30 mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	78 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	135 kN	erreichte Zylinderlast	142,5 kN		
		Durchbiegung	7,31 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

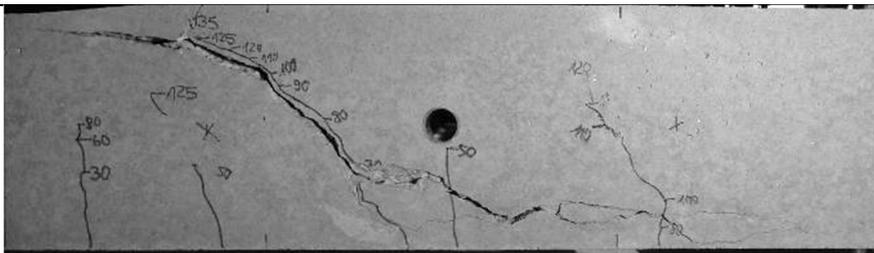


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	40 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	44,5 cm	6,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	53 cm	14,5 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	33 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	19 cm
F	Ende des Dübelrisses	1 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		30 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		50 °

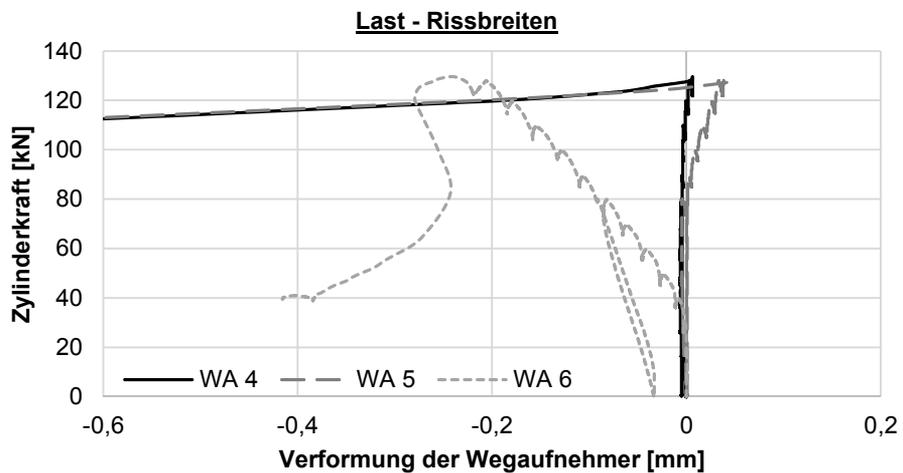
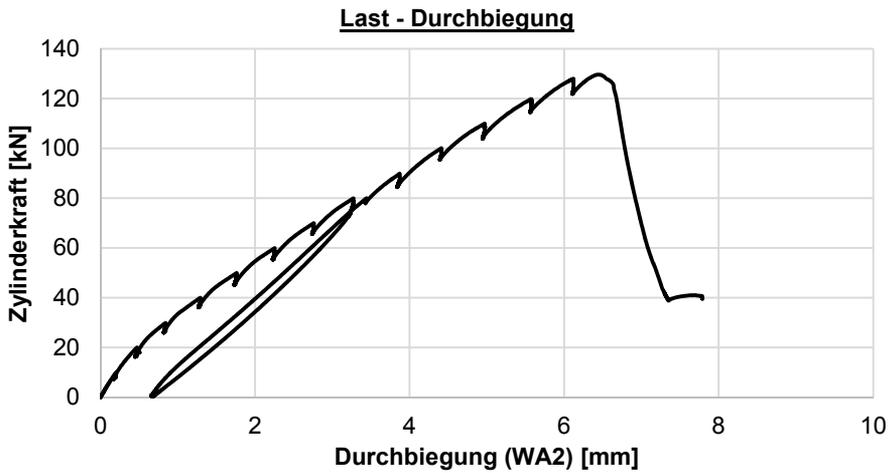
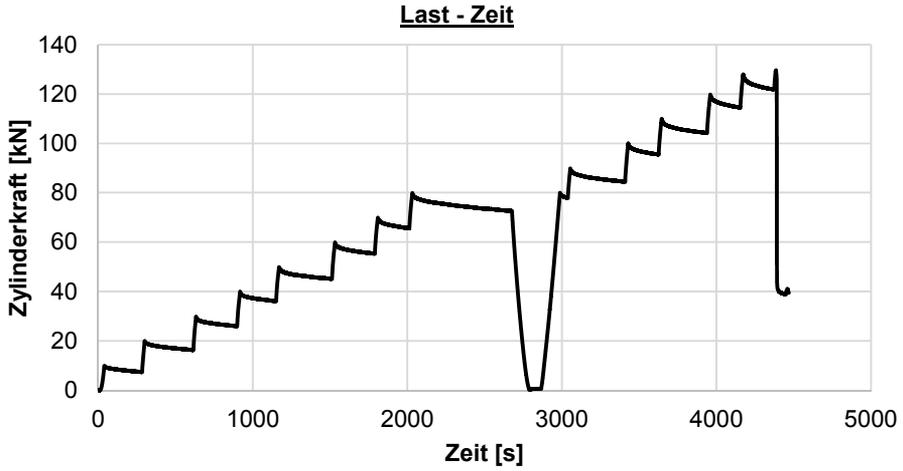
Hinweise zum Rissbild

auf der „Rückseite“ verlief der Riss durch die Öffnung

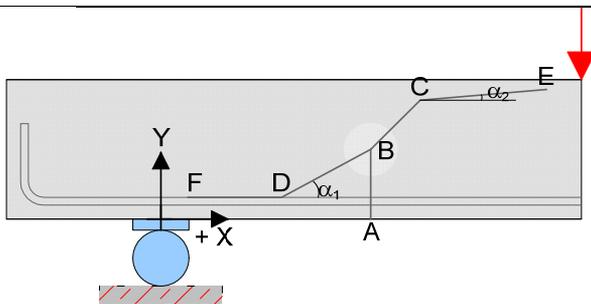


S1_V3 = S1_C30/37-20-0,18-0,16-6-1_V3

Datum	17.07.2013	Beginn	10:00	Ende	11:00
Bezeichnung	S1_C30/37-20-0,18-0,16-6-1_V3				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	44,9 N/mm ²	Betonalter	22 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine Elastomere an den Auflagern					
Messtechnik					
<p>Das Diagramm zeigt ein Detail eines zylindrischen Versuchskörpers mit einer Länge von 220,0 mm und einem Durchmesser von 20 mm. Die Auflagen sind wie folgt positioniert: WA 1 (links), WA 2 (links von der Mitte), WA 3 (rechts von der Mitte), WA 4 (links von der Mitte), WA 5 (rechts von der Mitte) und WA 6 (rechts). Die Abstände sind: 27,5 mm von der linken Endkante zu WA 1, 75,0 mm zwischen WA 1 und WA 2, 37,50 mm zwischen WA 2 und WA 4, 37,75 mm zwischen WA 4 und WA 5, 45,00 mm zwischen WA 5 und WA 3, 45,00 mm zwischen WA 3 und WA 6, und 27,5 mm von WA 6 zur rechten Endkante. Eine rote Last wird zentral auf dem Körper aufgebracht.</p>					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	80 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	3,27 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	0,67 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,15 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,00 mm				
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	3,30 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	80 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	150 kN	erreichte Zylinderlast	130 kN		
		Durchbiegung	6,50 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



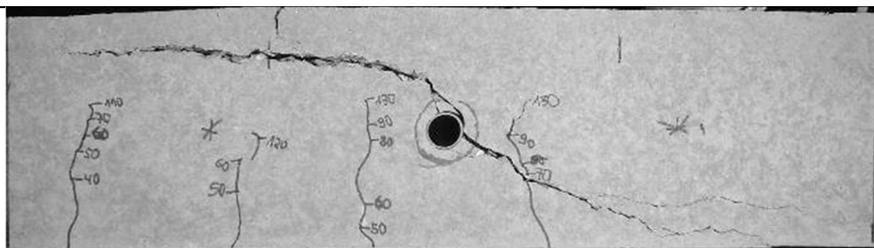
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	28 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	30 cm	6 cm
C	zweite Richtungsänderung	39,5 cm	14,5 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	24,5 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	17,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	- 7 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		40 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		50 °

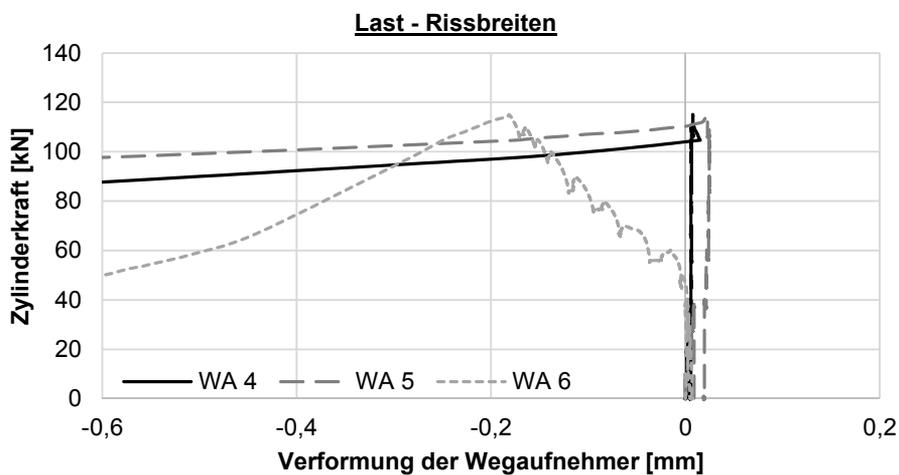
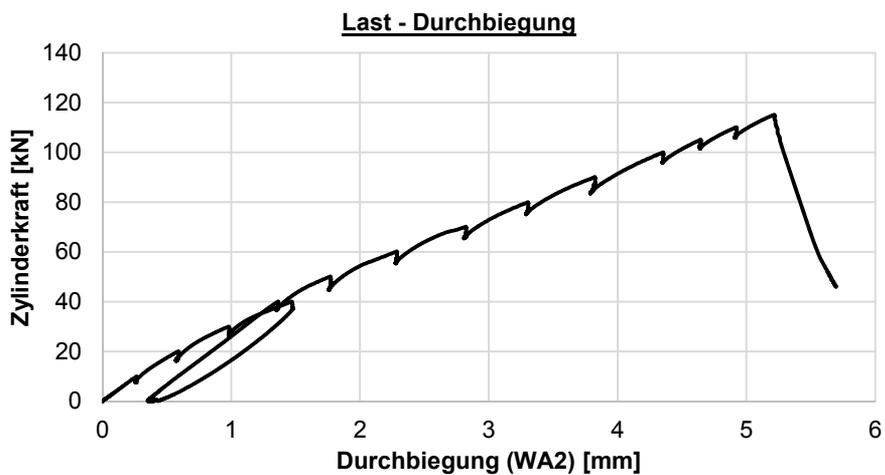
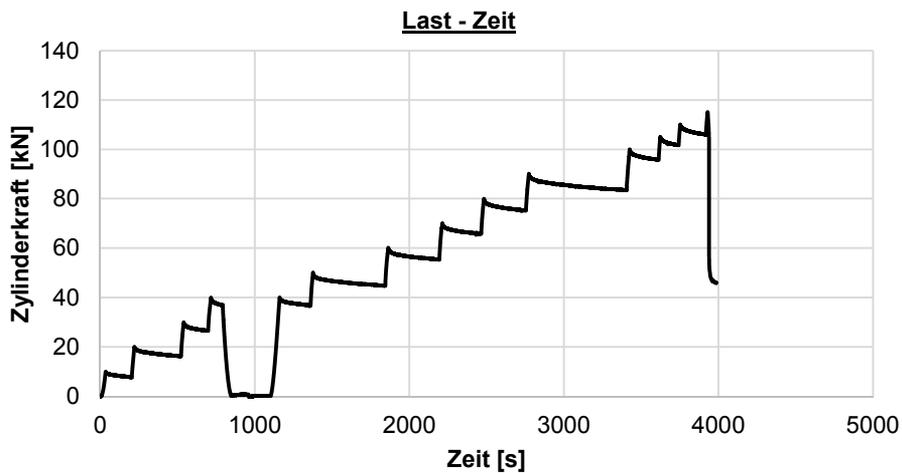
Hinweise zum Rissbild

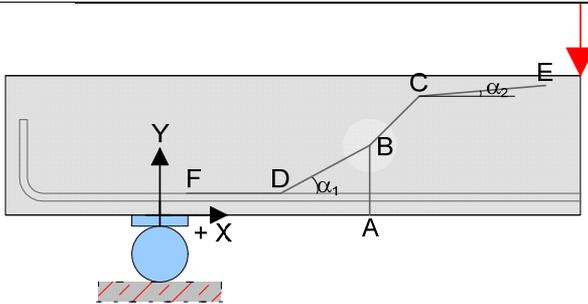
keine



S1_V4 = S1_C30/37-20-0,37-0-0-0_V4

Datum	22.07.2013	Beginn	08:15	Ende	09:15
Bezeichnung	S1_C30/37-20-0,37-0-0-0_V4				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	44,9 N/mm ²	Betonalter	27 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	52 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	1,77 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	0,35 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,10 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,00 mm				
Grenzdurchbiegung	L / 500 =			3,30 mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	80 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	110 kN	erreichte Zylinderlast	115 kN		
		Durchbiegung	5,20 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

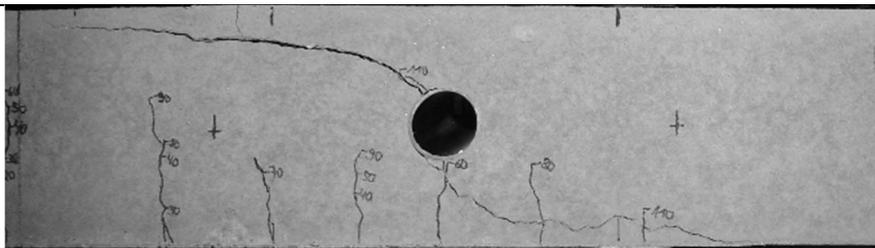


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	38,5 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	37,5 cm	10 cm
C	zweite Richtungsänderung	39,5 cm	12,5 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	34 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	18,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	11 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		60 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		40 °

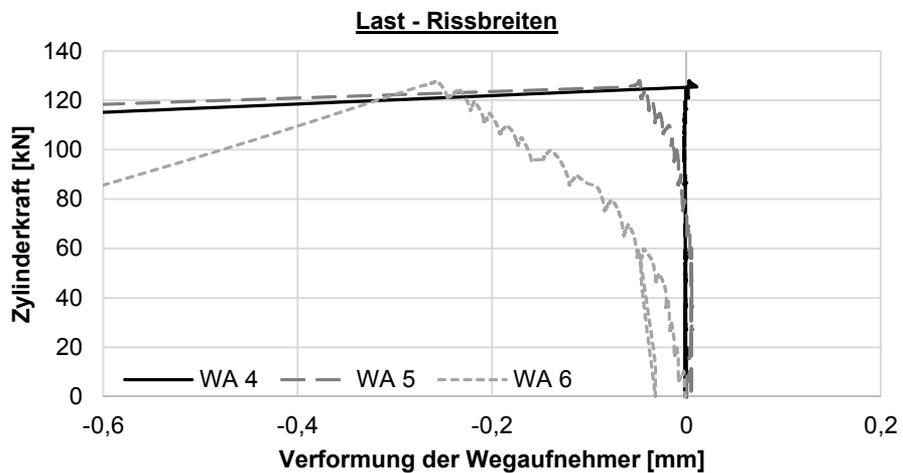
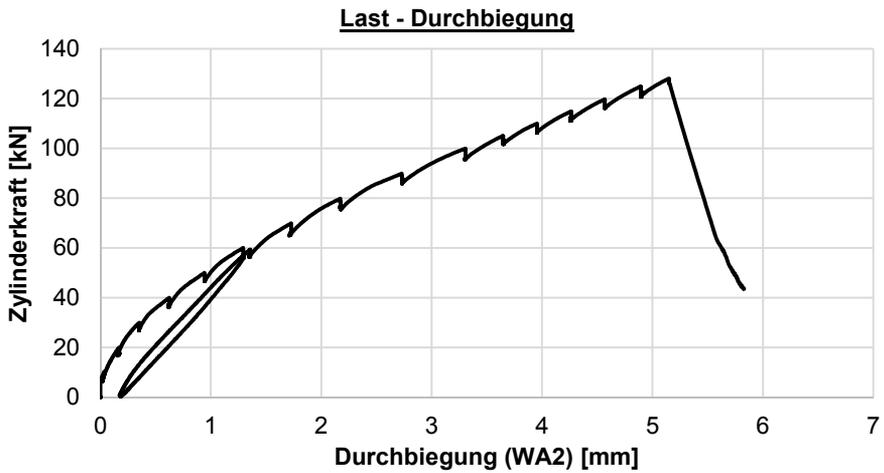
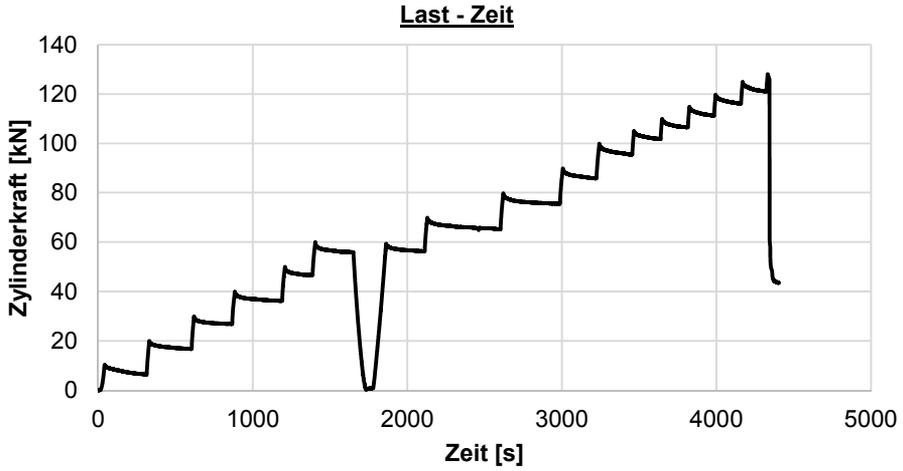
Hinweise zum Rissbild

keine

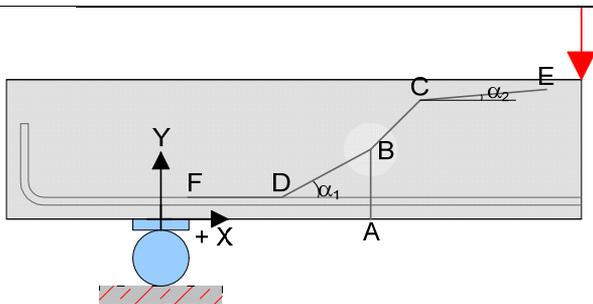


S1_V5 = S1_C30/37-20-0,37-0,16-6-1_V5

Datum	17.07.2013	Beginn	17:00	Ende	18:15
Bezeichnung	S1_C30/37-20-0,37-0,16-6-1_V5				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	44,9 N/mm ²	Betonalter	22 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	52 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	0,98 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	0,11 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,0 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,0 mm				
Grenzdurchbiegung	L / 500 =			3,30 mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	90 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	110 kN	erreichte Zylinderlast	128 kN		
		Durchbiegung	4,75 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



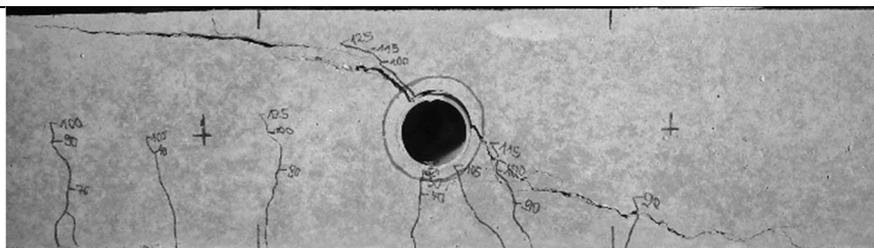
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	29 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	32 cm	8 cm
C	zweite Richtungsänderung	42 cm	15,5 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	21 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	19 cm
F	Ende des Dübelrisses	0 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		50 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		40 °

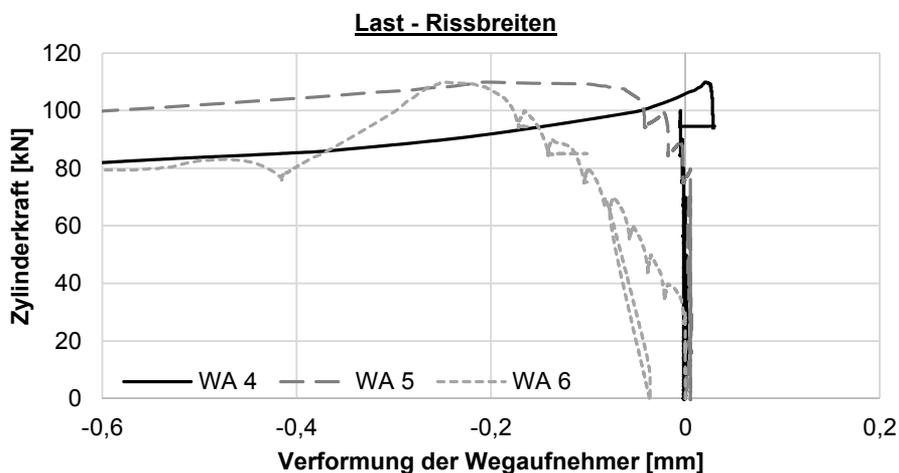
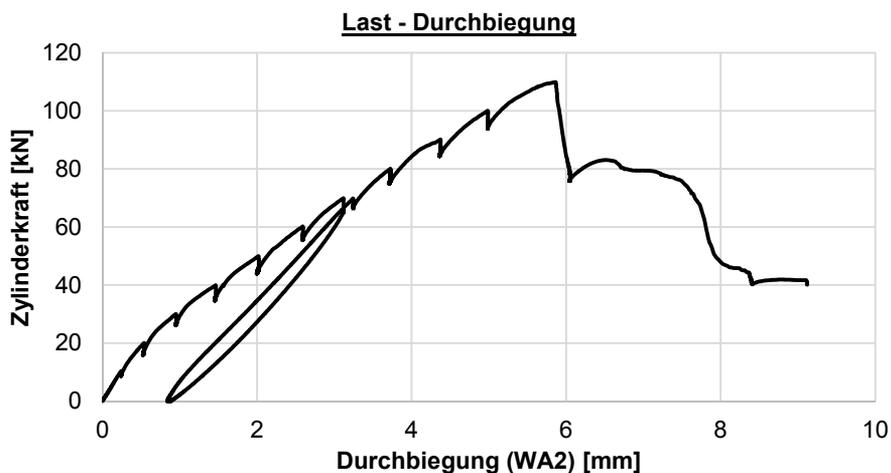
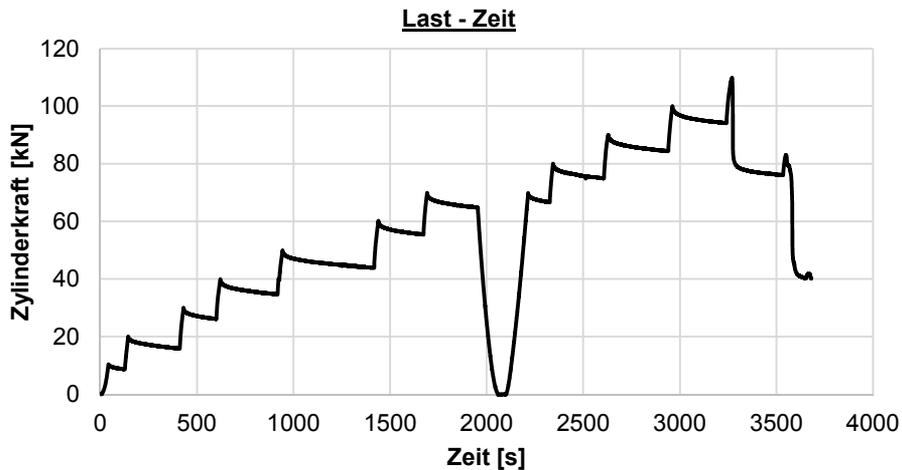
Hinweise zum Rissbild

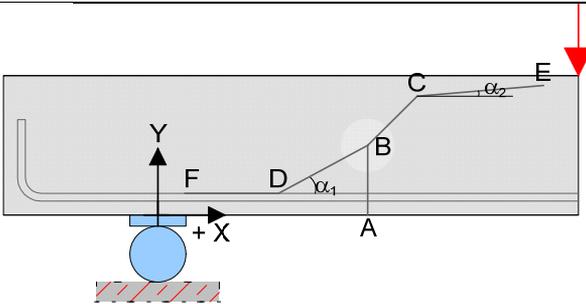
keine



S1_V6 = S1_C30/37-20-0,37-0,33-6-2_V6

Datum	18.07.2013	Beginn	09:50	Ende	10:50
Bezeichnung	S1_C30/37-20-0,37-0,33-6-2_V6				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	44,9 N/mm ²	Betonalter	23 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	70 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	2,76 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	0,72 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,2 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,1 mm				
Grenzdurchbiegung	L / 500 =			3,30 mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	80 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	150 kN	erreichte Zylinderlast	110 kN		
		Durchbiegung	5,36 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

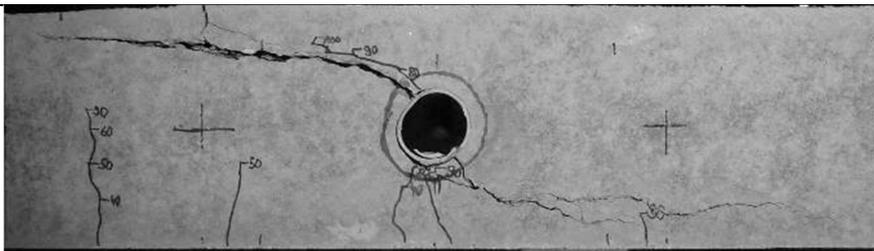


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	36 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	37,5 cm	10 cm
C	zweite Richtungsänderung	39 cm	14 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	27 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	18 cm
F	Ende des Dübelrisses	-7 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		25 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		35 °

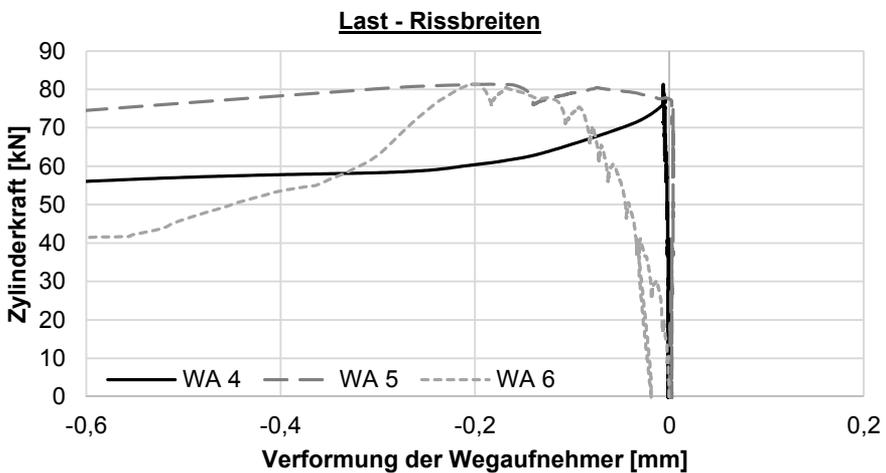
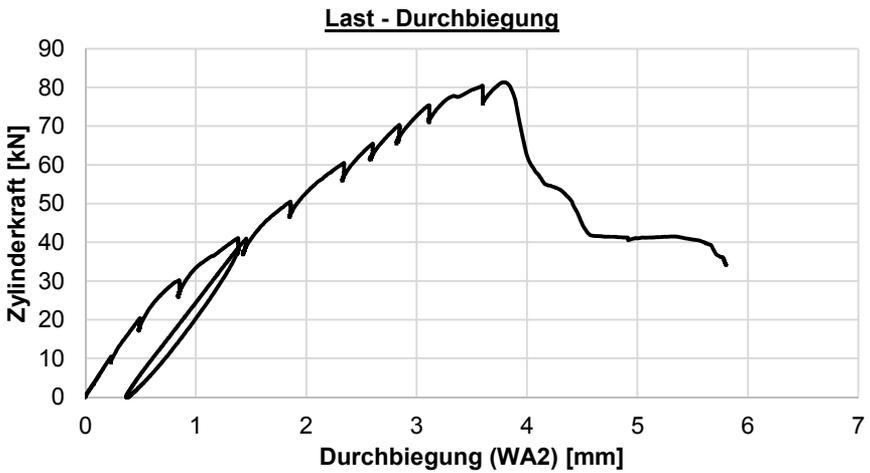
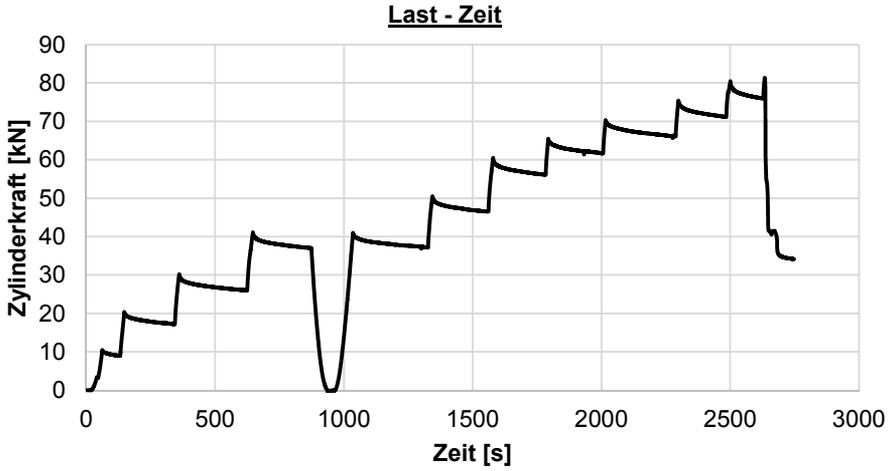
Hinweise zum Rissbild

keine

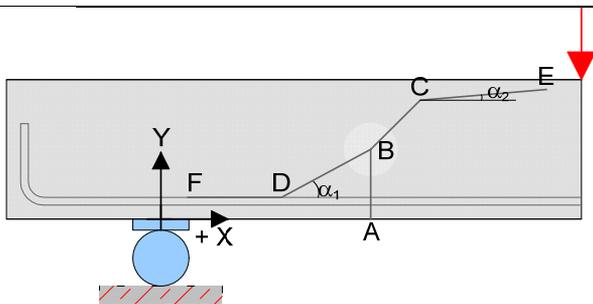


S1_V7 = S1_C30/37-20-0,53-0-0-0_V7

Datum	18.07.2013	Beginn	13:00	Ende	13:45
Bezeichnung	S1_C30/37-20-0,53-0-0-0_V7				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	49,5 N/mm ²	Betonalter	23 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	40 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	1,15 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	0,32 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,04 mm				
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	3,30 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	80 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	80 kN	erreichte Zylinderlast	82 kN		
		Durchbiegung	3,48 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



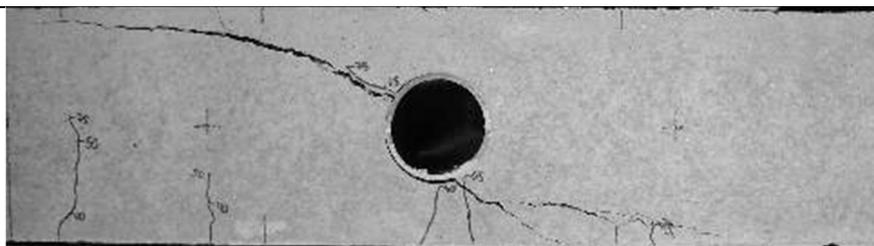
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	34,5 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	37,5 cm	10,0 cm
C	zweite Richtungsänderung	41,5 cm	12,5 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	32,0 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	18,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	3,5 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		32 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		25 °

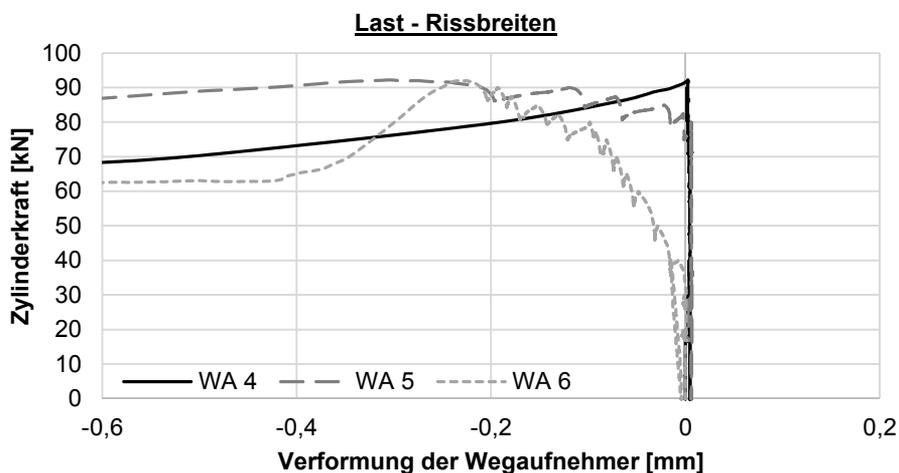
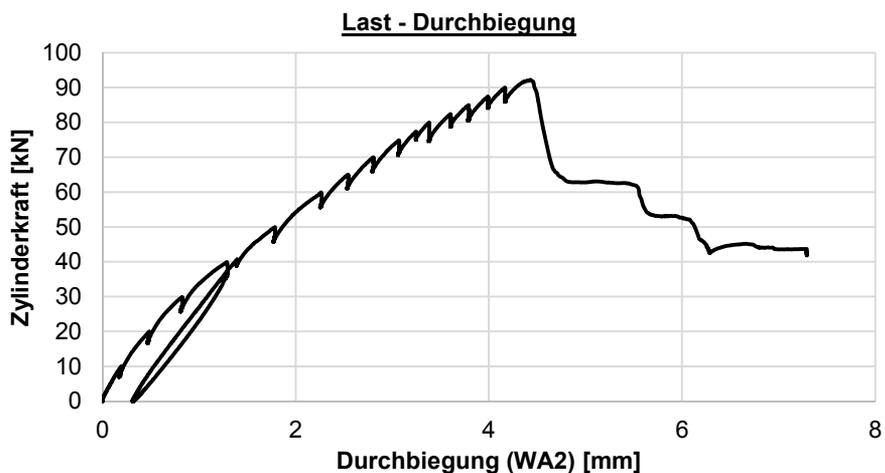
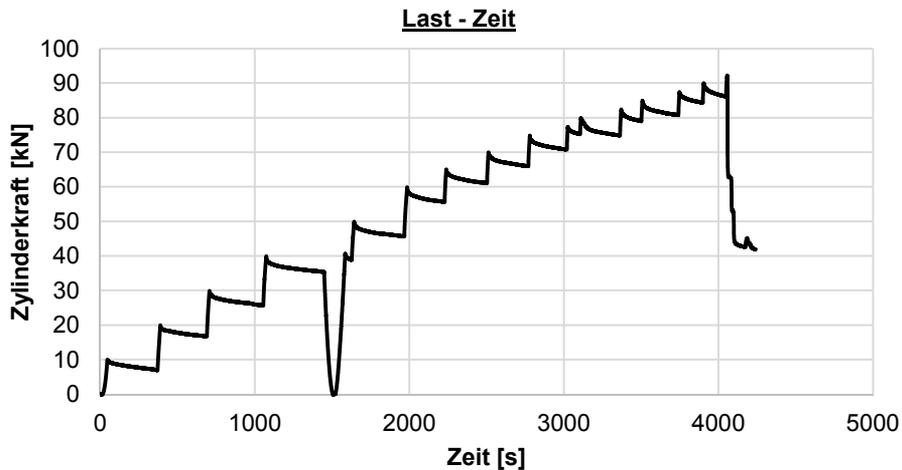
Hinweise zum Rissbild

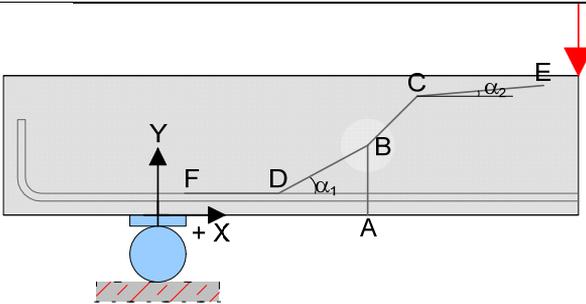
keine



S1_V8 = S1_C30/37-20-0,53-0,16-6-1_V8

Datum	22.07.2013	Beginn	12:50	Ende	14:00
Bezeichnung	S1_C30/37-20-0,53-0,16-6-1_V8				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	49,5 N/mm ²	Betonalter	27 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	40 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	1,14 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	0,25 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,03 mm				
Grenzdurchbiegung	L / 500 =			3,30 mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	80 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	80 kN	erreichte Zylinderlast	92 kN		
		Durchbiegung	4,09 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

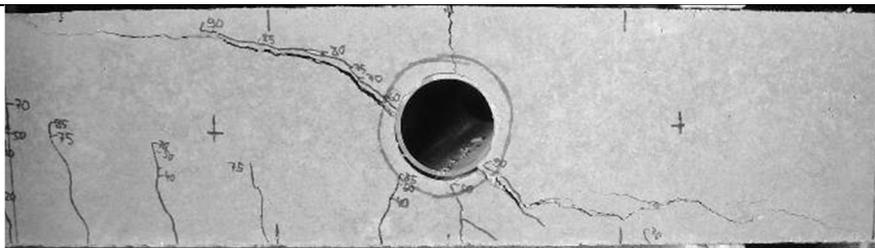


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	36,5 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	37,5 cm	10,0 cm
C	zweite Richtungsänderung	42,0 cm	11,0 cm
D	Schrägriss trifft t auf Biegebewehrung	31,0 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	18,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	0 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		45 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		43 °

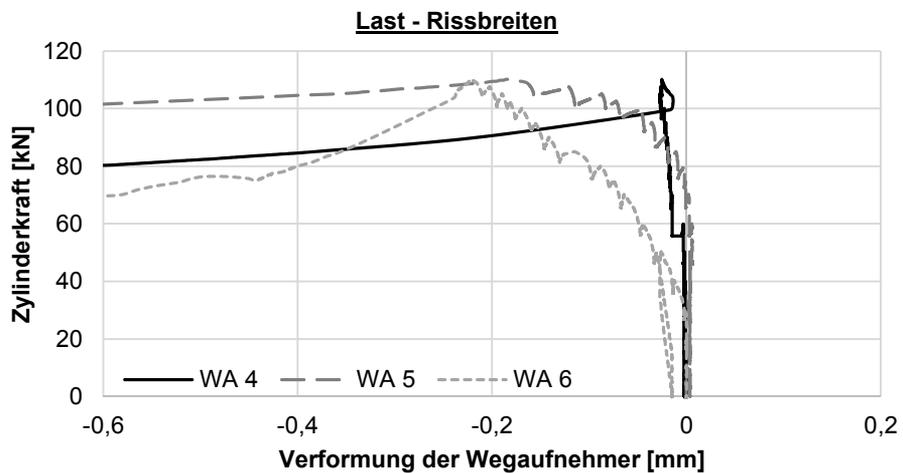
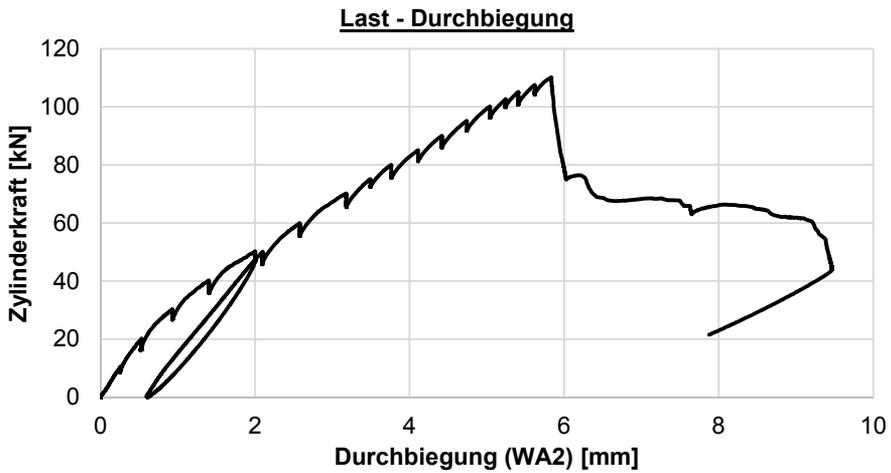
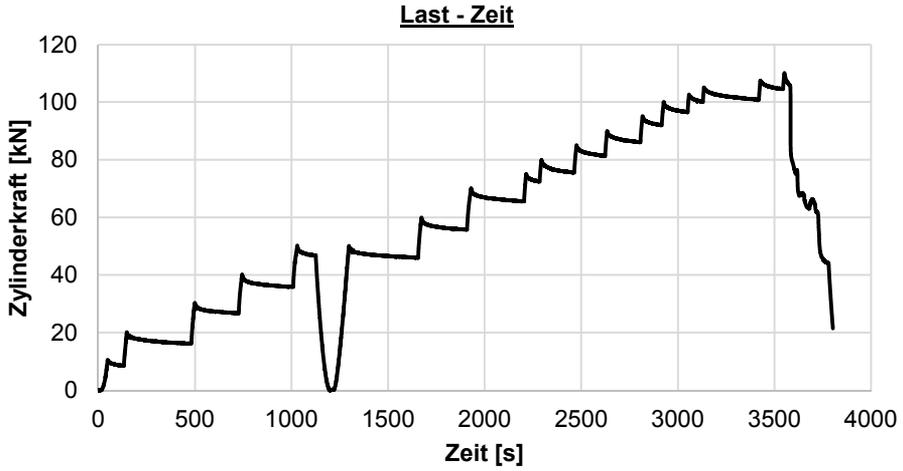
Hinweise zum Rissbild

keine

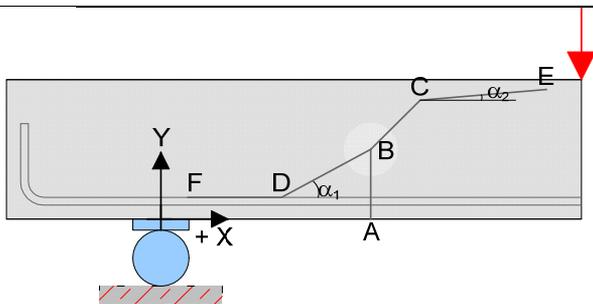


S1_V9 = S1_C30/37-20-0,53-0,33-6-2_V9

Datum	19.07.2013	Beginn	15:15	Ende	16:20
Bezeichnung	S1_C30/37-20-0,53-0,33-6-2_V9				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	49,5 N/mm ²	Betonalter	24 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
<p>Detail</p> <p>20</p> <p>WA 4 WA 5</p> <p>WA 6</p> <p>WA 1 WA 2 WA 3</p> <p>27,5 37,50 37,75 45,00 45,00 27,5</p> <p>75,0 90,0</p> <p>220,0</p>					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	50 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	1,60 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	0,42 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,12 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,04 mm				
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	3,30 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	72 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	100 kN	erreichte Zylinderlast	110 kN		
		Durchbiegung	5,0 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



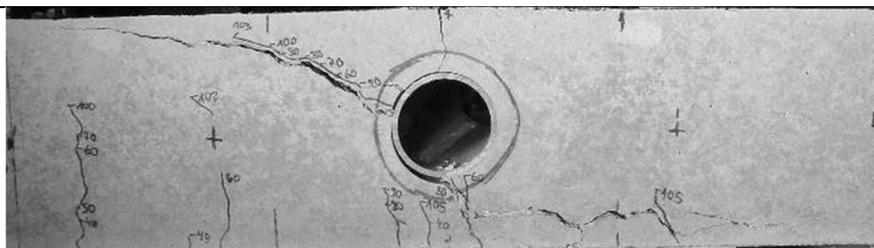
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	35 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	37,5 cm	10 cm
C	zweite Richtungsänderung	42 cm	12 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	36 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	19,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	-3 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		45 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		35 °

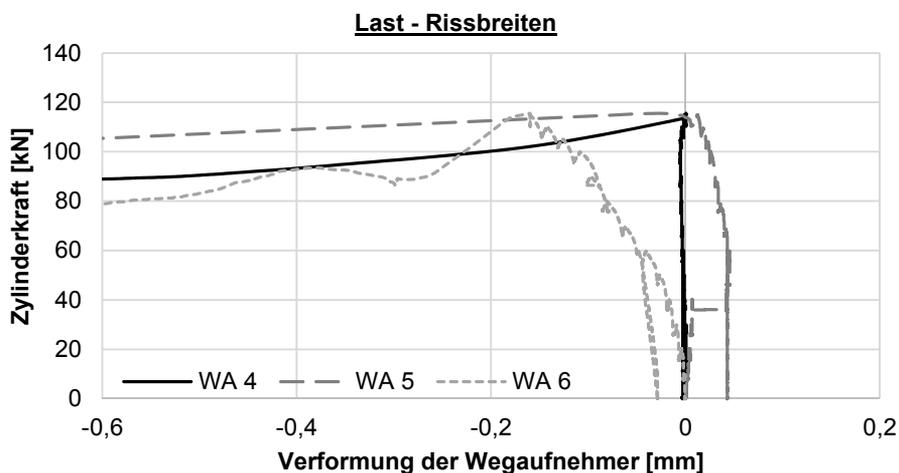
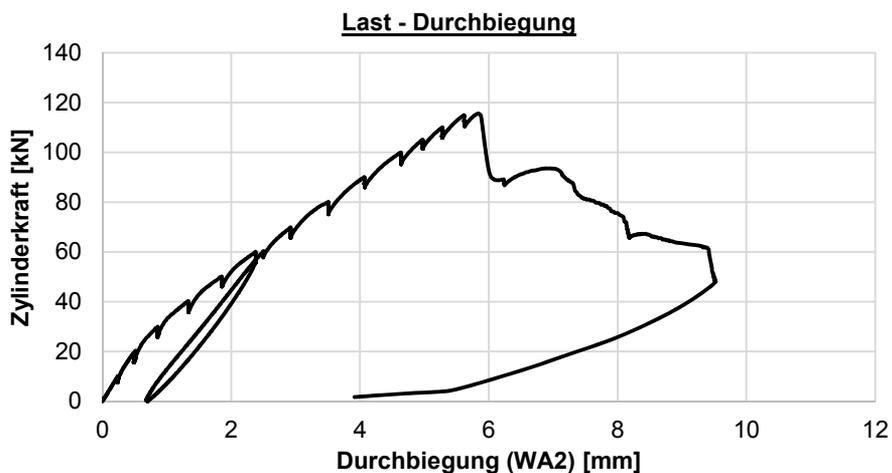
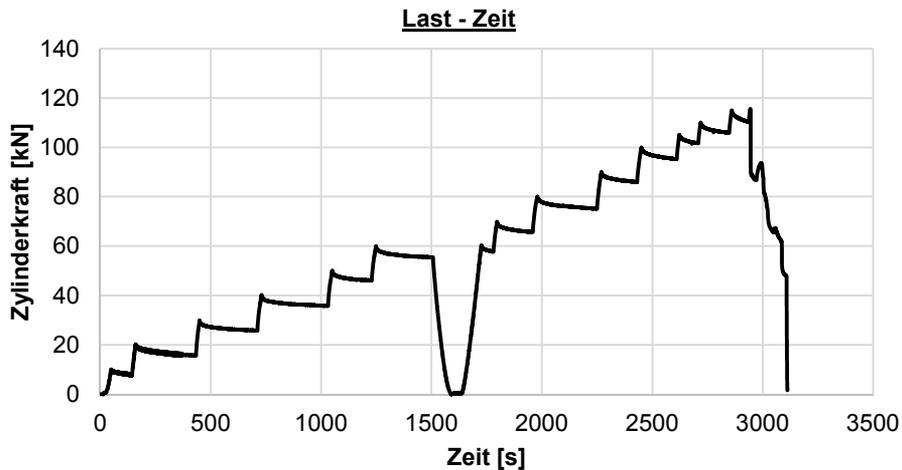
Hinweise zum Rissbild

keine

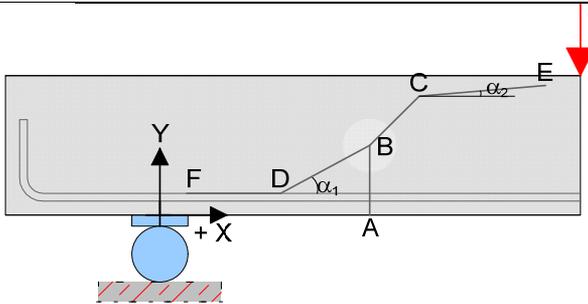


S1_V10 = S1_C30/37-20-0,53-0,49-6-3_V10

Datum	22.07.2013	Beginn	10:15	Ende	11:15
Bezeichnung	S1_C30/37-20-0,53-0,49-6-3_V10				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	49,5 N/mm ²	Betonalter	27 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	60 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	2,06 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	0,55 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,13 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,05 mm				
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	3,30 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	78 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	130 kN	erreichte Zylinderlast	115 kN		
		Durchbiegung	5,3 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



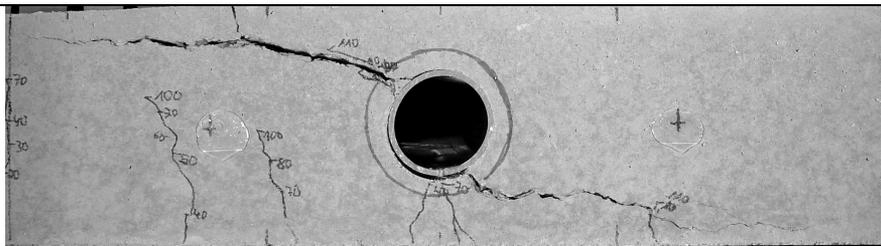
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	36 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	37,5 cm	10 cm
C	zweite Richtungsänderung	41 cm	13 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	31 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	18 cm
F	Ende des Dübelrisses	0 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		35 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		30 °

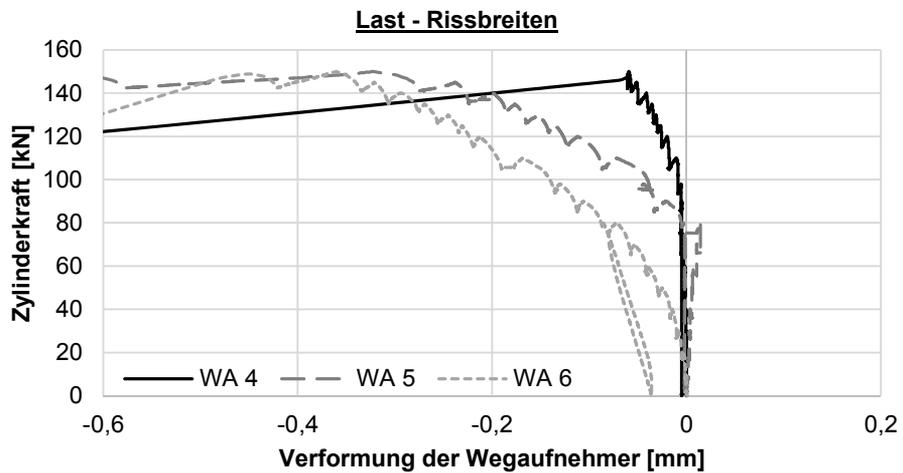
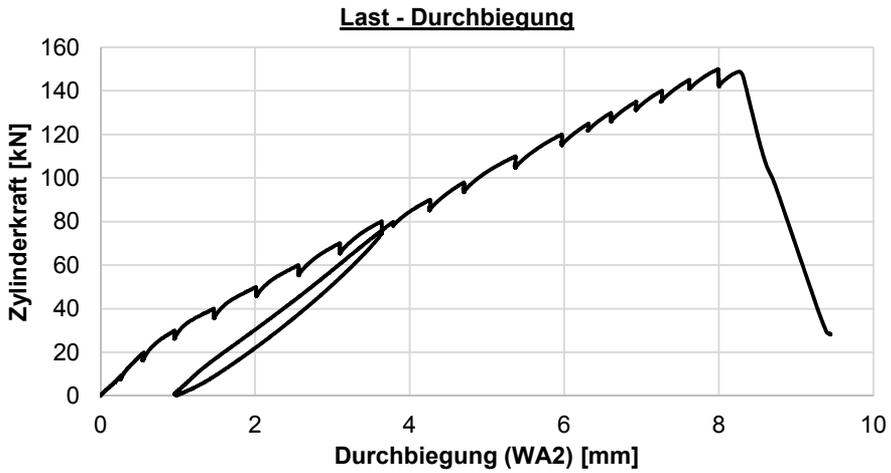
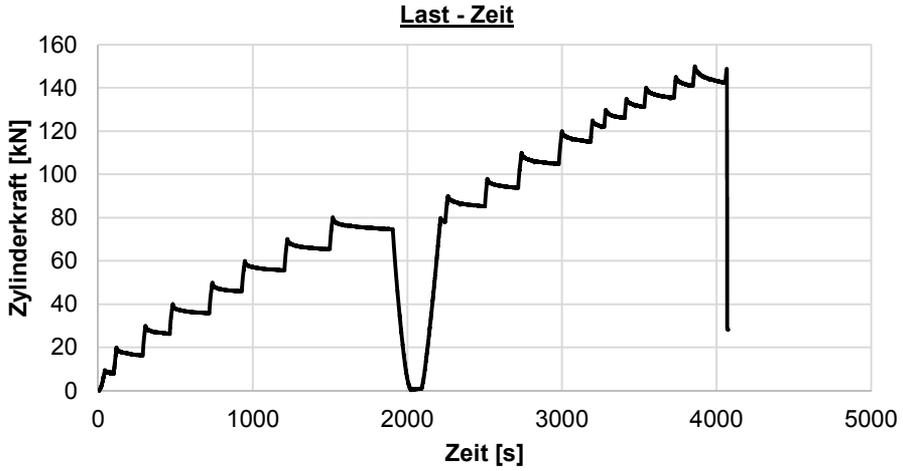
Hinweise zum Rissbild

keine

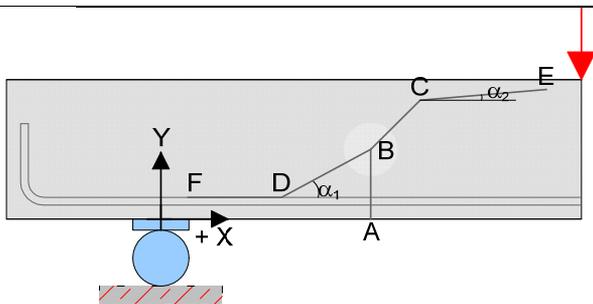


S1_V11 = S1_C30/37-20-0-0-0-0_V11

Datum	18.07.2013	Beginn	14:50	Ende	16:00
Bezeichnung	S1_C30/37-20-0-0-0-0_V11				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	49,5 N/mm ²	Betonalter	23 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	80 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	3,07 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	0,76 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,15 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,00 mm				
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	3,30 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	75 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	160 kN	erreichte Zylinderlast	150 kN		
		Durchbiegung	7,2 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



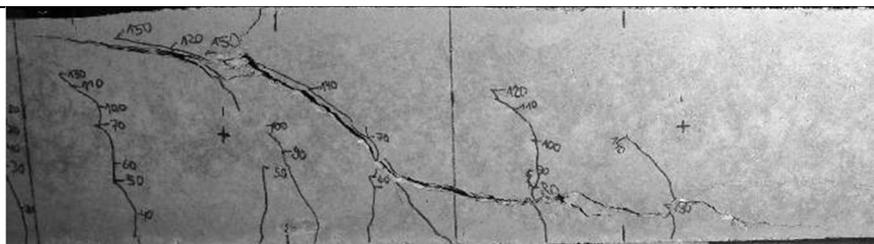
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	37,5 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	44 cm	7 cm
C	zweite Richtungsänderung	55 cm	15,5 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	33 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	19 cm
F	Ende des Dübelrisses	-5,5 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		45 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		45 °

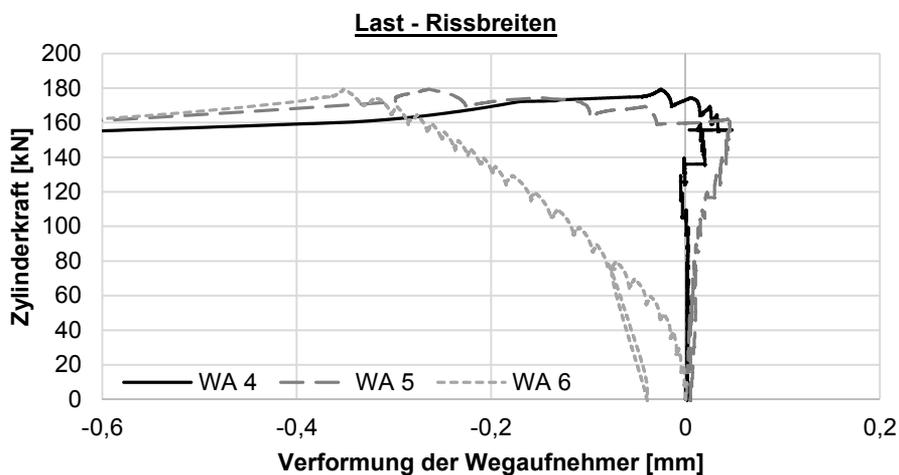
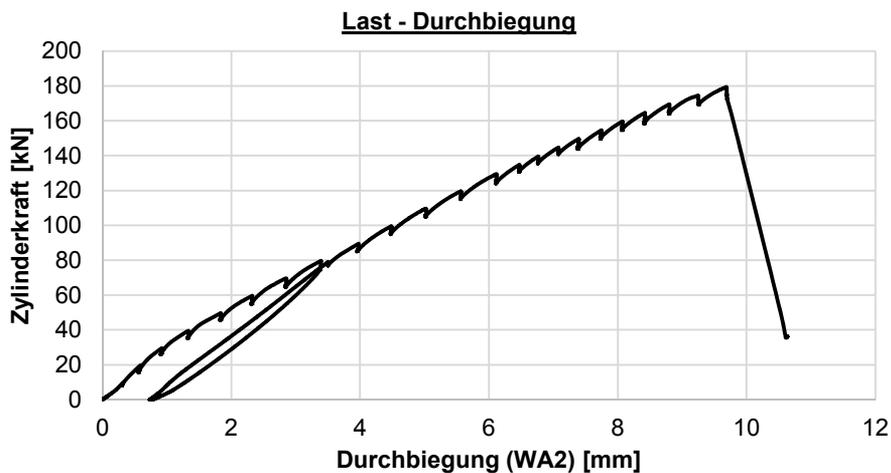
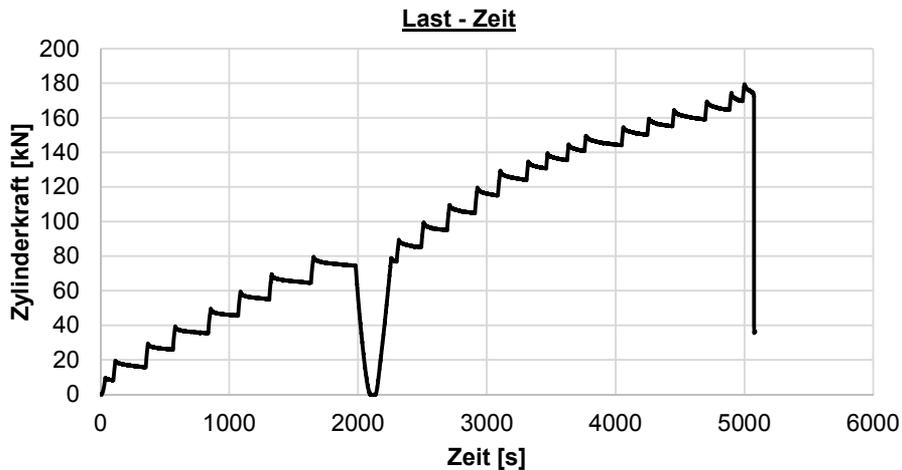
Hinweise zum Rissbild

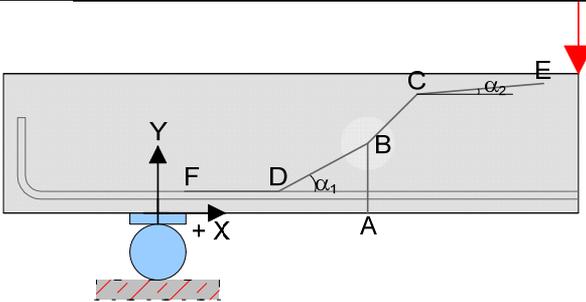
keine



S1_V12 = S1_C30/37-20-0-0-0-0_V12

Datum	22.07.2013	Beginn	13:00	Ende	14:30
Bezeichnung	S1_C30/37-20-0-0-0-0_V12				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	49,5 N/mm ²	Betonalter	27 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	80 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	2,88 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	0,60 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,10 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,00 mm				
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$			3,30 mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	78 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	150 kN	erreichte Zylinderlast	150 kN		
		Durchbiegung	8,83 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

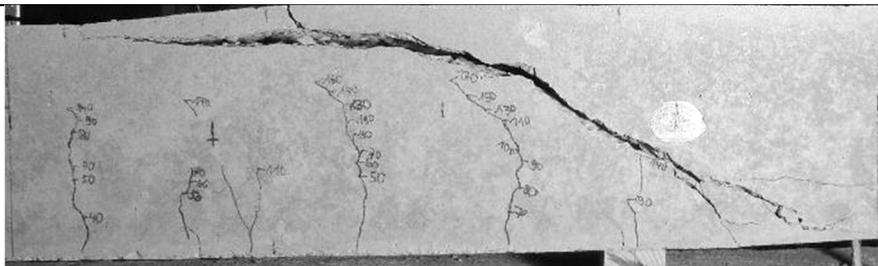


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	21 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	21 cm	9 cm
C	zweite Richtungsänderung	30 cm	15 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	9 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	19 cm
F	Ende des Dübelrisses	-8 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		30 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		30 °

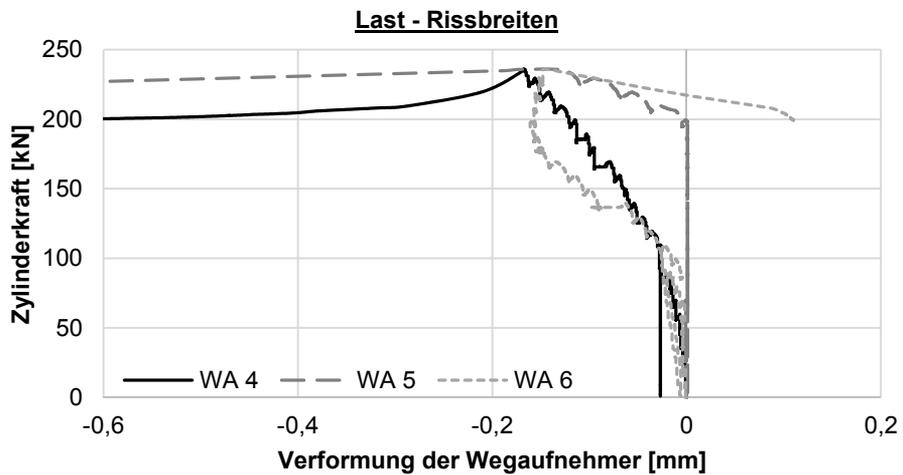
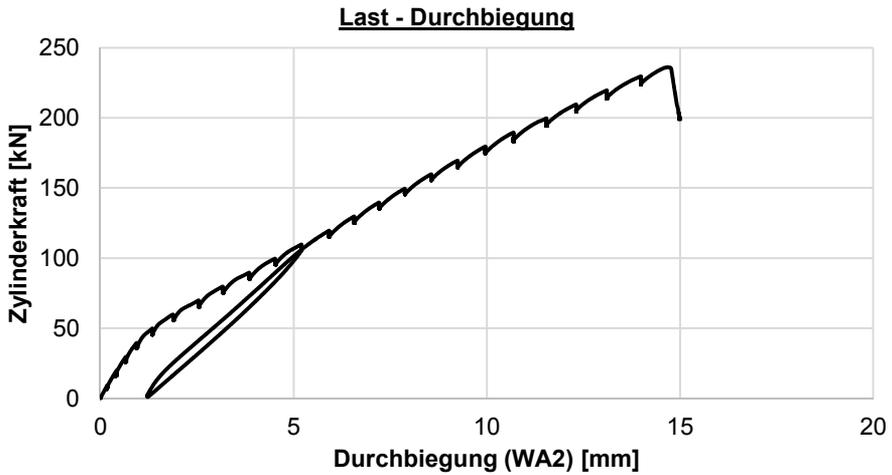
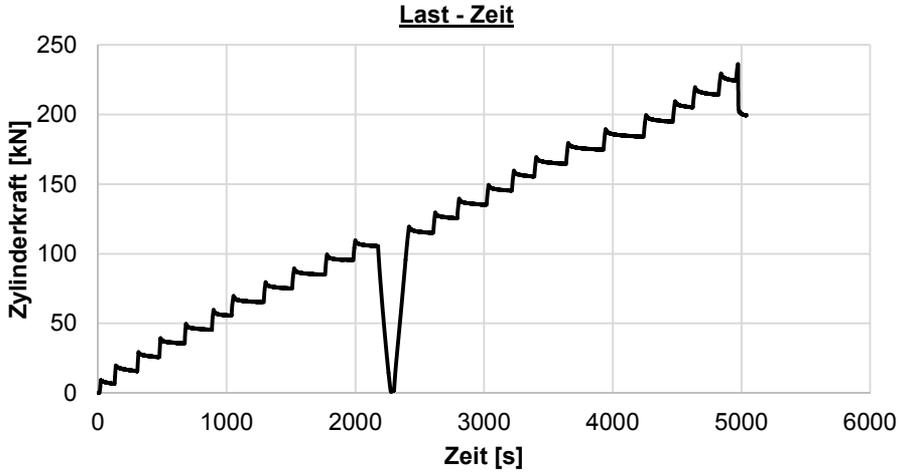
Hinweise zum Rissbild

keine

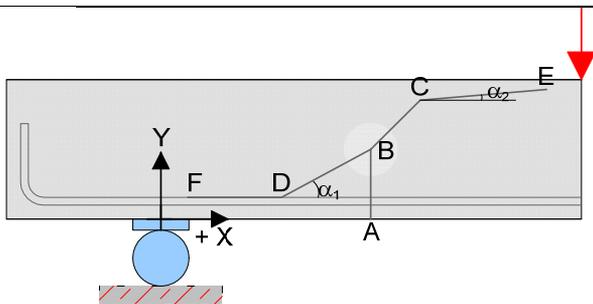


S2_V1 = S2_C30/37-30-0-0-0-0_V1

Datum	09.10.13	Beginn	15:12	Ende	17:20
Bezeichnung	S2_C30/37-30-0-0-0-0_V1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,1 N/mm ²	Betonalter	29 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	5,207 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	1,215 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,02 mm				
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	112 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235 kN	erreichte Zylinderlast	235 kN		
		Durchbiegung	14,99 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	86 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	94 cm	12 cm
C	zweite Richtungsänderung	104 cm	26 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	63 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	4,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	41 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		16 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		50 °

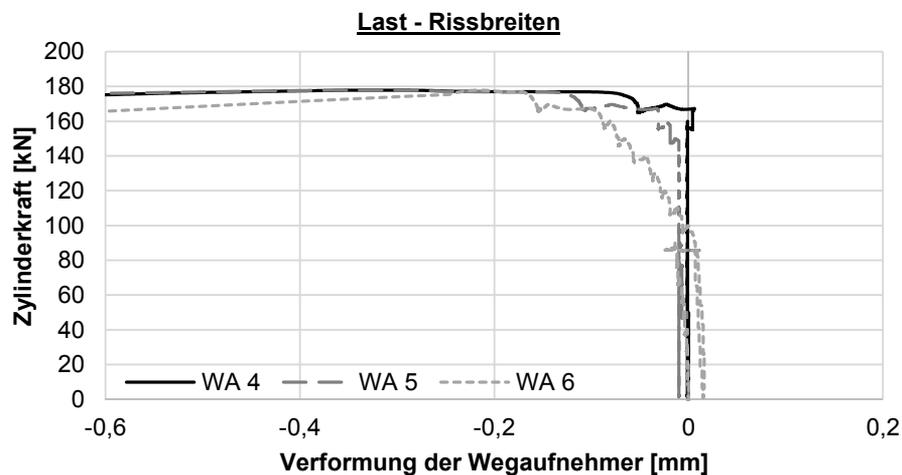
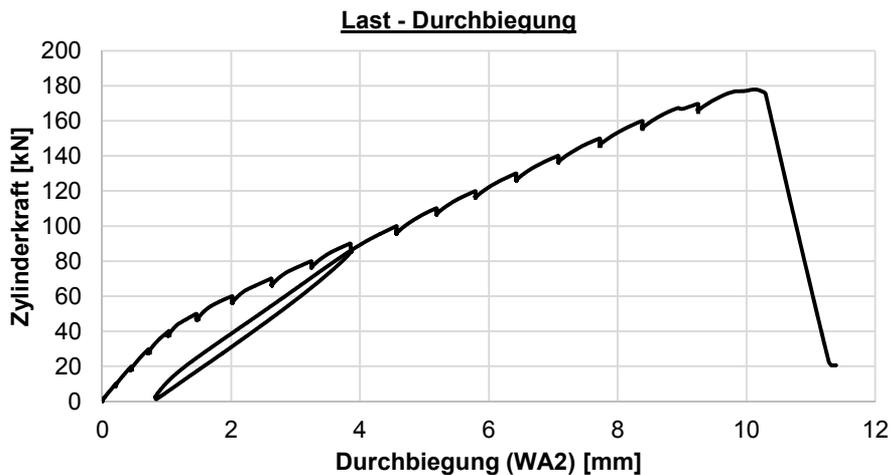
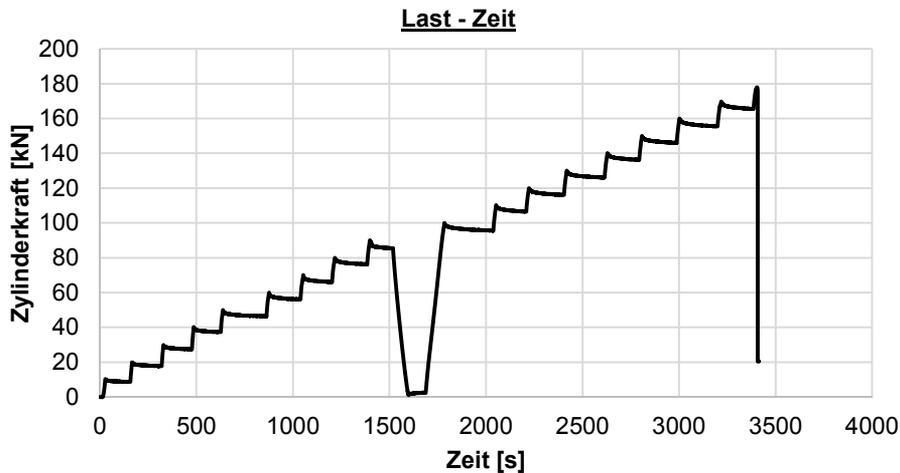
Hinweise zum Rissbild

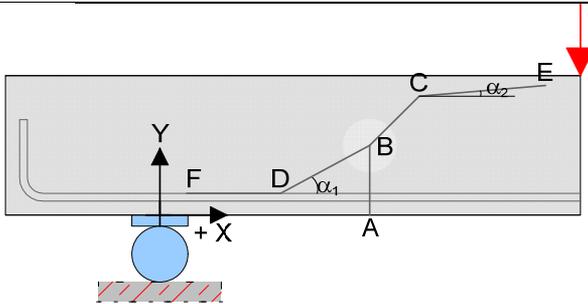
keine



S2_V2 = S2_C30/37-30-0,19-0-0-0_V2

Datum	09.10.13	Beginn	17:16	Ende	18:15
Bezeichnung	S2_C30/37-30-0,19-0-0-0_V2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,1 N/mm ²	Betonalter	29 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	90 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	3,853 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	0,833 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,025 mm				
Grenzdurchbiegung	L / 500 =		5,45 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	113 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	190 kN	erreichte Zylinderlast	176 kN		
		Durchbiegung	10,3 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

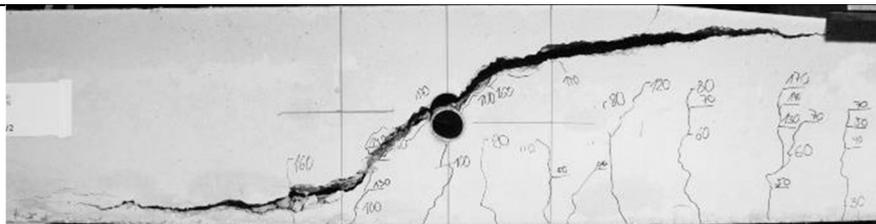


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	48 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	50 cm	8 cm
C	zweite Richtungsänderung	76 cm	24 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	47 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	27,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	-7 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		40 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		32 °

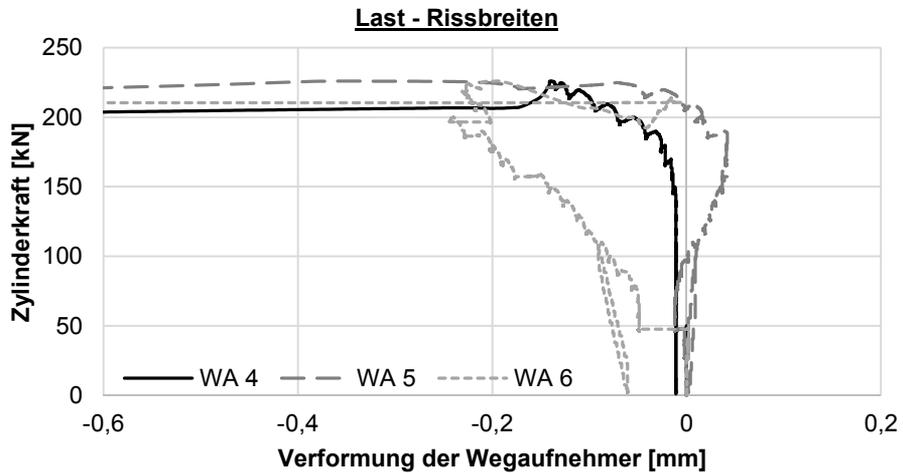
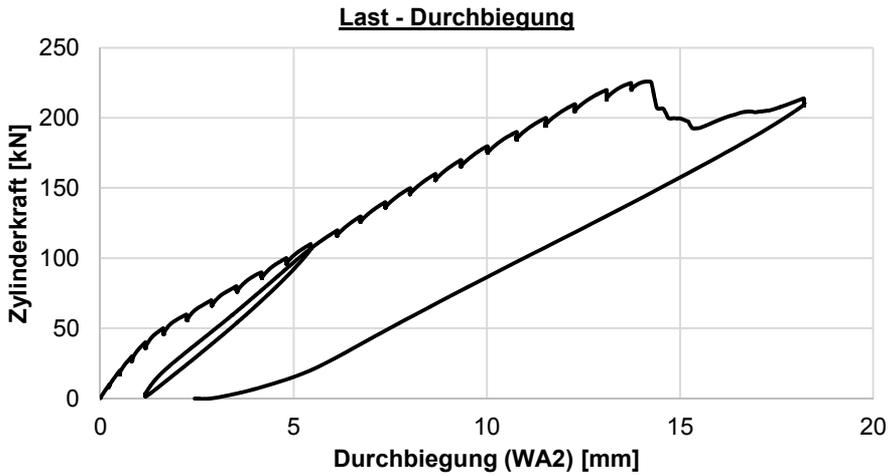
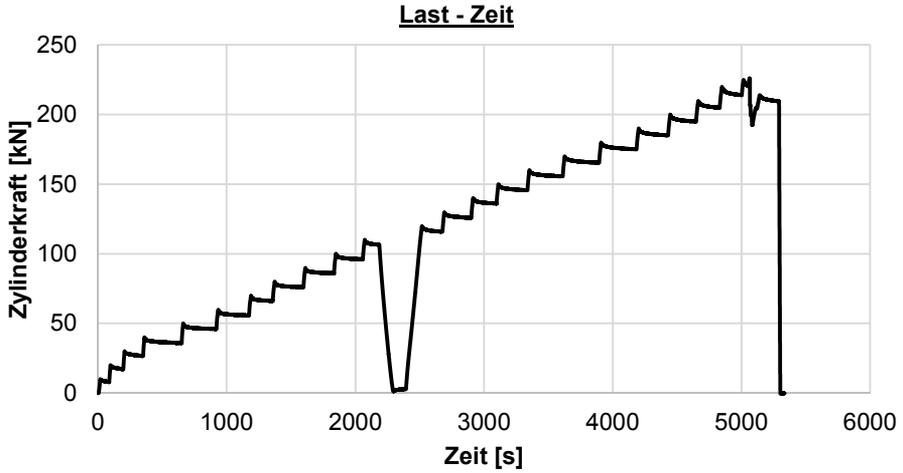
Hinweise zum Rissbild

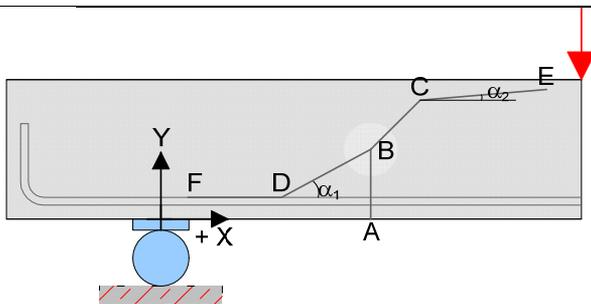
keine



S2_V3 = S2_C30/37-30-0,19-0,67-8-3_V3

Datum	10.10.13	Beginn	12:15	Ende	13:37
Bezeichnung	S2_C30/37-30-0,19-0,67-8-3_V3				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,1 N/mm ²	Betonalter	30 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	5,447 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	1,167 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,05 mm				
Grenzdurchbiegung	L / 500 =		5,45 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	110 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235 kN	erreichte Zylinderlast	225 kN		
		Durchbiegung	18,206 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

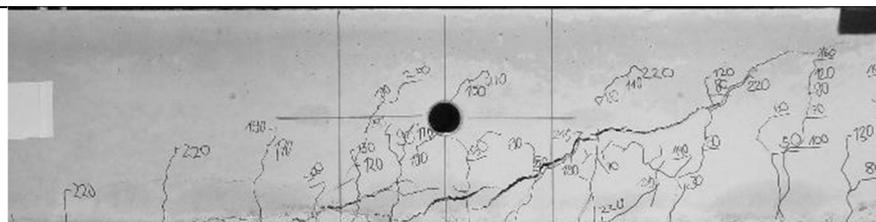


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	69 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	74 cm	8 cm
C	zweite Richtungsänderung	108,5 cm	22 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	66 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	25 cm
F	Ende des Dübelrisses	12 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		25 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		36 °

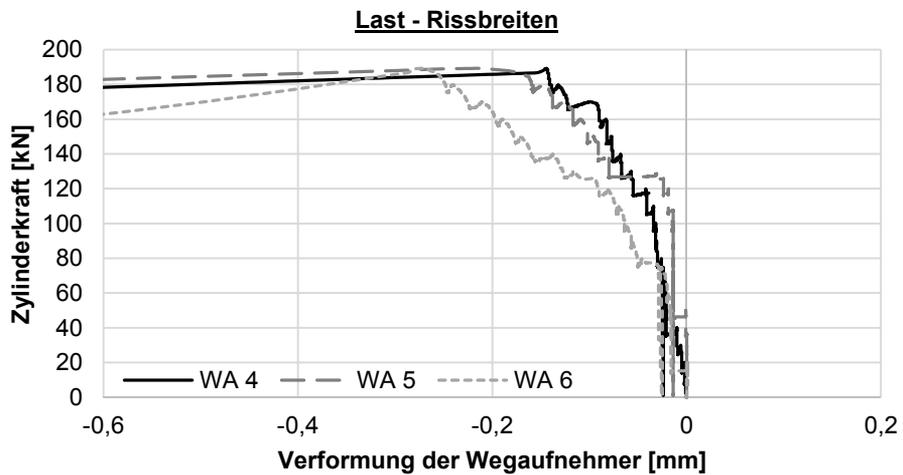
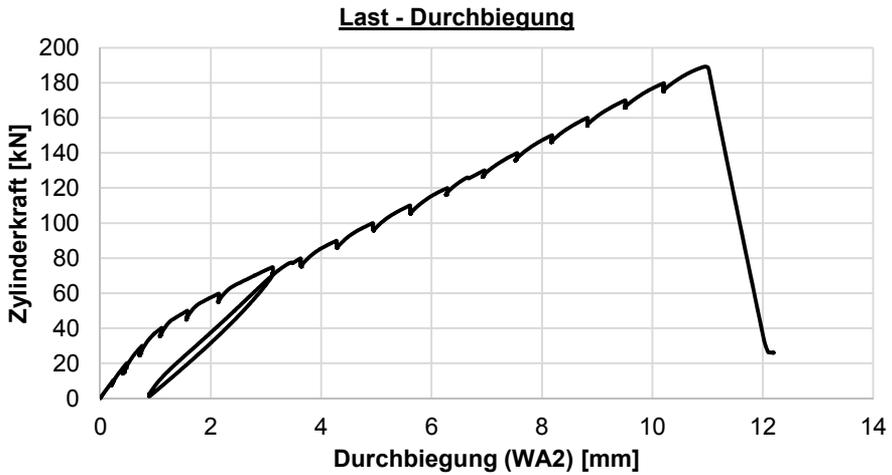
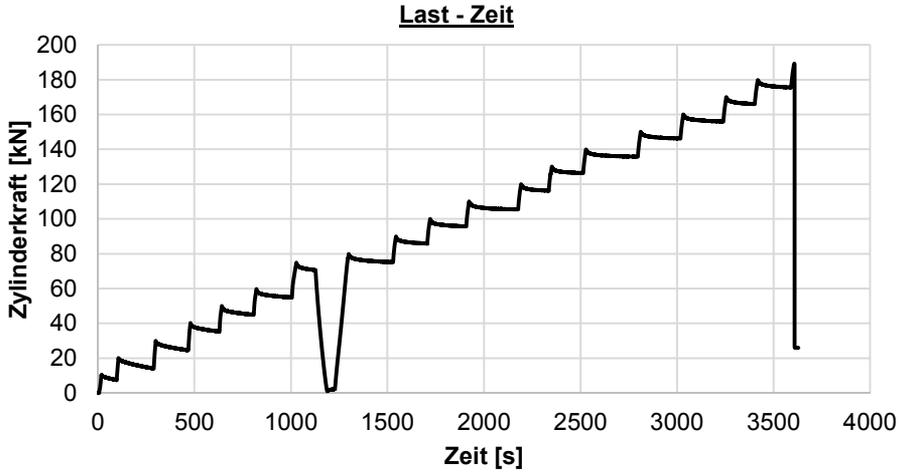
Hinweise zum Rissbild

keine

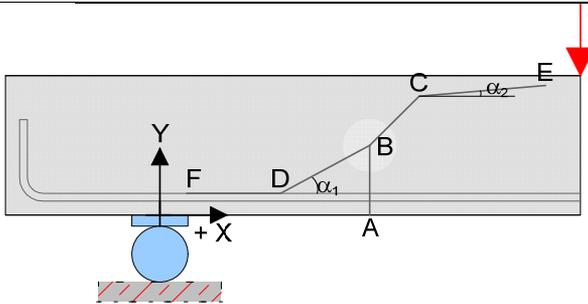


S2_V4 = S2_C30/37-30-0,33-0-0-0_V4

Datum	10.10.13	Beginn	09:40	Ende	10:40
Bezeichnung	S2_C30/37-30-0,33-0-0-0_V4				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,1 N/mm ²	Betonalter	30 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	75 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	3,126 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	0,881 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,5 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,1 mm				
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$		5,45 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	108 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	160 kN	erreichte Zylinderlast	188 kN		
		Durchbiegung	12,198 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



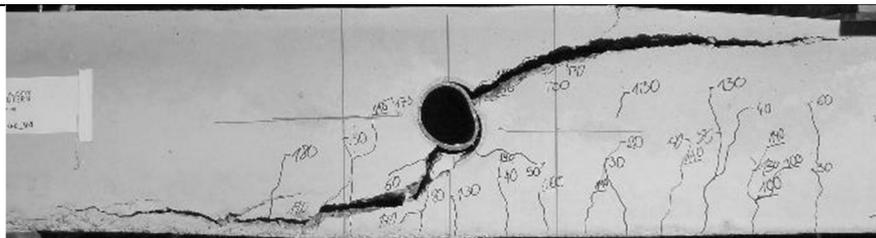
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	58 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	58 cm	7 cm
C	zweite Richtungsänderung	79 cm	23 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	56 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	27 cm
F	Ende des Dübelrisses	-5 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		61 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		26 °

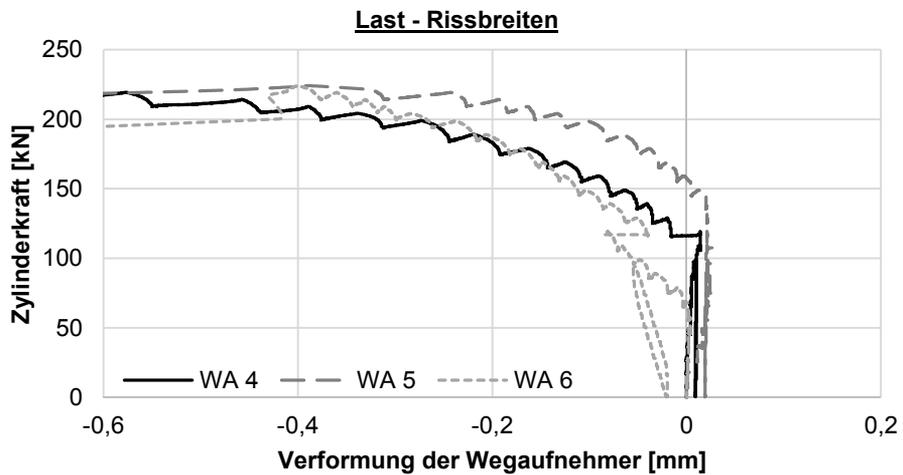
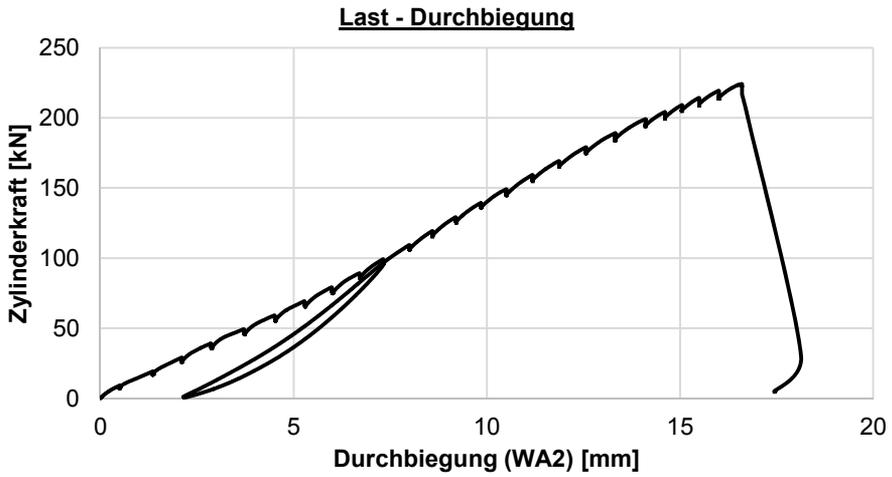
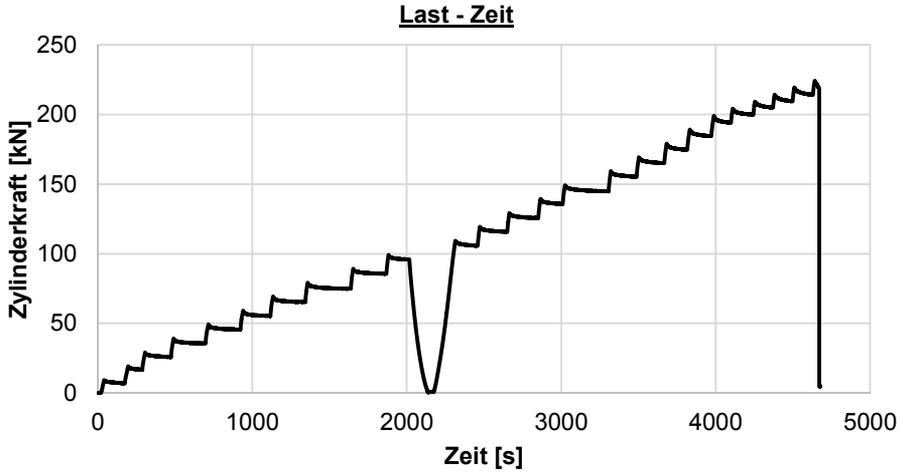
Hinweise zum Rissbild

keine

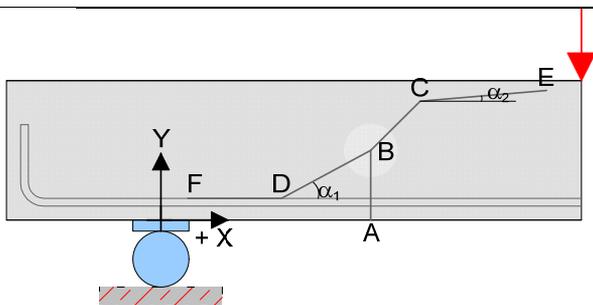


S2_V5 = S2_C30/37-30-0,33-0,67-8-3_V5

Datum	08.10.13	Beginn	12:42	Ende	14:00
Bezeichnung	S2_C30/37-30-0,33-0,67-8-3_V5				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,1 N/mm ²	Betonalter	28 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
Riss im Bereich der Lasteinleitung in der Druckzone → evtl. weicher					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	100 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	7,32 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	2,165 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,15 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,05 mm				
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$			5,45 mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	70 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	210 kN	erreichte Zylinderlast	225 kN		
		Durchbiegung	16,5 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
Wegen der Vorschädigung ist der Versuchskörper „weicher“ (größere Durchbiegung)					



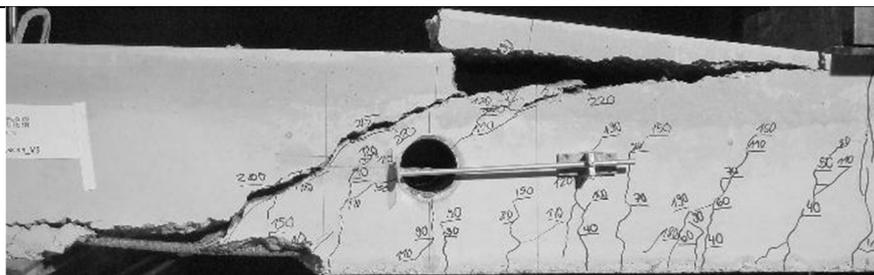
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	32 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	32 cm	5 cm
C	zweite Richtungsänderung	63 cm	26 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	32 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	27,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	-17 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		25 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		25 °

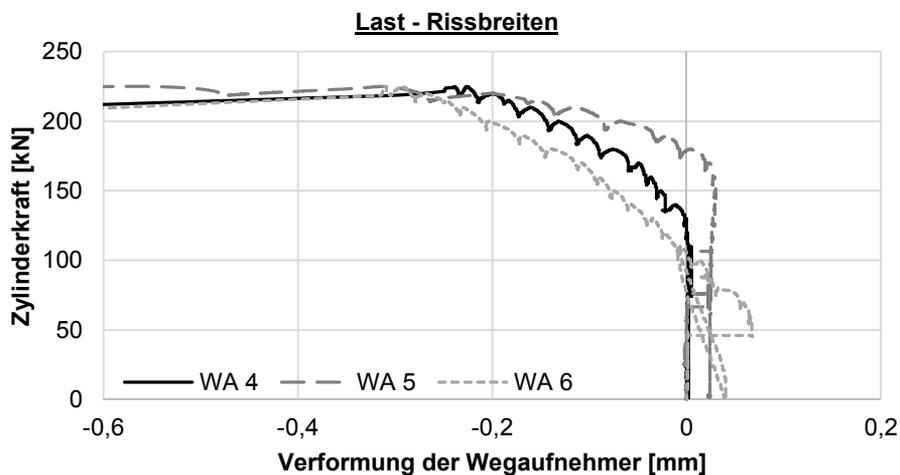
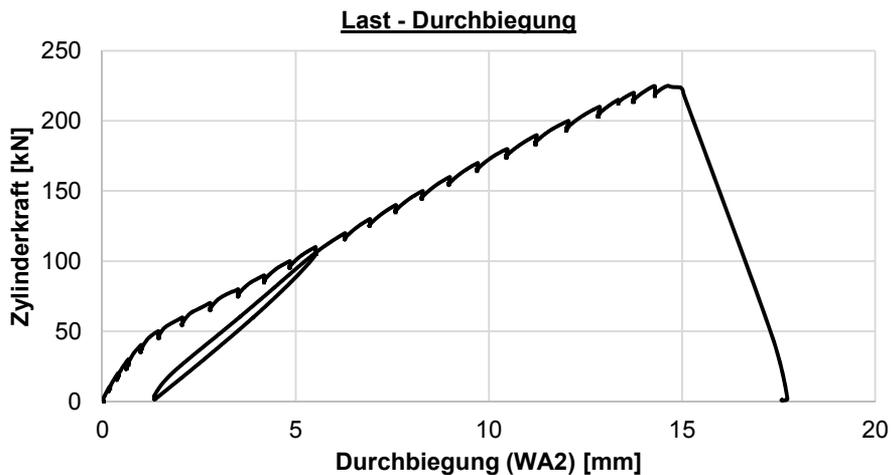
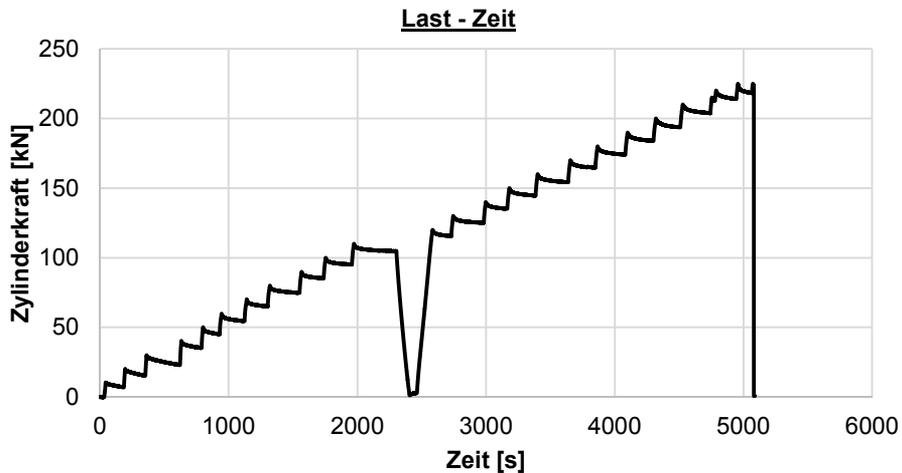
Hinweise zum Rissbild

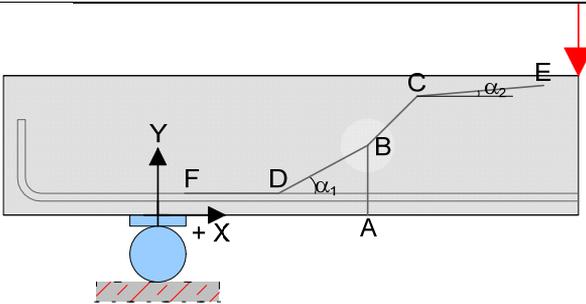
keine



S2_V6 = S2_C30/37-30-0,33-0,89-8-4_V6

Datum	08.10.13	Beginn	08:56	Ende	10:30
Bezeichnung	S2_C30/37-30-0,33-0,89-8-4_V6				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,1 N/mm ²	Betonalter	28 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	5,51 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	1,34 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,05 mm				
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	110 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235 kN	erreichte Zylinderlast	225 kN		
		Durchbiegung	15,0 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

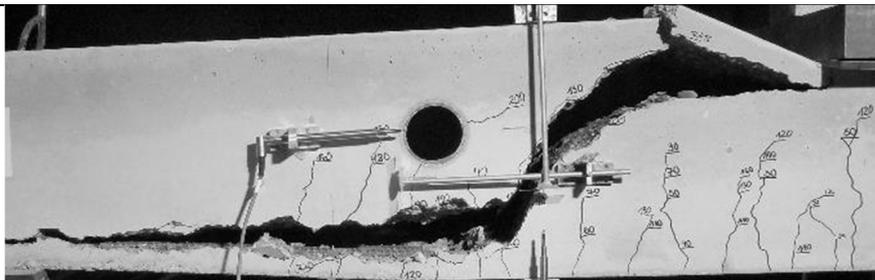


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	76,5 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	76,5 cm	5 cm
C	zweite Richtungsänderung	85 cm	21 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	76,5 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	27 cm
F	Ende des Dübelrisses	-23 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		42 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		35 °

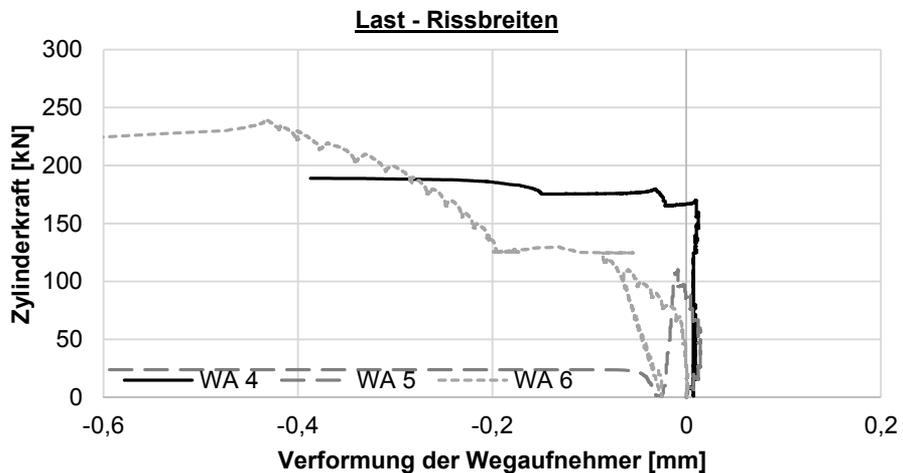
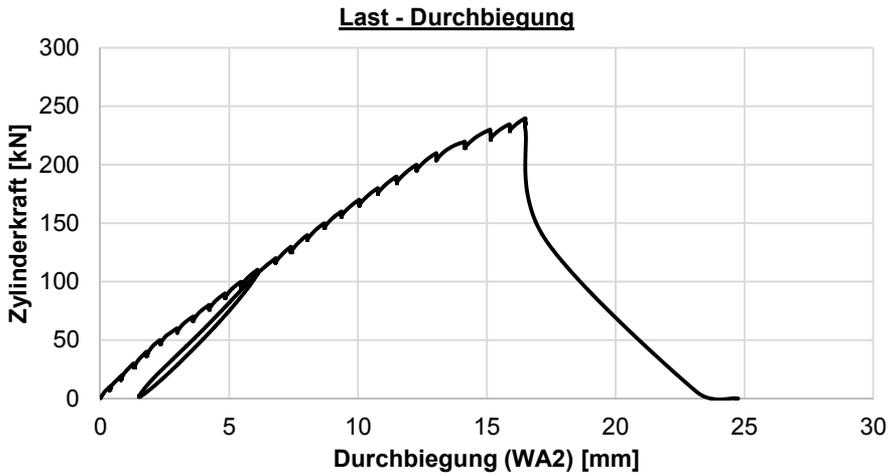
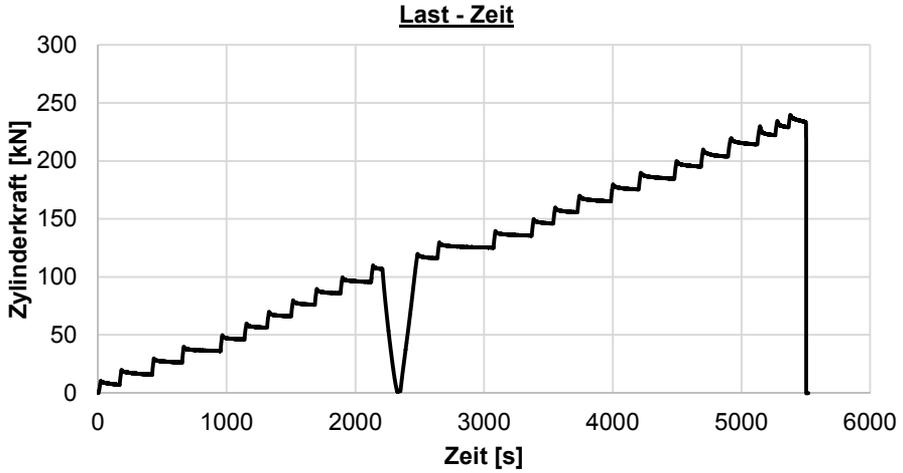
Hinweise zum Rissbild

keine

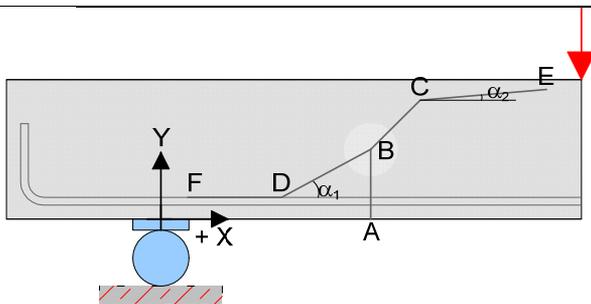


S2_V7 = S2_C30/37-30-0,33-0,89-8-4_V7

Datum	15.10.13	Beginn	12:56	Ende	14:30
Bezeichnung	S2_C30/37-30-0,33-0,89-8-4_V7				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	49,3 N/mm ²	Betonalter	22 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	6,105 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	1,909 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,05 mm				
Grenzdurchbiegung	L / 500 =			5,45 mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung					100 kN
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235 kN	erreichte Zylinderlast	240 kN		
		Durchbiegung	15,7 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
WA 5 bei ca. 130 kN abgefallen WA 4 bei ca. 190 kN abgefallen					



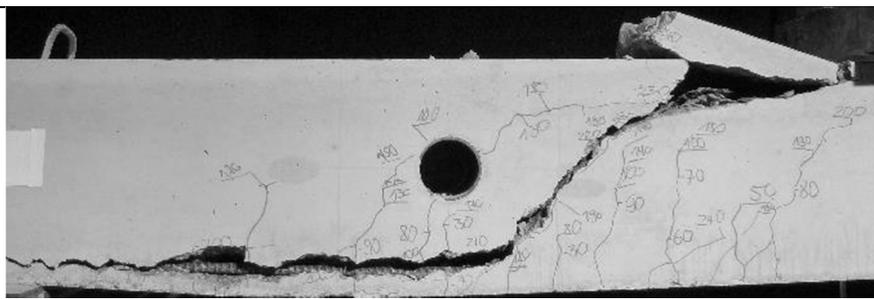
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	68 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	69 cm	6,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	82 cm	21 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	69 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	27 cm
F	Ende des Dübelrisses	-25 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		49 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		20 °

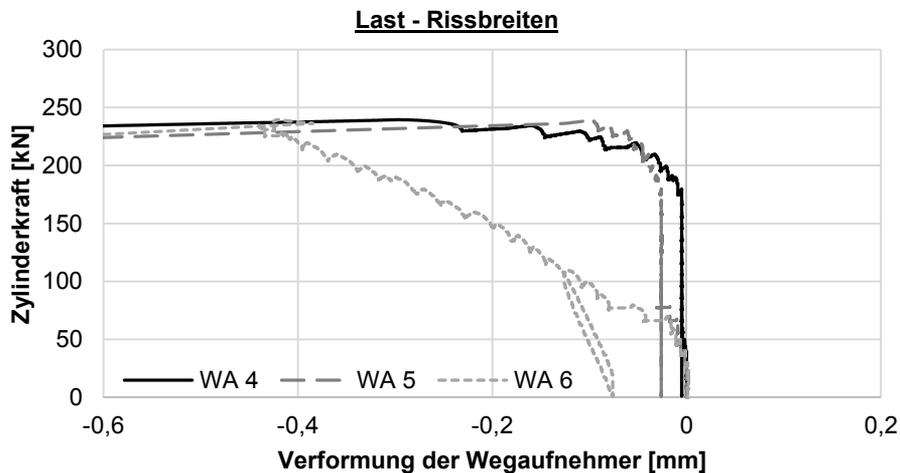
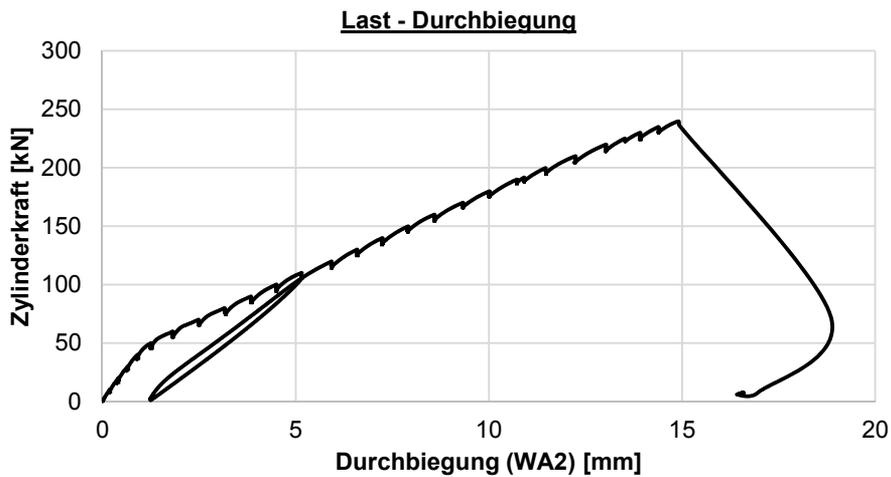
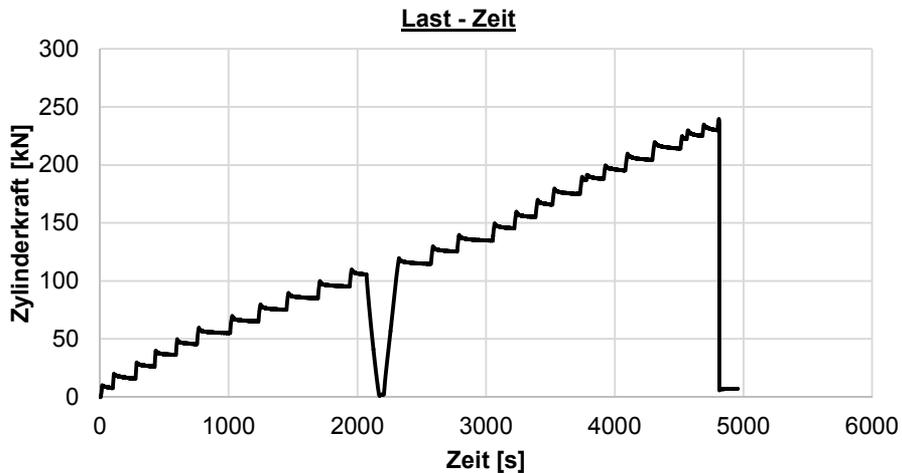
Hinweise zum Rissbild

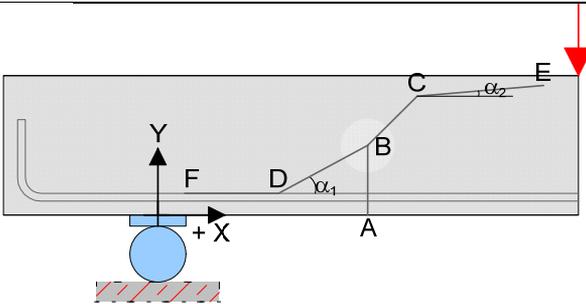
keine



S2_V8 = S2_C30/37-30-0,33-0,89-8-4_V8

Datum	10.10.13	Beginn	17:16	Ende	18:15
Bezeichnung	S2_C30/37-30-0,33-0,89-8-4_V8				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	55,3 N/mm ²	Betonalter	22 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	5,157 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	1,24 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,15 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,05 mm				
Grenzdurchbiegung	L / 500 =		5,45 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	111 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235 kN	erreichte Zylinderlast	240 kN		
		Durchbiegung	14,95 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

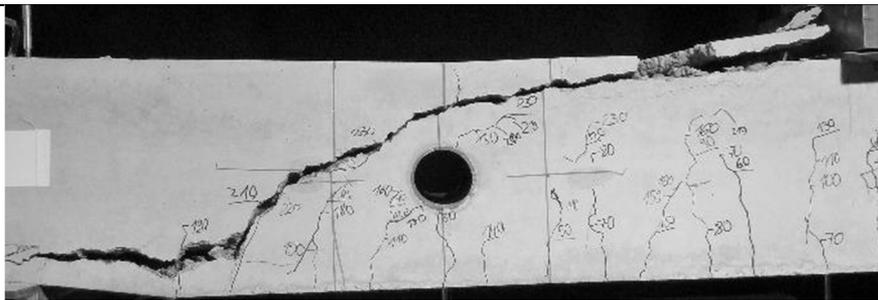


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	31 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	32 cm	5 cm
C	zweite Richtungsänderung	58 cm	23 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	31 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	28 cm
F	Ende des Dübelrisses	-25 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		41 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		21 °

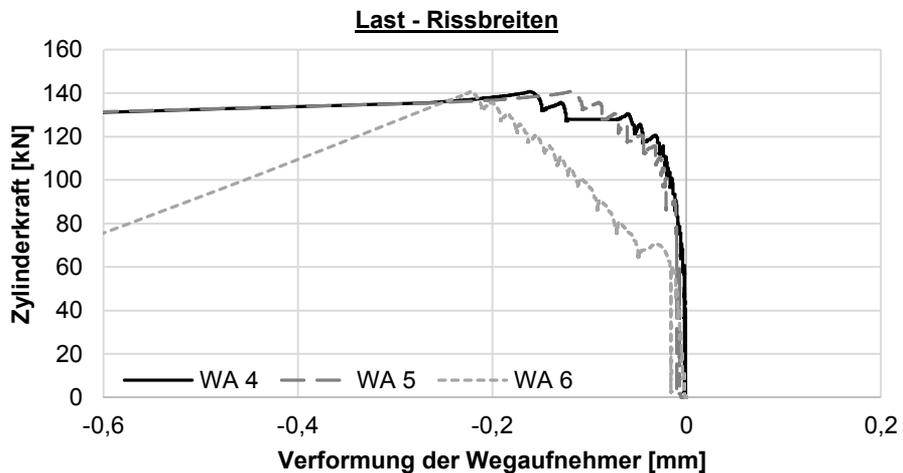
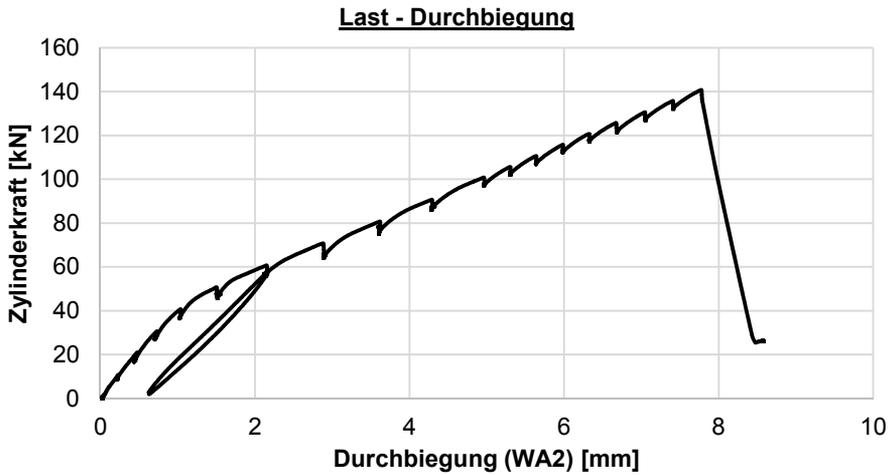
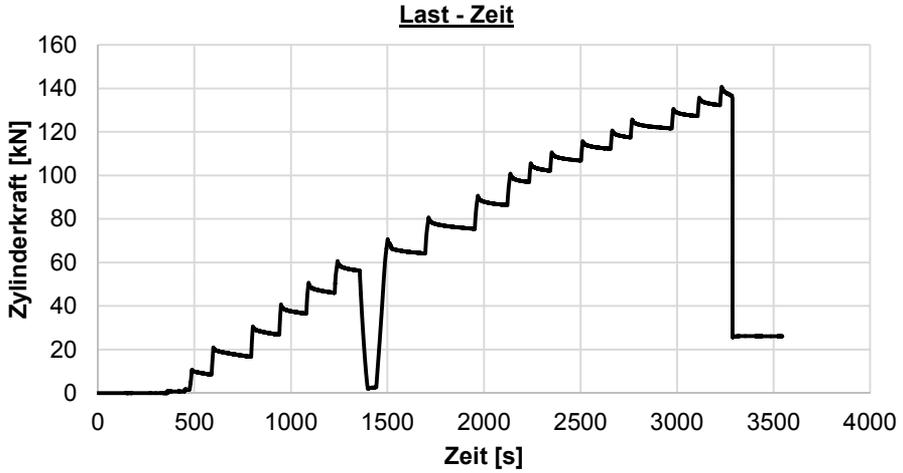
Hinweise zum Rissbild

keine

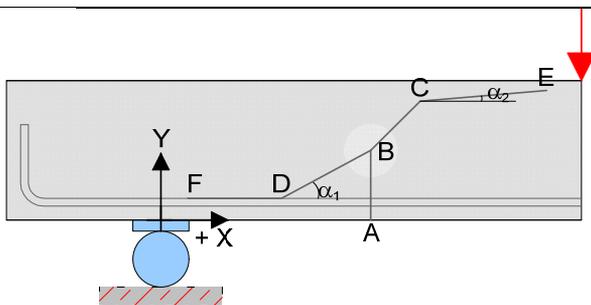


S2_V9 = S2_C30/37-30-0,46-0-0-0_V9

Datum	09.10.13	Beginn	09:35	Ende	10:30
Bezeichnung	S2_C30/37-30-0,46-0-0-0_V9				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,1 N/mm ²	Betonalter	29 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	60 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	2,16 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	0,63 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,0 mm				
Grenzdurchbiegung	L / 500 =		5,45 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	108 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	125 kN	erreichte Zylinderlast	140 kN		
		Durchbiegung	7,75 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



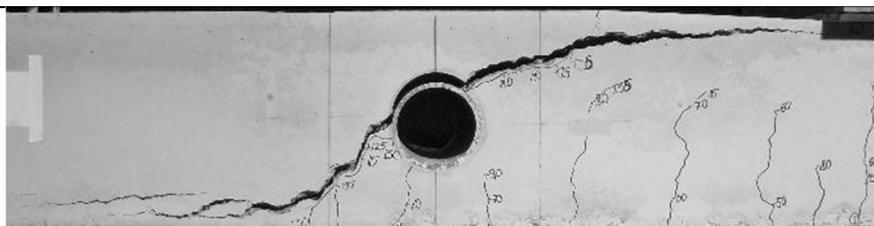
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	48 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	48 cm	7 cm
C	zweite Richtungsänderung	66 cm	20 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	45 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	28 cm
F	Ende des Dübelrisses	-6 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		44 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		16 °

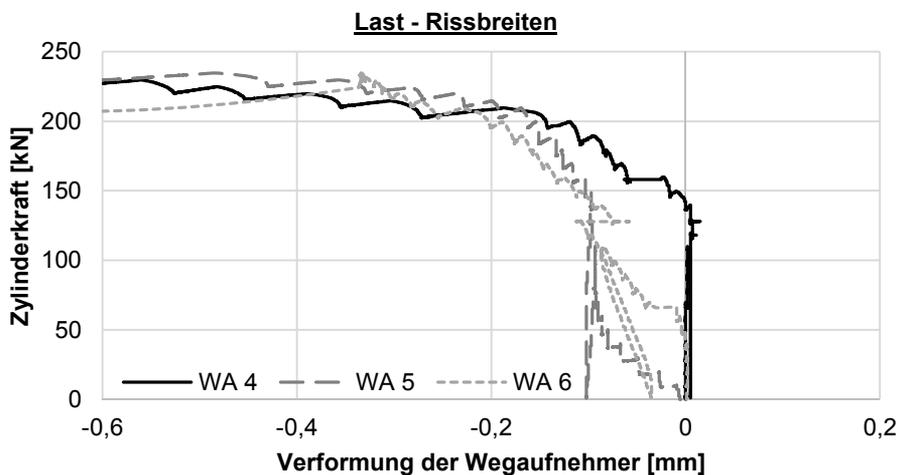
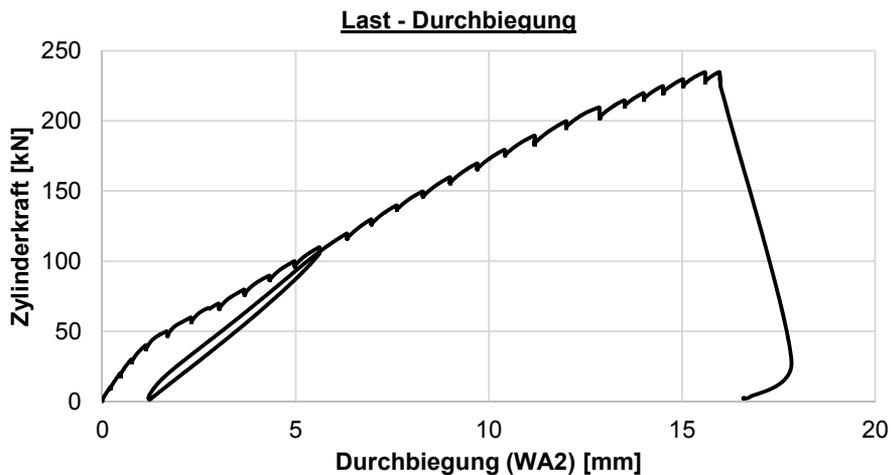
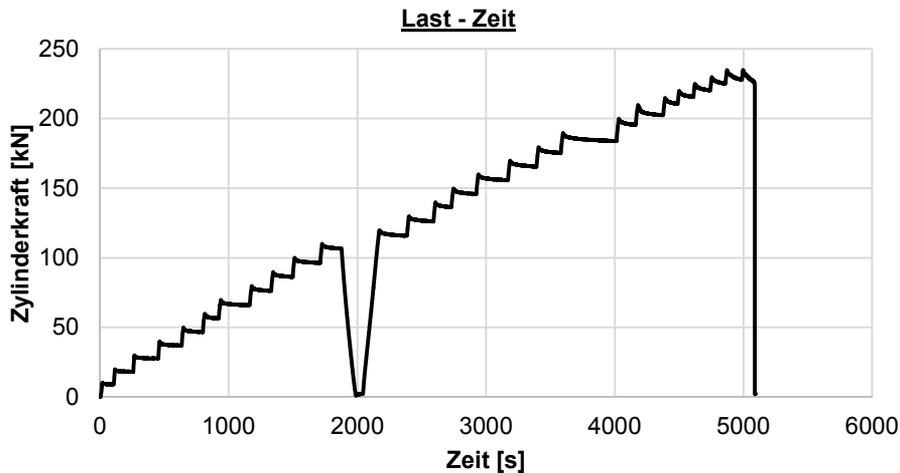
Hinweise zum Rissbild

keine

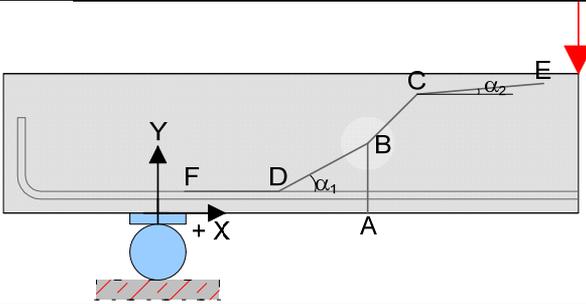


S2_V10 = S2_C30/37-30-0,46-0,67-8-3_V10

Datum	09.10.13	Beginn	142:43	Ende	14:00
Bezeichnung	S2_C30/37-30-0,46-0,67-8-3_V10				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,1 N/mm ²	Betonalter	29 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	5,618 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	1,209 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,05 mm				
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	108 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235 kN	erreichte Zylinderlast	235 kN		
		Durchbiegung	16,616 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



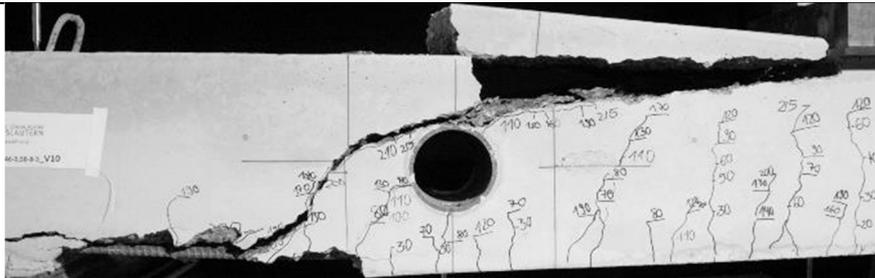
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	37 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	40 cm	8 cm
C	zweite Richtungsänderung	54 cm	19 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	35 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	27 cm
F	Ende des Dübelrisses	-25 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		50 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		16 °

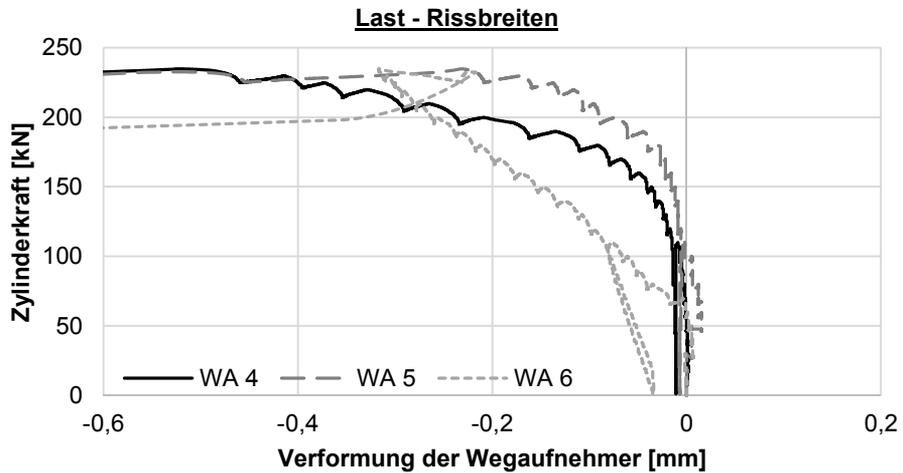
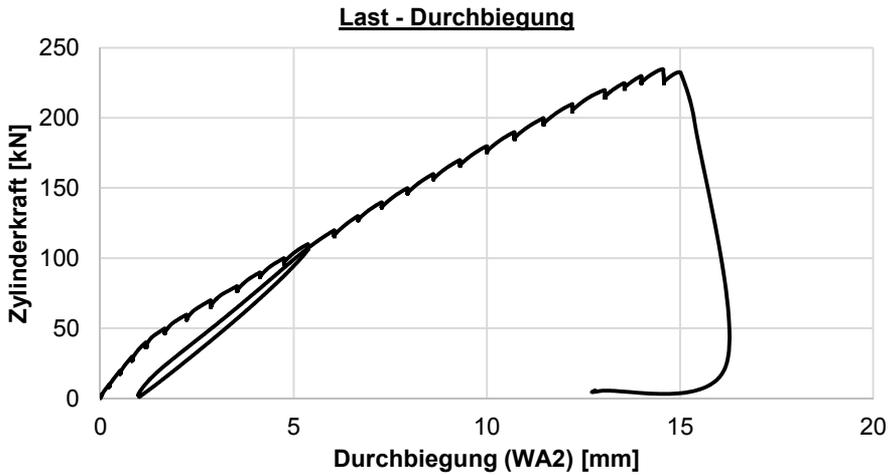
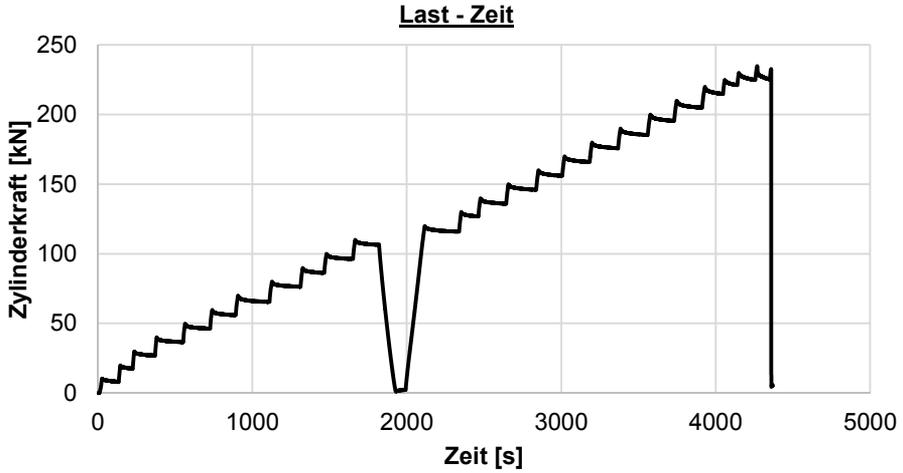
Hinweise zum Rissbild

keine

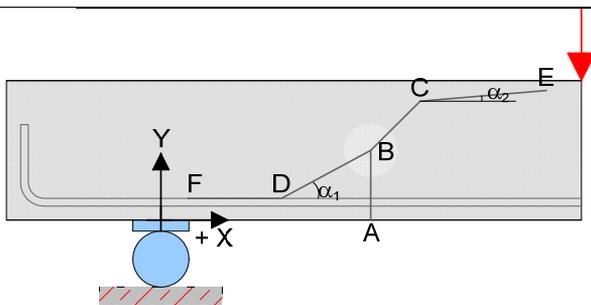


S2_V11 = S2_C30/37-30-0,46-0,89-8-4_V11

Datum	08.10.13	Beginn	18:20	Ende	19:30
Bezeichnung	S2_C30/37-30-0,46-0,89-8-4_V11				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,1 N/mm ²	Betonalter	30 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	5,377 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	1,00 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,05 mm				
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	110 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	225 kN	erreichte Zylinderlast	232 kN		
		Durchbiegung	15,0 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



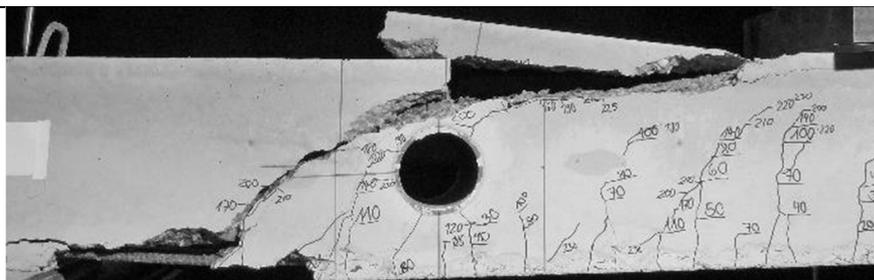
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	33 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	33 cm	5 cm
C	zweite Richtungsänderung	62 cm	22 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	33 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	27,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	-17 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		36 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		35 °

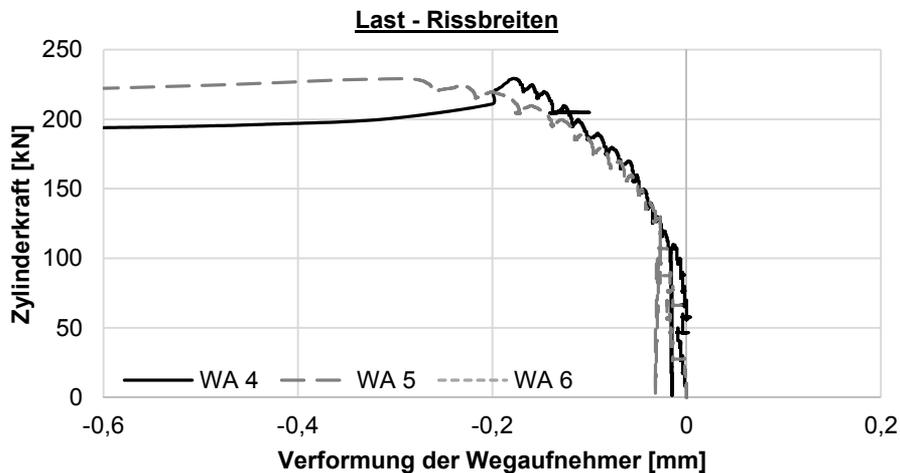
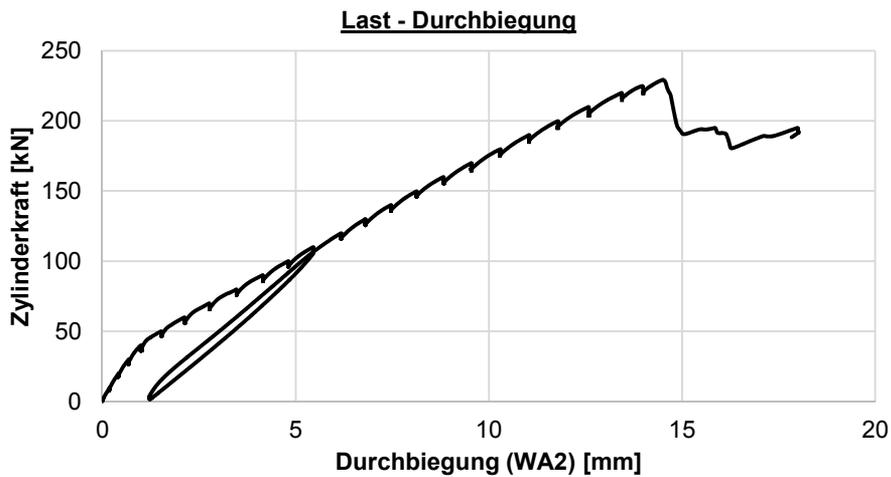
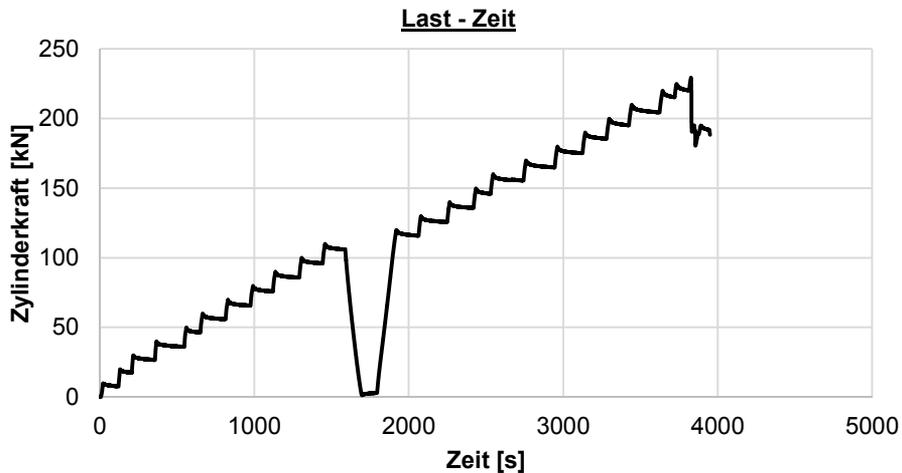
Hinweise zum Rissbild

keine

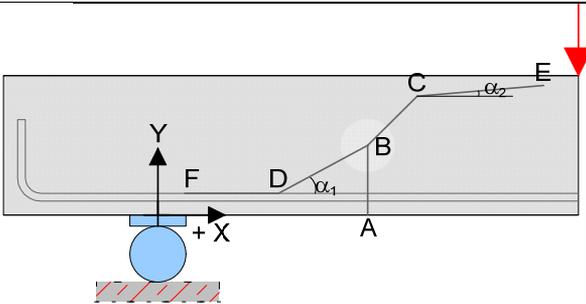


S2_V12 = S2_C30/37-30-0,46-1,11-8-5_V12

Datum	08.10.13	Beginn	16:00	Ende	17:20
Bezeichnung	S2_C30/37-30-0,46-1,11-8-5_V12				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,1 N/mm ²	Betonalter	30 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	5,46 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	1,21 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,05 mm				
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	110 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235 kN	erreichte Zylinderlast	230 kN		
		Durchbiegung	14,2 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
WA 6 defekt					



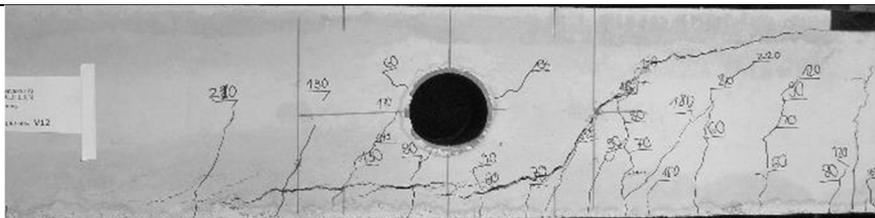
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	75 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	77 cm	7,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	90 cm	22 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	69 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	27 cm
F	Ende des Dübelrisses	3 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		40 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		20 °

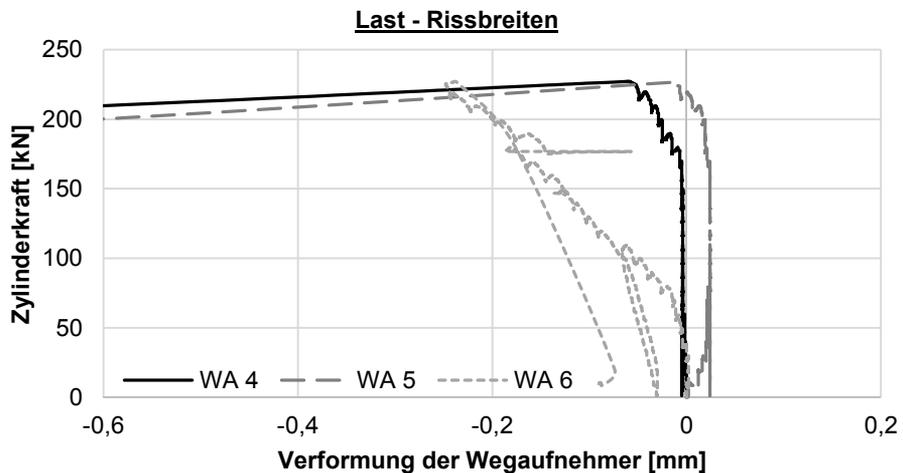
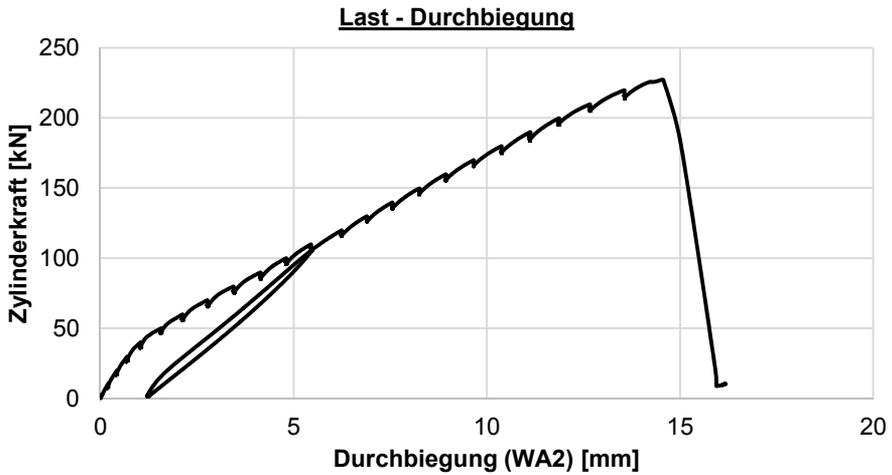
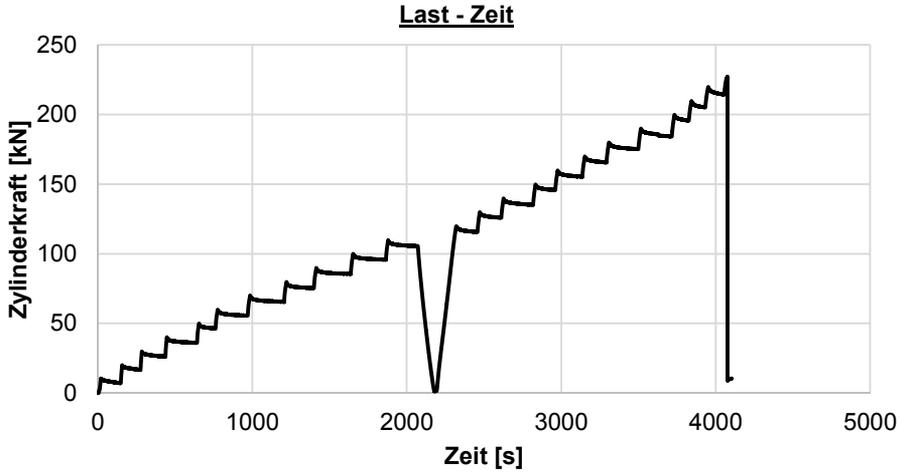
Hinweise zum Rissbild

keine

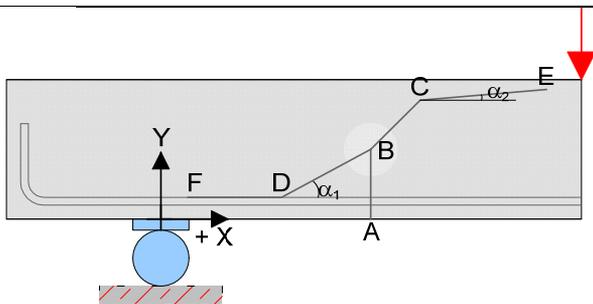


S2_V13 = S2_C30/37-30-0-0-0-0_V13

Datum	15.10.13	Beginn	10:40	Ende	12:10
Bezeichnung	S2_C30/37-0-0-0-0-0_V13				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	49,3 N/mm ²	Betonalter	22 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	5,453 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	1,212 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,1 mm				
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	110 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235 kN	erreichte Zylinderlast	225 kN		
		Durchbiegung	14,5 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



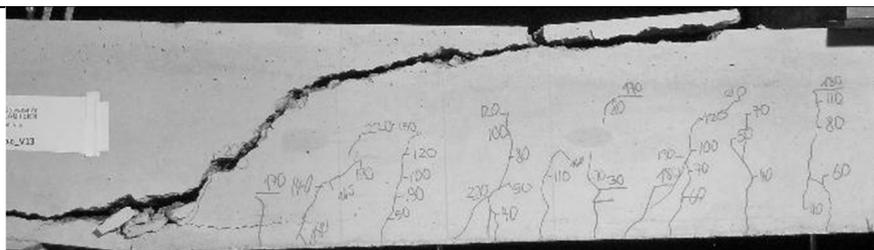
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	24 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	28 cm	10,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	41 cm	22 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	25 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	28 cm
F	Ende des Dübelrisses	-25 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		46 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		15 °

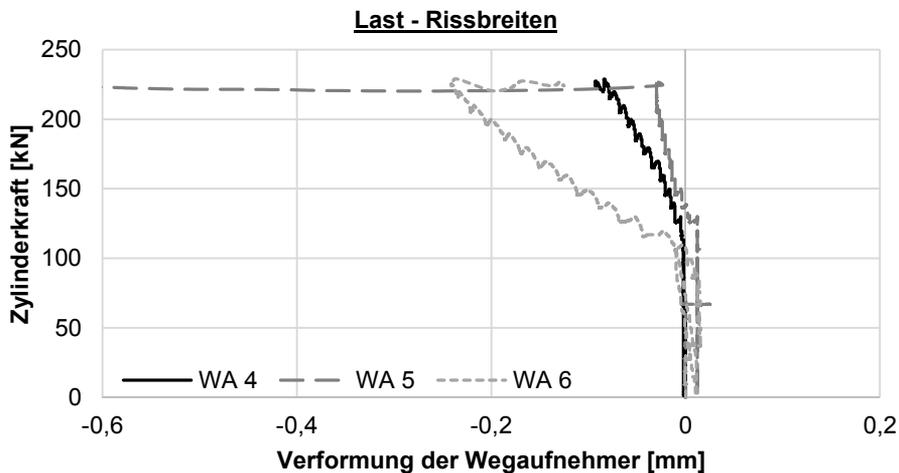
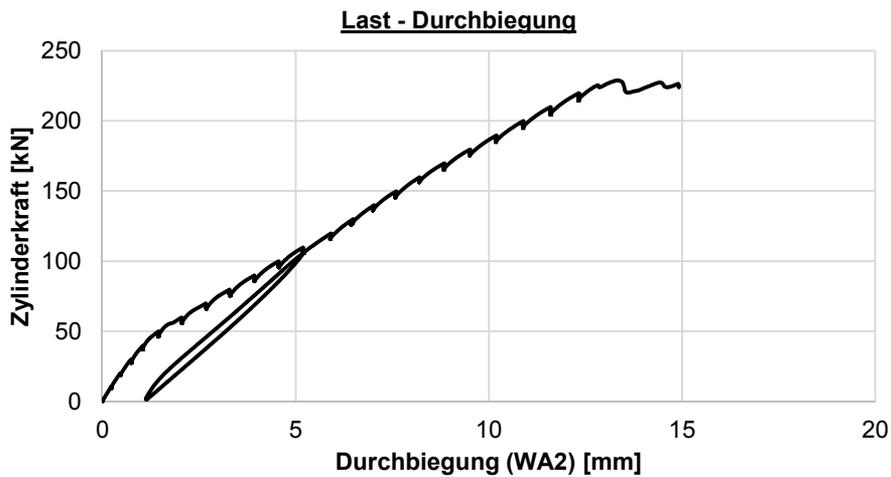
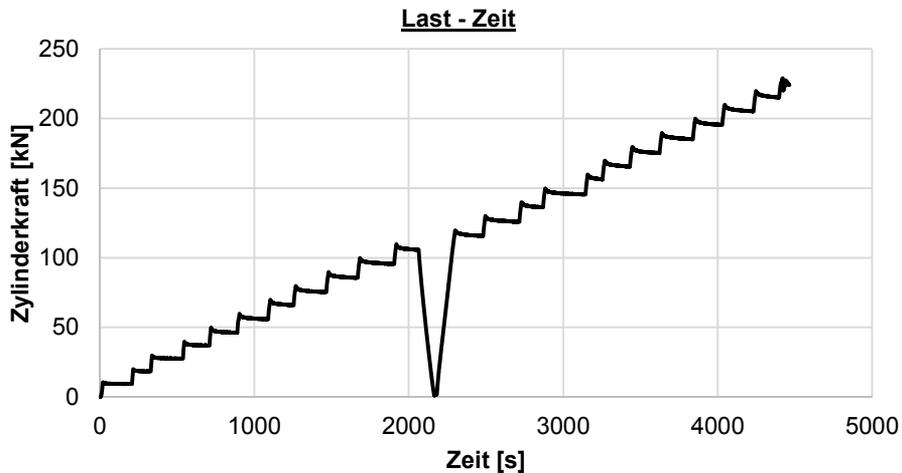
Hinweise zum Rissbild

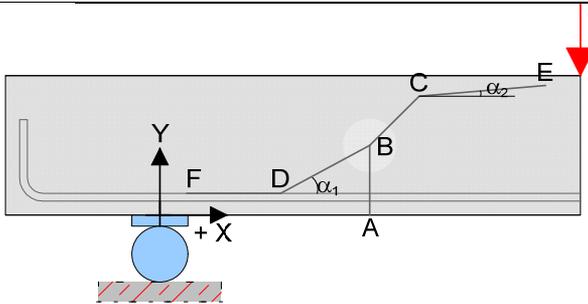
keine



S2_V14 = S2_C30/37-30-0-0-0-0_V14

Datum	14.10.13	Beginn	12:15	Ende	13:30
Bezeichnung	S2_C30/37-30-0-0-0-0_V14				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	55,3 N/mm ²	Betonalter	26 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110 kN				
Durchbiegung vor Entlastung	5,195 mm				
Durchbiegung nach Entlastung	1,133 mm				
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,15 mm				
Rissbreite unter der Öffnung	0,05 mm				
Grenzdurchbiegung	L / 500 =		5,45 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	111 kN				
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235 kN	erreichte Zylinderlast	228 kN		
		Durchbiegung	13,4 mm		
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

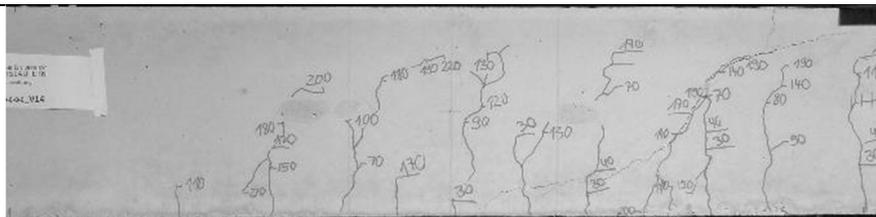


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	91,5 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	93 cm	10 cm
C	zweite Richtungsänderung	102 cm	21,5 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	81 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	26,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	61 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		°

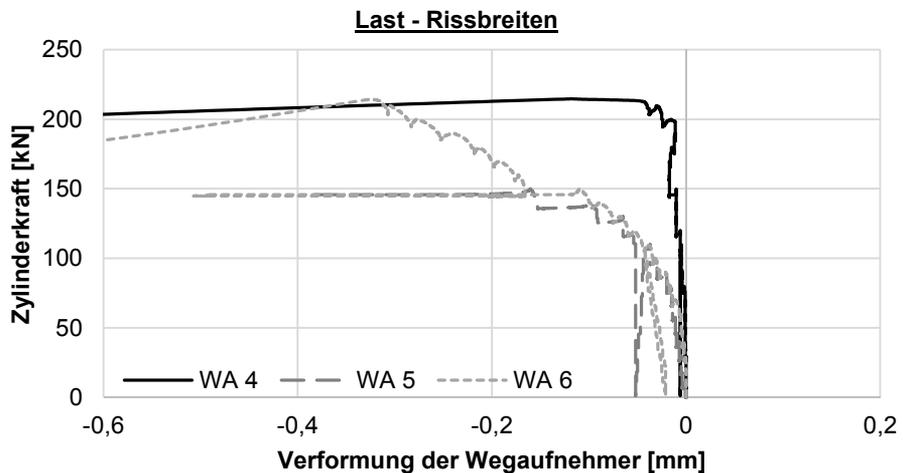
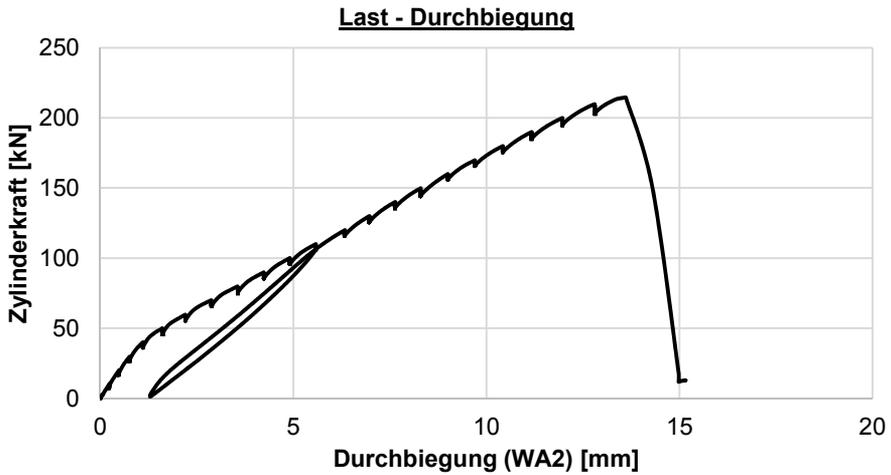
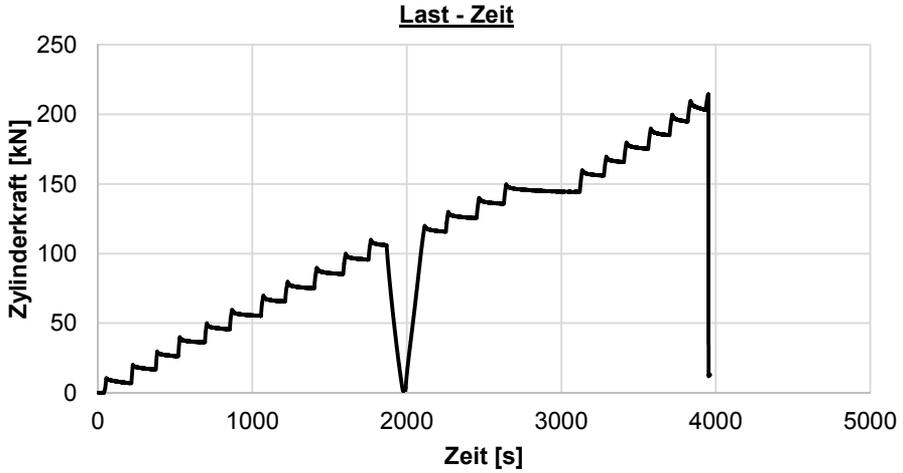
Hinweise zum Rissbild

keine

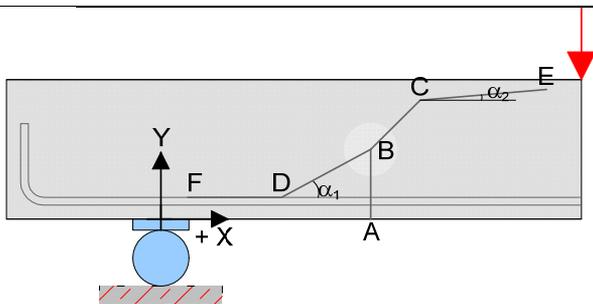


S3_V1 = S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,4--30_V1

Datum	14.10.13	Beginn	17:55	Ende	19:07
Bezeichnung		S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,4--30_V1			
Beton		C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn			
Würfeldruckfestigkeit		49,3 N/mm ²	Betonalter	21 Tage	
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei		110	kN		
Durchbiegung vor Entlastung		5,582	mm		
Durchbiegung nach Entlastung		1,288	mm		
Rissbreite unter Lasteinleitung		0,1	mm		
Rissbreite unter der Öffnung		0,05	mm		
Grenzdurchbiegung		$L / 500 =$	5,45 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung		108	kN		
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235	kN	erreichte Zylinderlast	215	kN
			Durchbiegung	13,6	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
WA5 bei ca. 150kN abgefallen					



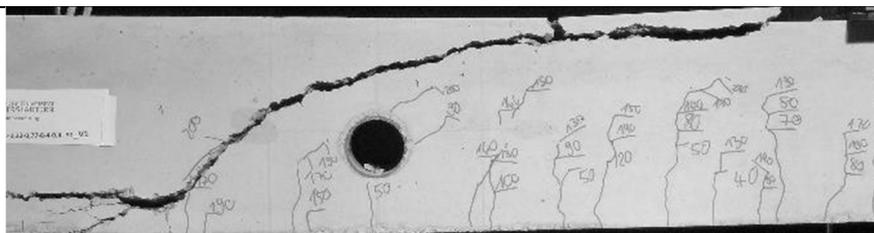
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	23 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	23 cm	6,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	34 cm	18 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	21 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	28 cm
F	Ende des Dübelrisses	-25 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		45 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		13 °

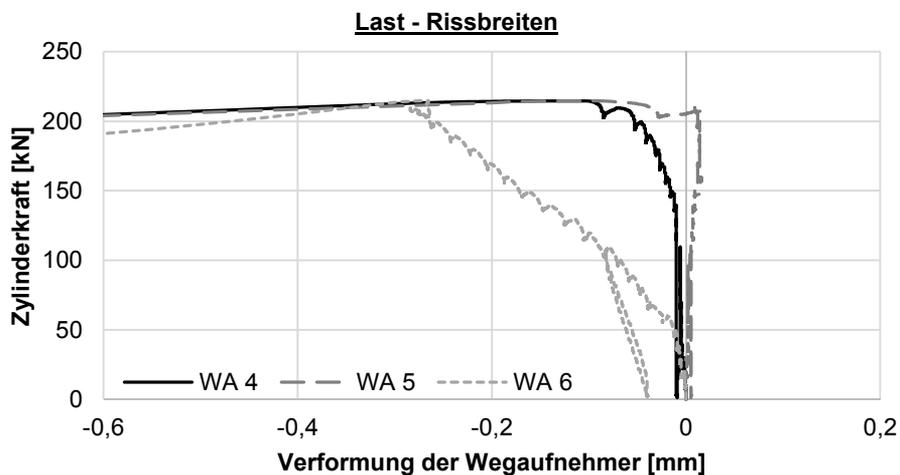
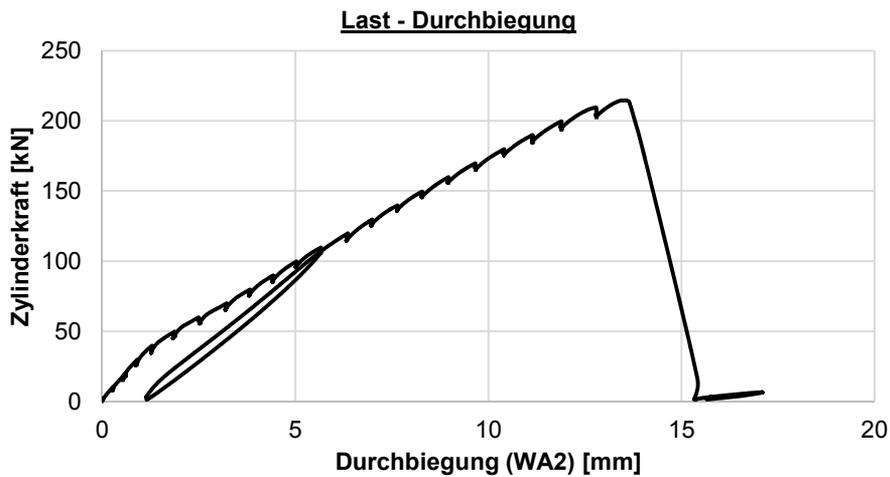
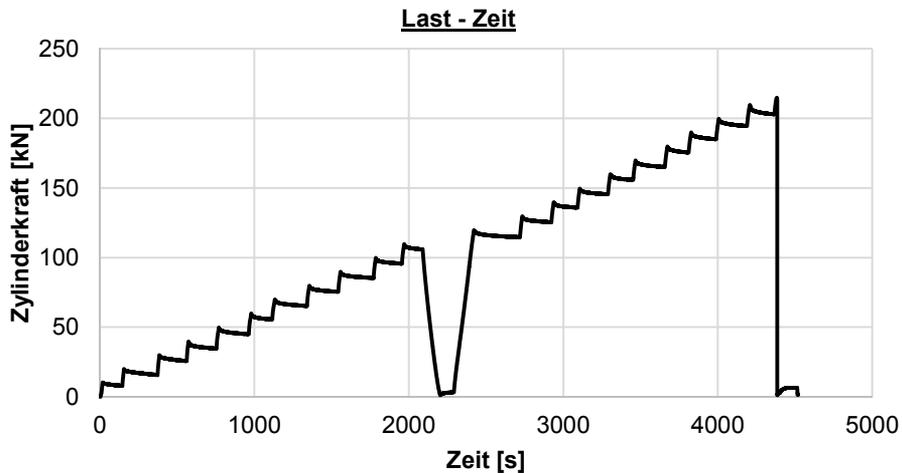
Hinweise zum Rissbild

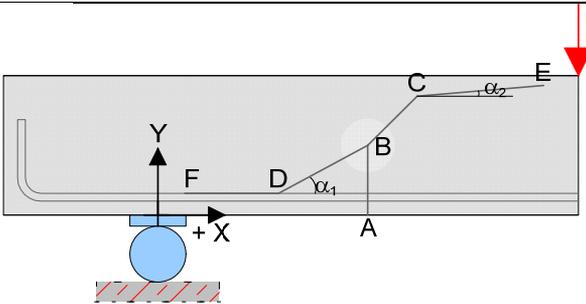
keine



S3_V2 = S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,5--30_V2

Datum	15.10.13	Beginn	08:43	Ende	10:00
Bezeichnung	S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,5--30_V2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	49,3 N/mm ²	Betonalter	22 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
<p>Detail</p> <p>30</p> <p>WA 4 WA 5</p> <p>WA 6</p> <p>WA 1 WA 2 WA 3</p> <p>27,5 61,25 122,5 61,25 327,5 75,00 150,0 75,00 27,5</p>					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	5,665	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	1,147	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,15	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	107	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235	kN	erreichte Zylinderlast	215	kN
			Durchbiegung	13,6	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

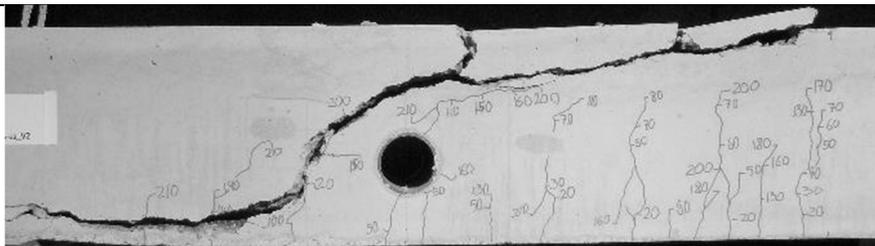


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	44 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	46 cm	8 cm
C	zweite Richtungsänderung	62 cm	22 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	45 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	27,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	-25 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		55 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		18 °

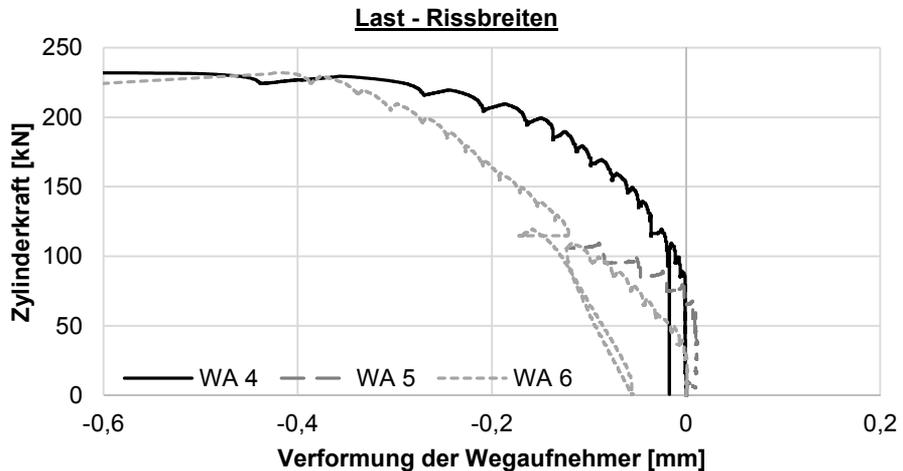
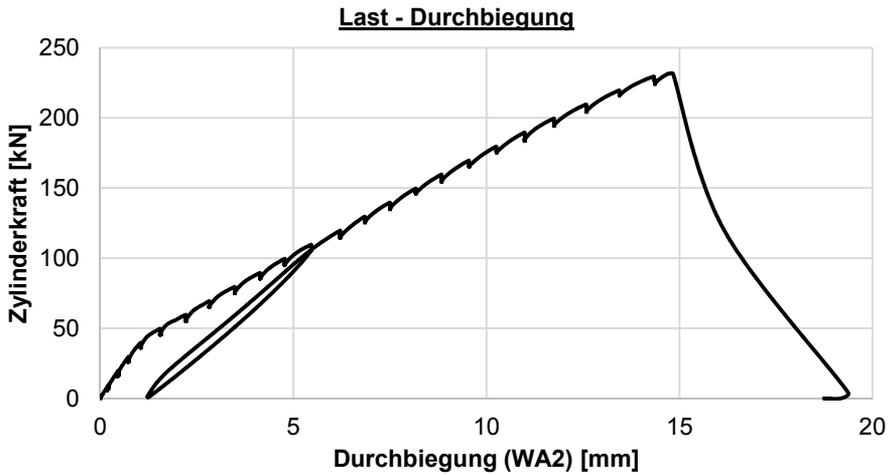
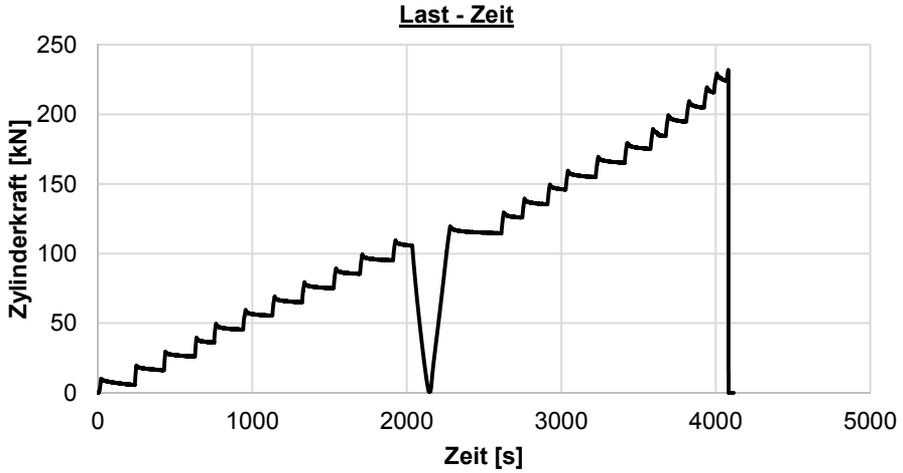
Hinweise zum Rissbild

keine

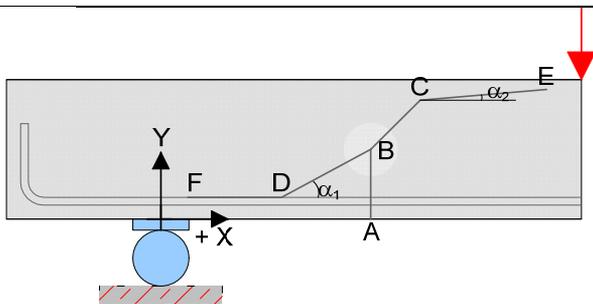


S3_V3 = S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,6--30_V3

Datum	15.10.13	Beginn	15:09	Ende	16:19
Bezeichnung	S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,6--30_V3				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	49,3 N/mm ²	Betonalter	22 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	5,465	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	1,23	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,15	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45		mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	110	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235	kN	erreichte Zylinderlast	231	kN
			Durchbiegung	14,8	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
WA5 bei ca. 120 kN abgefallen					



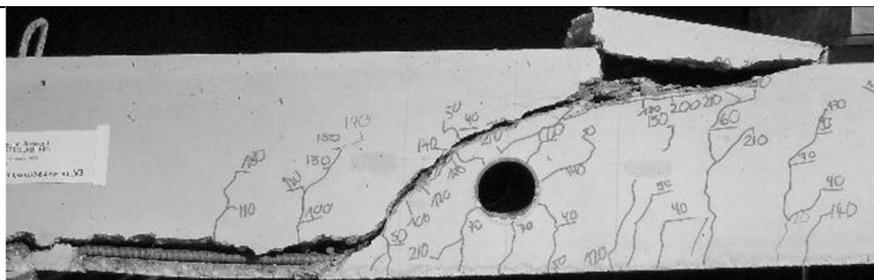
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	57 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	57 cm	7 cm
C	zweite Richtungsänderung	75 cm	21 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	55 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	27,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	-25 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		45 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		30 °

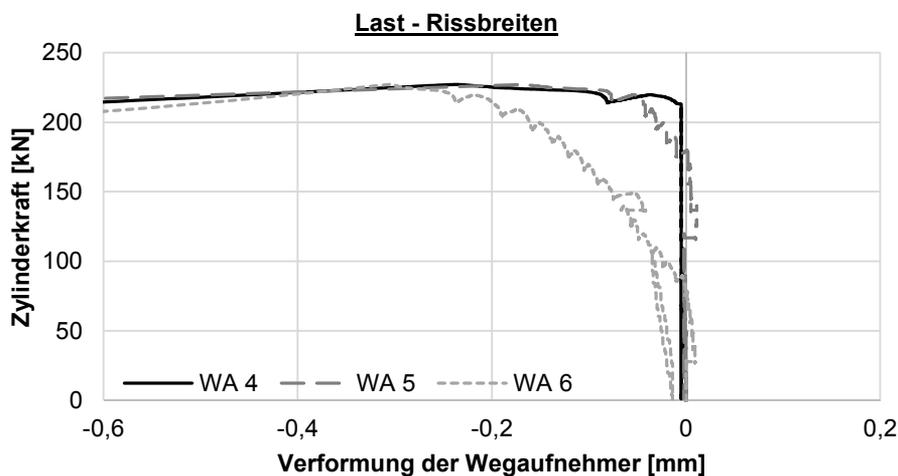
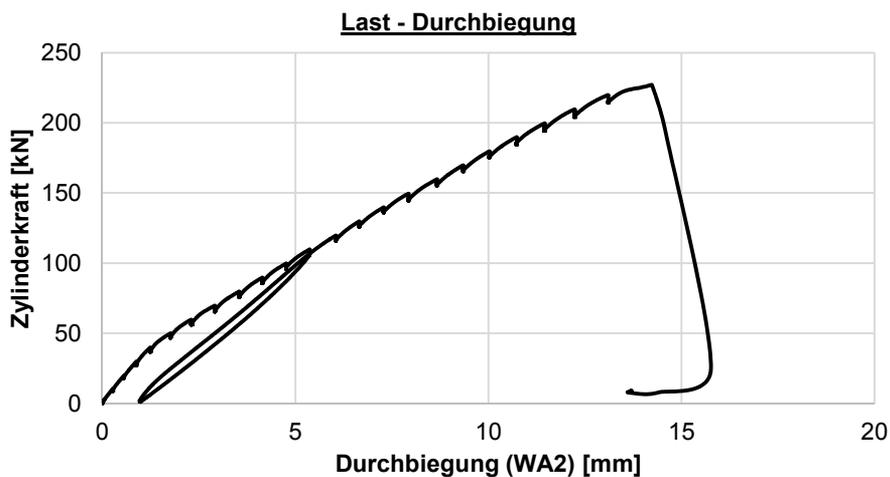
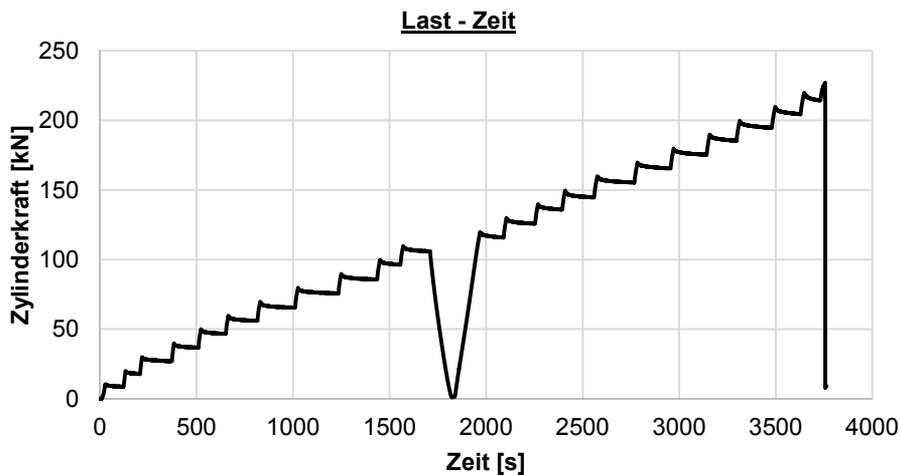
Hinweise zum Rissbild

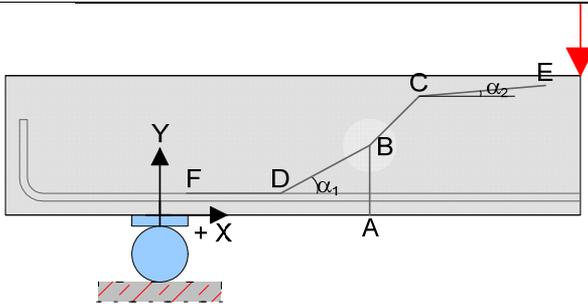
keine



S3_V4 = S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,4-0_V4

Datum	15.10.13	Beginn	16:42	Ende	18:00
Bezeichnung	S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,4-0_V4				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	49,3 N/mm ²	Betonalter	22 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	5,372	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,985	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,15	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	110	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235	kN	erreichte Zylinderlast	227	kN
			Durchbiegung	14,25	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

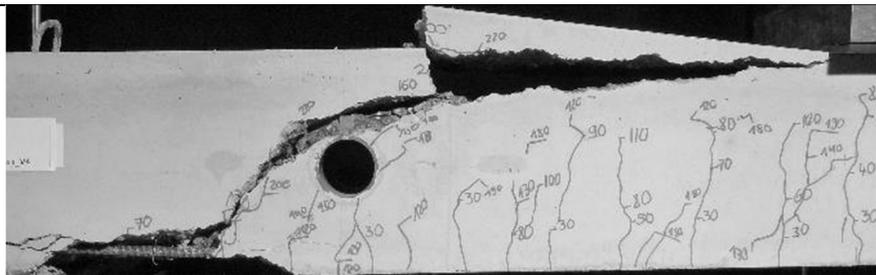


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	30 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	30 cm	7,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	42 cm	18 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	30 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	28 cm
F	Ende des Dübelrisses	-20 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		44 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		12 °

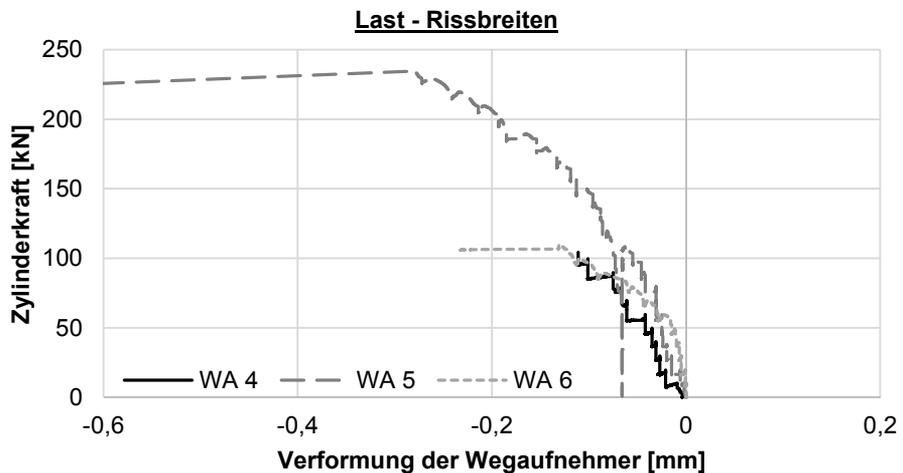
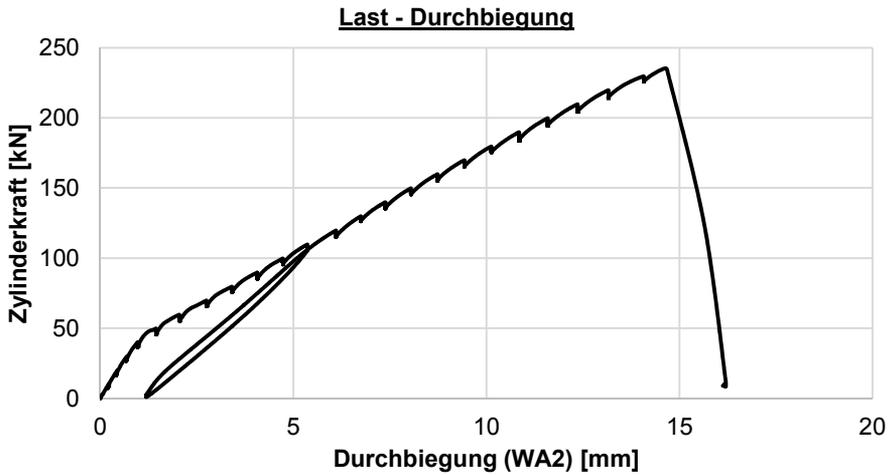
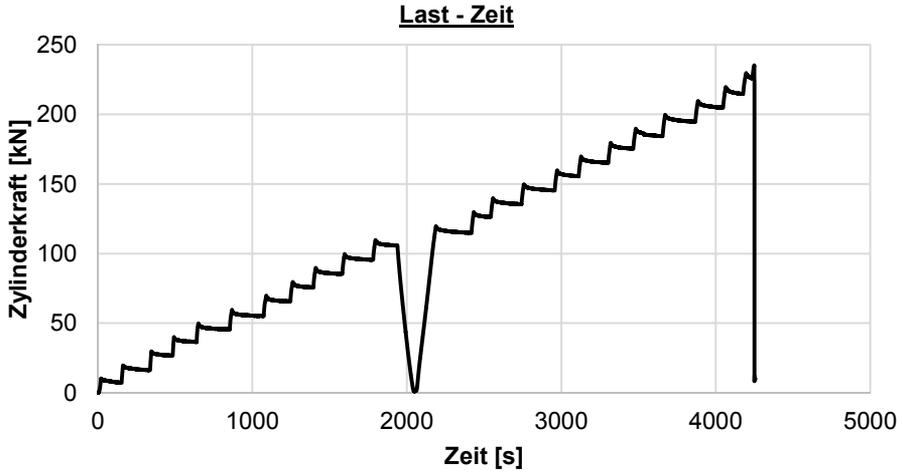
Hinweise zum Rissbild

keine

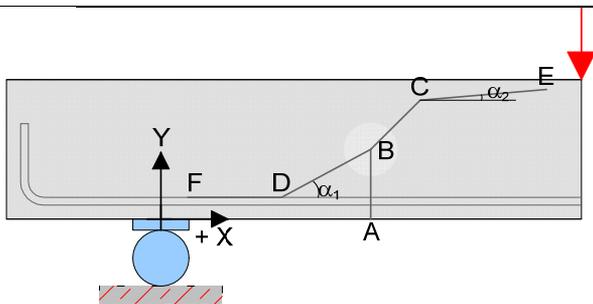


S3_V5 = S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,6-0_V5

Datum	16.10.13	Beginn	13:22	Ende	14:36
Bezeichnung	S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,6-0_V5				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	49,3 N/mm ²	Betonalter	23 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	5,366	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	1,193	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,15	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	110	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235	kN	erreichte Zylinderlast	235	kN
			Durchbiegung	14,7	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
WA4 und WA6 abgefallen					



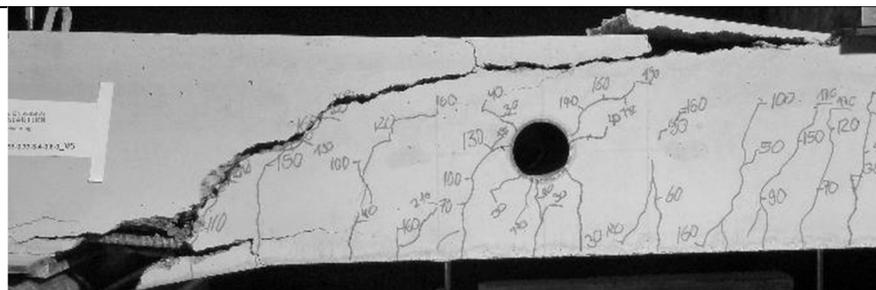
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	24 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	28 cm	9 cm
C	zweite Richtungsänderung	44 cm	21 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	25 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	28,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	-16 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		45 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		13 °

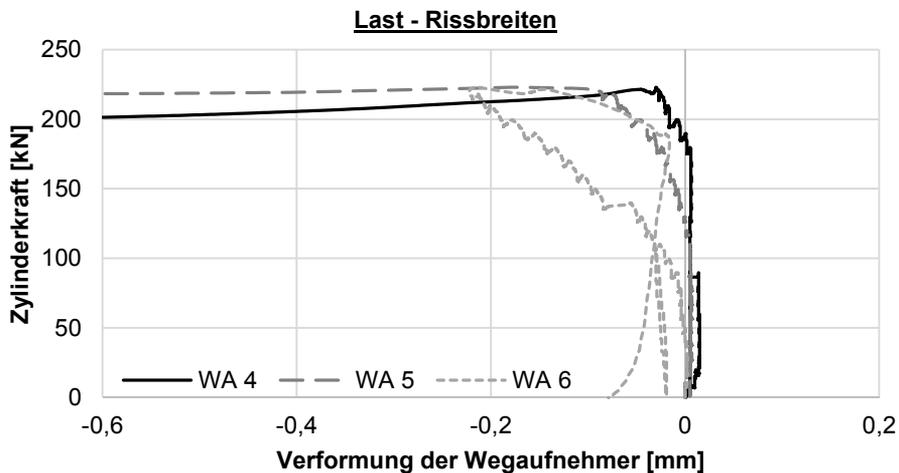
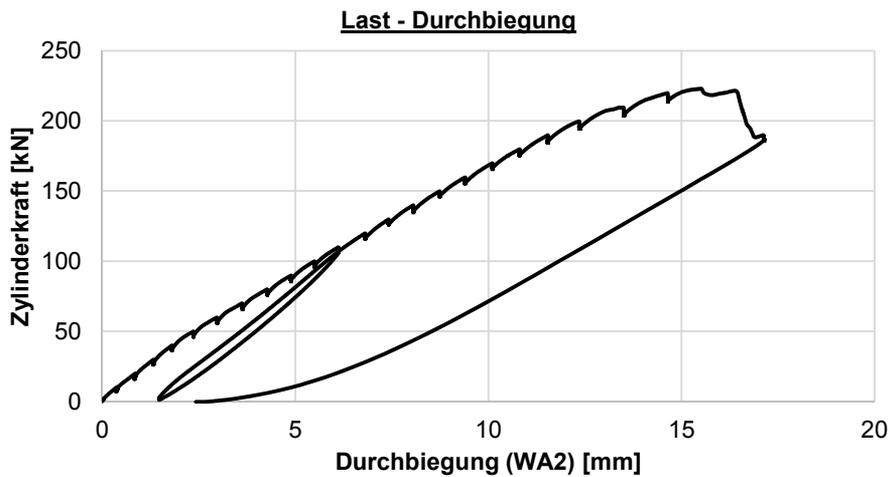
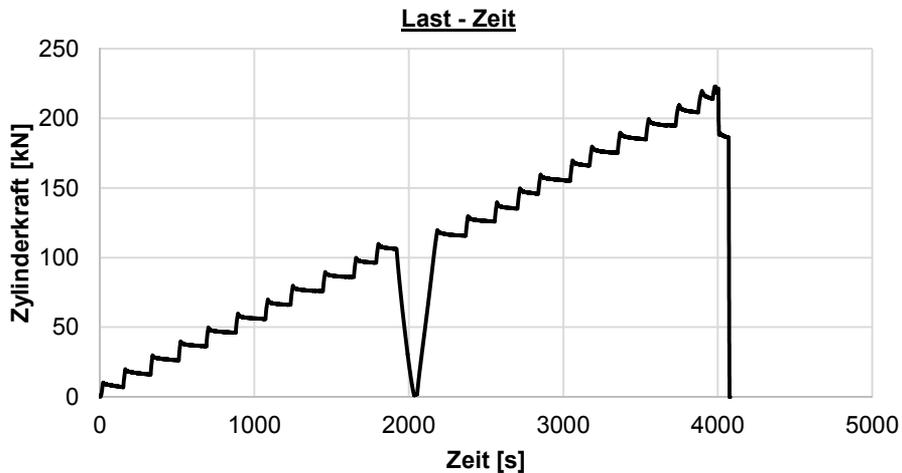
Hinweise zum Rissbild

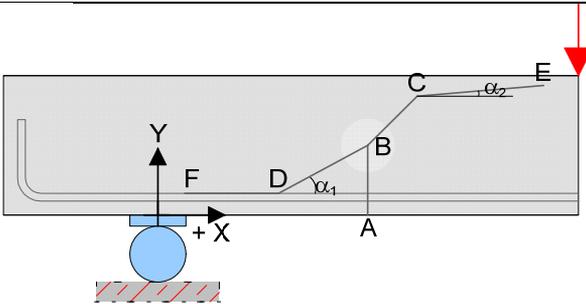
keine



S3_V6 = S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,4-30_V6

Datum	16.10.13	Beginn	14:58	Ende	16:40
Bezeichnung	S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,4-30_V6				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	49,3 N/mm ²	Betonalter	23 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	6,118	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	1,467	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,15	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45		mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	100	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235	kN	erreichte Zylinderlast	223	kN
			Durchbiegung	15,5	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

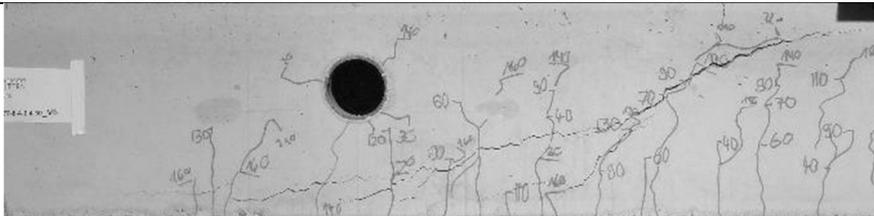


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	82 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	88 cm	14 cm
C	zweite Richtungsänderung	99 cm	21 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	51 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	26,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	8 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		10 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		30 °

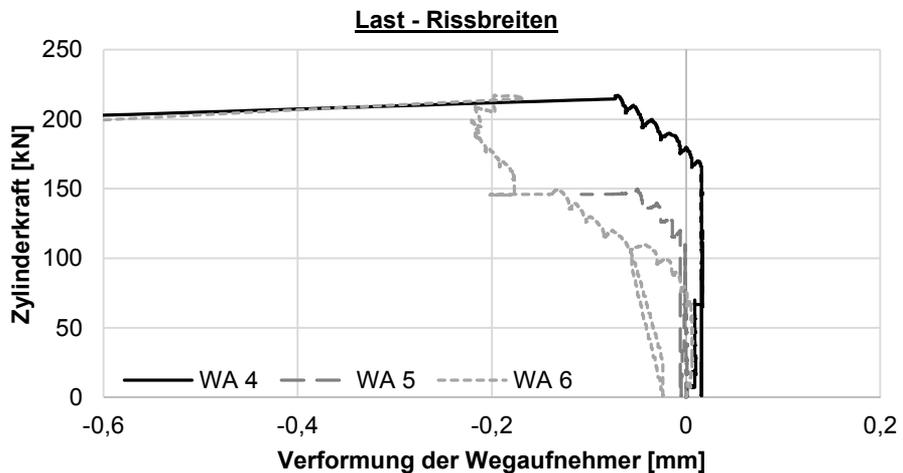
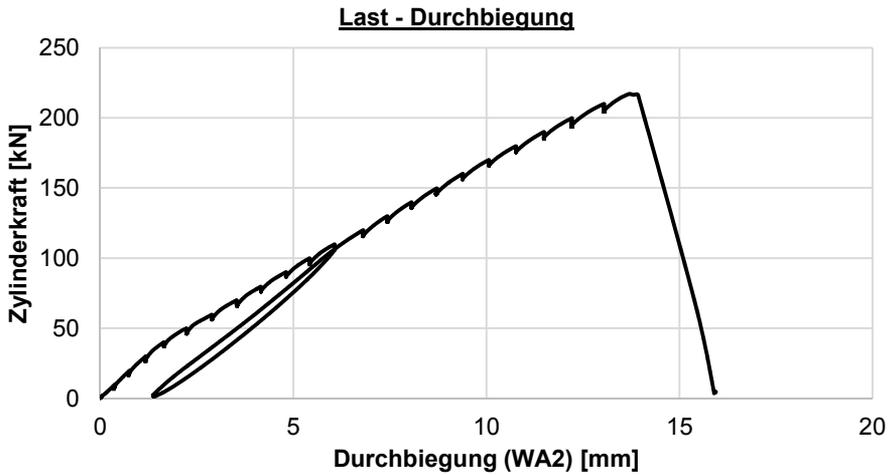
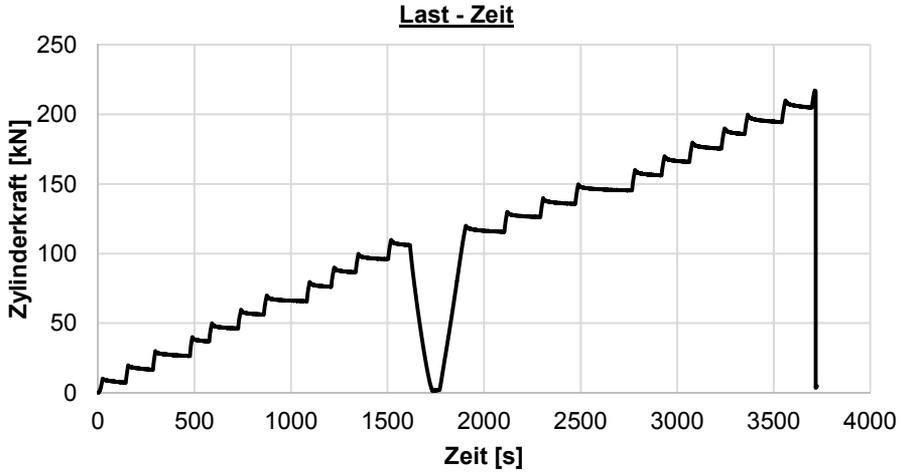
Hinweise zum Rissbild

keine

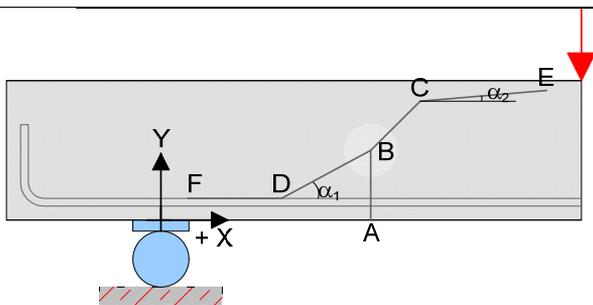


S3_V7 = S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,5-30_V7

Datum	16.10.13	Beginn	10:25	Ende	12:00
Bezeichnung	S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,5-30_V7				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	49,3 N/mm ²	Betonalter	23 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
<p>Detail</p> <p>30</p> <p>WA 4 WA 5</p> <p>WA 6</p> <p>WA 1 WA 2 WA 3</p> <p>27.5 61.25 122.5 61.25 327.5 75.00 150.0 75.00 27.5</p>					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	6,070	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	1,368	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	100	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235	kN	erreichte Zylinderlast	217	kN
			Durchbiegung	13,9	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
WA5 abgefallen					



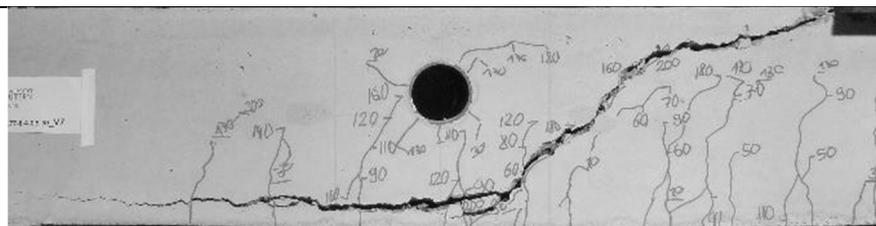
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	73 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	73 cm	7,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	96 cm	24 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	71 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	27 cm
F	Ende des Dübelrisses	-3 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse	43 °	
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse	°	

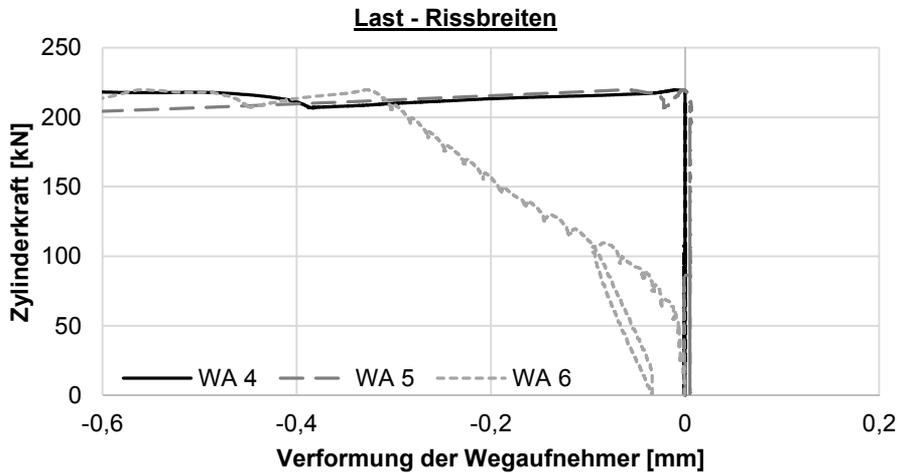
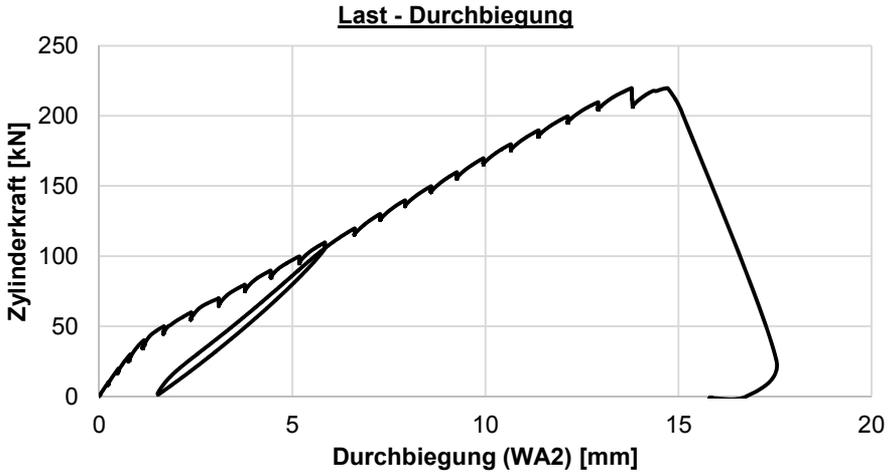
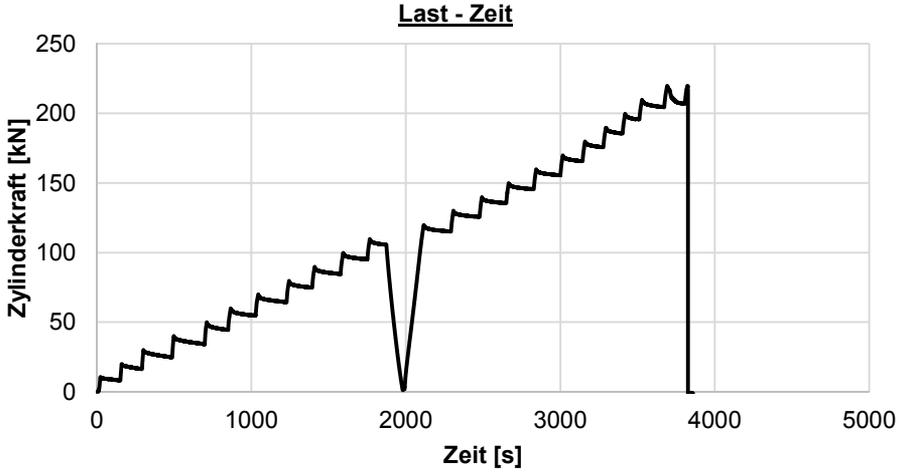
Hinweise zum Rissbild

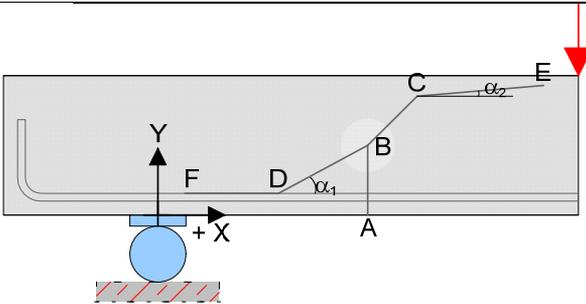
keine



S3_V8 = S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,6-30_V8

Datum	16.10.13	Beginn	08:56	Ende	10:05
Bezeichnung	S3_C30/37-30-0,33-0,89-8-4-0,6-30_V8				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	49,3 N/mm ²	Betonalter	23 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	5,848	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	1,519	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45		mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	104	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235	kN	erreichte Zylinderlast	220	kN
			Durchbiegung	14,75	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

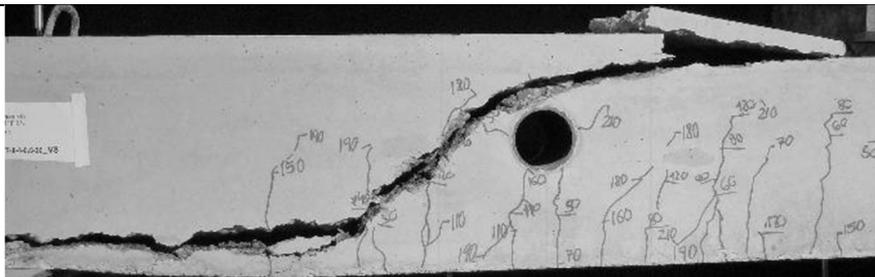


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	58 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	58 cm	13 cm
C	zweite Richtungsänderung	67 cm	22 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	47 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	28 cm
F	Ende des Dübelrisses	-25 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		44 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		12 °

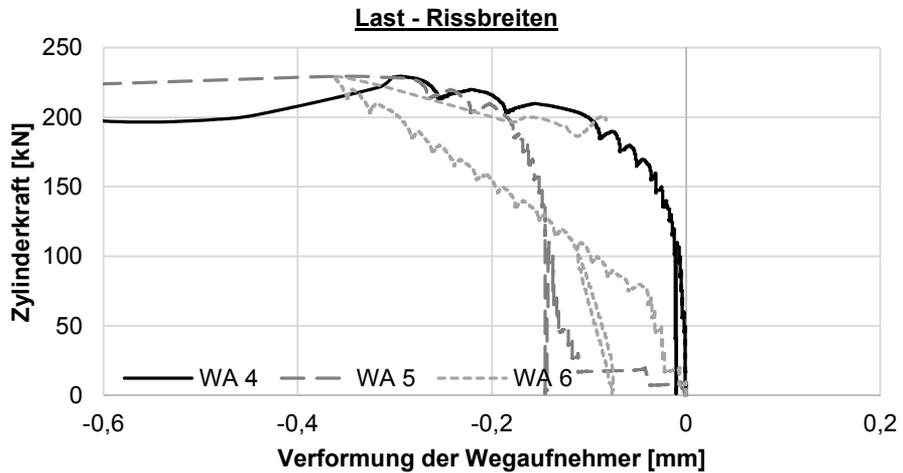
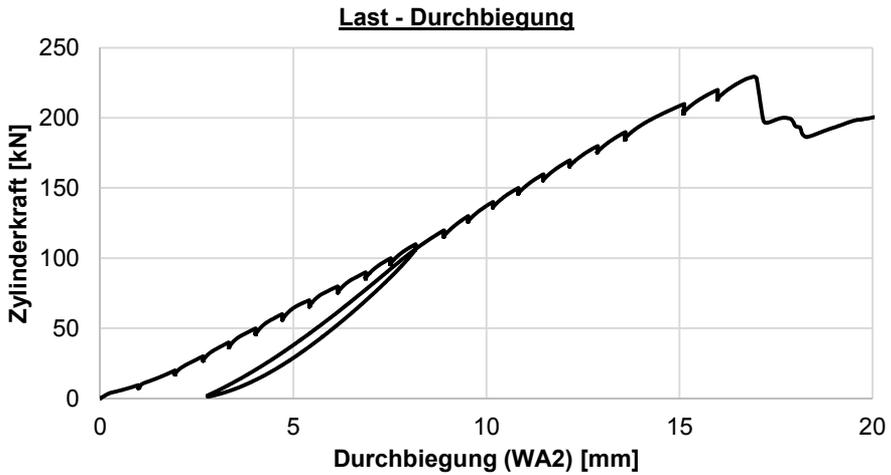
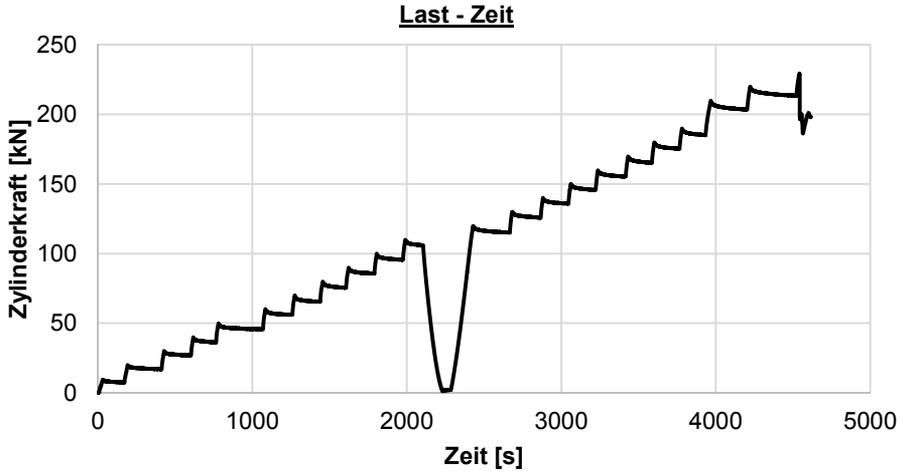
Hinweise zum Rissbild

keine

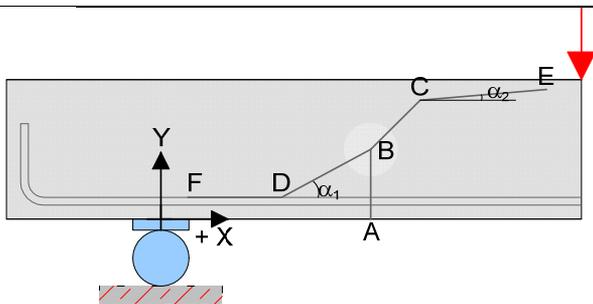


S4_V1 = S4_C30/37-30-0,33-0,87-6-7_V1

Datum	10.10.13	Beginn	16:23	Ende	18:00
Bezeichnung	S4_C30/37-30-0,33-0,87-6-7_V1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	55,3 N/mm ²	Betonalter	22 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
Riss in der Druckzone der Lasteinleitung durch vorherigen Versuch → evtl. weicher					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	8,167	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	2,783	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	70	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235	kN	erreichte Zylinderlast	228	kN
			Durchbiegung	18,8	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
Fehler in Messung bei WA5					



Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	66 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	66 cm	3 cm
C	zweite Richtungsänderung	98 cm	22 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	66 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	26,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	3,5 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse	38 °	
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse	°	

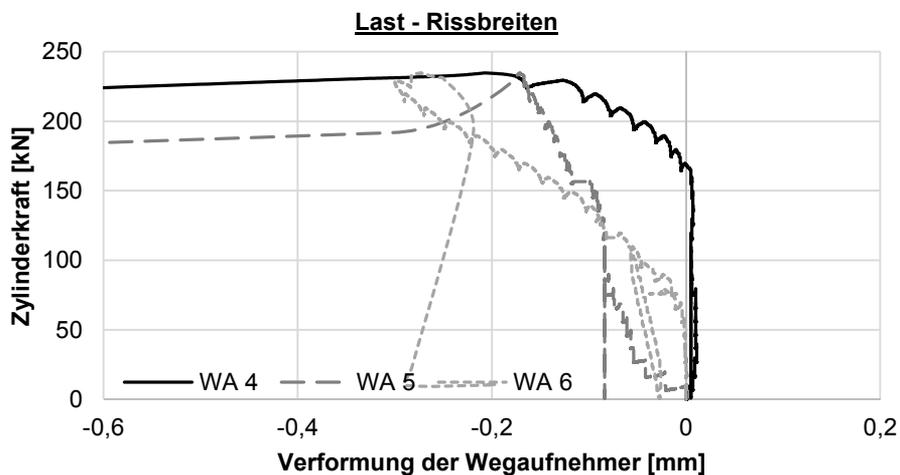
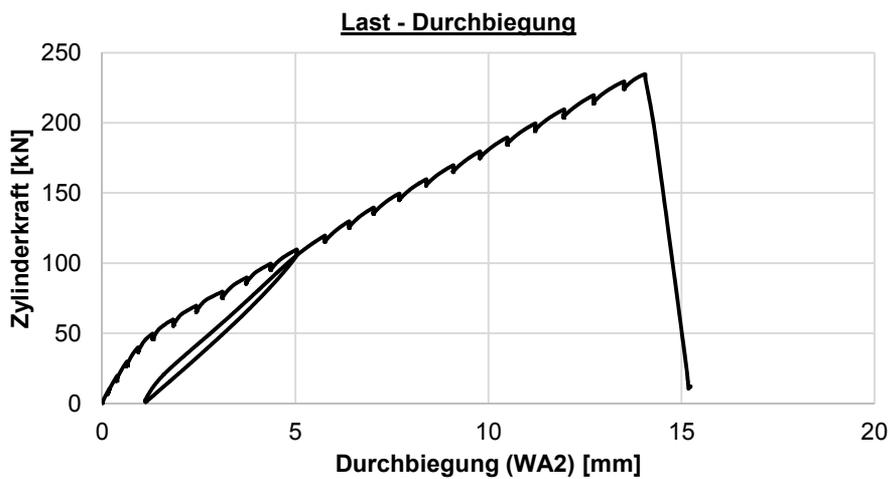
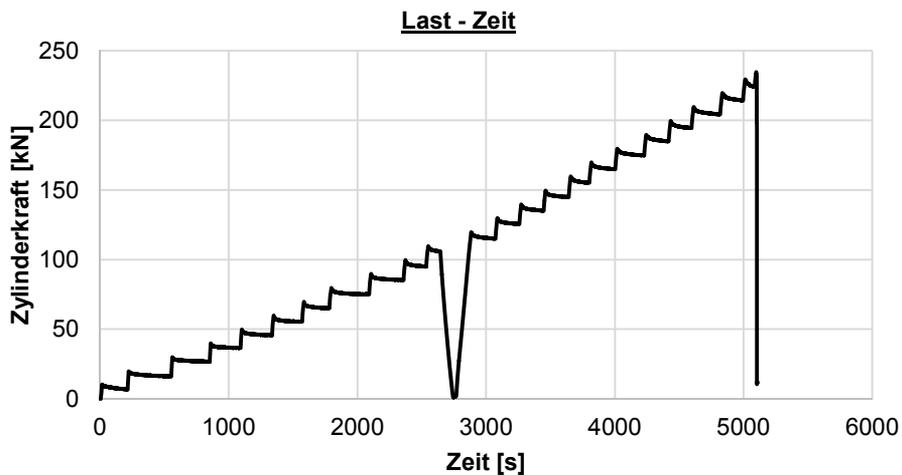
Hinweise zum Rissbild

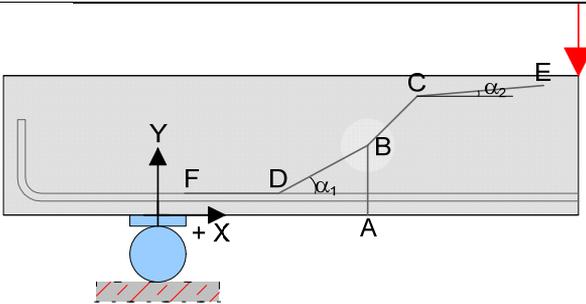
keine



S4_V2 = S4_C30/37-30-0,33-0,87-6-7_V2

Datum	11.10.13	Beginn	13:20	Ende	14:48
Bezeichnung	S4_C30/37-30-0,33-0,87-6-7_V2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	55,3 N/mm ²	Betonalter	23 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	5,042	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	1,113	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	L / 500 =		5,45 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			115 kN		
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235	kN	erreichte Zylinderlast	235	kN
			Durchbiegung	14,1	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

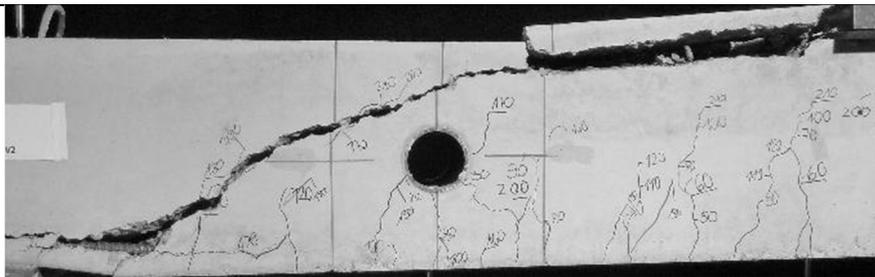


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	27 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	29 cm	8 cm
C	zweite Richtungsänderung	65,5 cm	26,5 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	23 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	28 cm
F	Ende des Dübelrisses	-24 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse	17 °	
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse	°	

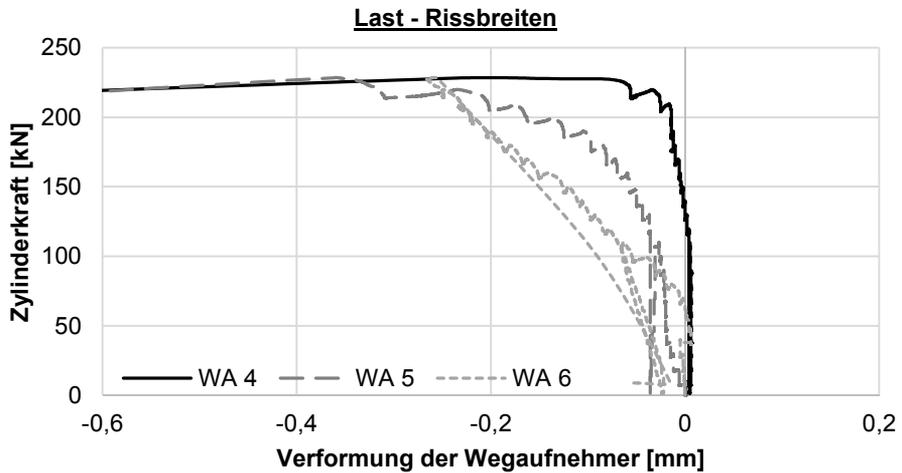
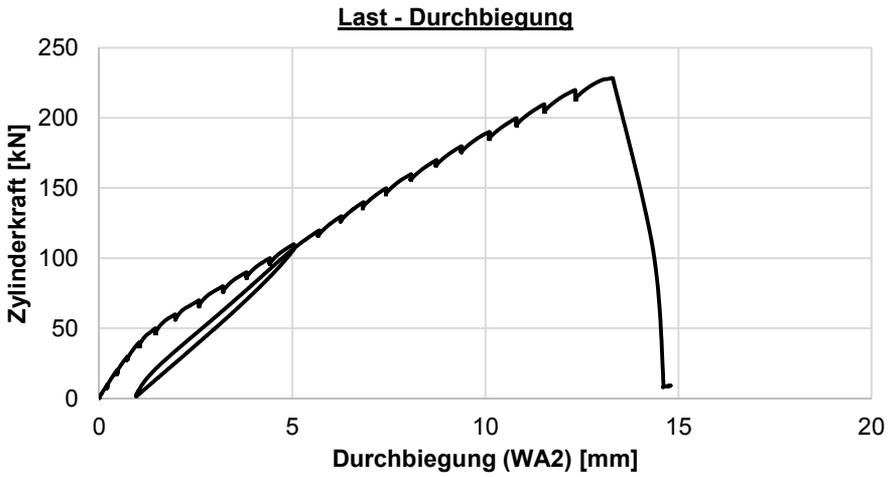
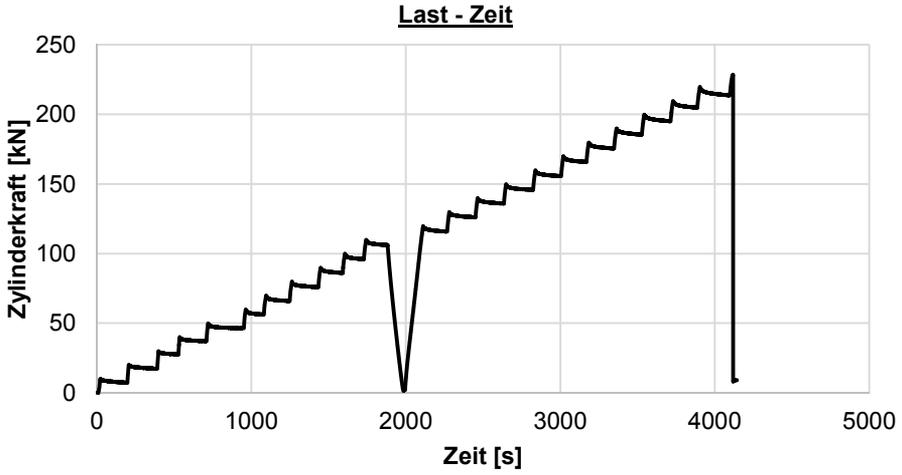
Hinweise zum Rissbild

keine

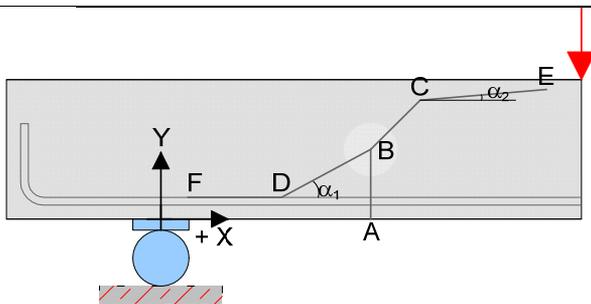


S4_V3 = S4_C30/37-30-0,33-0,87-6-7_V3

Datum	11.10.13	Beginn	15:15	Ende	16:25
Bezeichnung	S4_C30/37-30-0,33-0,87-6-7_V3				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	55,3 N/mm ²	Betonalter	23 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
<p>Detail</p> <p>30</p> <p>WA 4 WA 5</p> <p>WA 6</p> <p>WA 1 WA 2 WA 3</p> <p>27.5 61.25 122.5 61.25 327.5 75.00 150.0 75.00 27.5</p>					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	5,042	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,957	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,15	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	115	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235	kN	erreichte Zylinderlast	228	kN
			Durchbiegung	13,3	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



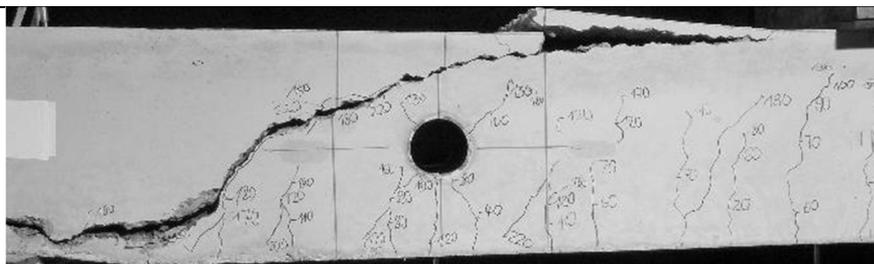
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	31,5 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	31,5 cm	9 cm
C	zweite Richtungsänderung	37 cm	17 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	25 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	28,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	-25 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		55 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		19 °

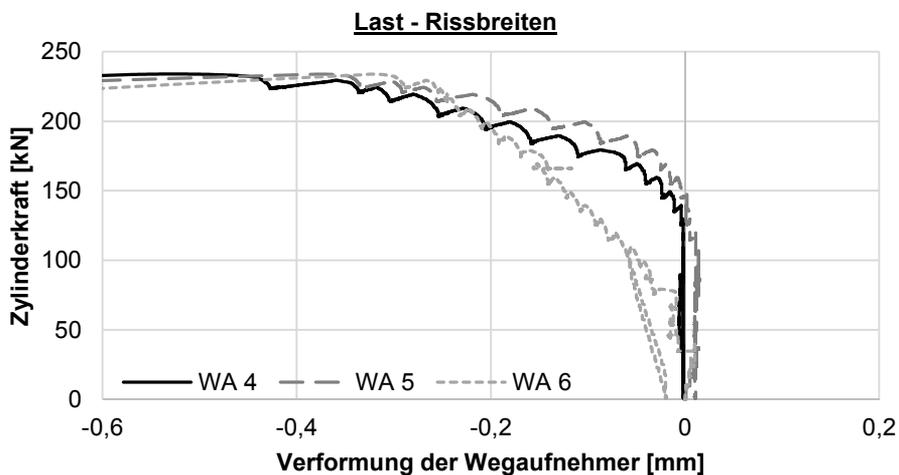
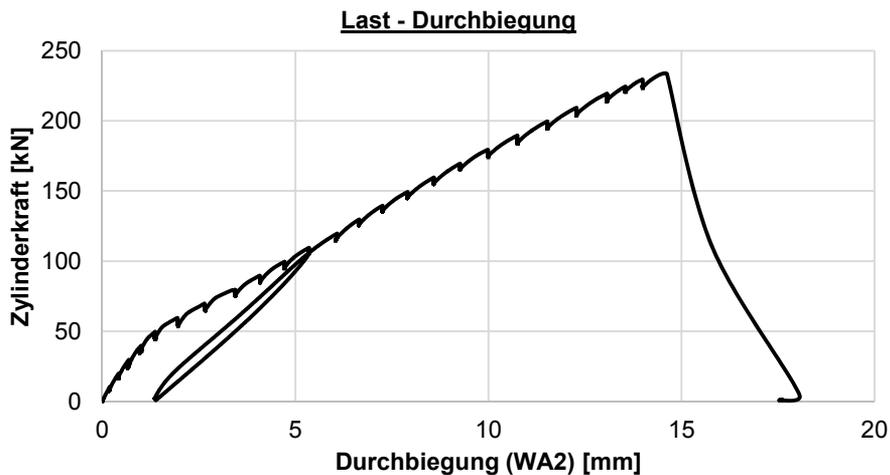
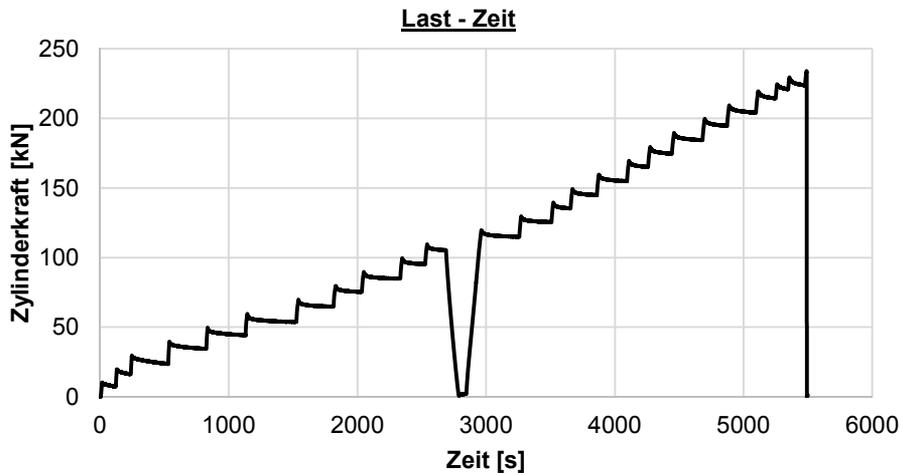
Hinweise zum Rissbild

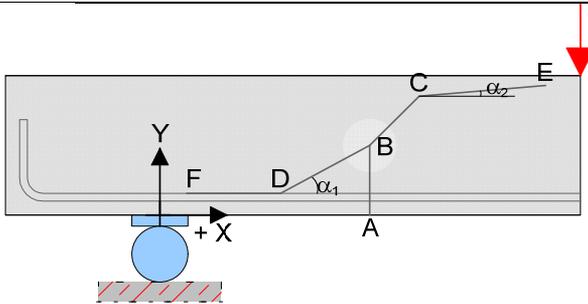
keine



S4_V4 = S4_C30/37-30-0,33-1,04-10-3_V4

Datum	11.10.13	Beginn	08:05	Ende	09:40
Bezeichnung	S4_C30/37-30-0,33-1,04-10-3_V4				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	55,3 N/mm ²	Betonalter	23 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	5,36	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	1,381	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,15	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	L / 500 =		5,45 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			108 kN		
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235	kN		erreichte Zylinderlast	232 kN
			Durchbiegung	17,617 mm	
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

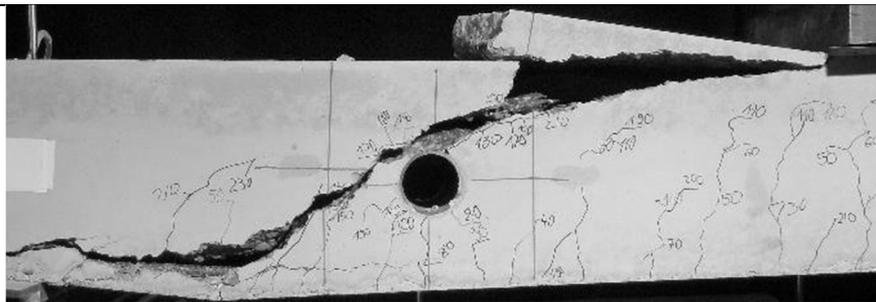


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	44 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	48 cm	12 cm
C	zweite Richtungsänderung	70 cm	23 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	38 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	28 cm
F	Ende des Dübelrisses	-25 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		33 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		°

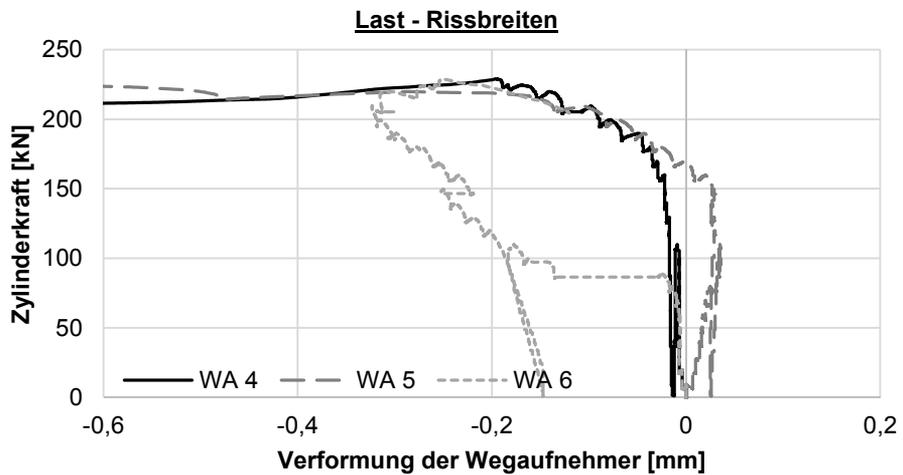
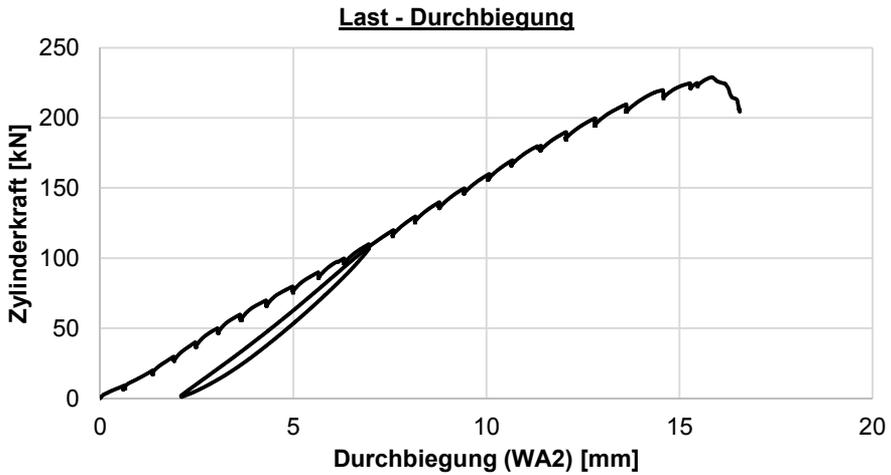
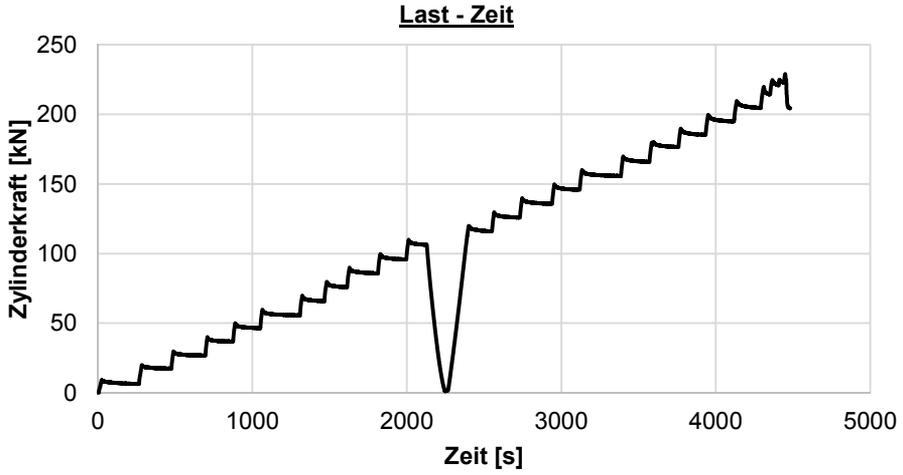
Hinweise zum Rissbild

keine

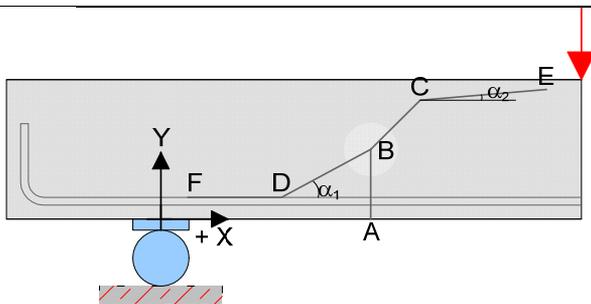


S4_V5 = S4_C30/37-30-0,33-1,04-10-3_V5

Datum	11.10.13	Beginn	10:16	Ende	11:32
Bezeichnung	S4_C30/37-30-0,33-1,04-10-3_V5				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	55,3 N/mm ²	Betonalter	23 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
Riss in der Druckzone der Lasteinleitung durch vorherigen Versuch → evtl. weicher					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	6,96	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	2,098	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,15	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,025	mm			
Grenzdurchbiegung	L / 500 =		5,45 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			87	kN	
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235	kN		erreichte Zylinderlast	230 kN
			Durchbiegung	16,562 mm	
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	75 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	79 cm	8 cm
C	zweite Richtungsänderung	99 cm	21 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	68 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	26,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	28 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		22 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		39 °

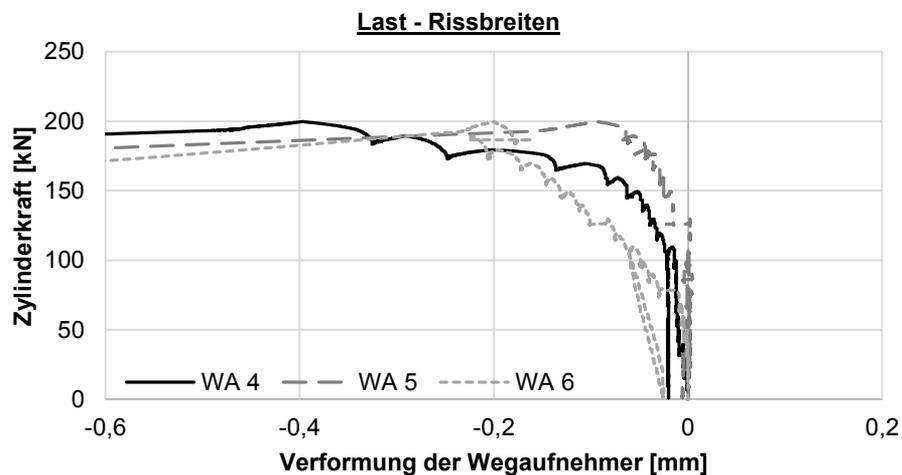
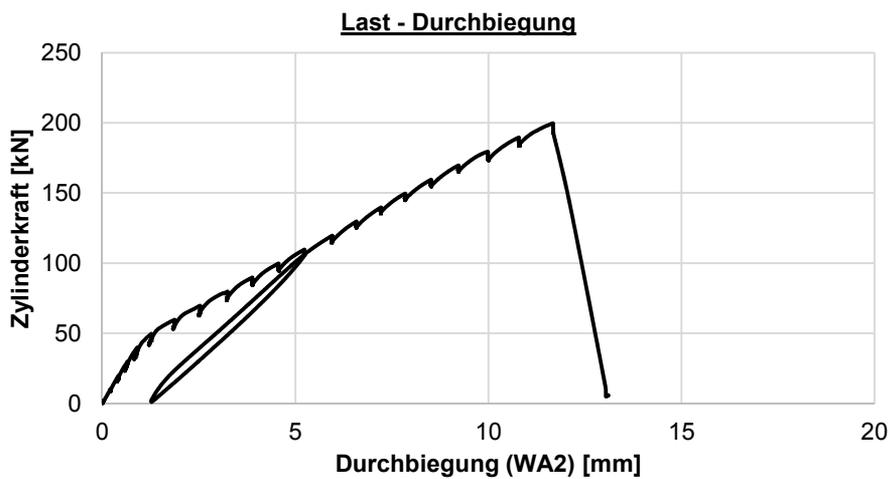
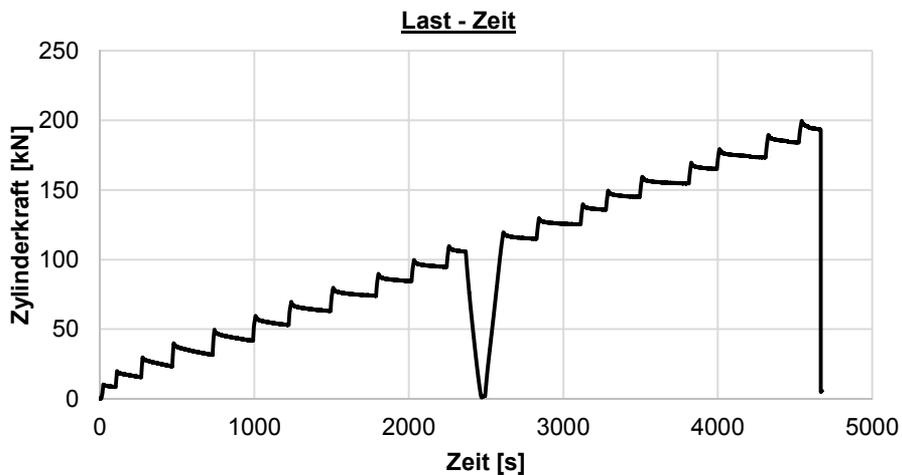
Hinweise zum Rissbild

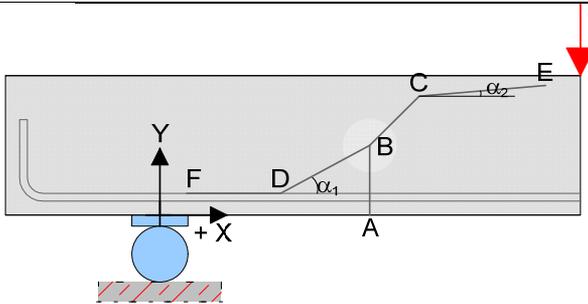
keine



S4_V6 = S4_C30/37-30-0,33-1,04-10-3_V6

Datum	14.10.13	Beginn	9:15	Ende	10:40
Bezeichnung	S4_C30/37-30-0,33-1,04-10-3_V6				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	55,3 N/mm ²	Betonalter	26 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	5,239	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	1,272	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,025	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	110	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235	kN	erreichte Zylinderlast	200	kN
			Durchbiegung	11,70	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

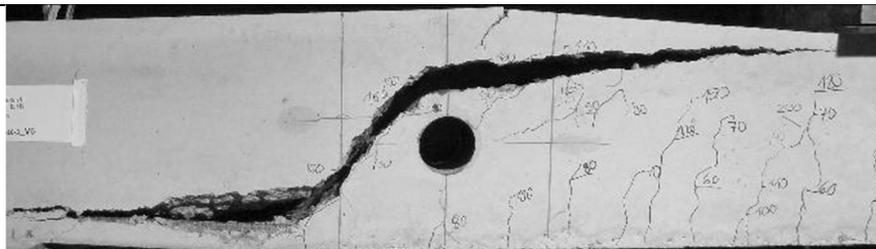


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	41 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	41 cm	4,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	57 cm	21 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	41 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	27,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	-25 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		55 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		°

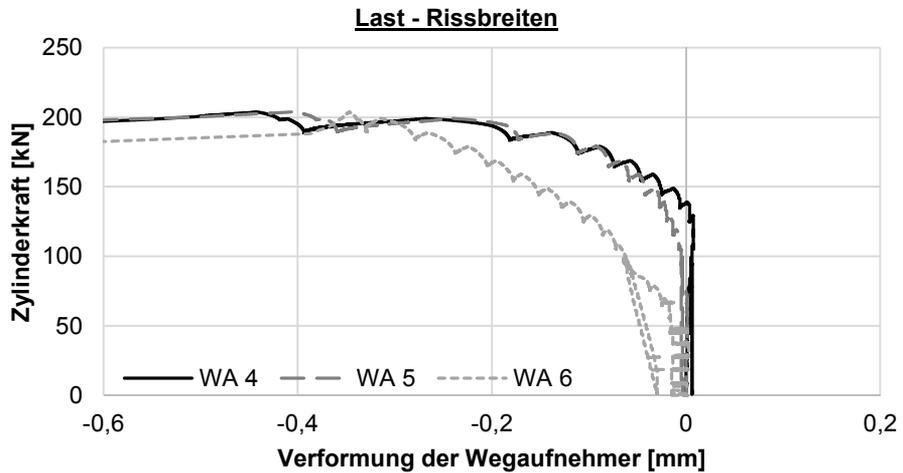
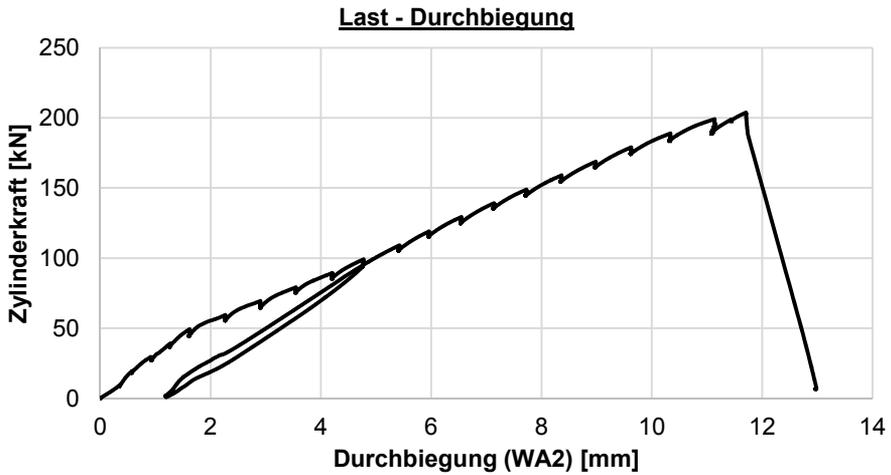
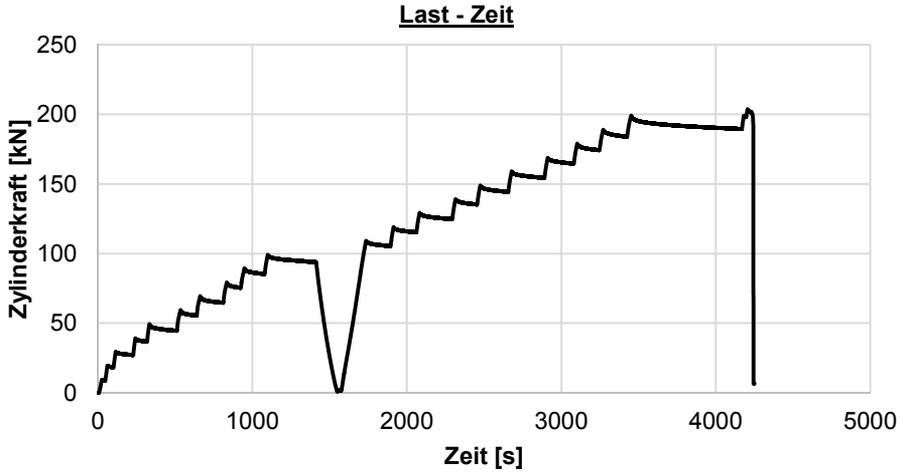
Hinweise zum Rissbild

keine

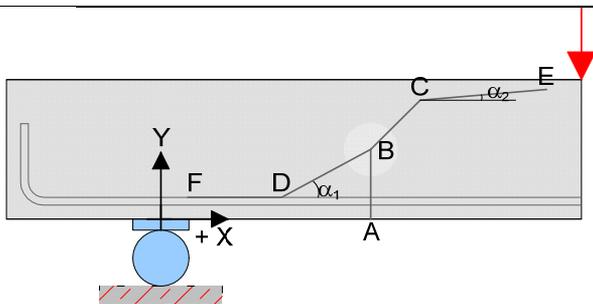


S5_V1-1 = S5_C30/37-30-0,28-0,37-6-3_V1-1

Datum	18.07.14	Beginn	07:55	Ende	09:10
Bezeichnung	S5_C30/37-30-0,28-0,37-6-3_V1-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	54,6 N/mm ²	Betonalter	22 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	100	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	4,775	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	1,191	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45		mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	110	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	215	kN	erreichte Zylinderlast	205	kN
			Durchbiegung	12,98	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



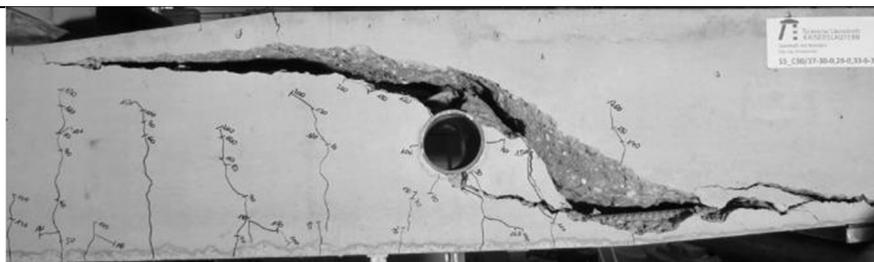
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	36 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	43 cm	5,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	48 cm	16 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	40 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	27,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	1,5 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		45 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		30 °

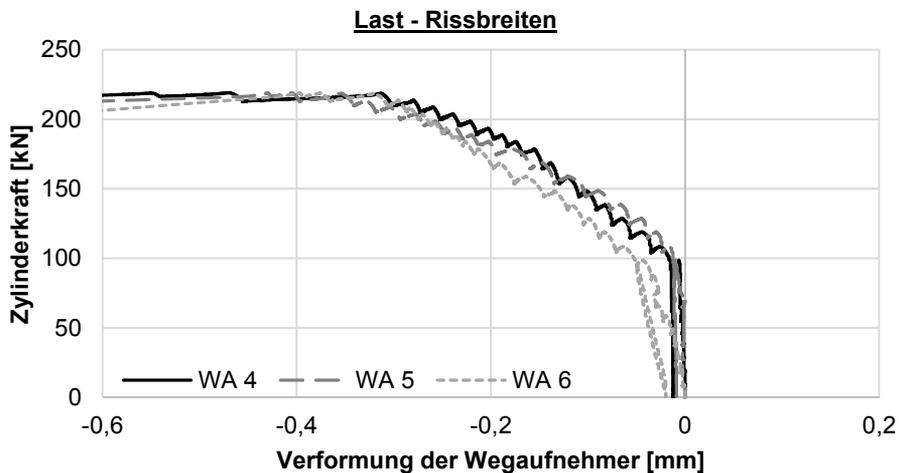
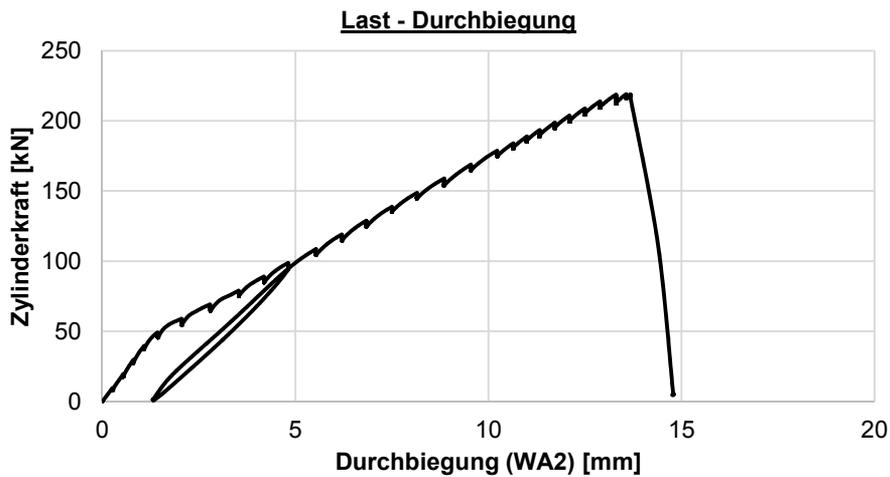
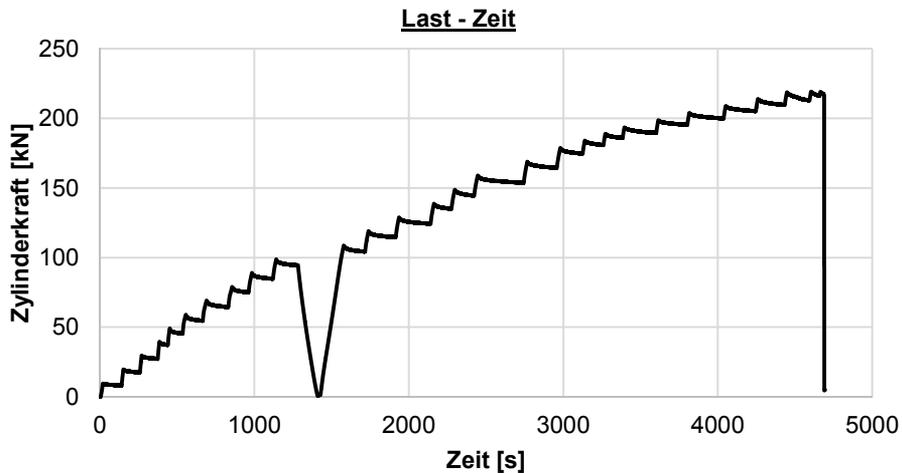
Hinweise zum Rissbild

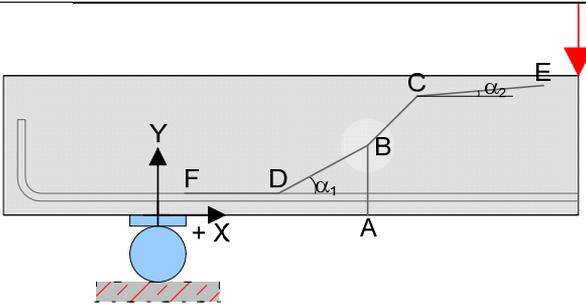
keine



S5_V1-2 = S5_C30/37-30-0,28-0,50-6-4_V1-2

Datum	17.07.14	Beginn	17:15	Ende	18:35
Bezeichnung	S5_C30/37-30-0,28-0,50-6-4_V1-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	54,6 N/mm ²	Betonalter	21 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	100	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	4,818	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	1,316	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45		mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	105		kN		
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	215	kN	erreichte Zylinderlast	220	kN
			Durchbiegung	13,7	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

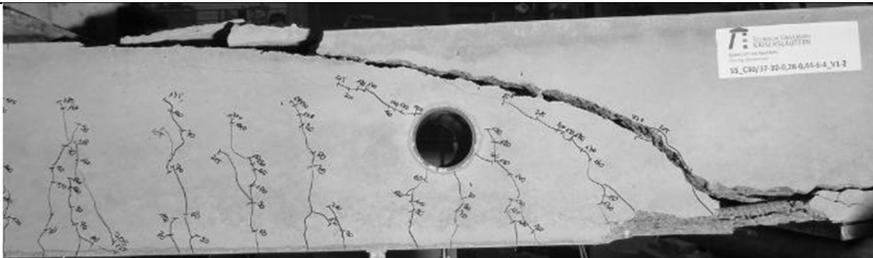


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	23 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	23 cm	4,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	30 cm	14,5 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	22 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	29 cm
F	Ende des Dübelrisses	-25 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		40 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		18 °

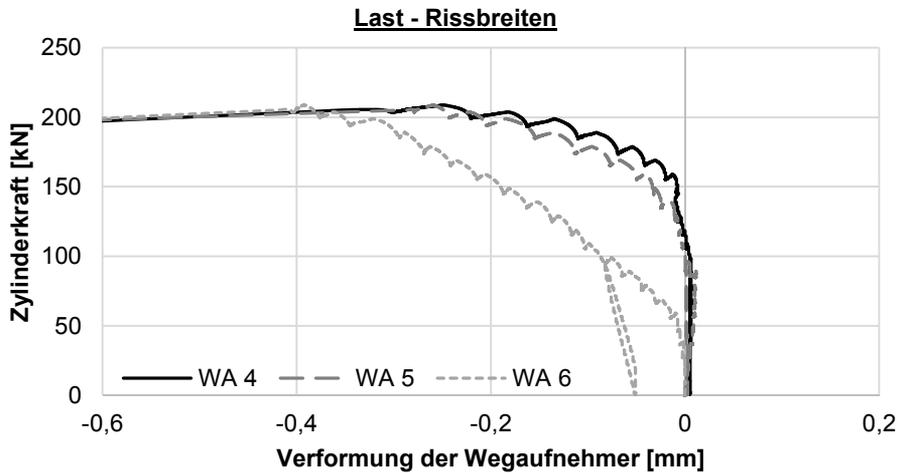
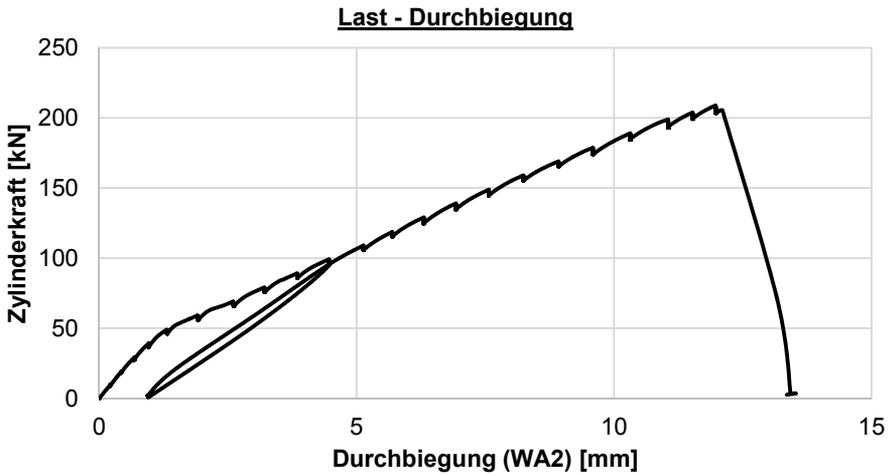
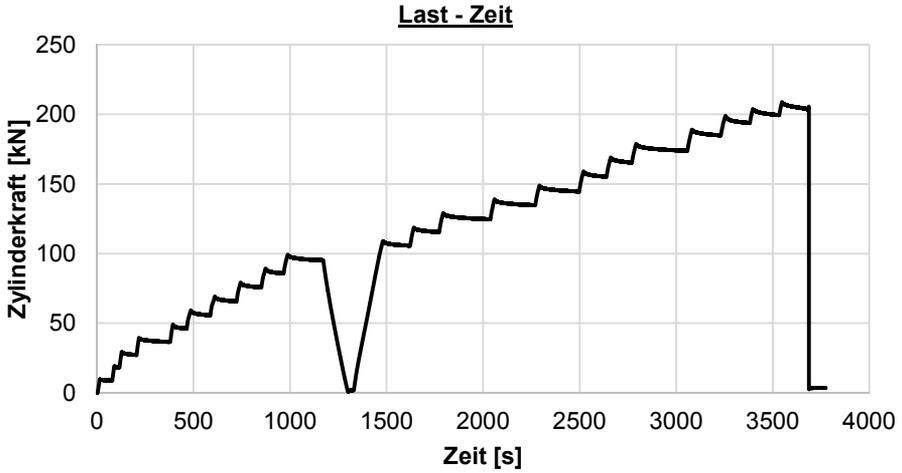
Hinweise zum Rissbild

keine

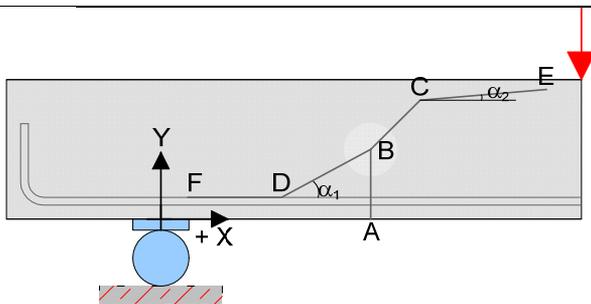


S5_V2-1 = S5_C30/37-30-0,28-0,62-6-5_V2-1

Datum	17.07.14	Beginn	11:35	Ende	12:40
Bezeichnung	S5_C30/37-30-0,28-0,62-6-5_V2-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	54,6 N/mm ²	Betonalter	21 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	100	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	4,468	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,944	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45		mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			115	kN	
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	215	kN	erreichte Zylinderlast	210	kN
			Durchbiegung	12,0	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	37 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	40 cm	9,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	46 cm	16 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	32 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	28 cm
F	Ende des Dübelrisses	-25 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		45 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		26 °

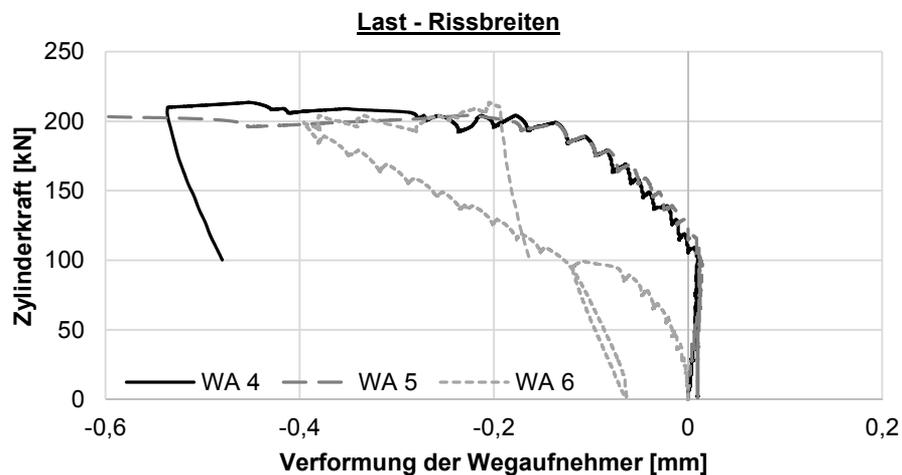
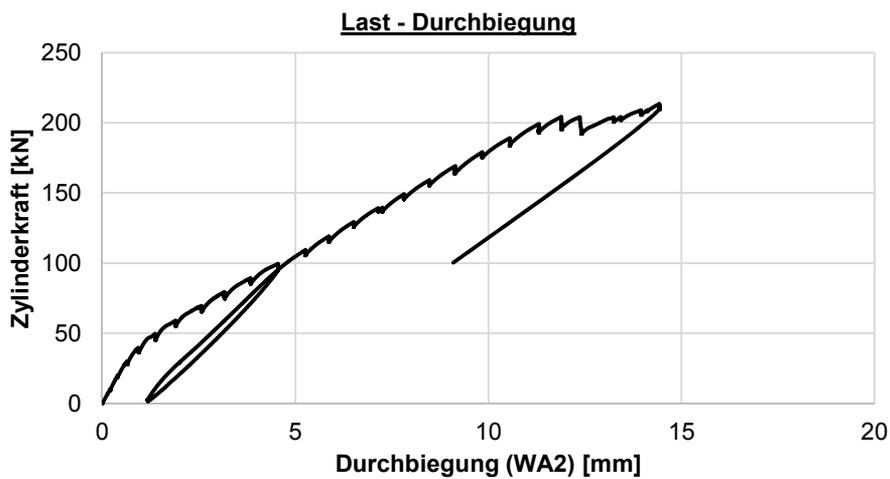
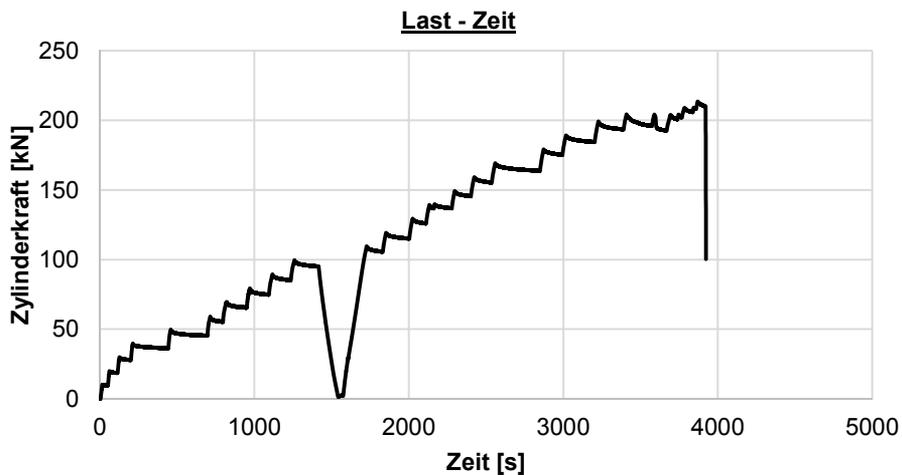
Hinweise zum Rissbild

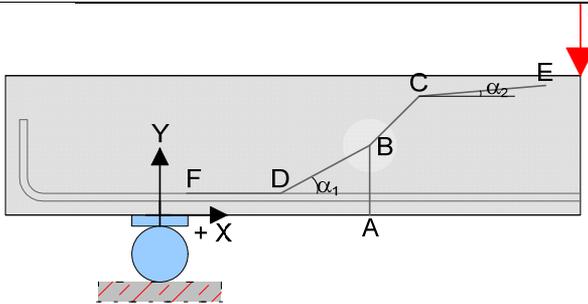
keine



S5_V2-2 = S5_C30/37-30-0,28-0,75-6-6_V2-2

Datum	18.07.14	Beginn	10:00	Ende	11:05
Bezeichnung	S5_C30/37-30-0,28-0,75-6-6_V2-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	54,6 N/mm ²	Betonalter	21 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
<p>Detail</p> <p>30</p> <p>WA 4 WA 5</p> <p>WA 6</p> <p>WA 1 WA 2 WA 3</p> <p>27,5 61,25 122,5 61,25 327,5 75,00 150,0 75,00 27,5</p>					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	100	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	4,556	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	1,175	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	112	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	215	kN	erreichte Zylinderlast	205	kN
			Durchbiegung	12,0	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

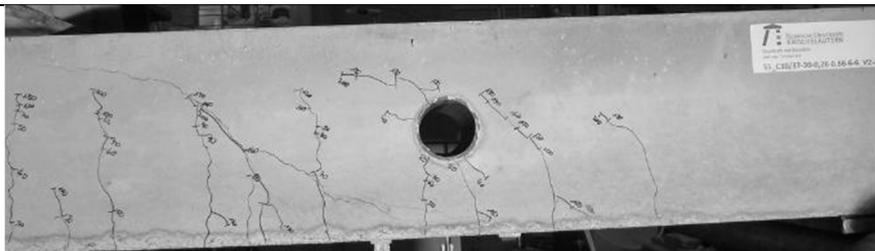


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	87,5 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	90 cm	13,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	100 cm	23 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	70 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	26 cm
F	Ende des Dübelrisses	52 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		30 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		45 °

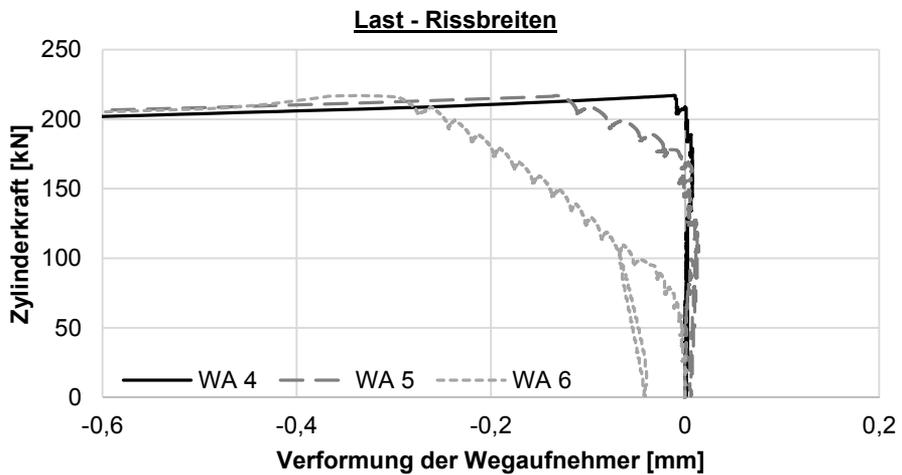
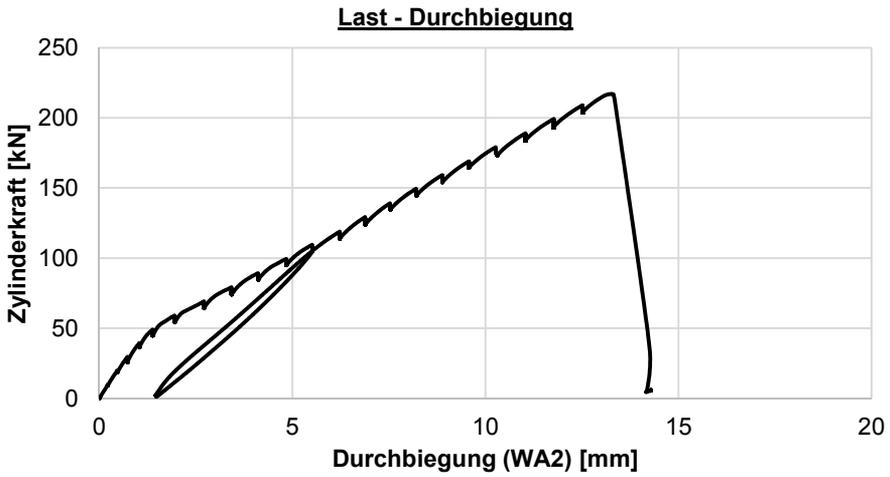
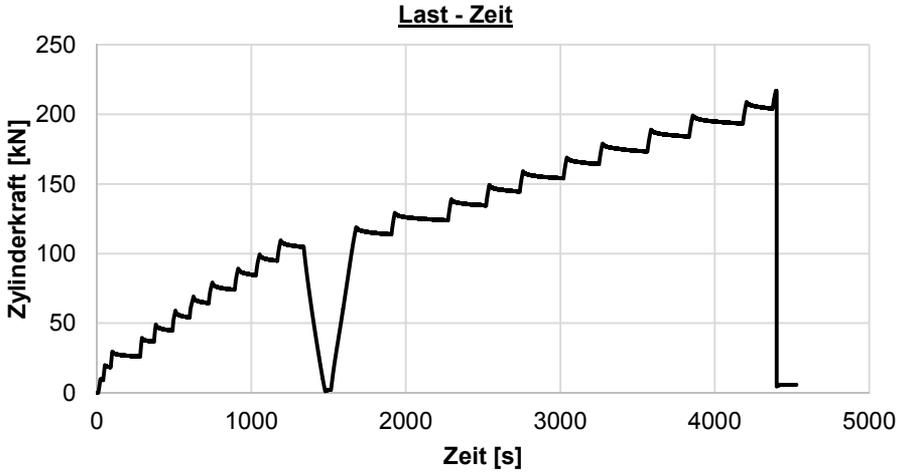
Hinweise zum Rissbild

keine

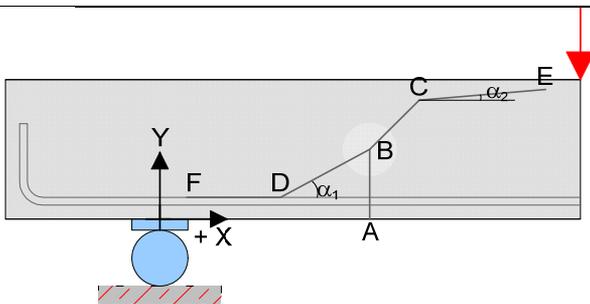


S5_V3-1 = S5_C30/37-30-0-0-0-V3-1

Datum	17.07.14	Beginn	13:20	Ende	15:00
Bezeichnung	S5_C30/37-30-0-0-0-V3-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	54,6 N/mm ²	Betonalter	21 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	5,518	mm			
Durchbiegung nach Entlastung		mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,15	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45		mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	108	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	225	kN	erreichte Zylinderlast	215	kN
			Durchbiegung	13,3	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



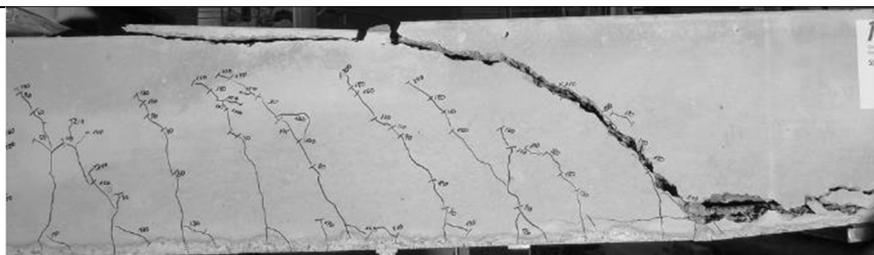
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	29 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	30 cm	5 cm
C	zweite Richtungsänderung	53 cm	25 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	30 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	29 cm
F	Ende des Dübelrisses	-25 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		45 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		35 °

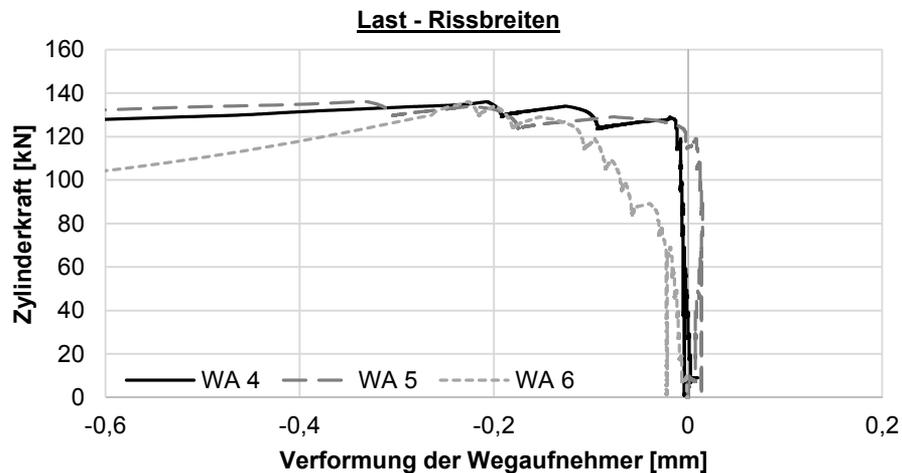
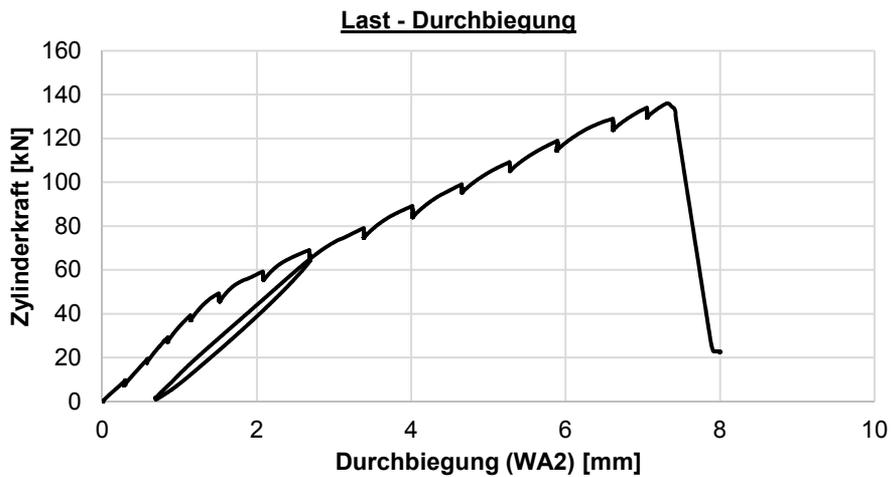
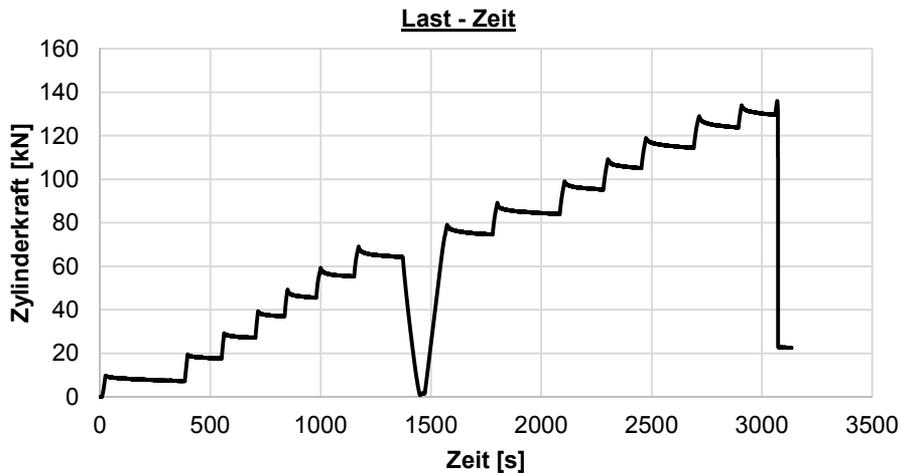
Hinweise zum Rissbild

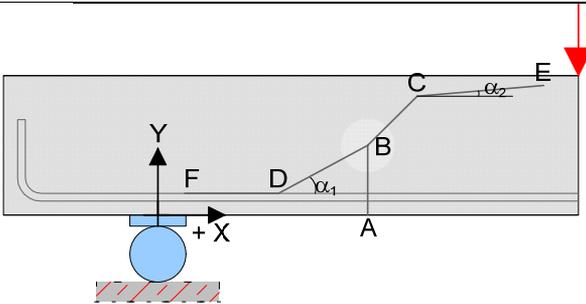
keine



S5_V3-2 = S5_C30/37-30-0,28-0-0-0_V3-2

Datum	17.07.14	Beginn	15:40	Ende	16:30
Bezeichnung	S5_C30/37-30-0,28-0-0-0_V3-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	54,6 N/mm ²	Betonalter	21 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	70	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	2,688	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,692	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$		5,45 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			105 kN		
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	150	kN	erreichte Zylinderlast	135	kN
			Durchbiegung	7,4	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

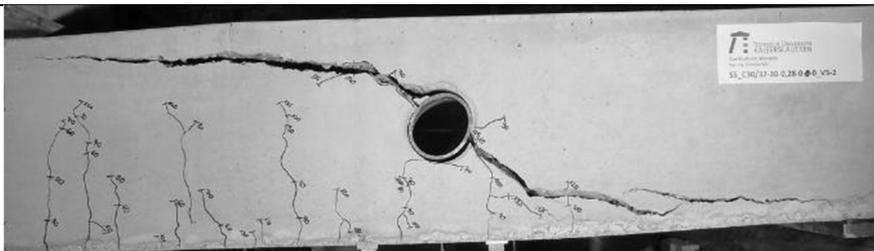


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	55 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	57 cm	12 cm
C	zweite Richtungsänderung	72 cm	24 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	36 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	27 cm
F	Ende des Dübelrisses	-11 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		38 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		15 °

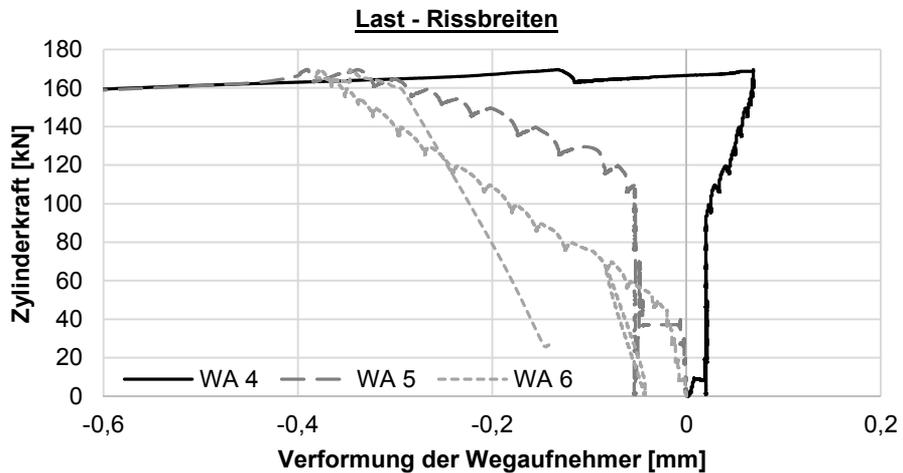
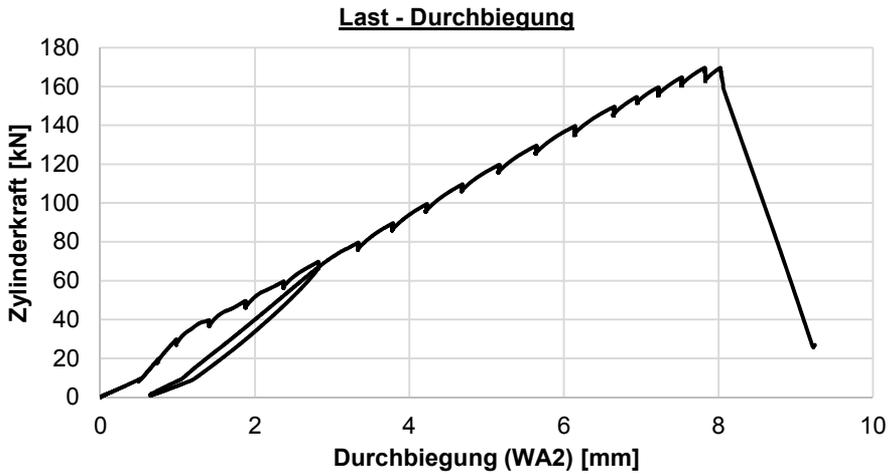
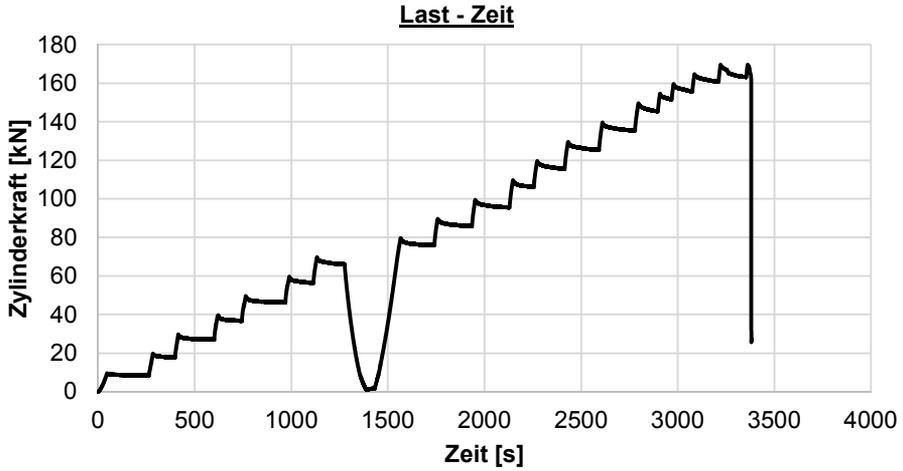
Hinweise zum Rissbild

keine

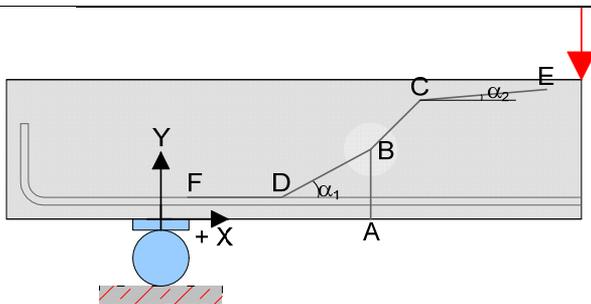


S6_V1 = S6_C30/37-20-0-0-0-0_V1

Datum	29.08.14	Beginn	17:30	Ende	19:00
Bezeichnung	S6_C30/37-20-0-0-0-0_V1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	50,1 N/mm ²	Betonalter	29 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	70	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	2,82	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,654	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	3,30 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	79	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	150	kN	erreichte Zylinderlast	170	kN
			Durchbiegung	8,0	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



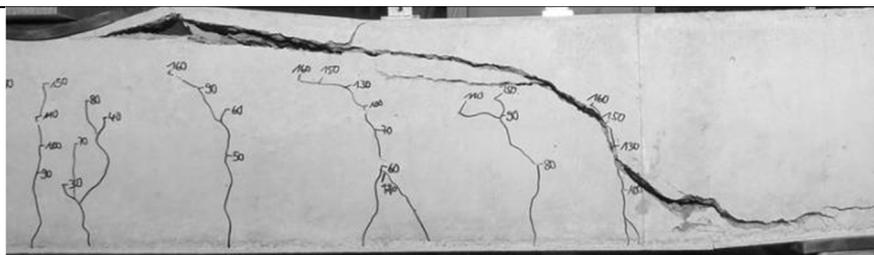
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	21,5 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	21,5 cm	7,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	24,5 cm	12 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	17 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	18 cm
F	Ende des Dübelrisses	-10 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		40 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		18 °

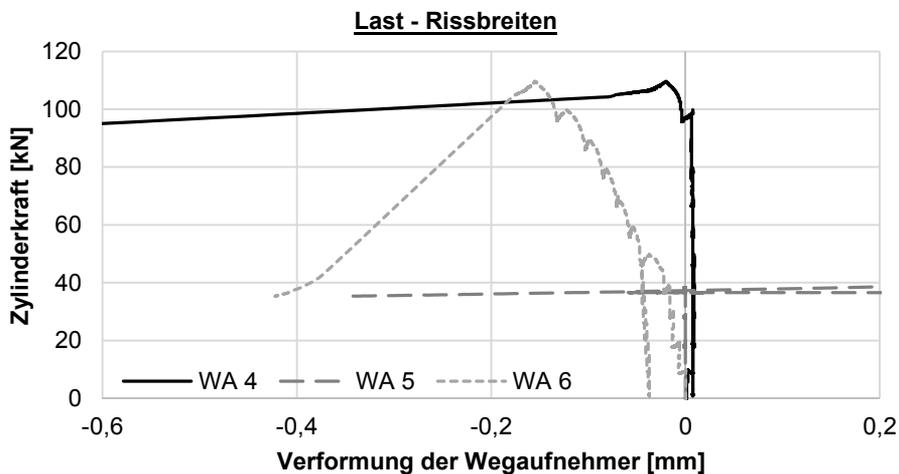
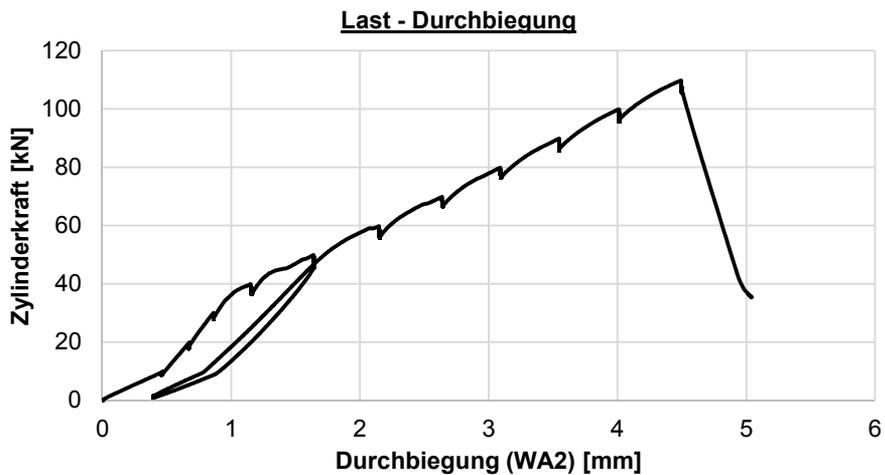
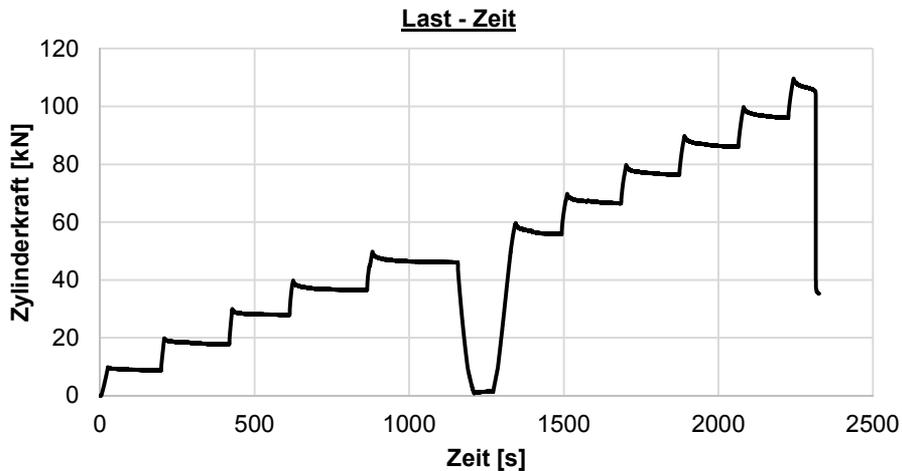
Hinweise zum Rissbild

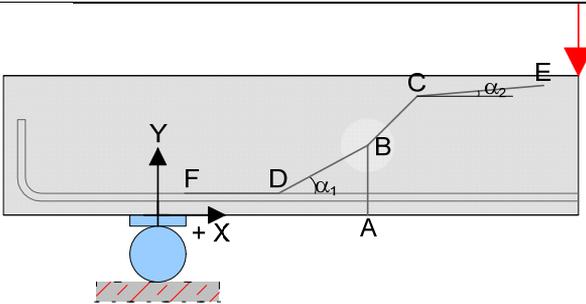
keine



S6_V2 = S6_C30/37-20-0,37-0-0-0_V2

Datum	29.08.14	Beginn	16:30	Ende	17:05
Bezeichnung	S6_C30/37-20-0,37-0-0-0_V2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	50,1 N/mm ²	Betonalter	29 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	50	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	1,647	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,398	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,02	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	3,30 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung					kN
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	120	kN	erreichte Zylinderlast	110	kN
			Durchbiegung	4,5	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

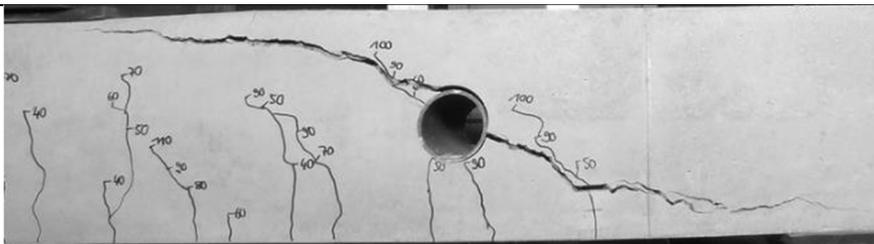


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	34 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	36 cm	7 cm
C	zweite Richtungsänderung	40 cm	12,5 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	23 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	17,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	1,5 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		46 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		35 °

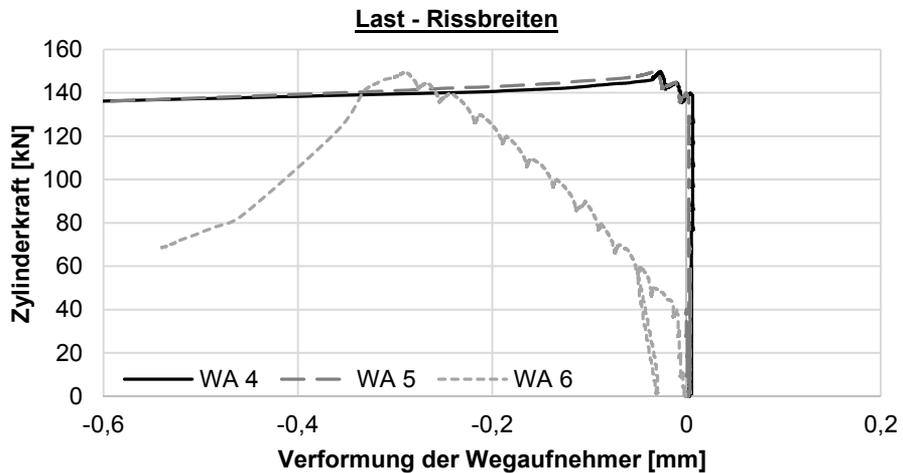
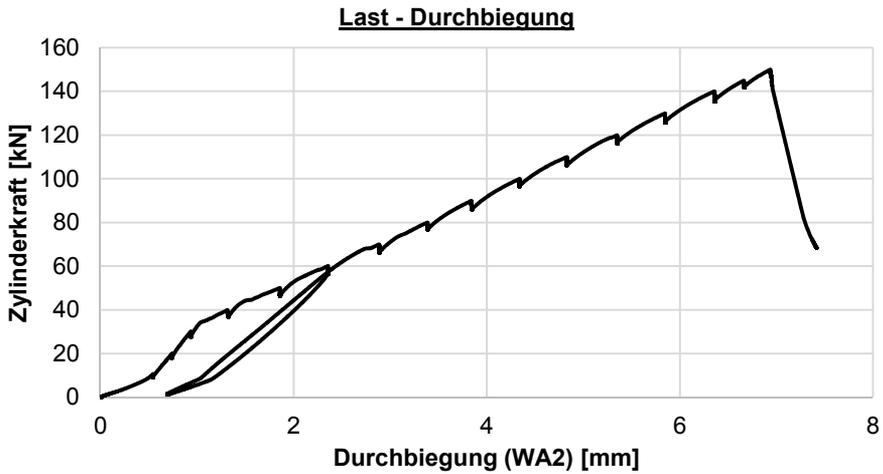
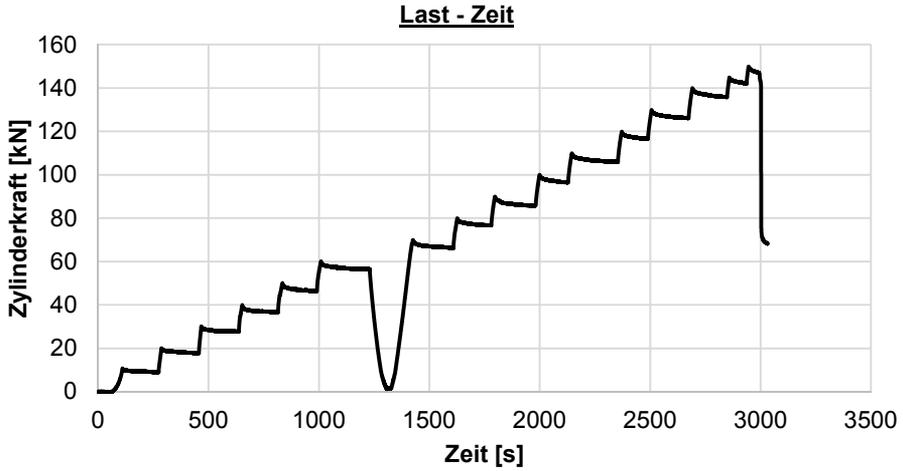
Hinweise zum Rissbild

keine

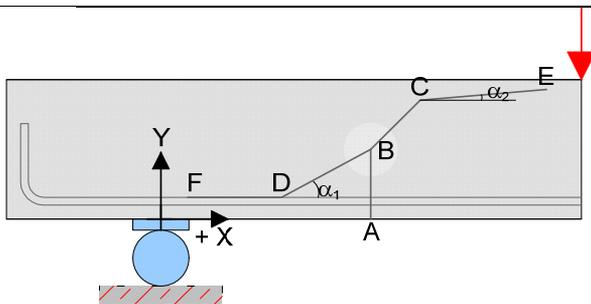


S6_V3-1 = S6_C30/37-20-0,37-0,33-6-2_V3-1

Datum	29.08.14	Beginn	13:50	Ende	14:50
Bezeichnung	S6_C30/37-20-0,37-0,33-6-2_V3-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	50,1 N/mm ²	Betonalter	29 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	60	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	2,36	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,70	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,07	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,03	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	3,30 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	79	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	130	kN	erreichte Zylinderlast	150	kN
			Durchbiegung	7,42	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



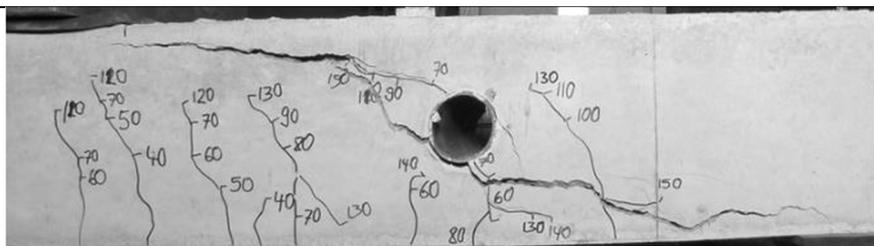
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	36,5 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	36,5 cm	5,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	39 cm	13,5 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	25 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	18 cm
F	Ende des Dübelrisses	4,5 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		52 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		32 °

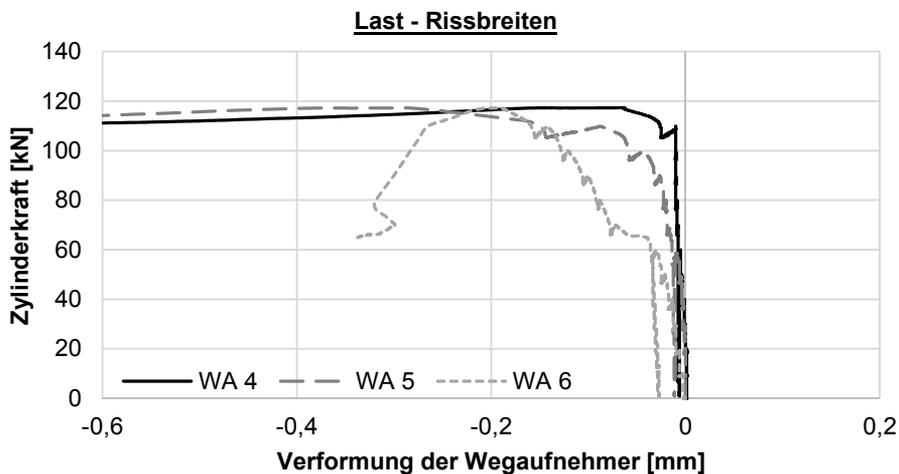
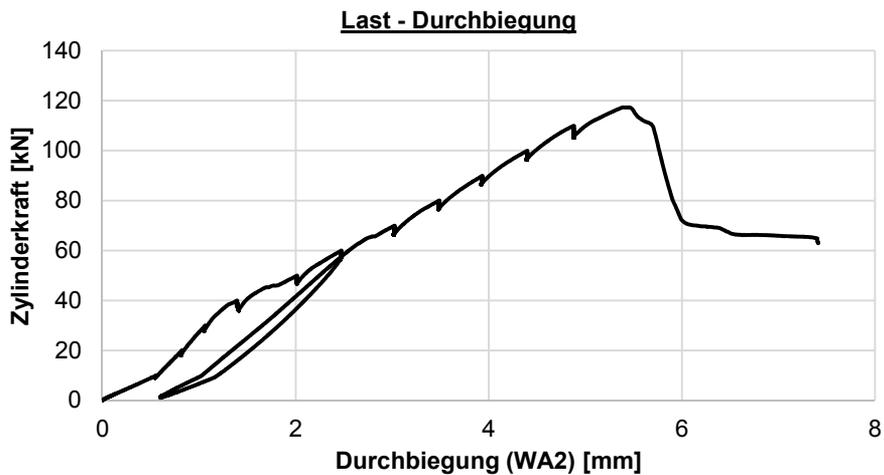
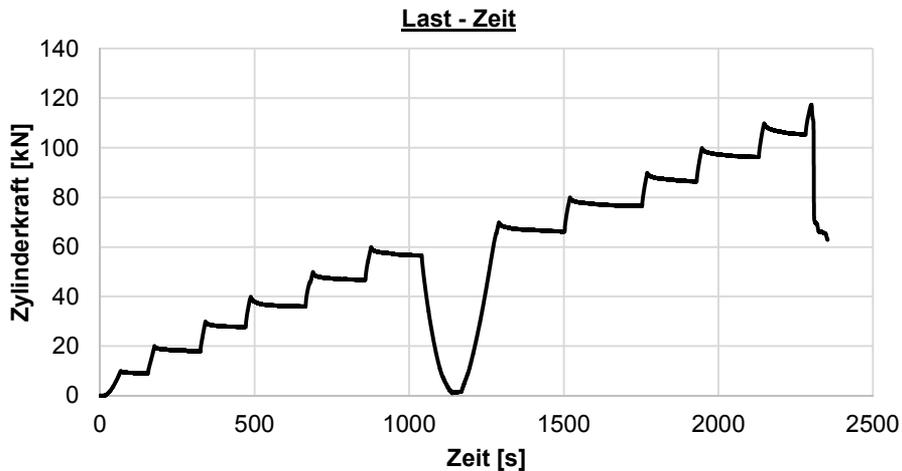
Hinweise zum Rissbild

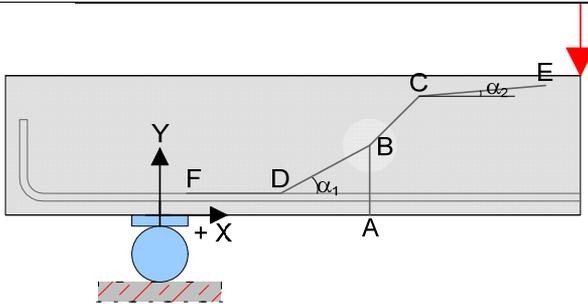
keine



S6_V3-2 = S6_C30/37-20-0,37-0,33-6-2_V3-2

Datum	29.08.14	Beginn	15:30	Ende	16:10
Bezeichnung	S6_C30/37-20-0,37-0,33-6-2_V3-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	50,1 N/mm ²	Betonalter	29 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	60	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	2,47	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,60	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,01	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	3,30 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	75	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	130	kN	erreichte Zylinderlast	117	kN
			Durchbiegung	5,4	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

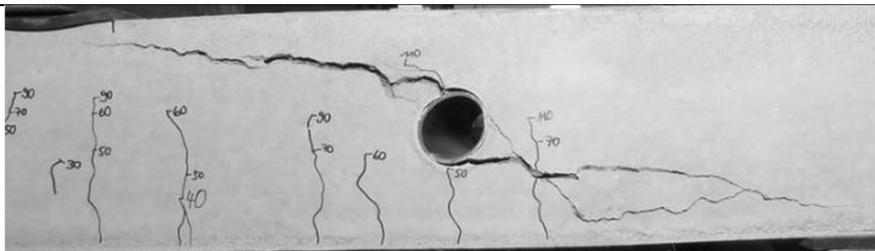


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	30 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	30 cm	6,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	38 cm	14 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	26 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	17,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	4 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		49 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		37 °

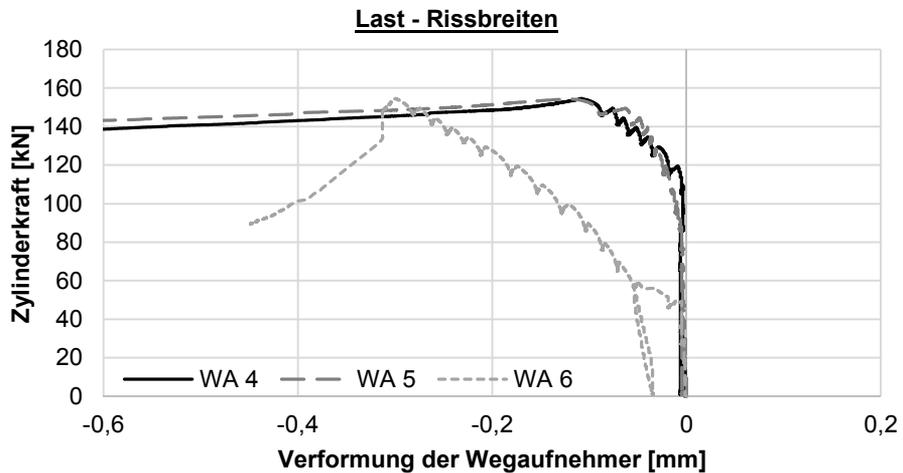
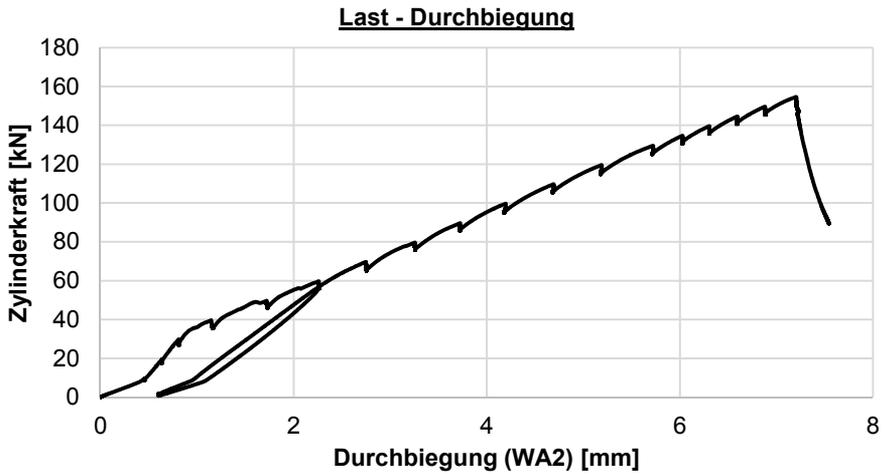
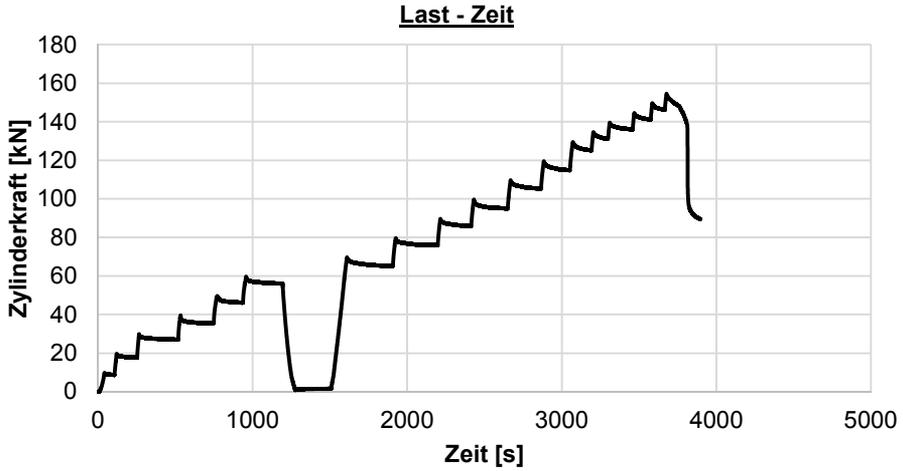
Hinweise zum Rissbild

keine

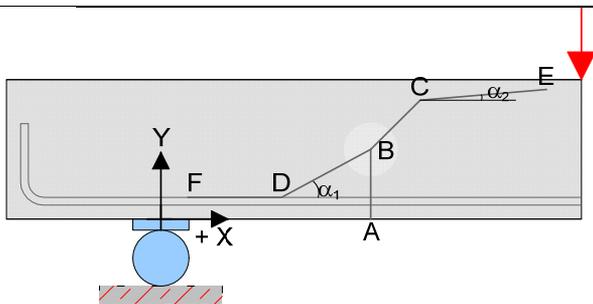


S6_V4-1 = S6_C30/37-20-0,37-0,49-6-3_V4-1

Datum	28.08.14	Beginn	17:20	Ende	18:10
Bezeichnung	S6_C30/37-20-0,37-0,49-6-3_V4-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	50,1 N/mm ²	Betonalter	28 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	60	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	2,263	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,6	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,03	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	3,30 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	80	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	135	kN	erreichte Zylinderlast	155	kN
			Durchbiegung	7,2	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



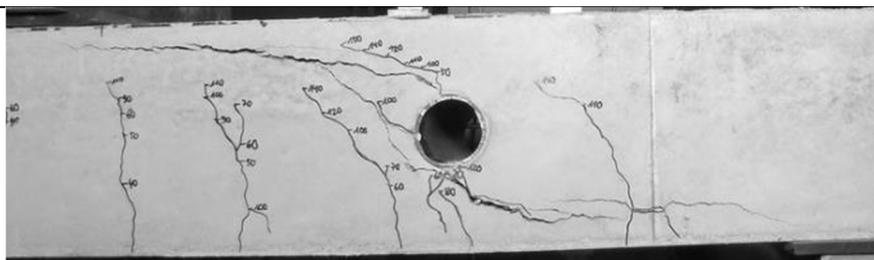
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	36 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	37 cm	8 cm
C	zweite Richtungsänderung	47 cm	17 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	32 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	17,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	7 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		29 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		37 °

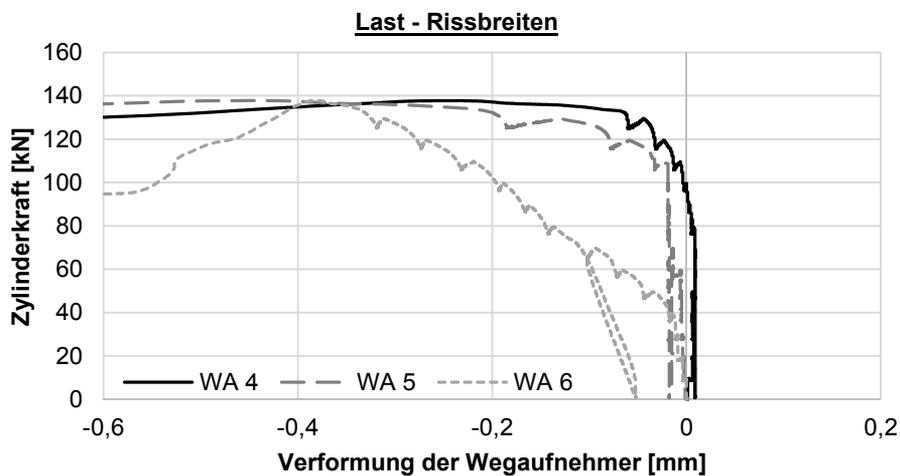
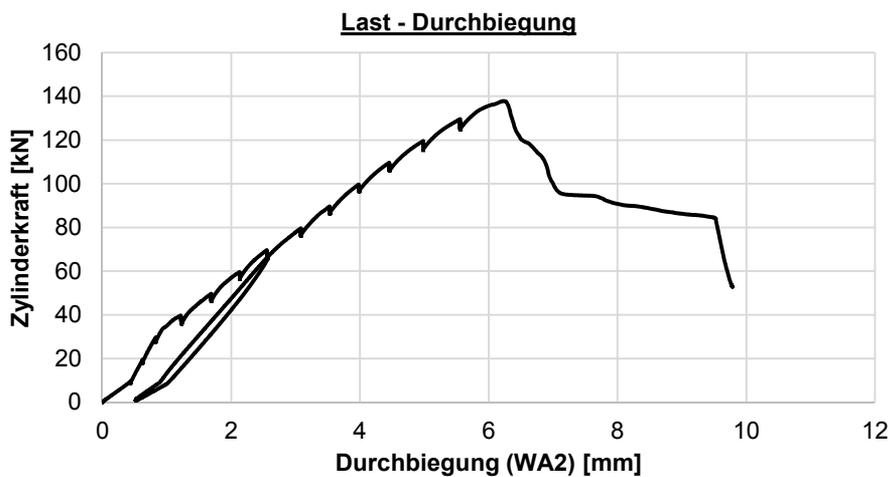
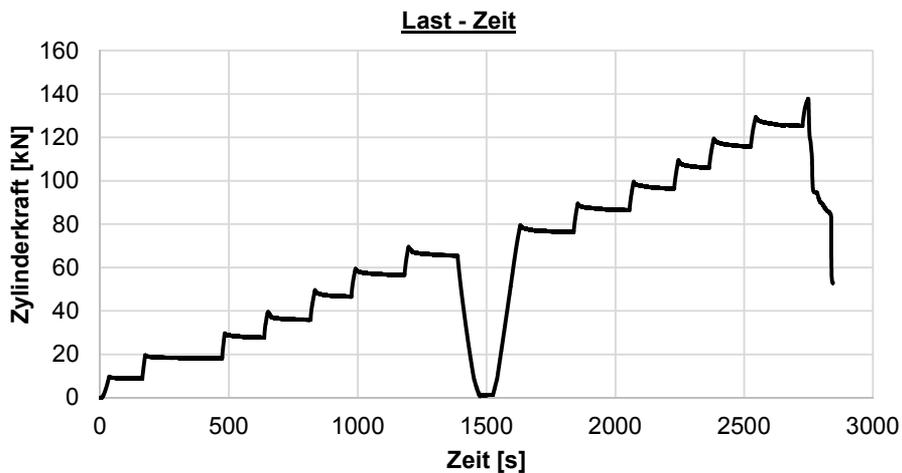
Hinweise zum Rissbild

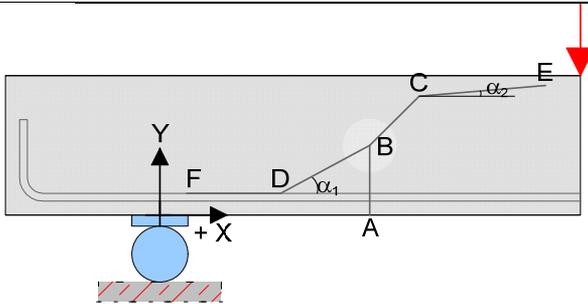
keine



S6_V4-2 = S6_C30/37-20-0,37-0,49-6-3_V4-2

Datum	28.08.14	Beginn	18:40	Ende	19:30
Bezeichnung	S6_C30/37-20-0,37-0,49-6-3_V4-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	50,1 N/mm ²	Betonalter	28 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	70	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	2,56	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,52	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,03	mm			
Grenzdurchbiegung	L / 500 =		3,30 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			84 kN		
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	155	kN	erreichte Zylinderlast	138	kN
			Durchbiegung	6,22	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

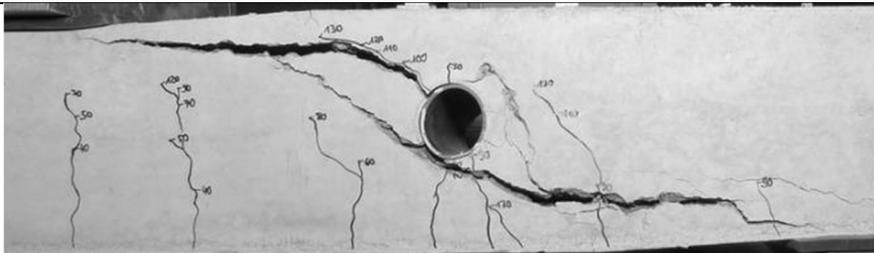


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	35 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	35 cm	7 cm
C	zweite Richtungsänderung	40 cm	14 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	22 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	17,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	4 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		35 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		31 °

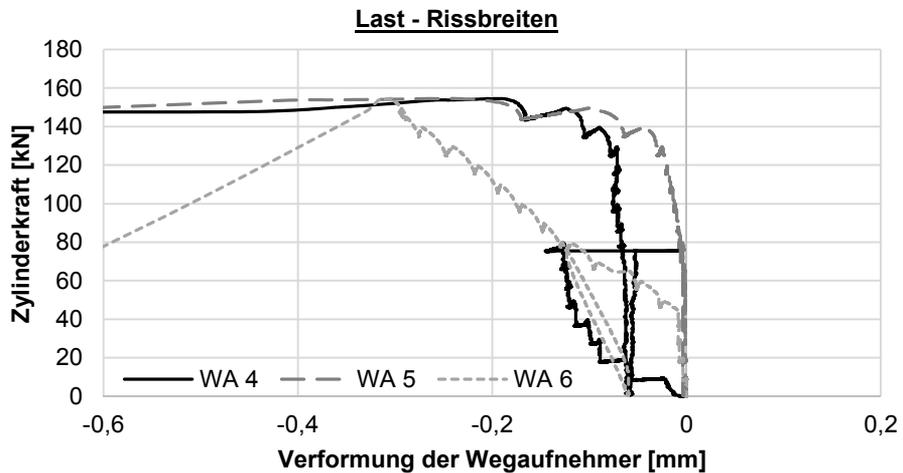
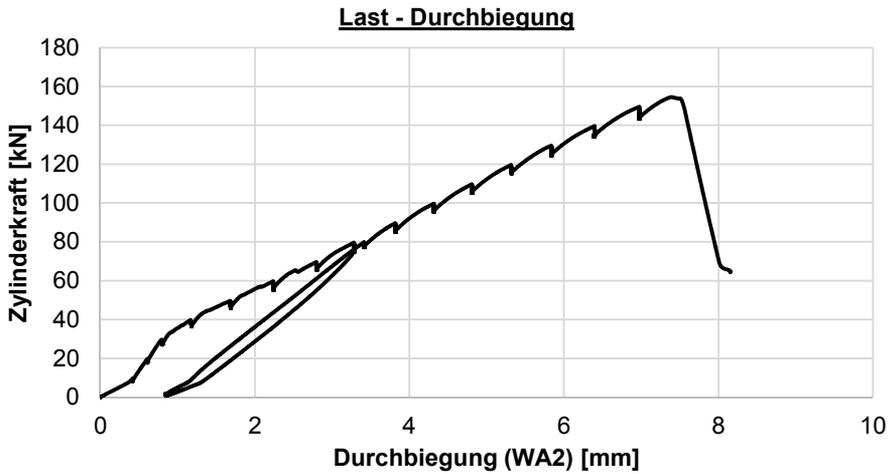
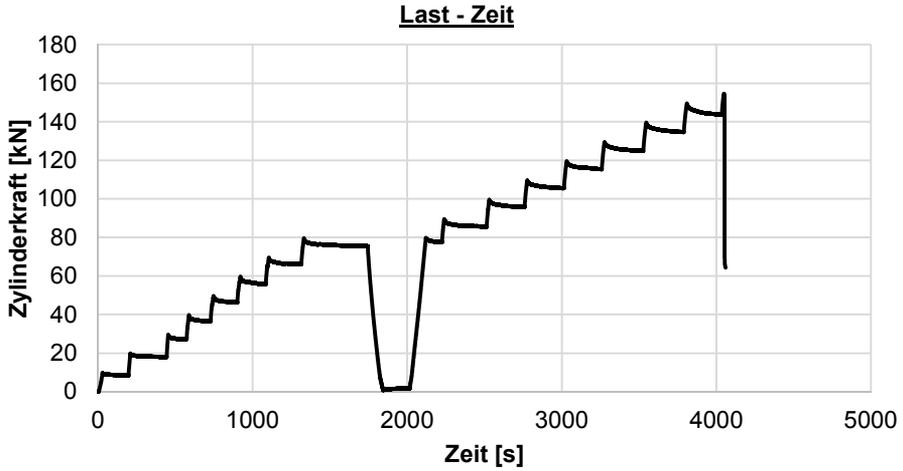
Hinweise zum Rissbild

keine

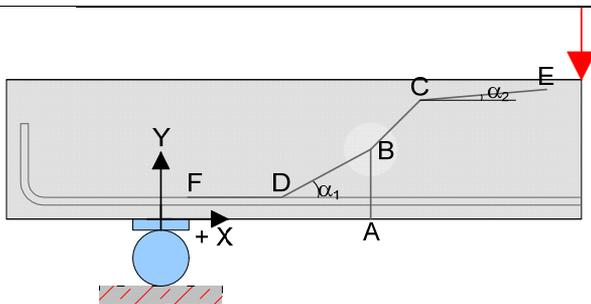


S6_V5-1 = S6_C30/37-20-0,37-0,66-6-4_V5-1

Datum	28.08.14	Beginn	13:30	Ende	14:30
Bezeichnung	S6_C30/37-20-0,37-0,66-6-4_V5-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	50,1 N/mm ²	Betonalter	28 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	80	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,285	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,85	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,15	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,1	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	3,30 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	80	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	170	kN	erreichte Zylinderlast	154	kN
			Durchbiegung	7,38	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



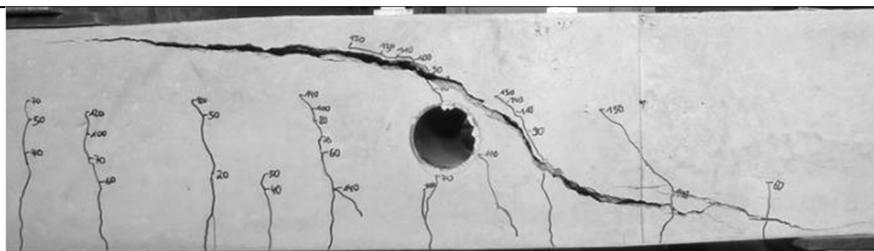
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	28 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	28 cm	7 cm
C	zweite Richtungsänderung	31 cm	10,5 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	17,5 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	17,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	0 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse	63 °	
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse	41 °	

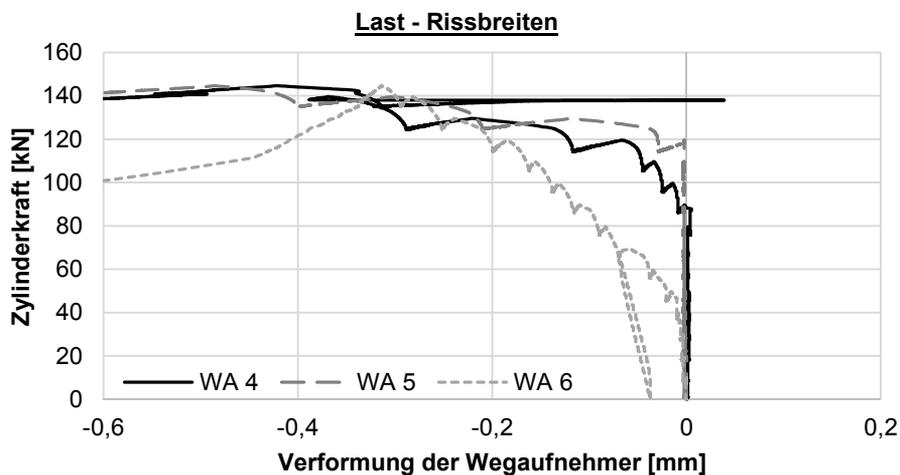
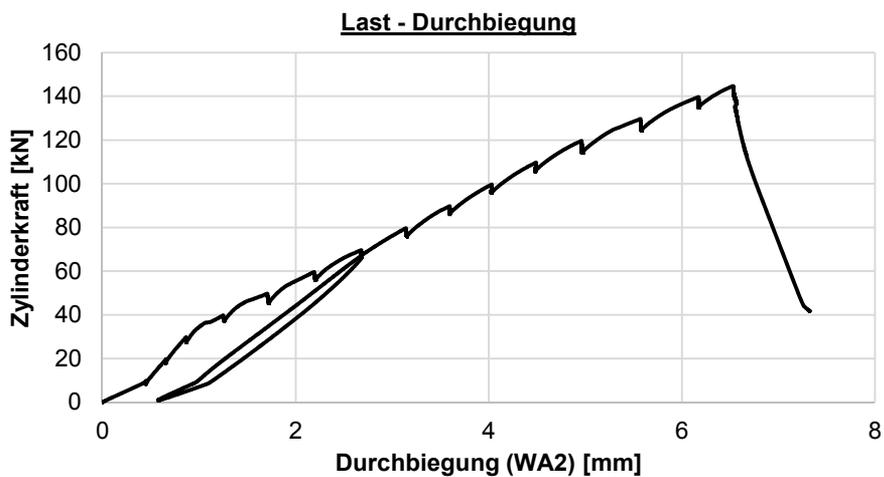
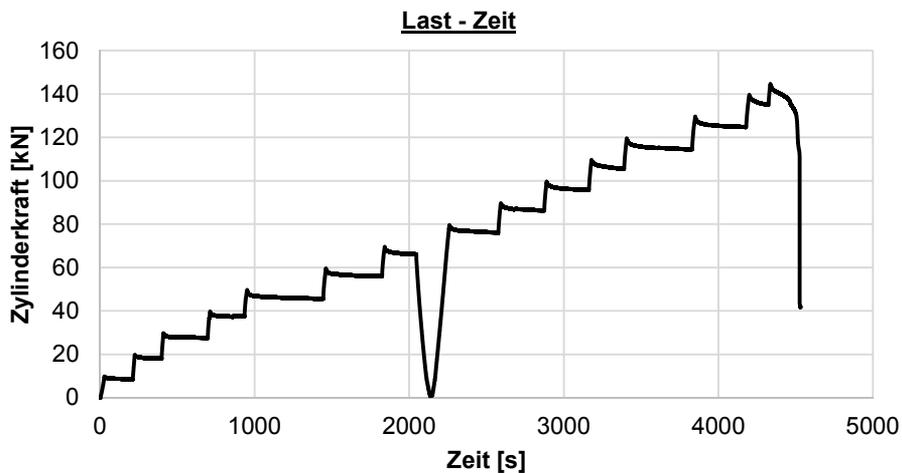
Hinweise zum Rissbild

keine

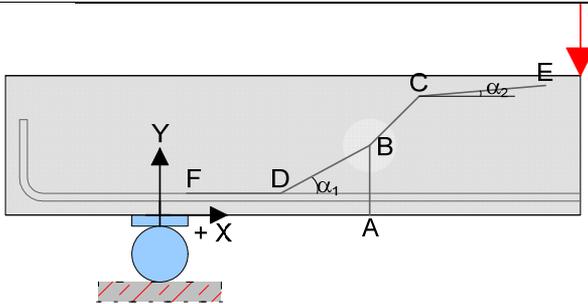


S6_V5-2 = S6_C30/37-20-0,37-0,66-6-4_V5-2

Datum	28.08.14	Beginn	15:15	Ende	16:20
Bezeichnung	S6_C30/37-20-0,37-0,66-6-4_V5-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	50,1 N/mm ²	Betonalter	28 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	70	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	2,68	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,582	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,15	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,1	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	3,30 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	85				kN
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	155	kN	erreichte Zylinderlast	145	kN
			Durchbiegung	6,4	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



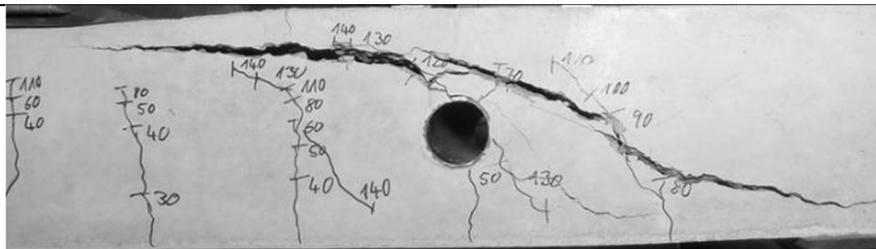
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	19 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	19 cm	5,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	38 cm	13,5 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	8 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	17,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	3 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		32 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		20 °

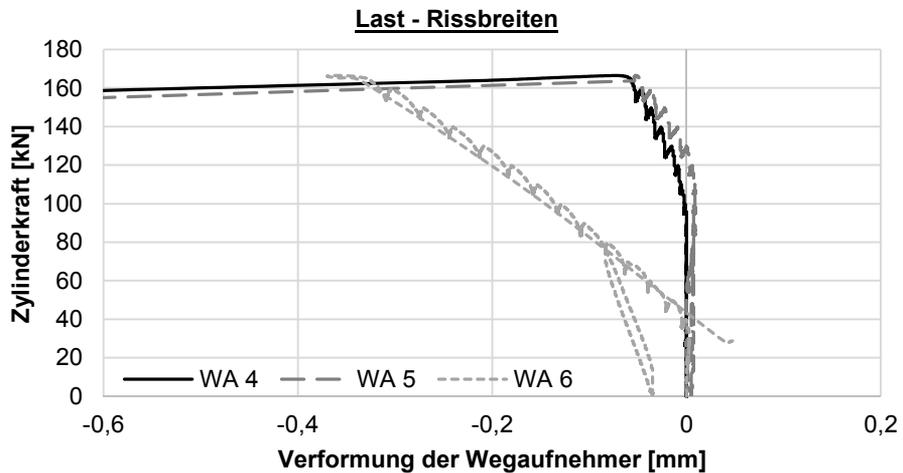
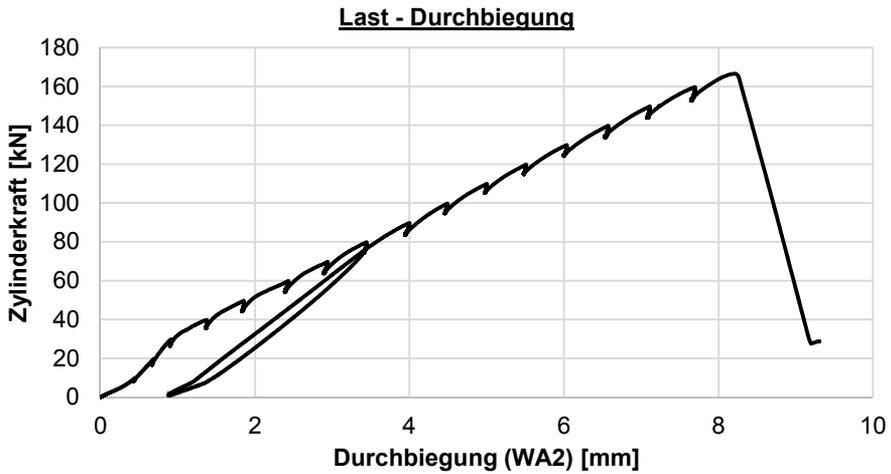
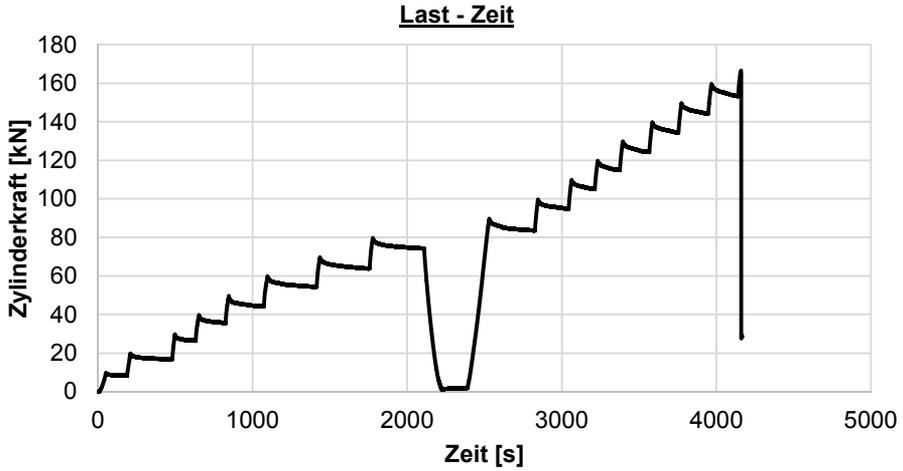
Hinweise zum Rissbild

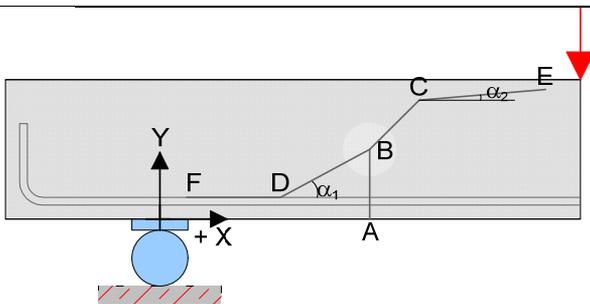
keine



S6_V6 = S6_C30/37-20-0-0-0-0_V6

Datum	28.08.14	Beginn	08:45	Ende	09:45
Bezeichnung	S6_C30/37-20-0-0-0-0_V6				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	50,1 N/mm ²	Betonalter	28 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	85	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,4	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,892	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	3,30 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	78	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	185	kN	erreichte Zylinderlast	166	kN
			Durchbiegung	8,2	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

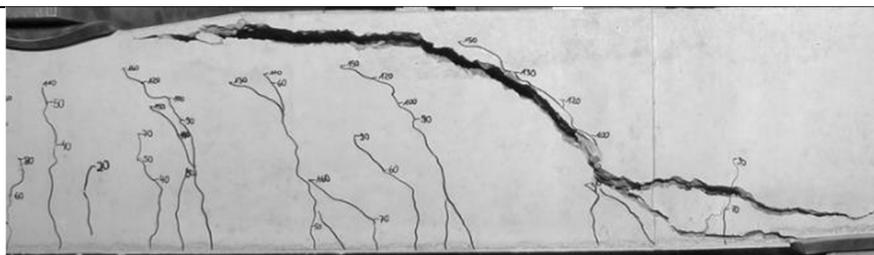


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	25,5 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	25,5 cm	6,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	33 cm	15 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	21 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	19 cm
F	Ende des Dübelrisses	-10 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		45 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		45 °

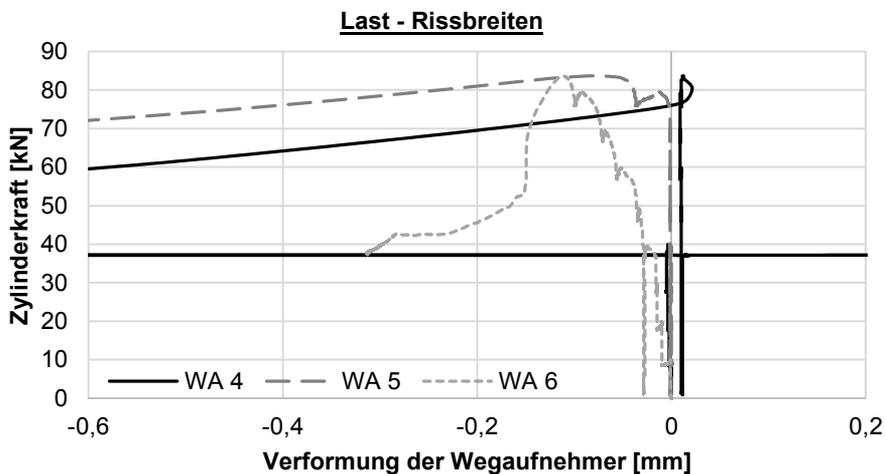
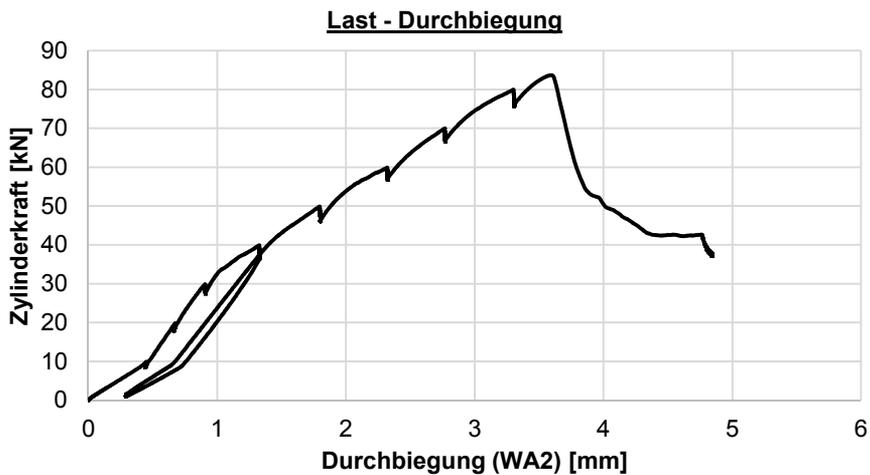
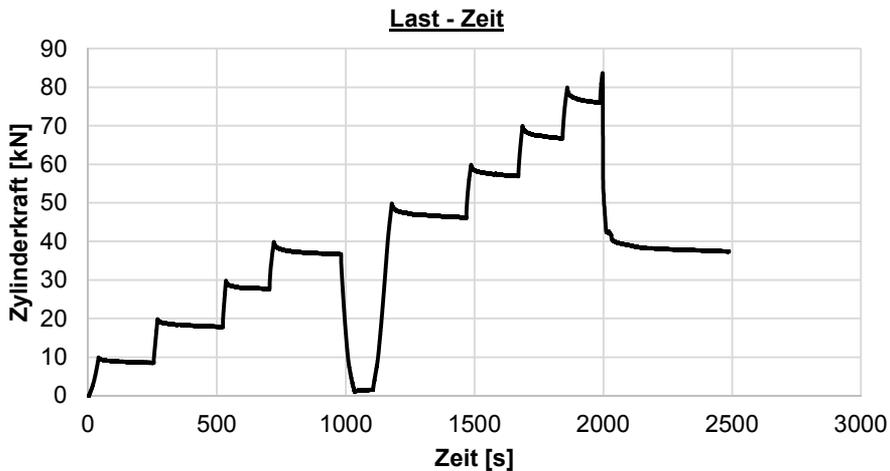
Hinweise zum Rissbild

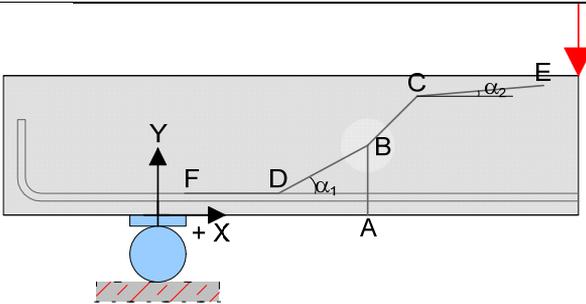
keine



S6_V7 = S6_C30/37-20-0,53-0-0-0_V7

Datum	28.08.14	Beginn	10:45	Ende	11:25
Bezeichnung	S6_C30/37-20-0,53-0-0-0_V7				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	50,1 N/mm ²	Betonalter	28 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	40	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	1,327	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,297	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,03	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	3,30 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	80	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	90	kN	erreichte Zylinderlast	84	kN
			Durchbiegung	3,588	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

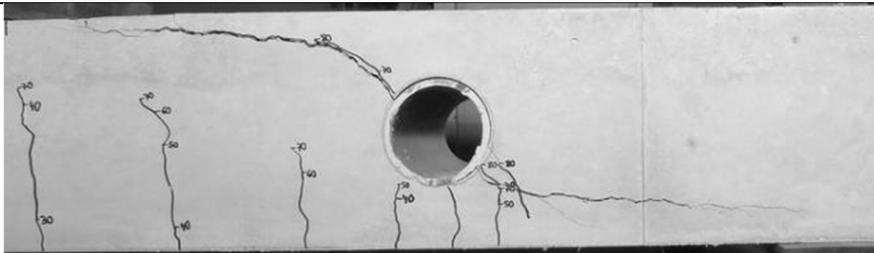


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	cm	cm
C	zweite Richtungsänderung	cm	cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	cm
F	Ende des Dübelrisses	cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		°

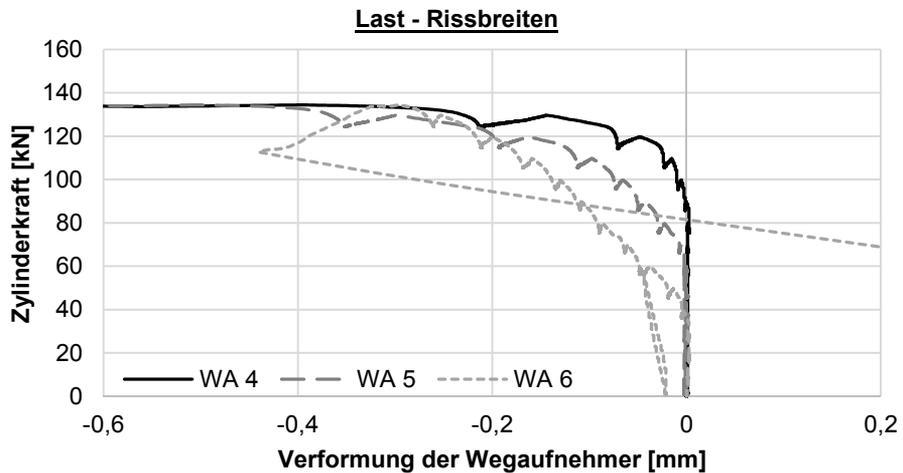
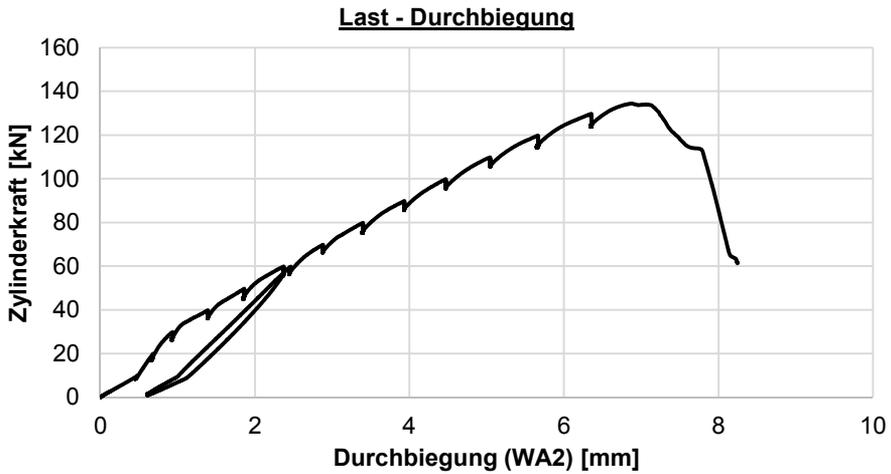
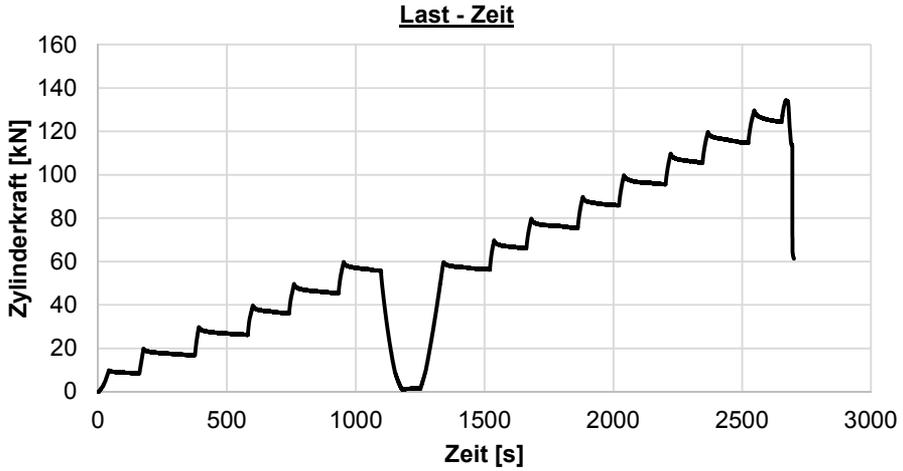
Hinweise zum Rissbild

keine

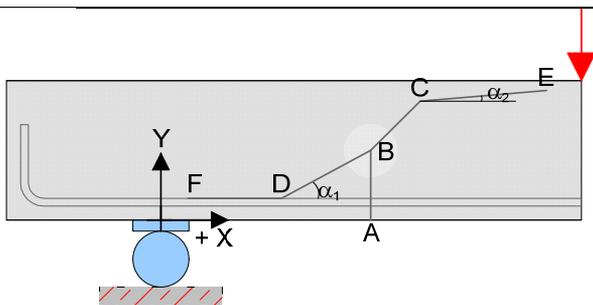


S6_V8-1 = S6_C30/37-20-0,53-0,49-6-3_V8-1

Datum	29.08.14	Beginn	07:45	Ende	08:30
Bezeichnung	S6_C30/37-20-0,53-0,49-6-3_V8-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	50,1 N/mm ²	Betonalter	29 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	60	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	2,30	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,61	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,04	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	3,30		mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	75	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	130	kN	erreichte Zylinderlast	134	kN
			Durchbiegung	7,0	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



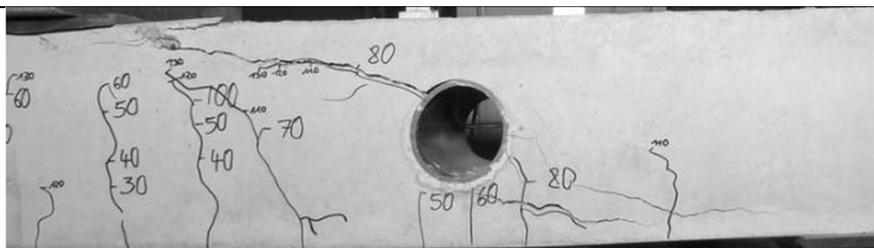
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	32 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	32 cm	4 cm
C	zweite Richtungsänderung	40 cm	14 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	27 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	18,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	7 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		25 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		27 °

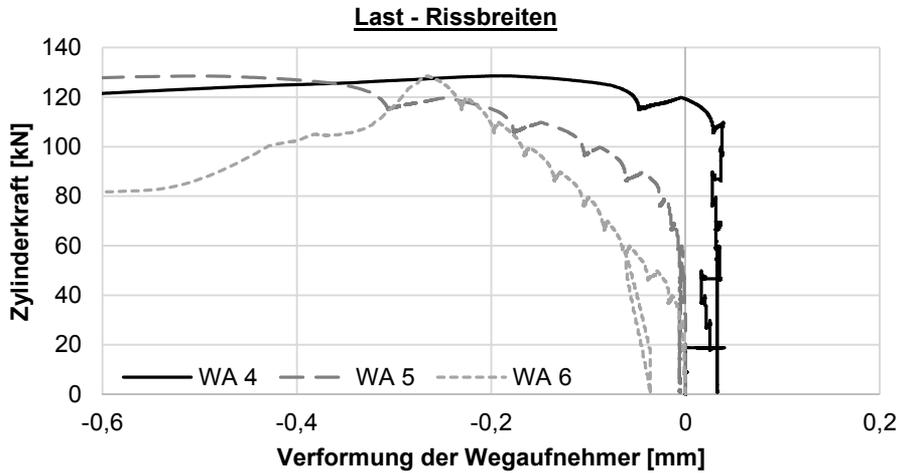
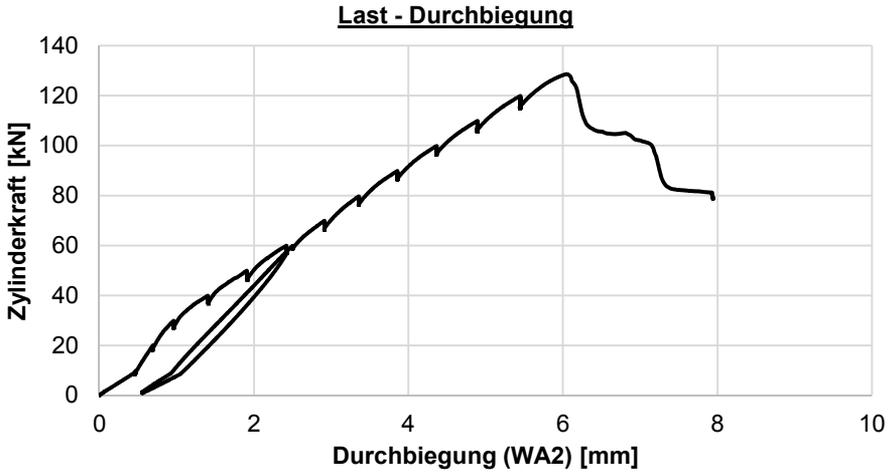
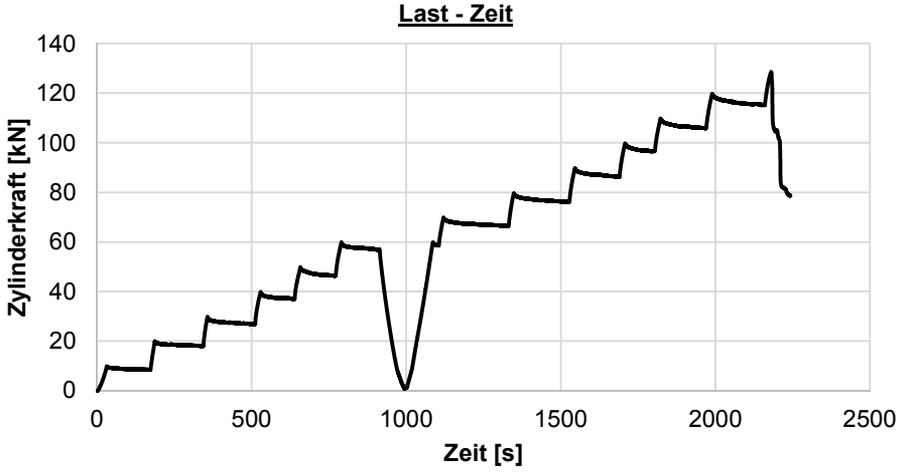
Hinweise zum Rissbild

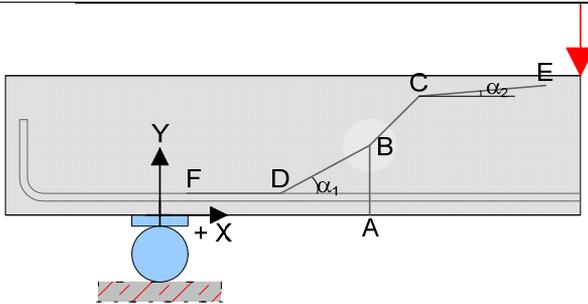
keine



S6_V8-2 = S6_C30/37-20-0,53-0,49-6-3_V8-2

Datum	29.08.14	Beginn	08:50	Ende	09:25
Bezeichnung	S6_C30/37-20-0,53-0,49-6-3_V8-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	50,1 N/mm ²	Betonalter	29 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	60	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	2,42	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,55	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$		3,30 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			80		kN
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	130	kN	erreichte Zylinderlast	128	kN
			Durchbiegung	6,1	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

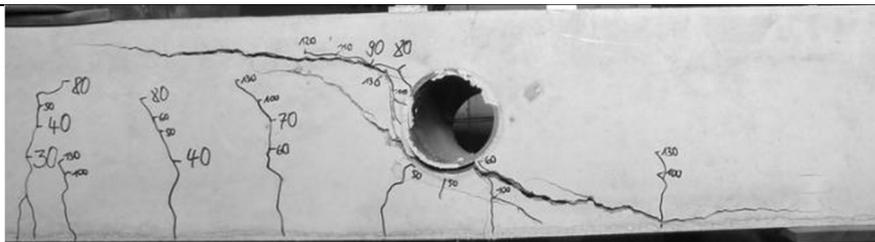


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	34 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	34 cm	cm
C	zweite Richtungsänderung	41 cm	14,5 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	23 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	18 cm
F	Ende des Dübelrisses	8 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		20 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		28 °

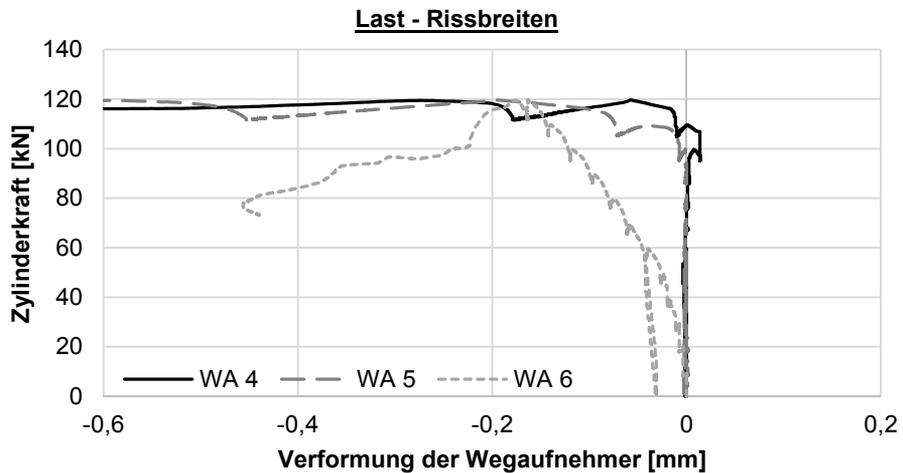
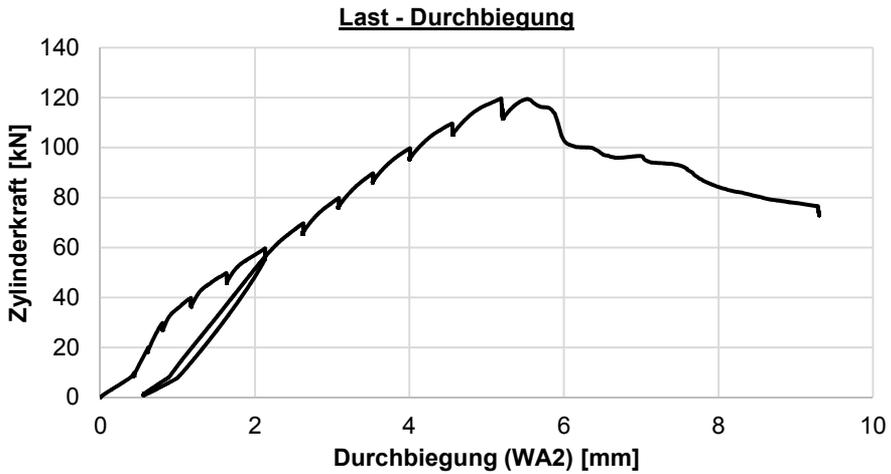
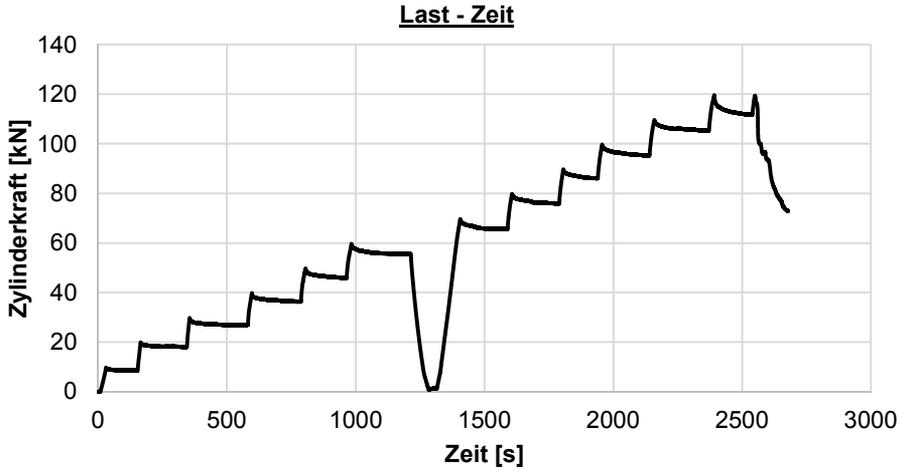
Hinweise zum Rissbild

keine

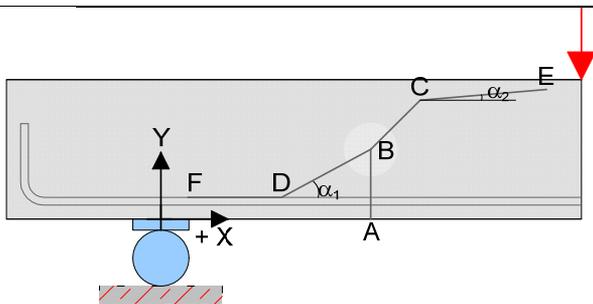


S6_V9-1 = S6_C30/37-20-0,53-0,66-6-4_V9-1

Datum	29.08.14	Beginn	10:00	Ende	10:40
Bezeichnung	S6_C30/37-20-0,53-0,66-6-4_V9-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	50,1 N/mm ²	Betonalter	29 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	60	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	2,134	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,56	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,03	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	3,30 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	84	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	140	kN	erreichte Zylinderlast	120	kN
			Durchbiegung	5,2	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



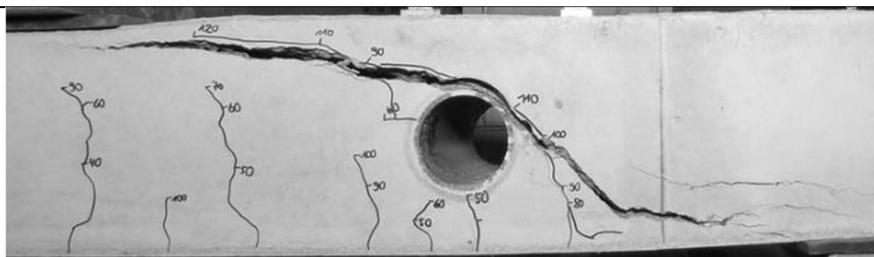
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	28 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	30 cm	9 cm
C	zweite Richtungsänderung	39 cm	15 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	23,5 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	18 cm
F	Ende des Dübelrisses	0 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		46 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		22 °

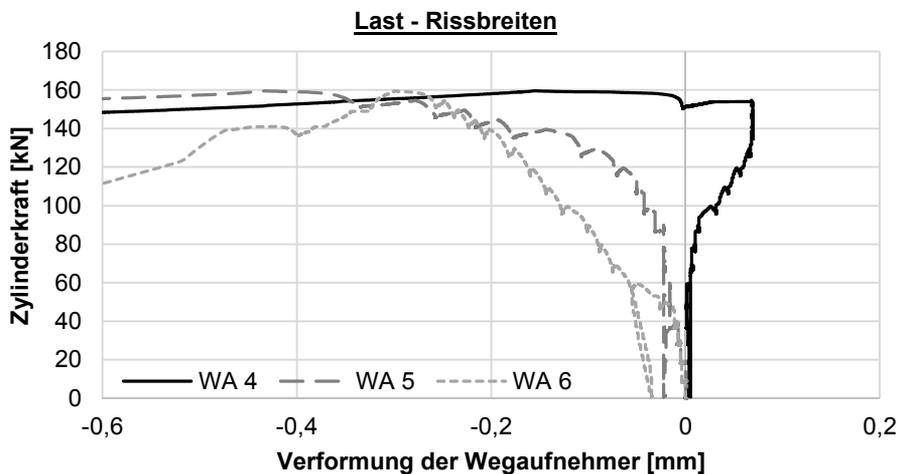
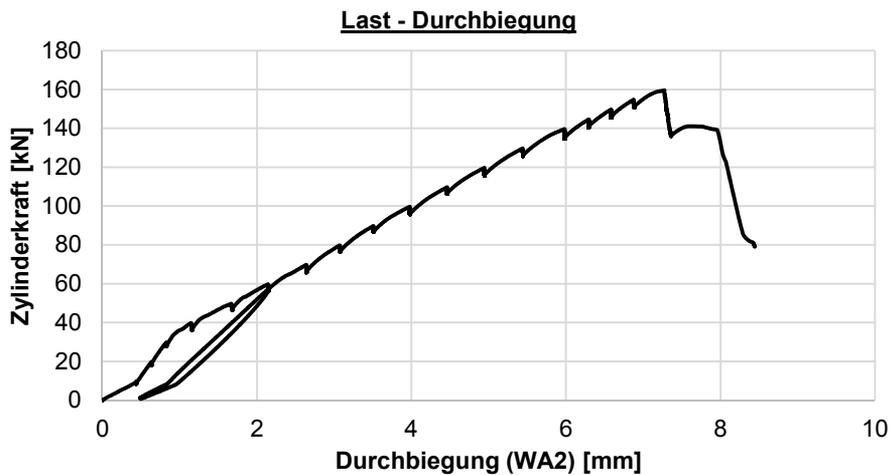
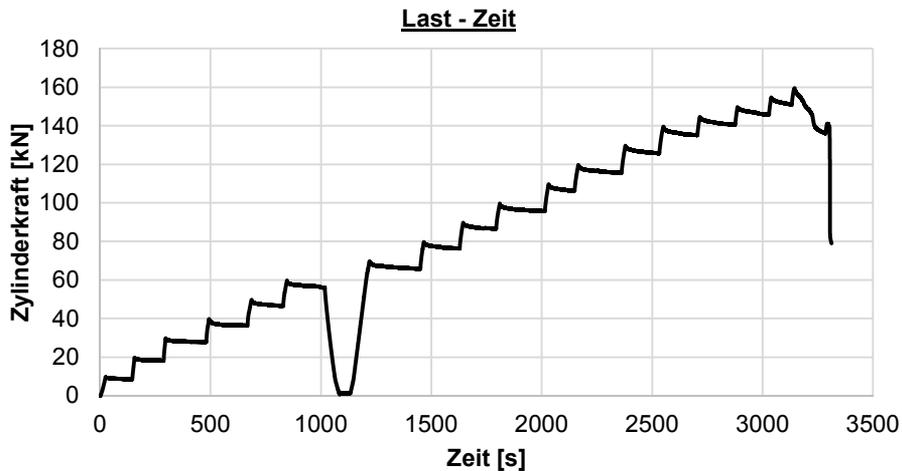
Hinweise zum Rissbild

keine

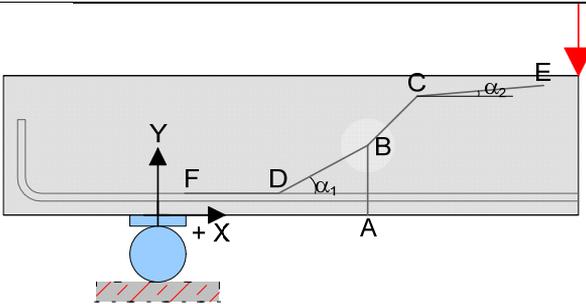


S6_V9-2 = S6_C30/37-20-0,53-0,66-6-4_V9-2

Datum	29.08.14	Beginn	11:00	Ende	12:00
Bezeichnung	S6_C30/37-20-0,53-0,66-6-4_V9-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	50,1 N/mm ²	Betonalter	29 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	60	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	2,146	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,495	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,02	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	3,30 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	85	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	140	kN	erreichte Zylinderlast	160	kN
			Durchbiegung	7,3	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



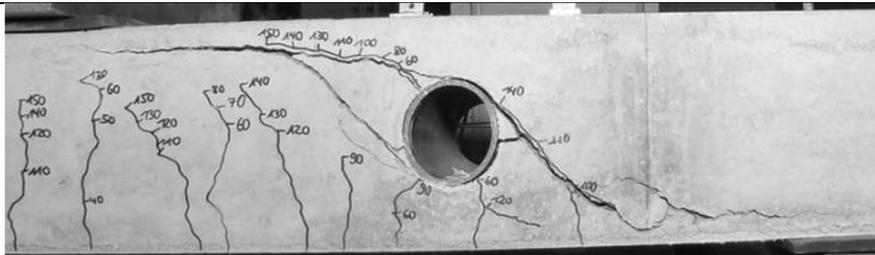
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	18 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	18 cm	6 cm
C	zweite Richtungsänderung	20 cm	cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	13 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	18 cm
F	Ende des Dübelrisses	0 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		50 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		20 °

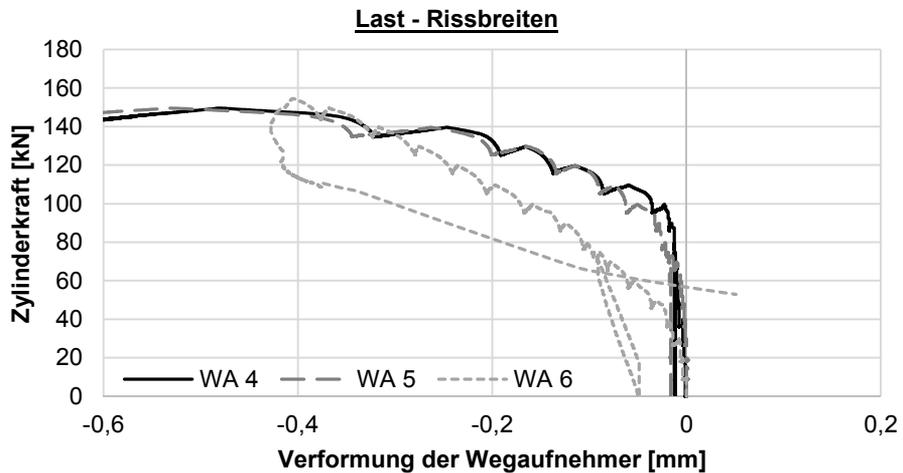
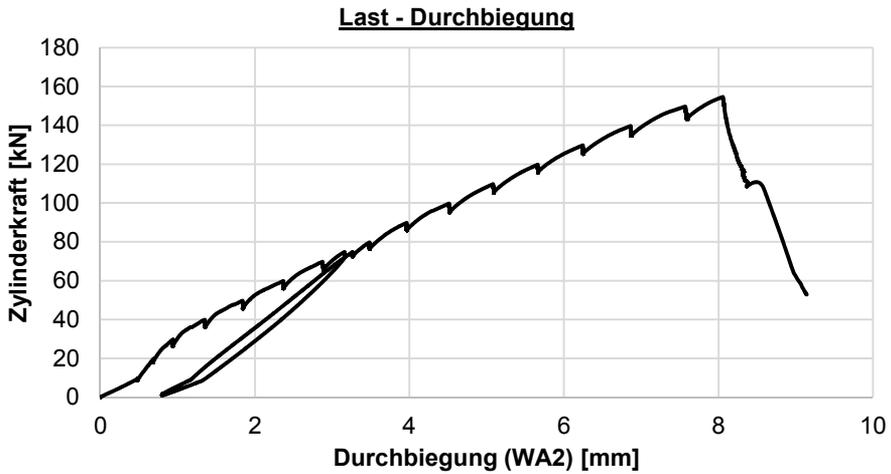
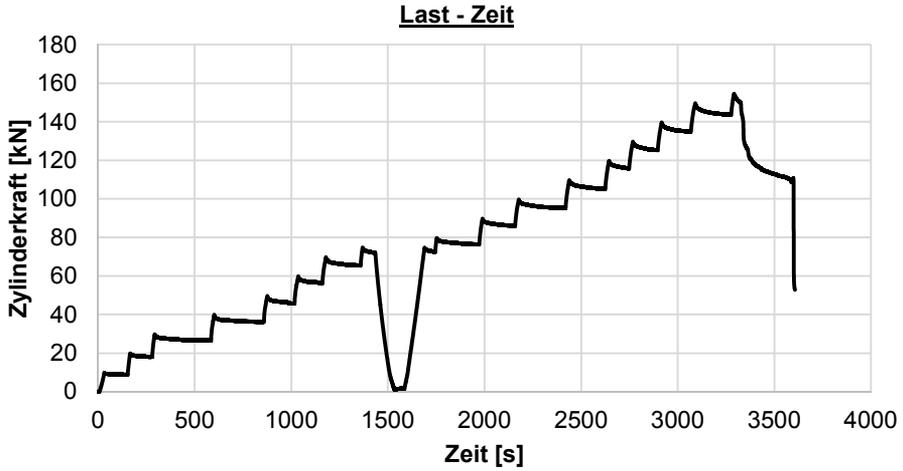
Hinweise zum Rissbild

keine

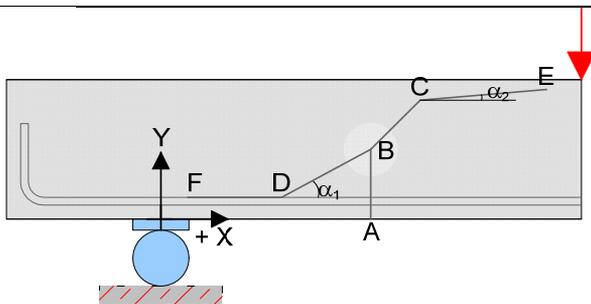


S6_V10-1 = S6_C30/37-20-0,53-0,82-6-5_V10-1

Datum	28.08.14	Beginn	20:00	Ende	21:00
Bezeichnung	S6_C30/37-20-0,53-0,82-6-5_V10-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	50,1 N/mm ²	Betonalter	28 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
<p>Detail</p> <p>20</p> <p>WA 4 WA 5</p> <p>WA 6</p> <p>WA 1 WA 2 WA 3</p> <p>27.5 37.50 37.75 45.00 45.00 27.5</p> <p>75.0 90.0 220.0</p>					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	75	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,21	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,80	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,15	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,1	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	3,30 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	75	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	160	kN	erreichte Zylinderlast	155	kN
			Durchbiegung	8,0	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



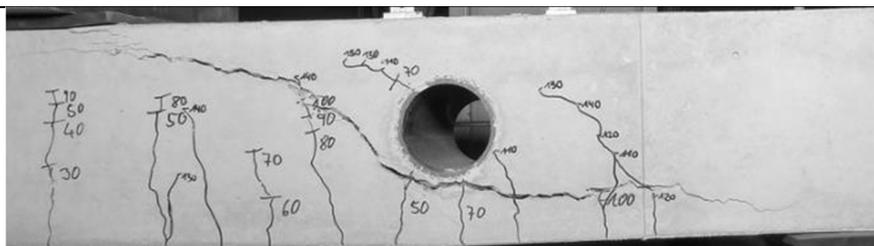
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	47 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	51 cm	14 cm
C	zweite Richtungsänderung	- cm	cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	48 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	17 cm
F	Ende des Dübelrisses	7 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		51 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		51 °

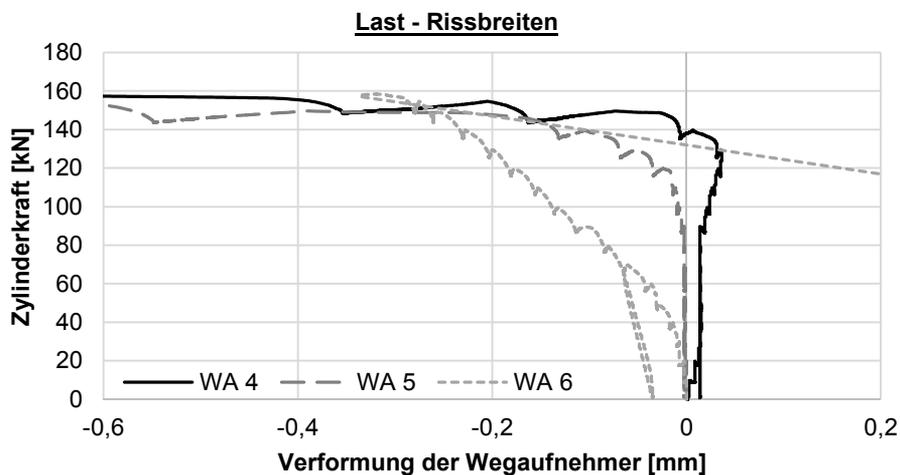
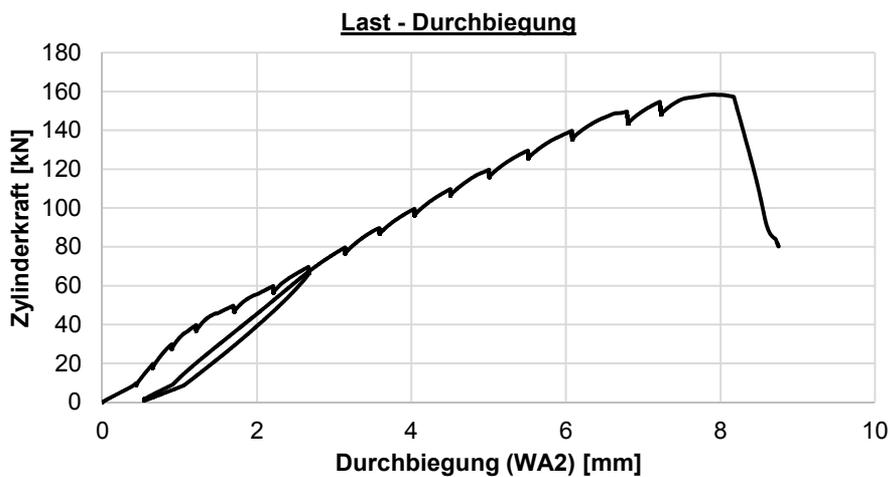
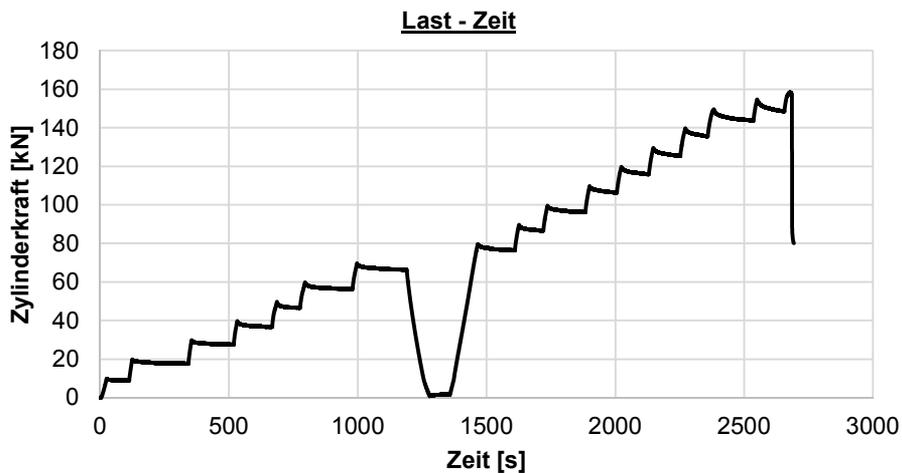
Hinweise zum Rissbild

keine

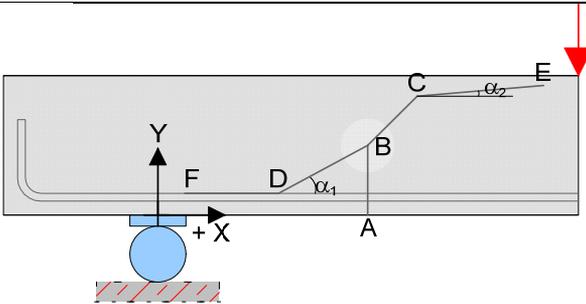


S6_V10-2 = S6_C30/37-20-0,53-0,82-6-5_V10-2

Datum	28.08.14	Beginn	21:15	Ende	22:25
Bezeichnung	S6_C30/37-20-0,53-0,82-6-5_V10-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	50,1 N/mm ²	Betonalter	28 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	70	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	2,668	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,548	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,01	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	3,30		mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	83		kN		
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	155	kN	erreichte Zylinderlast	158	kN
			Durchbiegung	8,1	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



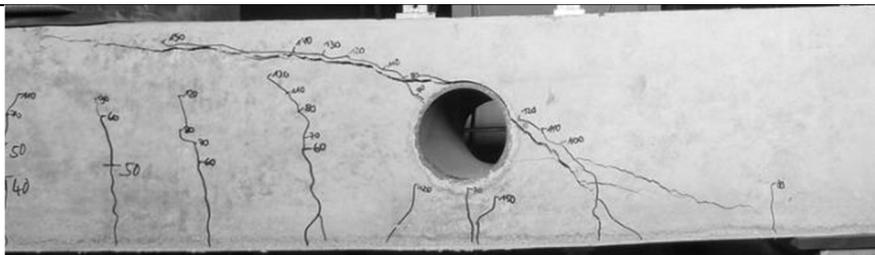
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	28 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	28 cm	4 cm
C	zweite Richtungsänderung	cm	cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	28 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	cm
F	Ende des Dübelrisses	1,5 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		°

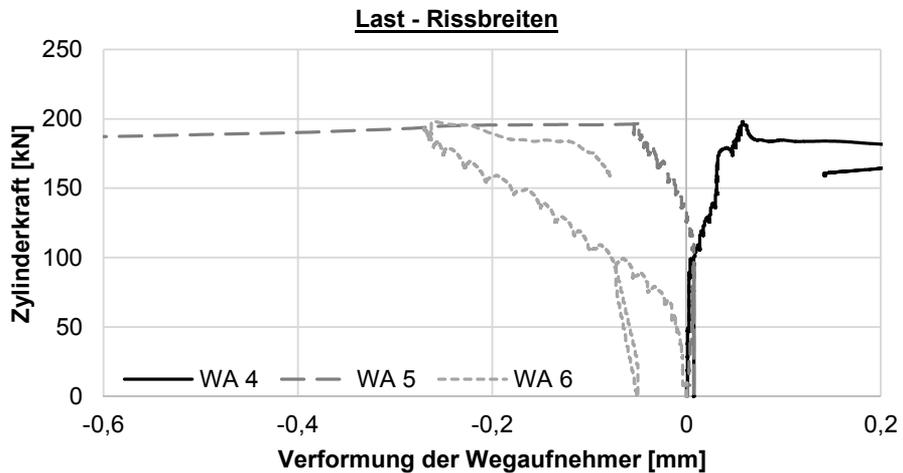
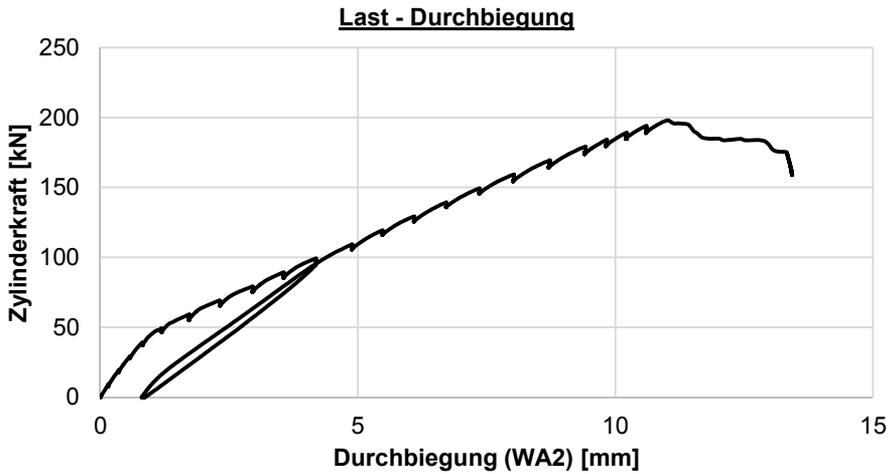
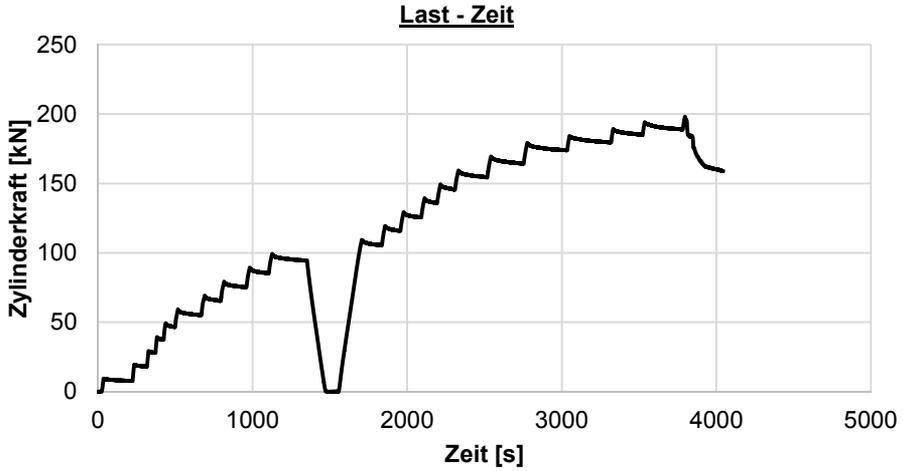
Hinweise zum Rissbild

keine

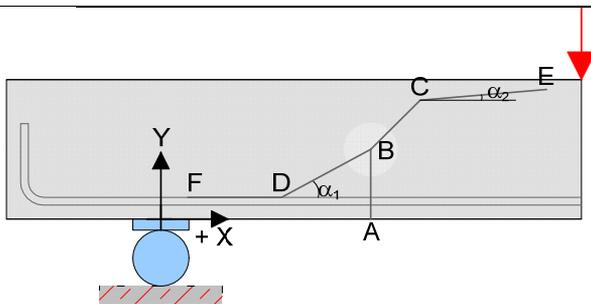


S7_V1 = S7_C30/37-30-0-0-0-0_V1

Datum	30.10.14	Beginn	08:30	Ende	09:45
Bezeichnung	S7_C30/37-30-0-0-0-0_V1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	38,2 N/mm ²	Betonalter	44 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	100	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	4,187	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,817	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45		mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	119		kN		
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	210	kN	erreichte Zylinderlast	199	kN
			Durchbiegung	11,0	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
relativ duktiles Versagen					



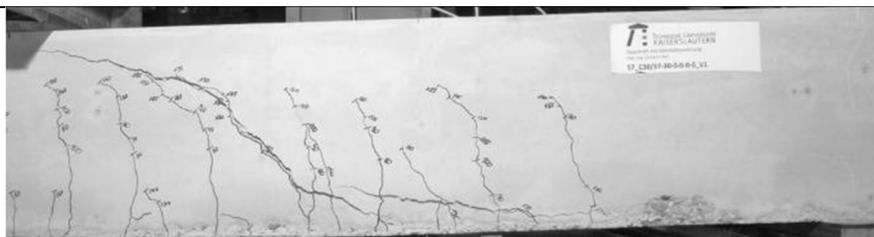
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	78 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	80 cm	9,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	94,5 cm	20 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	51 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	27 cm
F	Ende des Dübelrisses	6 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		44 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		11 °

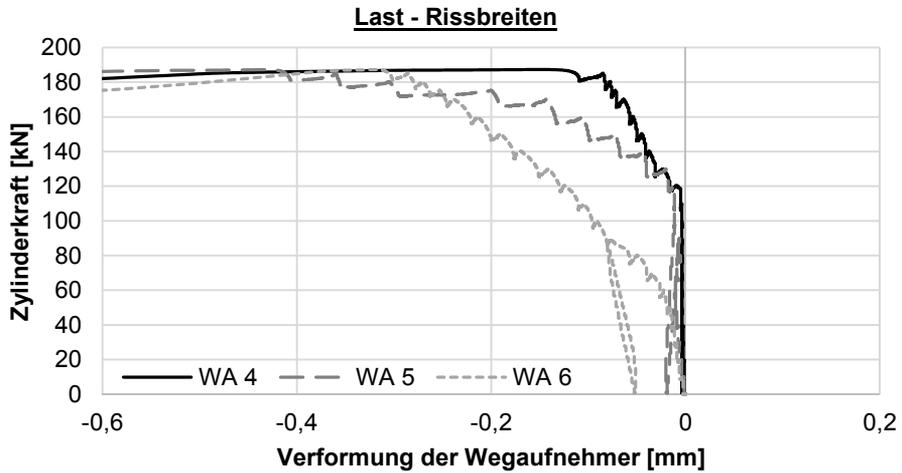
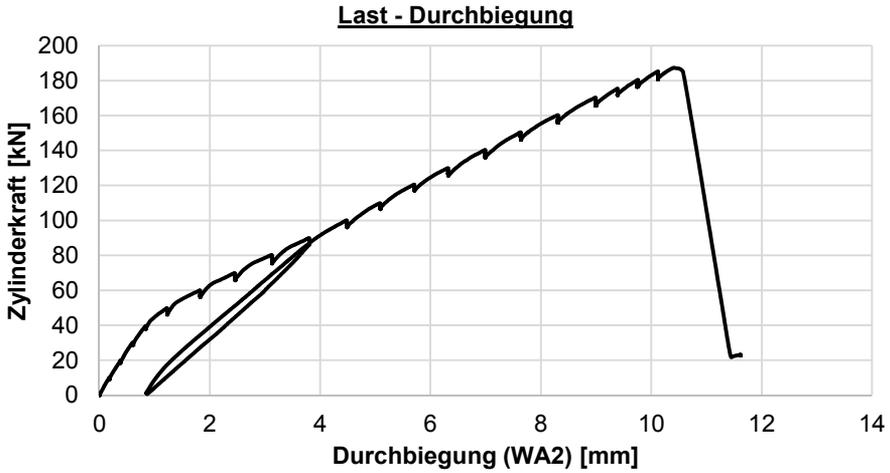
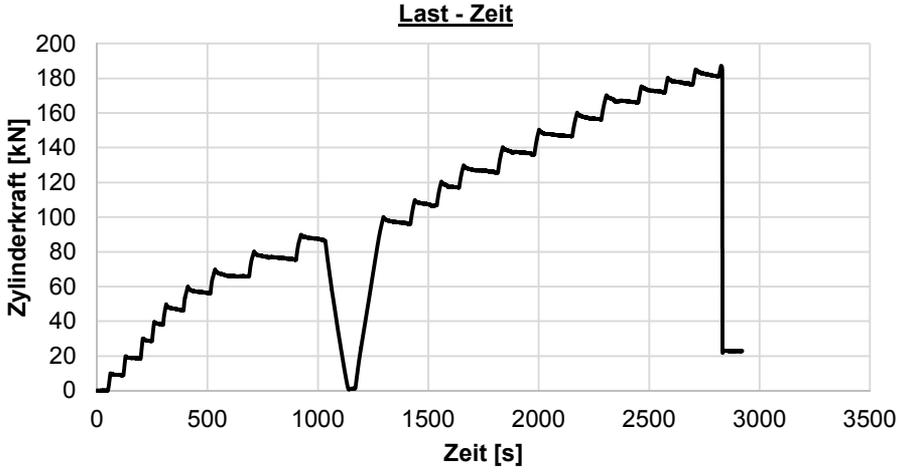
Hinweise zum Rissbild

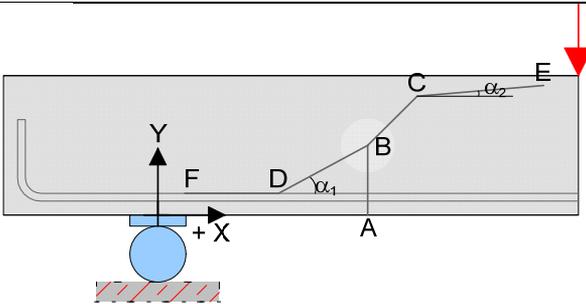
keine



S7_V2 = S7_C30/37-30-0,18-0,25-6-2_V2

Datum	29.10.14	Beginn	14:50	Ende	15:35
Bezeichnung	S7_C30/37-30-0,18-0,25-6-2_V2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	38,2 N/mm ²	Betonalter	43 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
<p>Detail</p> <p>30</p> <p>WA 4 WA 5</p> <p>WA 6</p> <p>WA 1 WA 2 WA 3</p> <p>27.5 61.25 122.5 61.25 75.00 150.0 75.00 27.5</p> <p>327.5</p>					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	90	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,803	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,860	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	116	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	190	kN	erreichte Zylinderlast	188	kN
			Durchbiegung	11,62	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

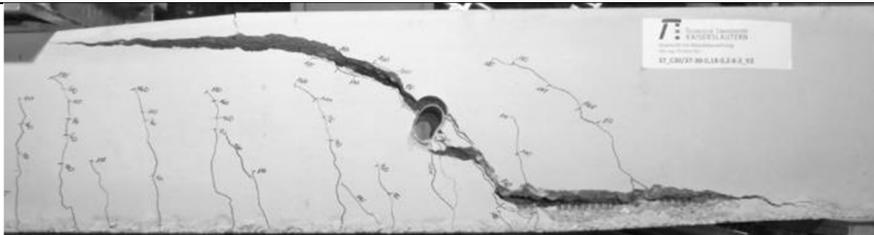


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	50 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	54,5 cm	10 cm
C	zweite Richtungsänderung	65 cm	21 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	48,5 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	1,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	5 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse	42 °	
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse	44 °	

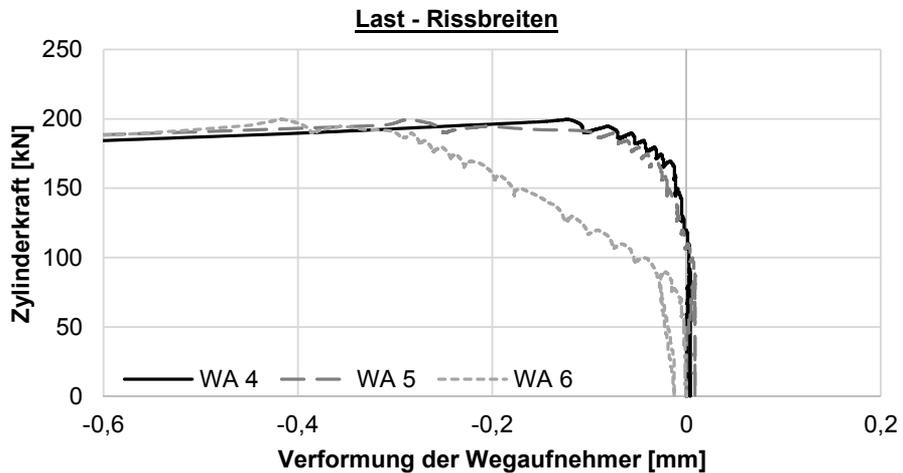
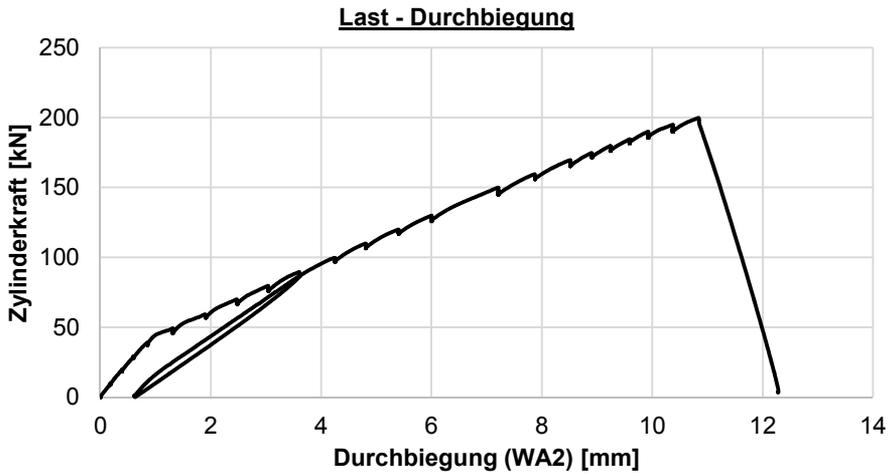
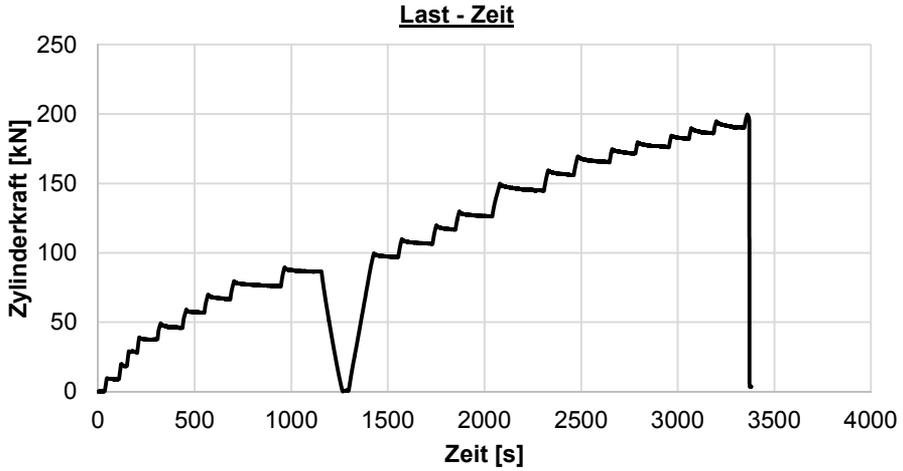
Hinweise zum Rissbild

keine

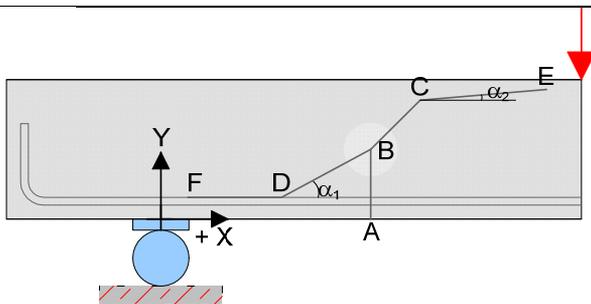


S7_V3 = S7_C30/37-30-0,18-0,37-6-3_V3

Datum	29.10.14	Beginn	16:00	Ende	17:05
Bezeichnung	S7_C30/37-30-0,18-0,37-6-3_V3				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	38,2 N/mm ²	Betonalter	43 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	90	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,61	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,626	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	L / 500 =		5,45 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			119 kN		
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	190	kN	erreichte Zylinderlast	200	kN
			Durchbiegung	10,8	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



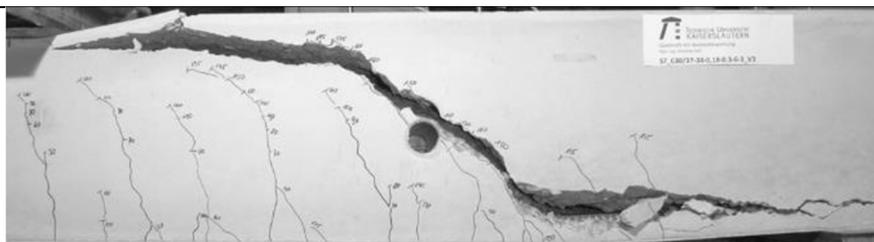
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	47 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	48,5 cm	9 cm
C	zweite Richtungsänderung	68 cm	23 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	43 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	28 cm
F	Ende des Dübelrisses	-25 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse	33 °	
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse	7 °	

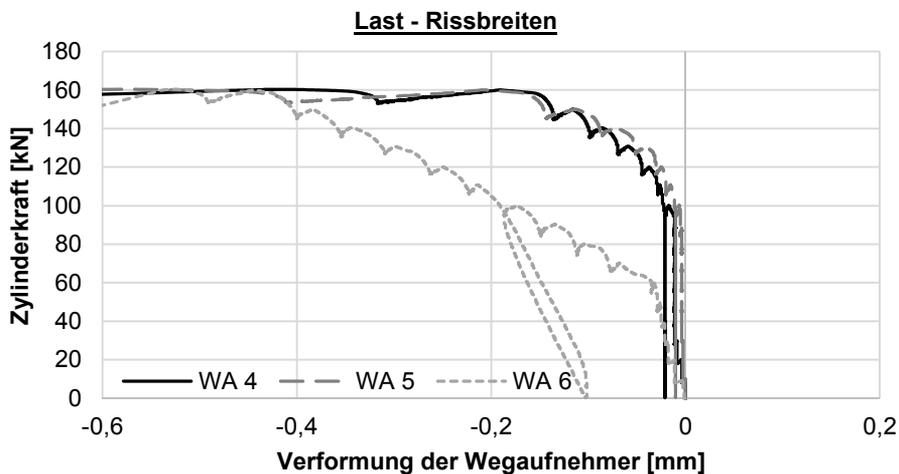
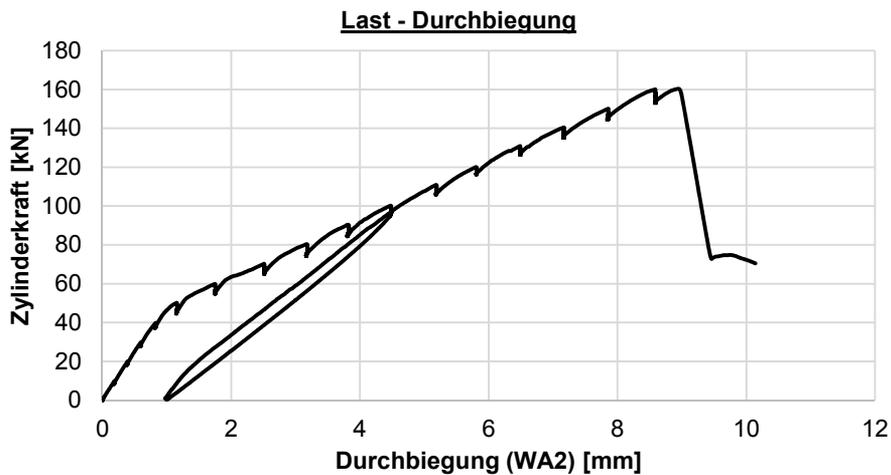
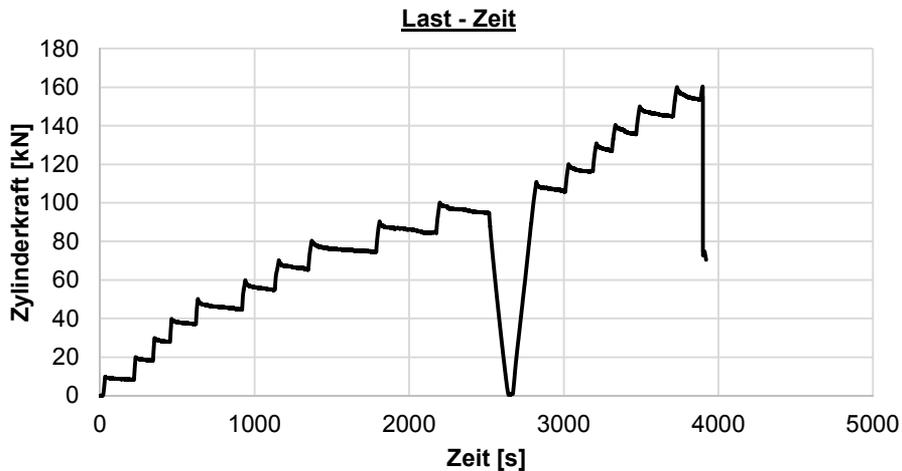
Hinweise zum Rissbild

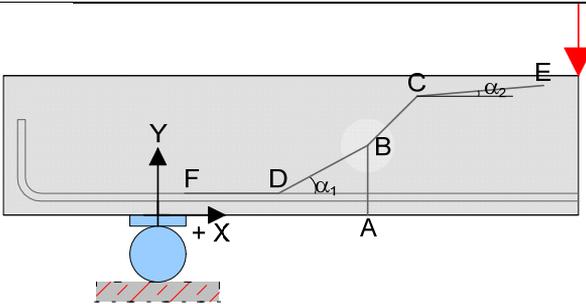
keine



S7_V4 = S7_C30/37-30-0,33-0,25-6-2_V4

Datum	29.10.14	Beginn	10:50	Ende	12:00
Bezeichnung	S7_C30/37-30-0,33-0,25-6-2_V4				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	38,2 N/mm ²	Betonalter	43 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	100	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	4,486	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,99	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45		mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	115		kN		
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	210	kN		erreichte Zylinderlast	170
				Durchbiegung	10,14
					mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

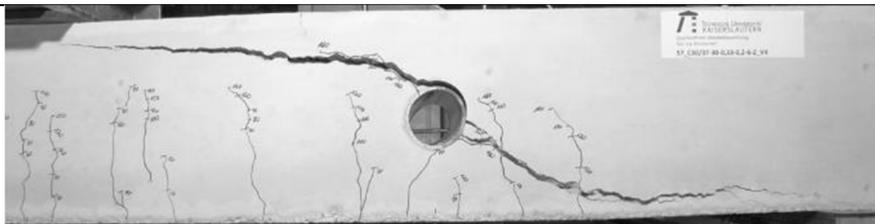


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	48,5 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	53 cm	10 cm
C	zweite Richtungsänderung	69 cm	22,5 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	41 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	27 cm
F	Ende des Dübelrisses	-1 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse	32 °	
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse	7,5 °	

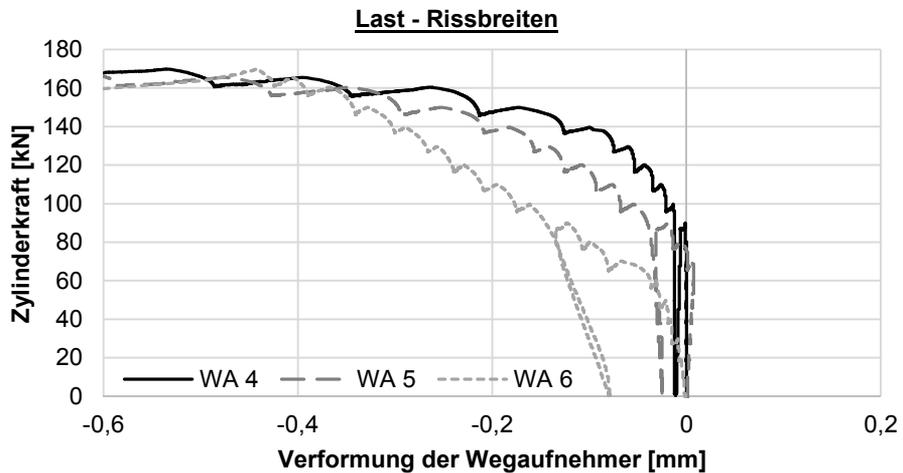
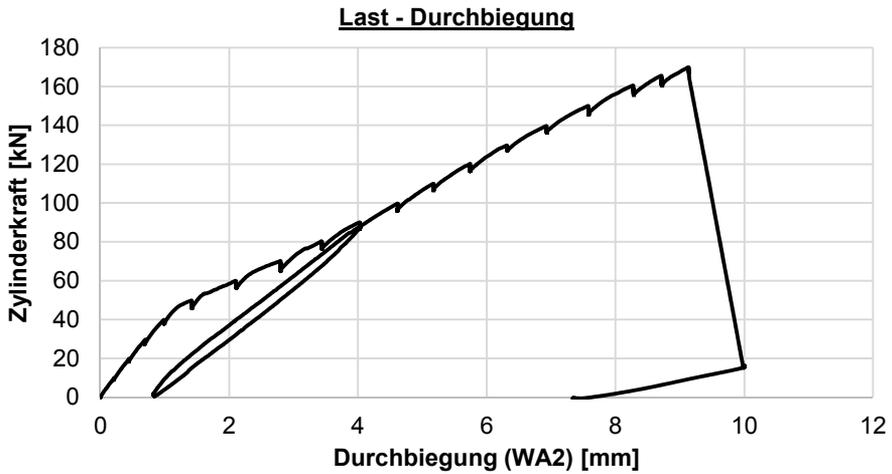
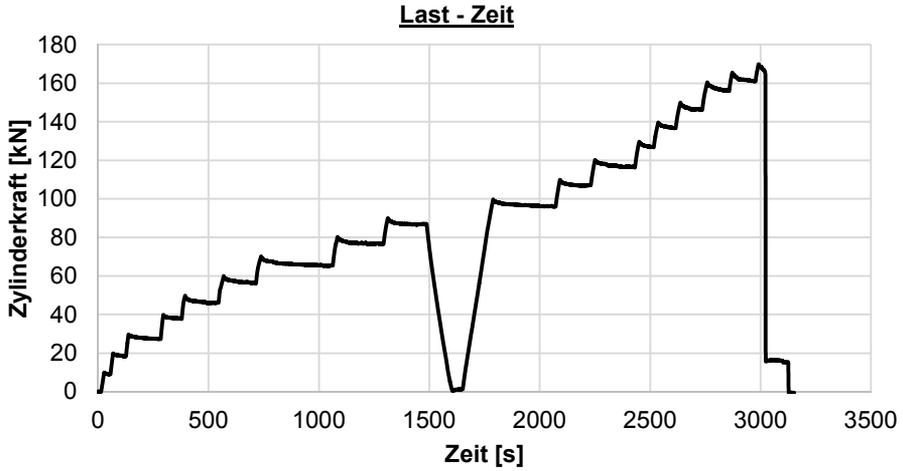
Hinweise zum Rissbild

keine

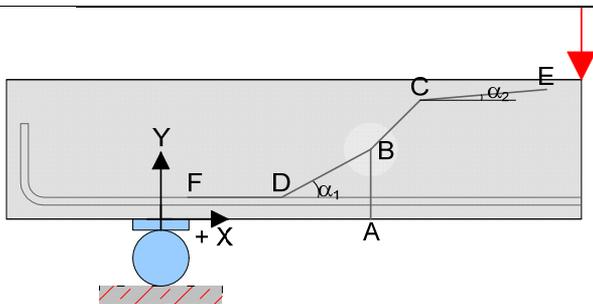


S7_V5 = S7_C30/37-30-0,33-0,37-6-3_V5

Datum	29.10.14	Beginn	13:15	Ende	14:15
Bezeichnung	S7_C30/37-30-0,33-0,37-6-3_V5				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	38,2 N/mm ²	Betonalter	43 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
<p>Detail</p> <p>30</p> <p>WA 4 WA 5</p> <p>WA 6</p> <p>WA 1 WA 2 WA 3</p> <p>27,5 61,25 122,5 61,25 327,5 75,00 150,0 75,00 27,5</p>					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	90	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	4,03	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,83	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	L / 500 =		5,45 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			115 kN		
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	190	kN	erreichte Zylinderlast	170	kN
			Durchbiegung	9,2	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



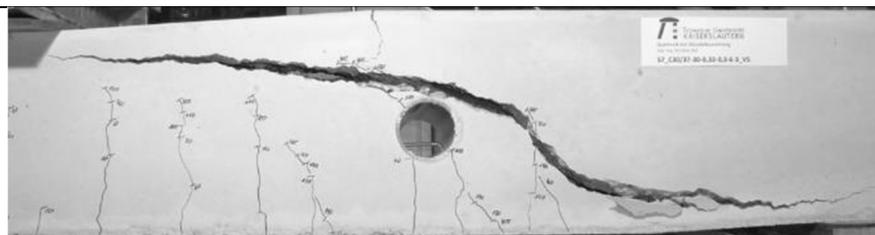
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	46,5 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	40 cm	11 cm
C	zweite Richtungsänderung	49 cm	17 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	31 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	28,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	-16 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		50 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		17 °

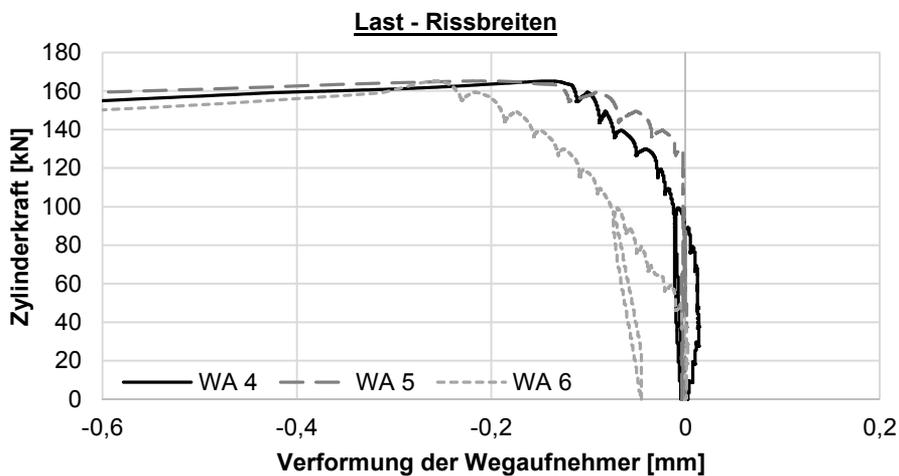
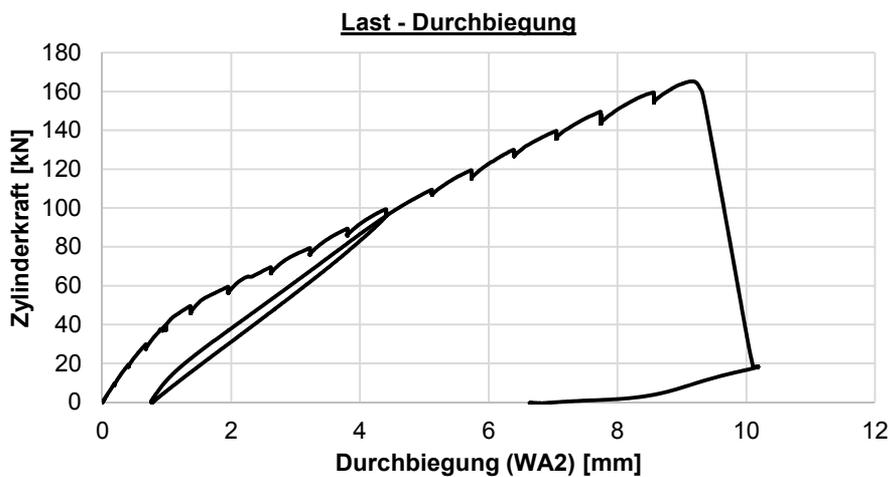
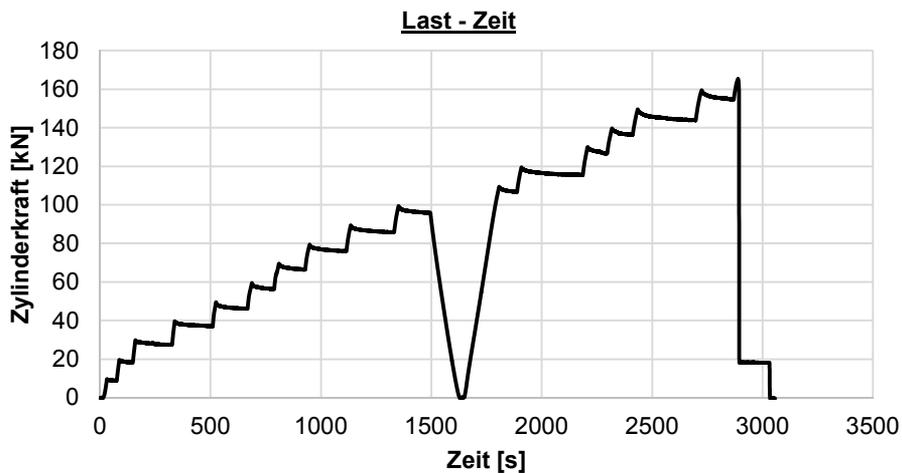
Hinweise zum Rissbild

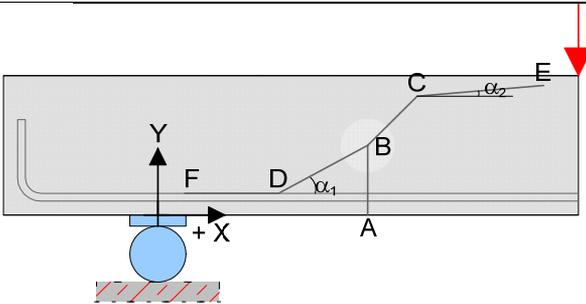
keine



S7_V6 = S7_C30/37-30-0,33-0,50-6-4_V6

Datum	30.10.14	Beginn	10:10	Ende	11:00
Bezeichnung	S7_C30/37-30-0,33-0,50-6-4_V6				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	38,2 N/mm ²	Betonalter	44 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	100	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	4,408	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,766	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$		5,45 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			115		kN
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	210	kN	erreichte Zylinderlast	165	kN
			Durchbiegung	9,3	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

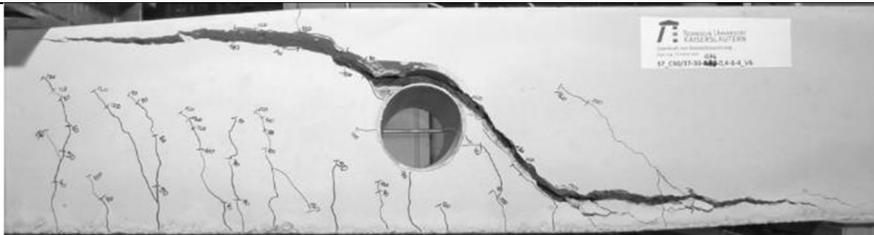


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	42,5 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	55 cm	17,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	74 cm	25 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	40 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	28,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	11 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		40 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		9 °

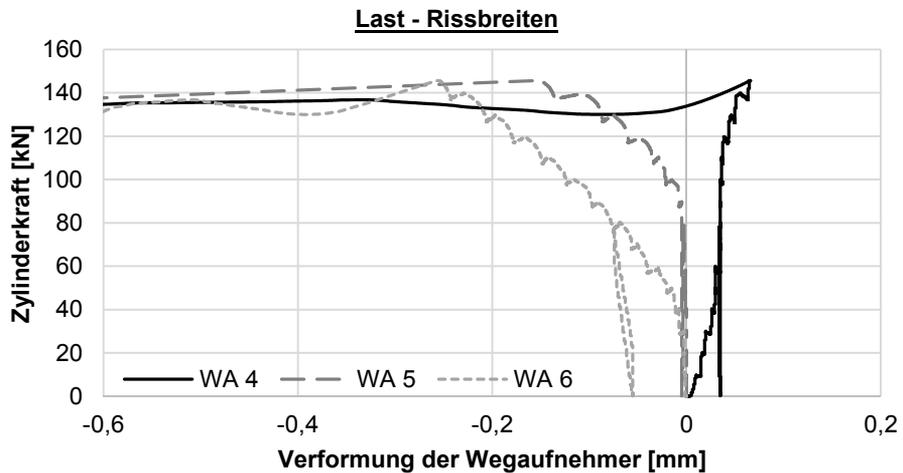
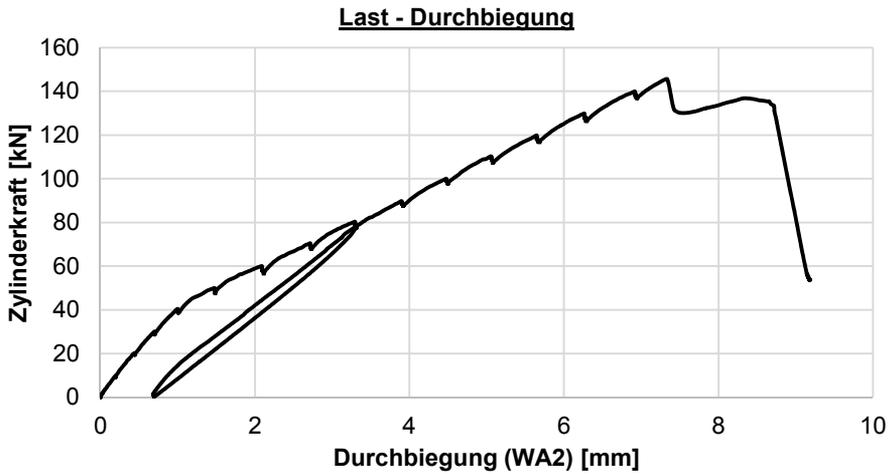
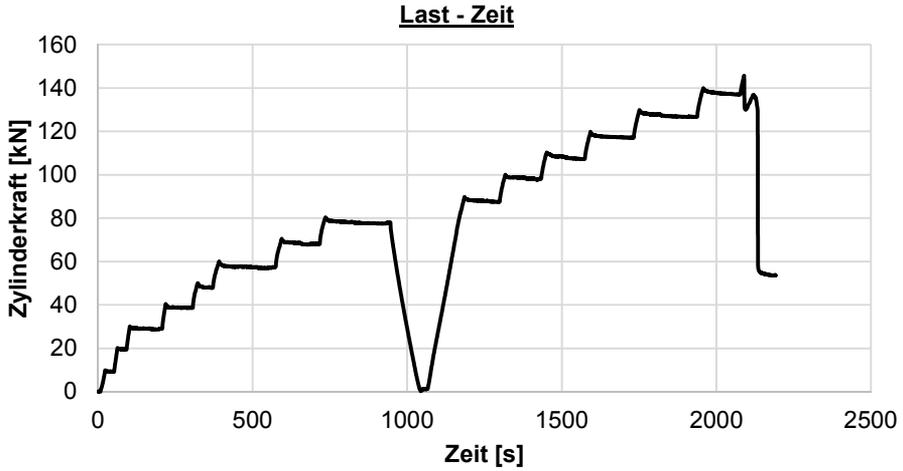
Hinweise zum Rissbild

keine



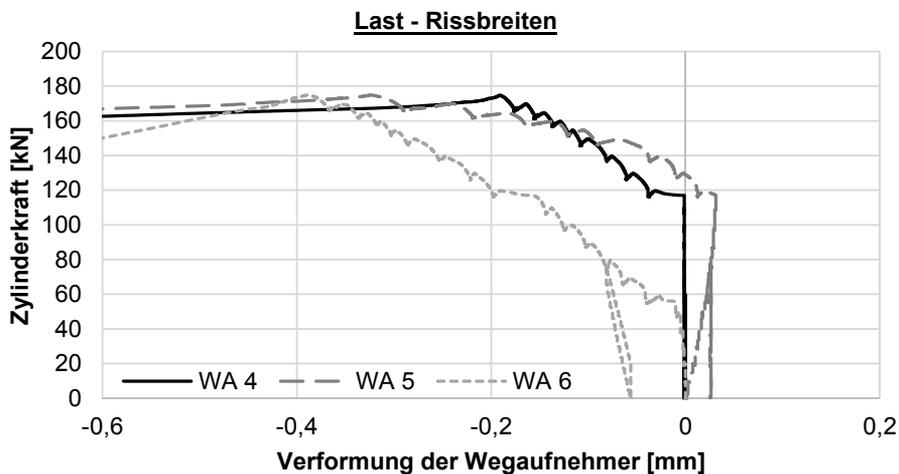
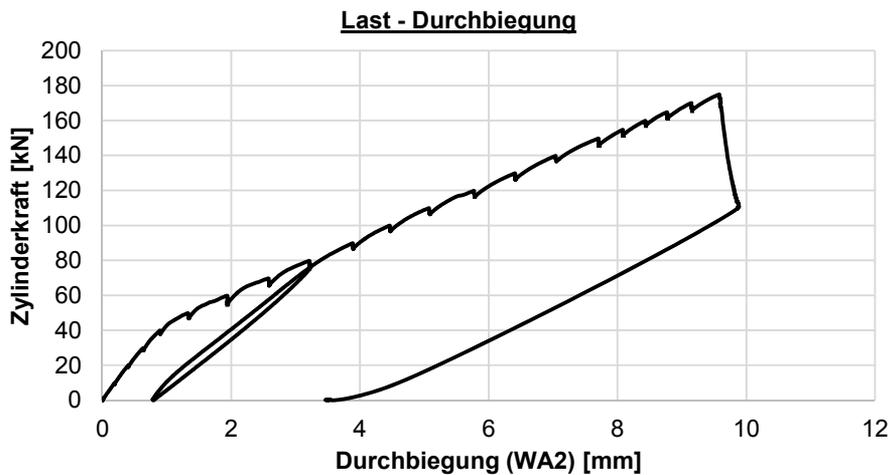
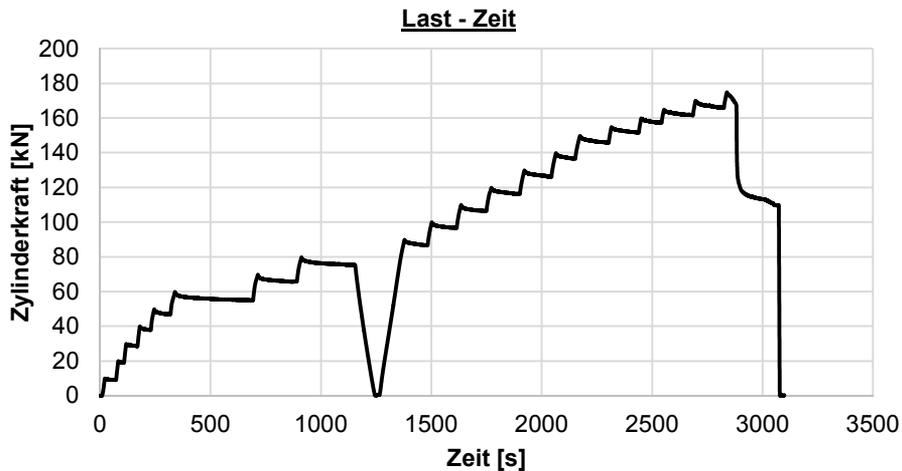
S7_V7 = S7_C30/37-30-0,46-0,25-6-2_V7

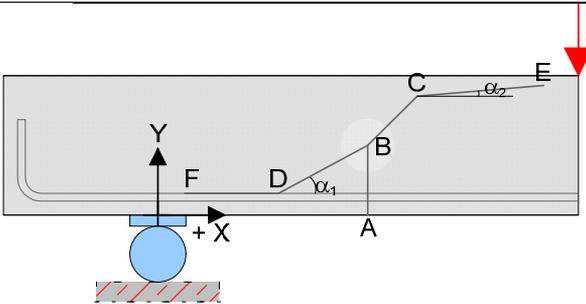
Datum	30.10.14	Beginn	14:20	Ende	15:00
Bezeichnung	S7_C30/37-30-0,46-0,25-6-2_V7				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	38,2 N/mm ²	Betonalter	44 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	80	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,296	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,691	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	5,45 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung				116	kN
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	165	kN	erreichte Zylinderlast	145	kN
			Durchbiegung	7,3	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



S7_V8 = S7_C30/37-30-0,46-0,37-6-3_V8

Datum	30.10.14	Beginn	11:30	Ende	12:30
Bezeichnung	S7_C30/37-30-0,46-0,37-6-3_V8				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	38,2 N/mm ²	Betonalter	44 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	80	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,22	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,796	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	L / 500 =		5,45 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			115 kN		
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	170	kN	erreichte Zylinderlast	175	kN
			Durchbiegung	9,6	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	36 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	45,5 cm	16 cm
C	zweite Richtungsänderung	74 cm	23 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	31 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	28,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	5 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		22 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		7 °

Hinweise zum Rissbild

keine



Anhang B: Protokolle zu den Versuchen mit Gitterträgern

Nachfolgend sind die Protokolle aller Versuche dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass manche Versagensbilder spiegelverkehrt zu dem schematischen Rissverlauf dargestellt sind.

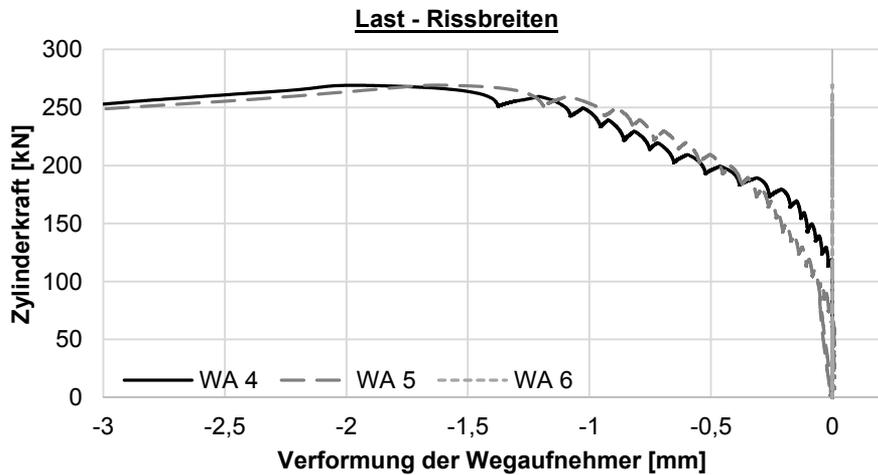
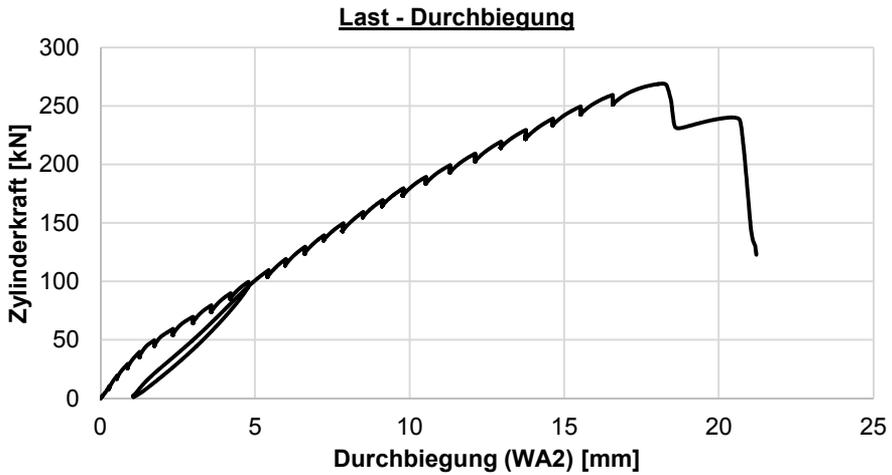
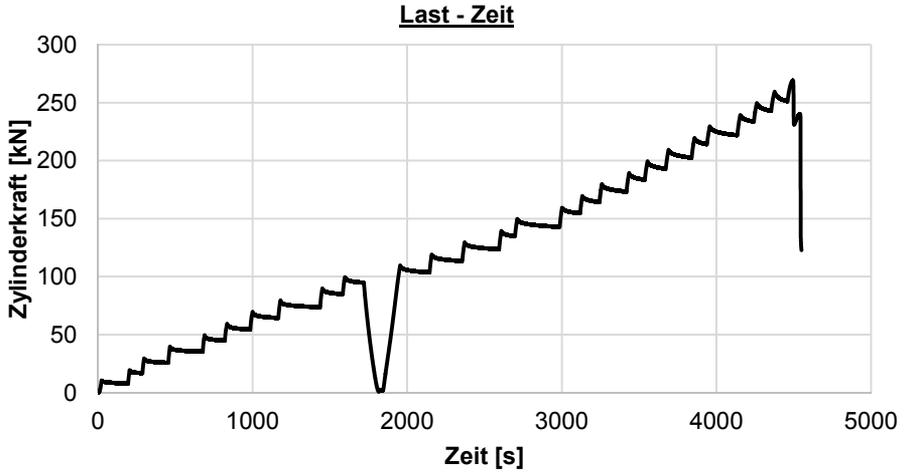
Anhang B – Versuchsprotokolle, Last-Verformungskurven, Rissbreitenentwicklung und Rissbilder

GT_V1-1 = GT_C30/37-25-40-0,35-3-7-2-Längs_V1-1	3
GT_V1-2 = GT_C30/37-25-40-0,35-3-7-2-Längs_V1-2	6
GT_V1-3 = GT_C30/37-25-40-0,35-3-7-2-Längs_V1-3	9
GT_V2-1 = GT_C30/37-25-40-10 x 25-1-7-2-Längs_V2-1	12
GT_V2-2 = GT_C30/37-25-40-10 x 25-1-7-2-Längs_V2-2	15
GT_V2-3 = GT_C30/37-25-40-10 x 25-1-7-2-Längs_V2-3	18
GT_V3-1 = GT_C30/37-25-40-0,35-1-7-2-Quer_V3-1	21
GT_V3-2 = GT_C30/37-25-40-0,35-1-7-2-Quer_V3-2	24
GT_V3-3 = GT_C30/37-25-40-0,35-1-7-2-Quer_V3-3	27
GT_V4-1 = GT_C30/37-25-40-0,35-1-7-1-Quer_V4-1	30
GT_V4-2 = GT_C30/37-25-40-0,35-1-7-1-Quer_V4-2	33
GT_V4-3 = GT_C30/37-25-40-0,35-1-7-1-Quer_V4-3	36
GT_V5-1 = GT_C30/37-25-40-0-0-0-0-0_V5-1	39
GT_V5-2 = GT_C30/37-25-40-0-0-0-0-0_V5-2	42
GT_V6-1 = GT_C30/37-25-40-0-0-7-2-Längs_V6-1	45
GT_V6-2 = GT_C30/37-25-40-0-0-7-2-Längs_V6-2	48
GT_V7-1 = GT_C30/37-25-40-0-0-7-2-Quer_V7-1	51
GT_V7-2 = GT_C30/37-25-40-0-0-7-2-Quer_V7-2	54
1GT_V1-1 = 1GT_C30/37-25-30-0,33-3-7-1-Längs_V1-1	57
1GT_V1-2 = 1GT_C30/37-25-30-0,33-3-7-1-Längs_V1-2	60
1GT_V2-1 = 1GT_C30/37-25-35-0,33-3-7-1-Längs_V2-1	63
1GT_V2-2 = 1GT_C30/37-25-35-0,33-3-7-1-Längs_V2-2	66
1GT_V3-1 = 1GT_C30/37-25-40-0,33-3-7-1-Längs_V3-1	69
1GT_V3-2 = 1GT_C30/37-25-40-0,33-3-7-1-Längs_V3-2	72
1GT_V4-1 = 1GT_C30/37-25-45-0,33-3-7-1-Längs_V4-1	75
1GT_V4-2 = 1GT_C30/37-25-45-0,33-3-7-1-Längs_V4-2	78
1GT_V5-1 = 1GT_C30/37-25-40-0-0-0-0-0_V5-1	81
1GT_V5-2 = 1GT_C30/37-25-40-0,33-3-0-0-0_V5-2	83
2GT_V1-1 = 2GT_C30/37-25-40-0,33-1-OB-7-1-Quer_V1-1	86
2GT_V1-2 = 2GT_C30/37-25-40-0,33-1-FT-7-1-Quer_V1-2	89
2GT_V2-1 = 2GT_C30/37-25-40-0,33-1-OB-6-1-Quer_V2-1	92
2GT_V2-2 = 2GT_C30/37-25-40-0,33-1-FT-6-1-Quer_V2-2	95
2GT_V3-1 = 2GT_C30/37-25-40-0,33-1-0-0-0_V3-1	98
2GT_V3-2 = 2GT_C30/37-25-40-0-0-0-0-0_V3-2	101
3GT_V1-1 = 3GT_C30/37-25-25-0,33-3-7-1-Längs_V1-1	104
3GT_V1-2 = 3GT_C30/37-25-25-0,33-3-7-1-Längs_V1-2	107
3GT_V2-1 = 3GT_C30/37-25-30-0,33-3-7-1-Längs_V2-1	110
3GT_V2-2 = 3GT_C30/37-25-30-0,33-3-7-1-Längs_V2-2	113
3GT_V3-1 = 3GT_C30/37-25-30-0,33-3-6-1-Längs_V3-1	116
3GT_V3-2 = 3GT_C30/37-25-30-0,33-3-6-1-Längs_V3-2	119
3GT_V4-1 = 3GT_C30/37-25-30-0-0-0-0-0_V4-1	122

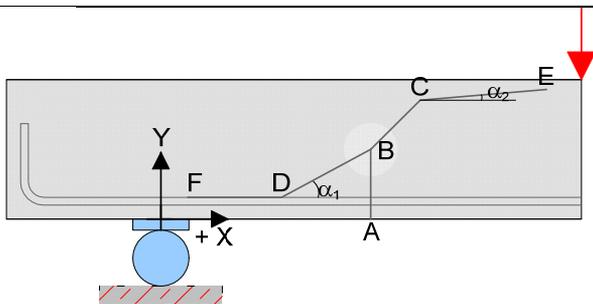
4GT_V1-1 = 4GT_C30/37-25-40-0,33-1-FT-6-1-Quer_V1-1.....	125
4GT_V1-2 = 4GT_C30/37-25-40-0,33-1-OB-6-1-Quer_V1-2.....	128
4GT_V2-1 = 4GT_C30/37-25-40-0,33-1-Eigen-6-2-Quer_V2-1	131
4GT_V2-2 = 4GT_C30/37-25-40-0,33-1-Eigen-6-3-Quer_V2-2	134
4GT_V3-1 = 4GT_C30/37-25-40-0-0-0-0_V3-1	137
4GT_V3-2 = 4GT_C30/37-25-40-0,33-1-0-0-0_V3-2	140

GT_V1-1 = GT_C30/37-25-40-0,35-3-7-2-Längs_V1-1

Datum	17.12.13	Beginn	18:40	Ende	20:00
Bezeichnung	GT_C30/37-25-40-0,35-3-7-2-Längs_V1-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,9 N/mm ²	Betonalter	20 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
Schwindrisse an oberhalb der äußeren Öffnungen					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	100	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	4,79	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	1,07	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	L / 500 =			4,40 mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung				92 kN	
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	210	kN	erreichte Zylinderlast	269	kN
			Durchbiegung	18	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



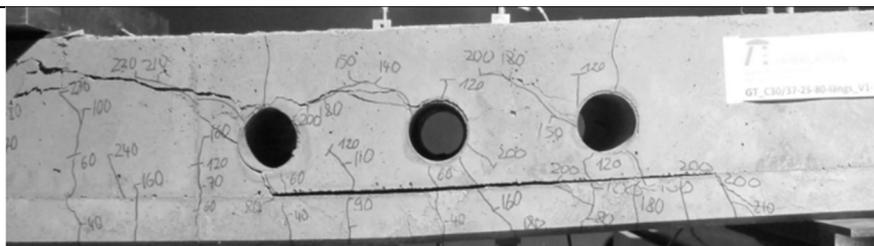
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	cm	cm
C	zweite Richtungsänderung	cm	cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	cm
F	Ende des Dübelrisses	cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		°

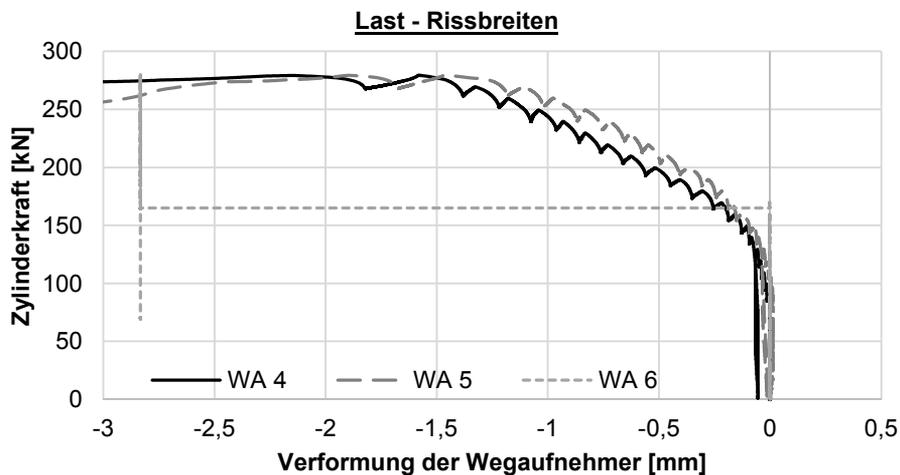
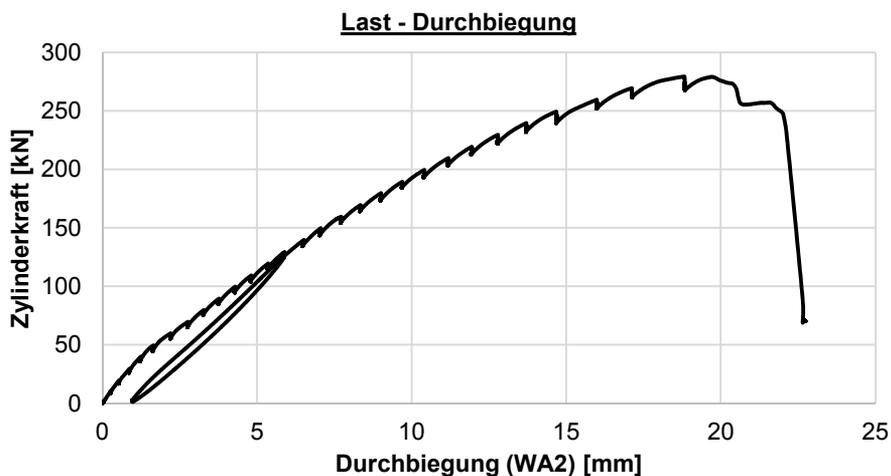
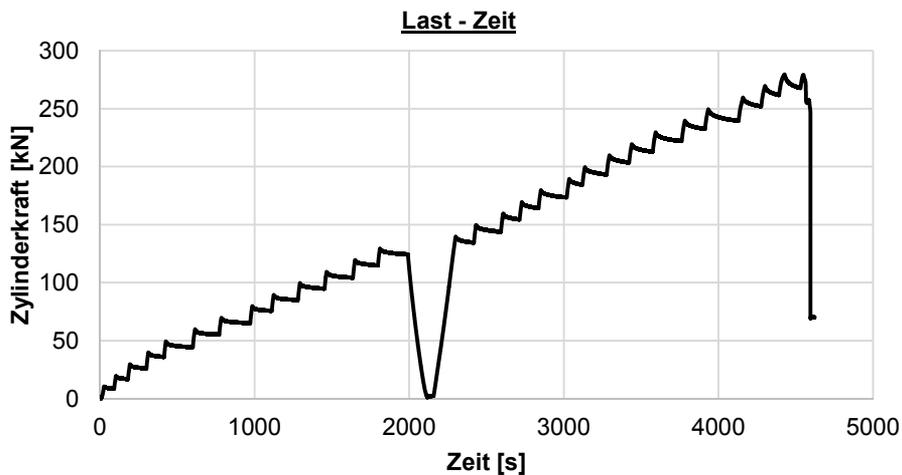
Hinweise zum Rissbild

keine

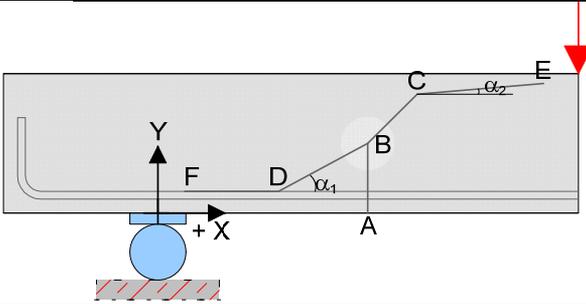


GT_V1-2 = GT_C30/37-25-40-0,35-3-7-2-Längs_V1-2

Datum	17.12.13	Beginn	20:21	Ende	22:00
Bezeichnung	GT_C30/37-25-40-0,35-3-7-2-Längs_V1-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,9 N/mm ²	Betonalter	20 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
Schwindrisse an oberhalb der äußeren Öffnungen Schwindrisse oberhalb entlang des Gitterträger-Obergurts					
Messtechnik					
<p>Detail</p> <p>WA 4 WA 5 WA 6 WA 7 WA 1 WA 2 WA 3</p> <p>28 50 100 150 210 270 275</p>					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	130	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	5,89	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,97	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	100	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	270	kN	erreichte Zylinderlast	280	kN
			Durchbiegung	19	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



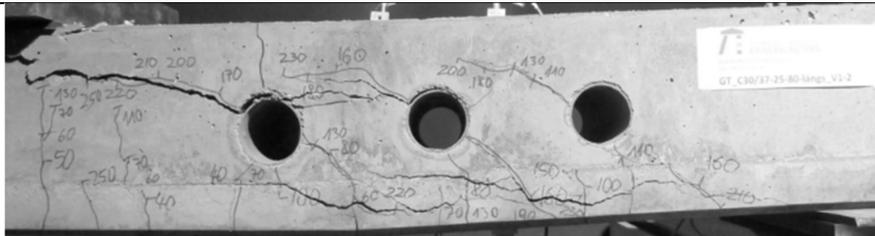
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	cm	cm
C	zweite Richtungsänderung	cm	cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	cm
F	Ende des Dübelrisses	cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		°

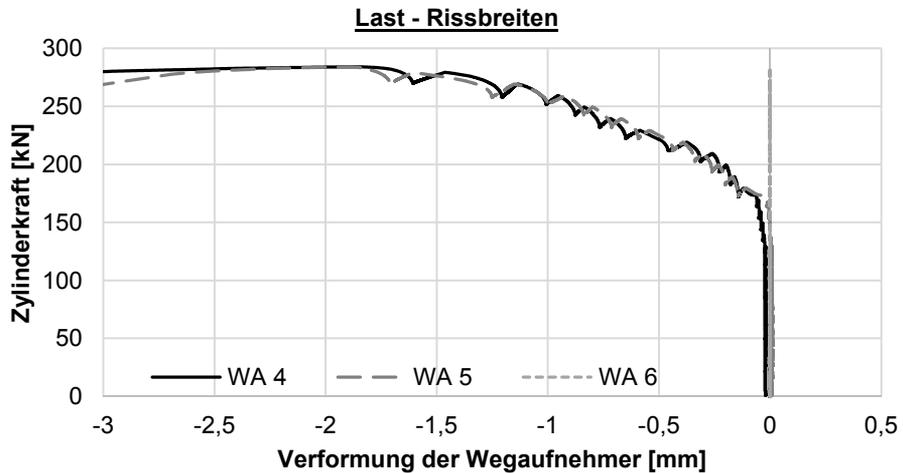
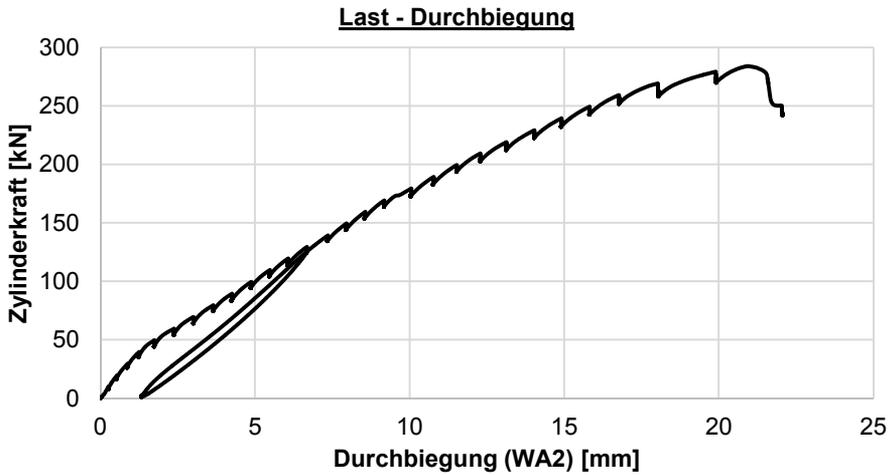
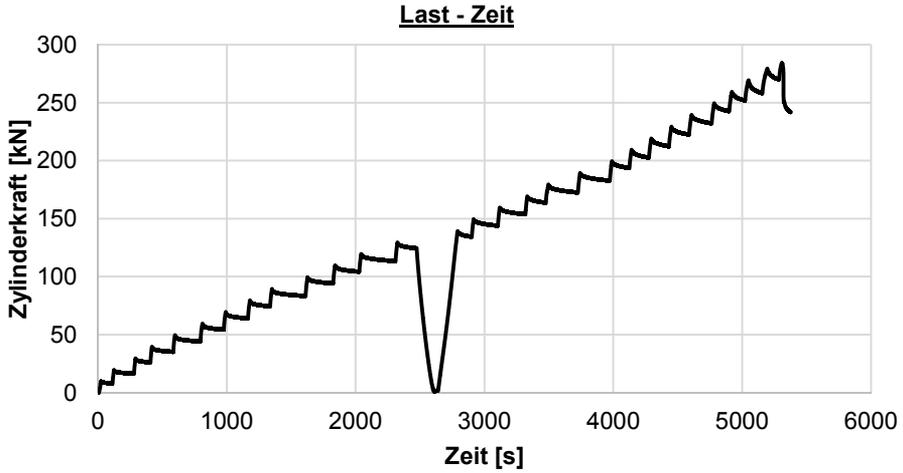
Hinweise zum Rissbild

keine

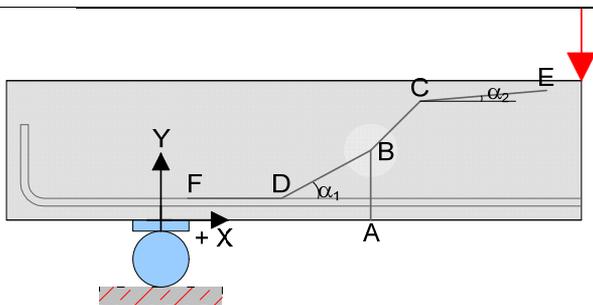


GT_V1-3 = GT_C30/37-25-40-0,35-3-7-2-Längs_V1-3

Datum	18.12.13	Beginn	08:30	Ende	10:00
Bezeichnung	GT_C30/37-25-40-0,35-3-7-2-Längs_V1-3				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,9 N/mm ²	Betonalter	21 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
Schwindrisse an oberhalb der äußeren Öffnungen Schwindrisse oberhalb entlang des Gitterträger-Obergurts					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	130	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	6,68	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	1,33	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	L / 500 =		4,40 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			92		kN
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	270	kN	erreichte Zylinderlast	284	kN
			Durchbiegung	21	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



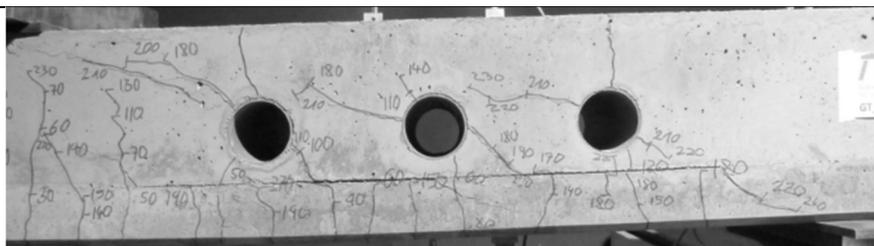
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	cm	cm
C	zweite Richtungsänderung	cm	cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	cm
F	Ende des Dübelrisses	cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		°

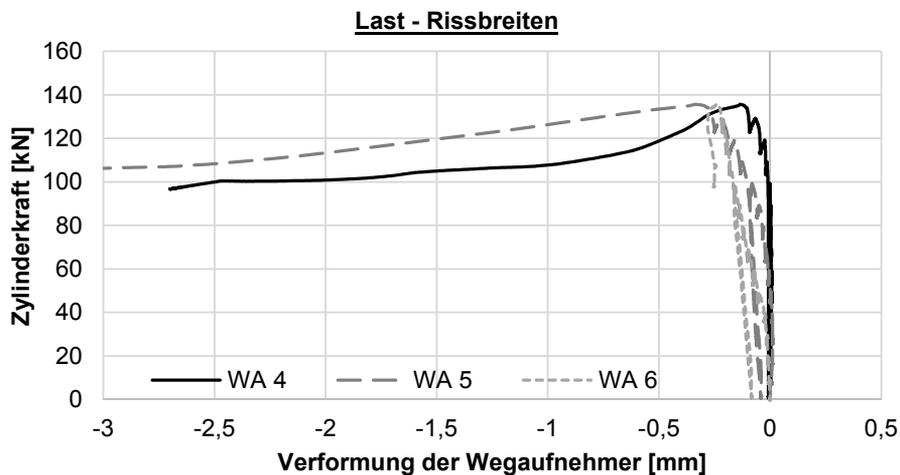
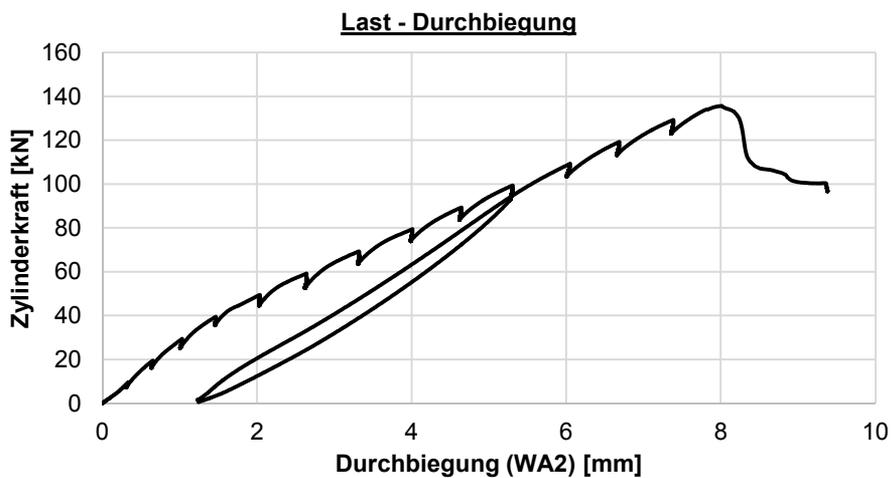
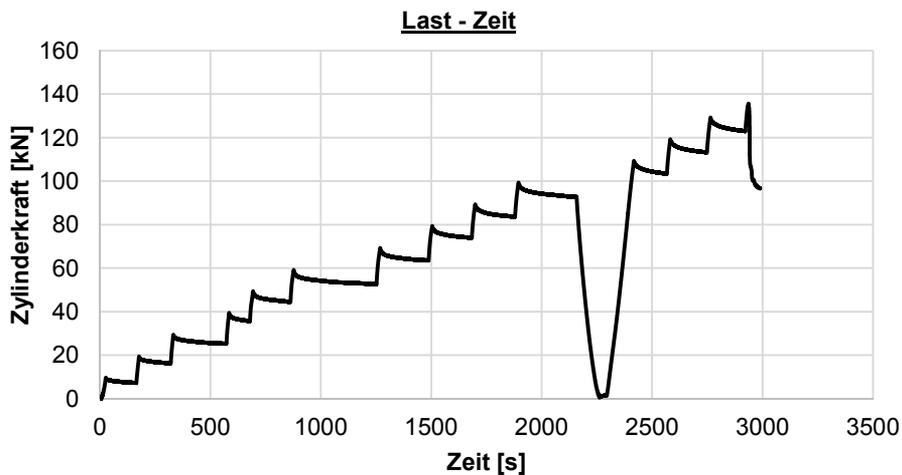
Hinweise zum Rissbild

keine

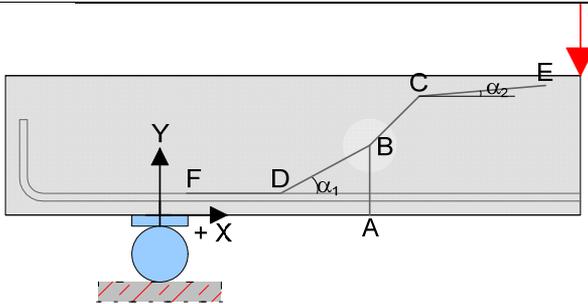


GT_V2-1 = GT_C30/37-25-40-10 x 25-1-7-2-Längs_V2-1

Datum	17.12.13	Beginn	08:00	Ende	09:10
Bezeichnung	GT_C30/37-25-40-10 x 25-1-7-2-Längs_V2-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,9 N/mm ²	Betonalter	20 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
Schwindrisse im Bereich der Öffnung Schwindrisse oberhalb entlang des Gitterträger-Obergurts					
Messtechnik					
<p>Detail</p>					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	100	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	5,27	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	1,25	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,03	mm			
Grenzdurchbiegung	L / 500 =		4,40 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			85	kN	
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	210	kN	erreichte Zylinderlast	136	kN
			Durchbiegung	8	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



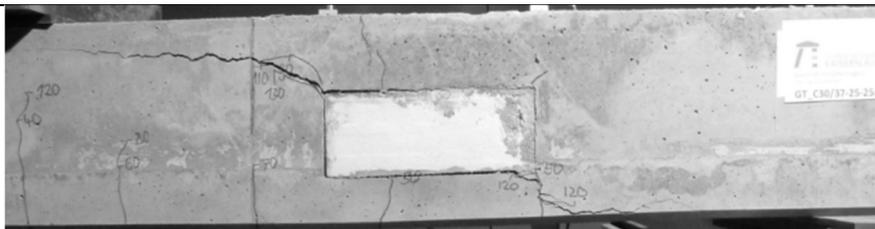
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	cm	cm
C	zweite Richtungsänderung	cm	cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	cm
F	Ende des Dübelrisses	cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		°

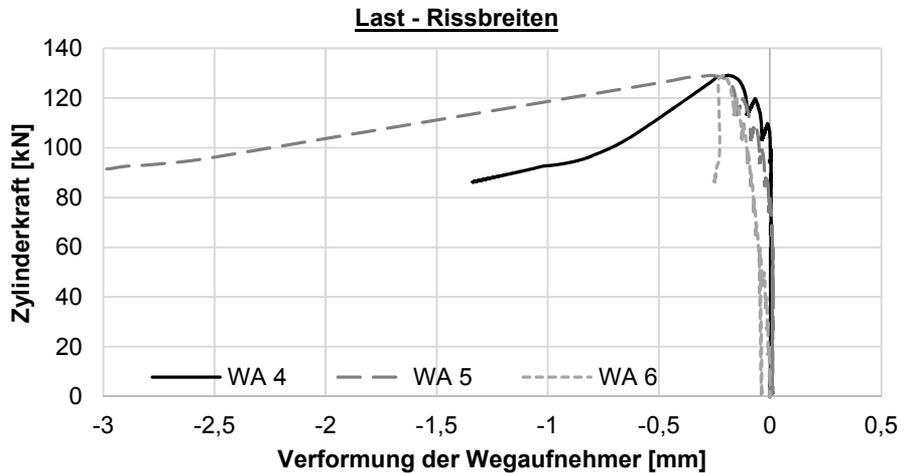
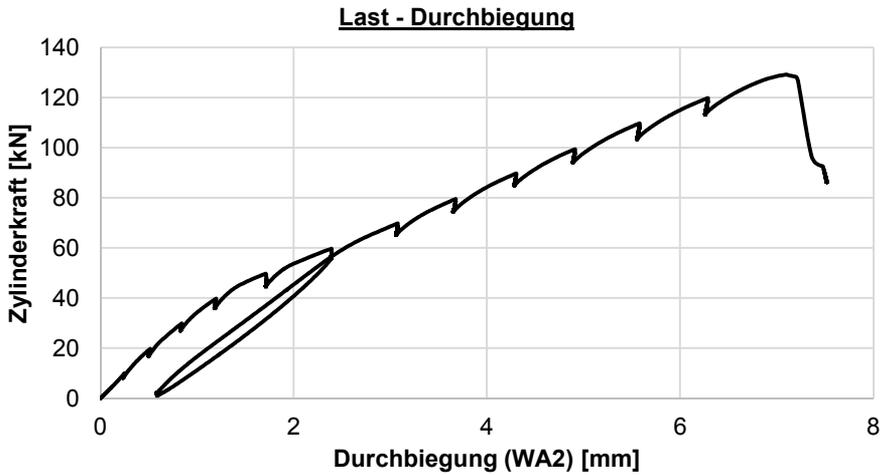
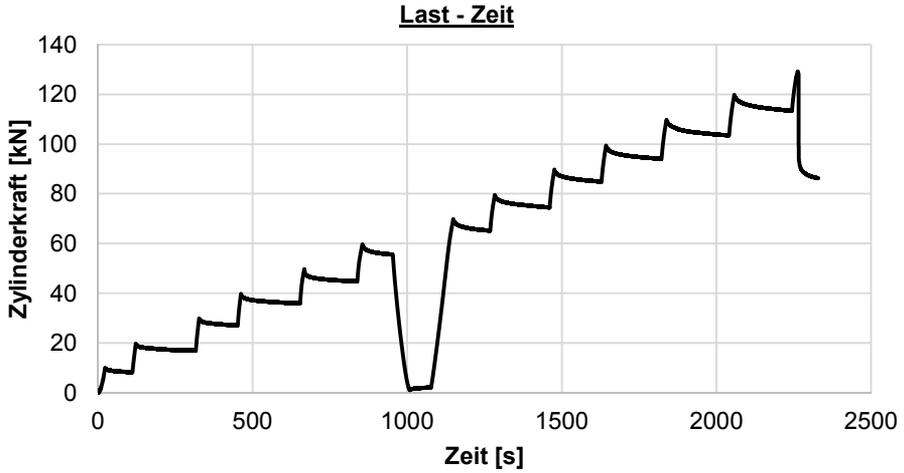
Hinweise zum Rissbild

keine

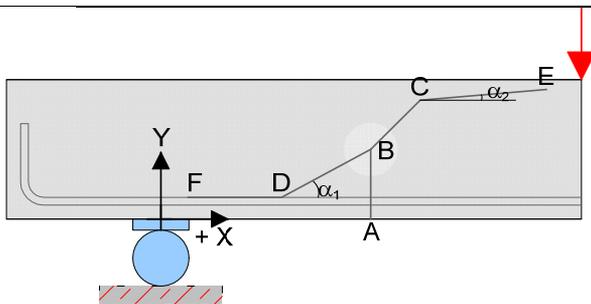


GT_V2-2 = GT_C30/37-25-40-10 x 25-1-7-2-Längs_V2-2

Datum	17.12.13	Beginn	09:35	Ende	10:40
Bezeichnung	GT_C30/37-25-40-10 x 25-1-7-2-Längs_V2-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,9 N/mm ²	Betonalter	20 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
Schwindrisse an oberhalb der äußeren Öffnungen Schwindrisse oberhalb entlang des Gitterträger-Obergurts					
Messtechnik					
<p>Detail</p>					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	60	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	2,39	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,60	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40		mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	90		kN		
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	135	kN	erreichte Zylinderlast	129	kN
			Durchbiegung	7,2	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



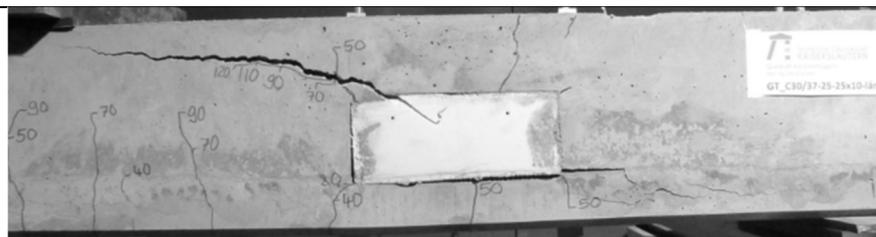
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	cm	cm
C	zweite Richtungsänderung	cm	cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	cm
F	Ende des Dübelrisses	cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		°

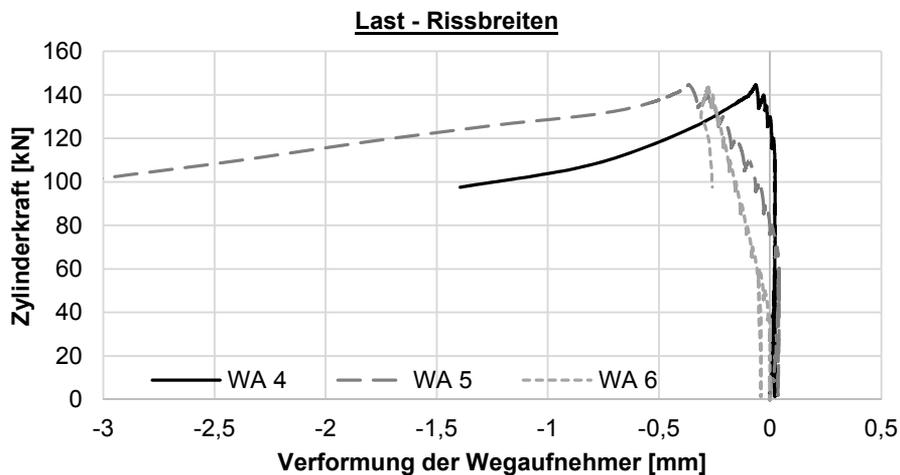
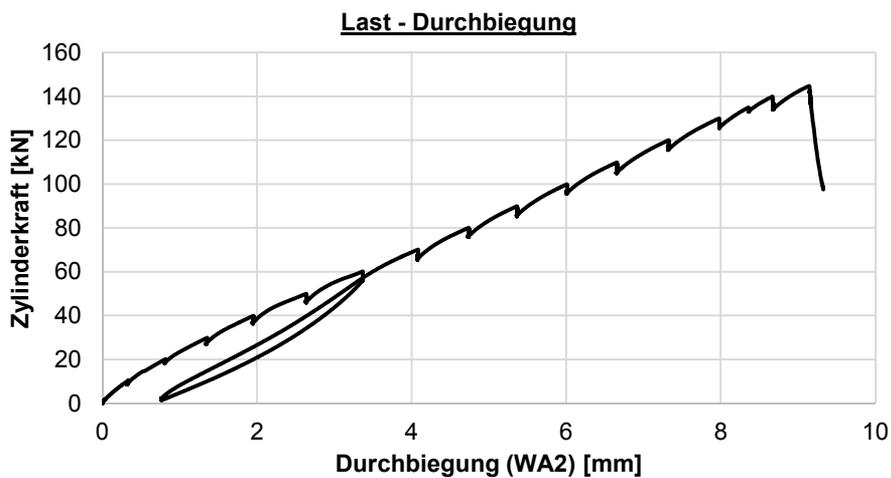
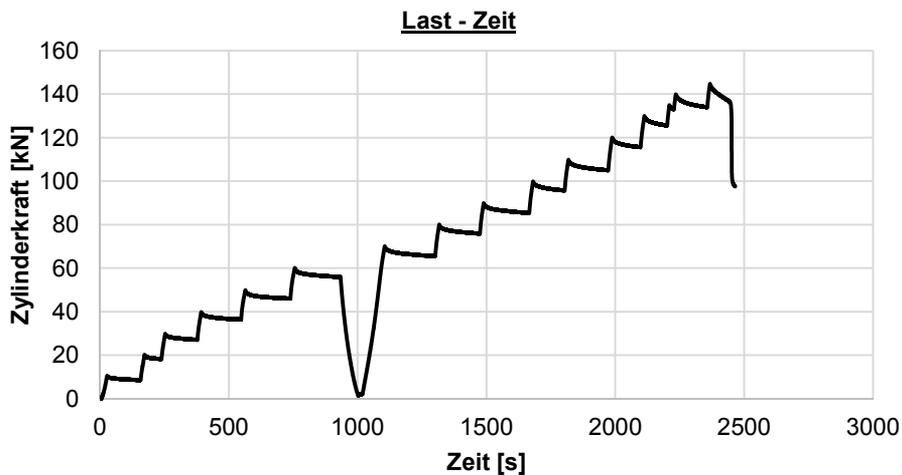
Hinweise zum Rissbild

keine

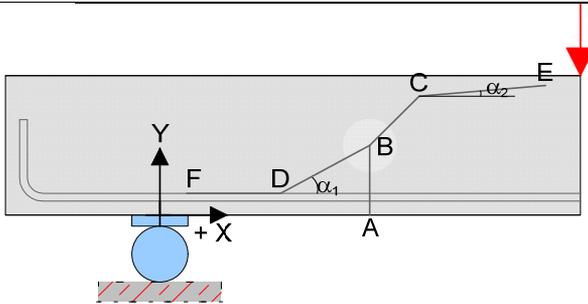


GT_V2-3 = GT_C30/37-25-40-10 x 25-1-7-2-Längs_V2-3

Datum	18.12.13	Beginn	10:25	Ende	11:40
Bezeichnung	GT_C30/37-25-40-10 x 25-1-7-2-Längs_V2-3				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,9 N/mm ²	Betonalter	21 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
Schwindrisse an oberhalb der äußeren Öffnungen Schwindrisse oberhalb entlang des Gitterträger-Obergurts					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	60	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,37	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,77	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40		mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	74	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	130	kN	erreichte Zylinderlast	145	kN
			Durchbiegung	9,2	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



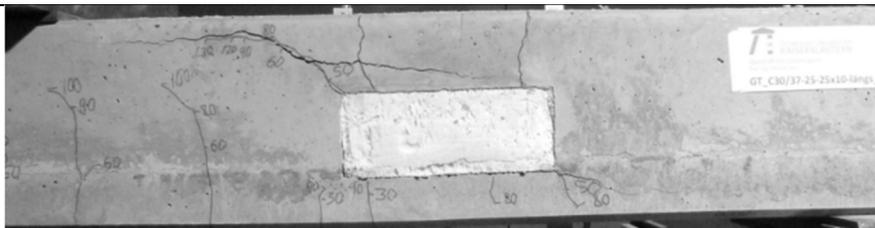
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	cm	cm
C	zweite Richtungsänderung	cm	cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	cm
F	Ende des Dübelrisses	cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		°

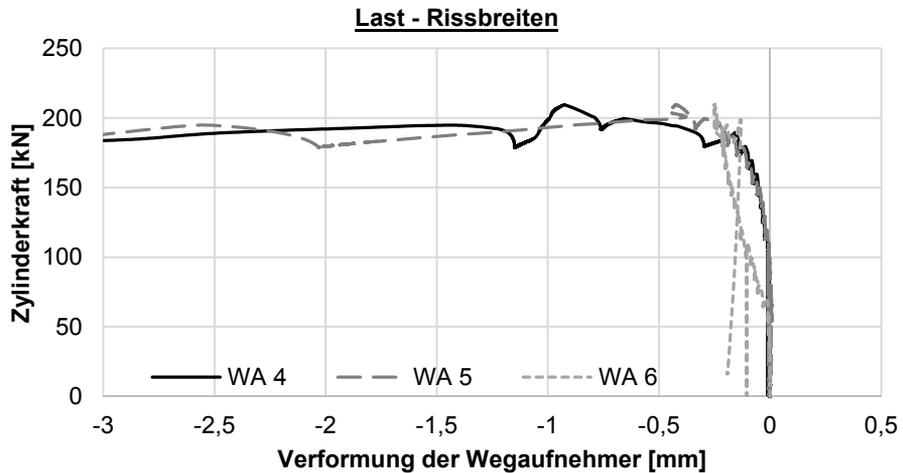
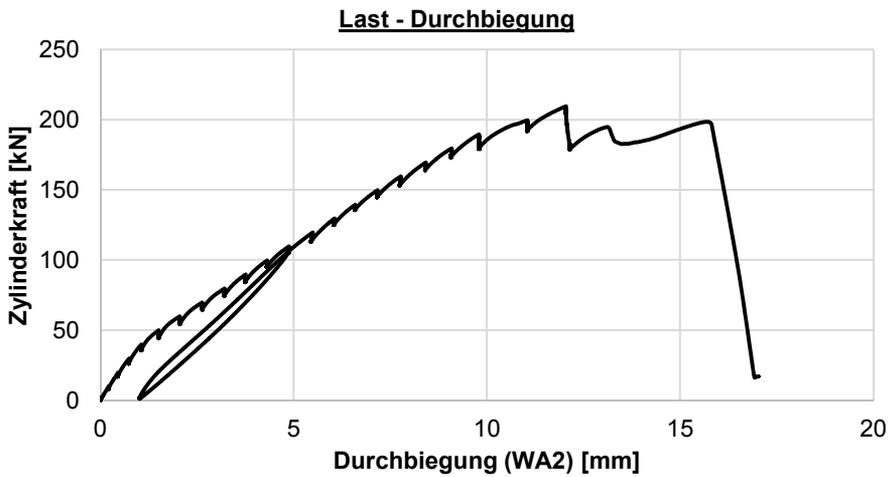
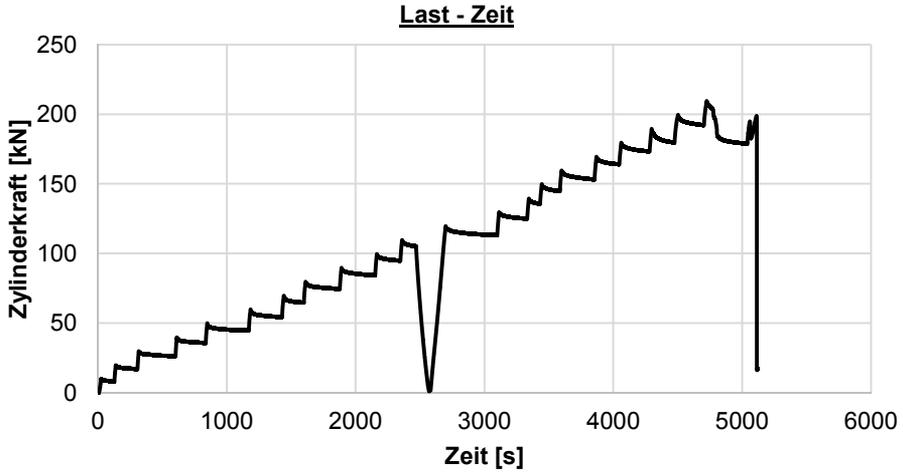
Hinweise zum Rissbild

keine

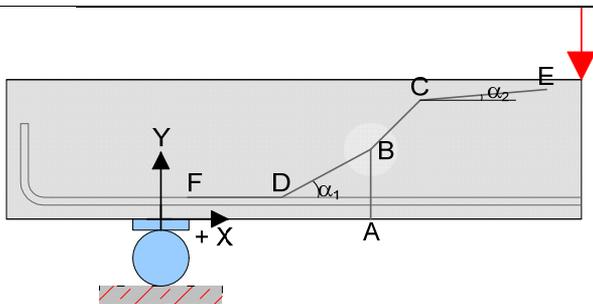


GT_V3-1 = GT_C30/37-25-40-0,35-1-7-2-Quer_V3-1

Datum	16.12.13	Beginn	09:30	Ende	11:00
Bezeichnung		GT_C30/37-25-40-0,35-1-7-2-Quer_V3-1			
Beton		C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn			
Würfeldruckfestigkeit		53,9 N/mm ²	Betonalter	19 Tage	
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei		110	kN		
Durchbiegung vor Entlastung		4,87	mm		
Durchbiegung nach Entlastung		1,01	mm		
Rissbreite unter Lasteinleitung		0,2	mm		
Rissbreite unter der Öffnung		0,05	mm		
Grenzdurchbiegung		$L / 500 =$	4,40 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			100	kN	
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235	kN	erreichte Zylinderlast	210	kN
			Durchbiegung	11,5	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



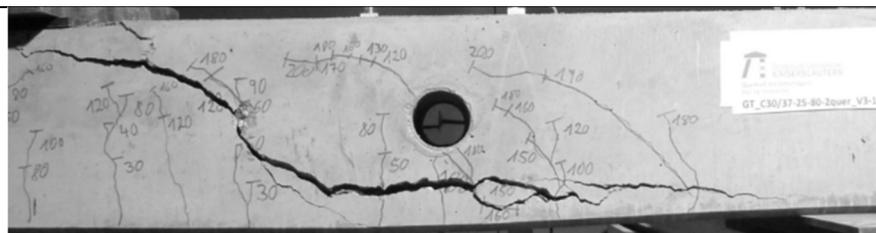
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	74 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	75 cm	13 cm
C	zweite Richtungsänderung	80 cm	19 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	68 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	22 cm
F	Ende des Dübelrisses	4 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		26 °
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		34 °

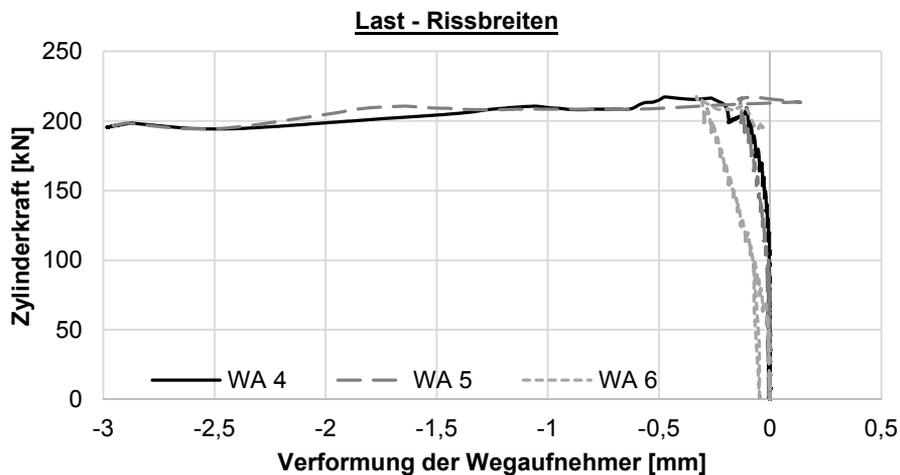
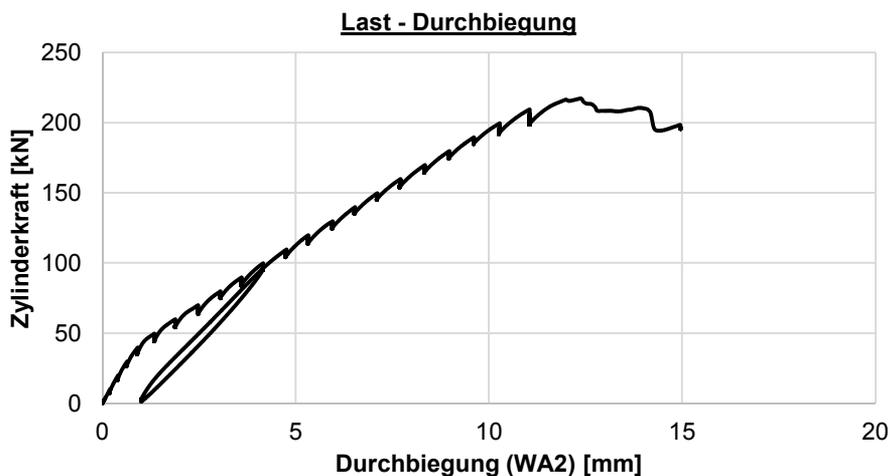
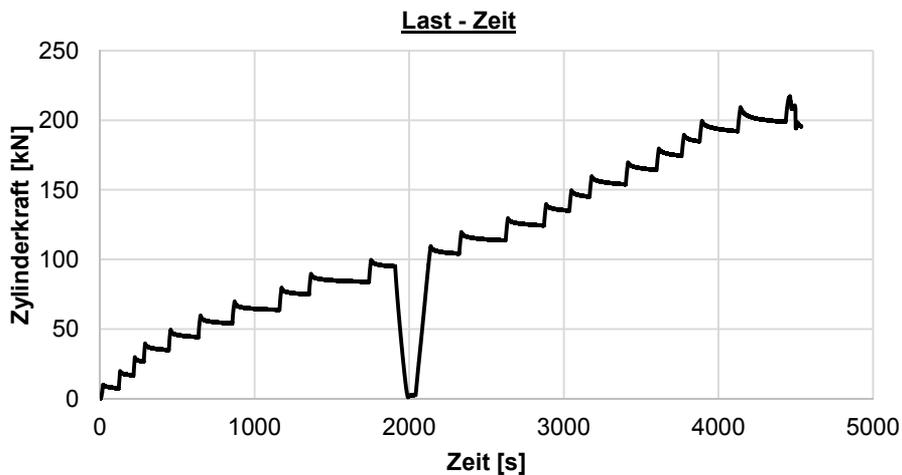
Hinweise zum Rissbild

keine

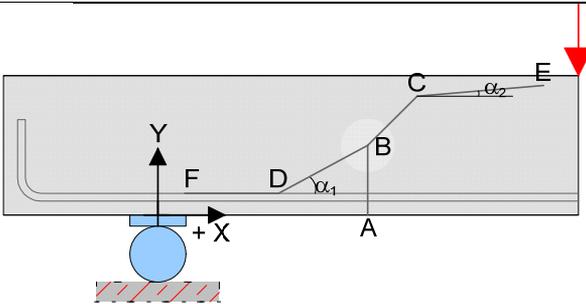


GT_V3-2 = GT_C30/37-25-40-0,35-1-7-2-Quer_V3-2

Datum	16.12.13	Beginn	16:40	Ende	18:20
Bezeichnung	GT_C30/37-25-40-0,35-1-7-2-Quer_V3-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,9 N/mm ²	Betonalter	19 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	100	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	4,15	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	1,0	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,2	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$		4,40 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			100		kN
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	210	kN	erreichte Zylinderlast	217	kN
			Durchbiegung	12	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



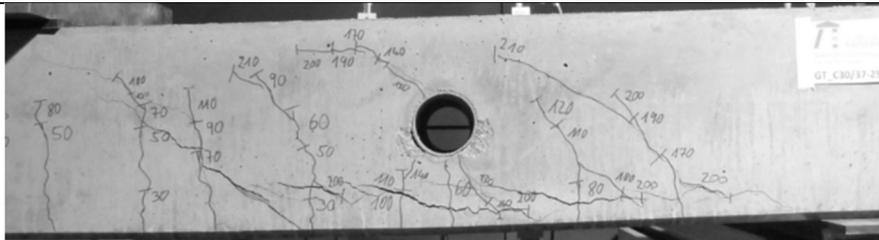
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	76 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	79 cm	11 cm
C	zweite Richtungsänderung	92 cm	20 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	71 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	21,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	10 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		34°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		24°

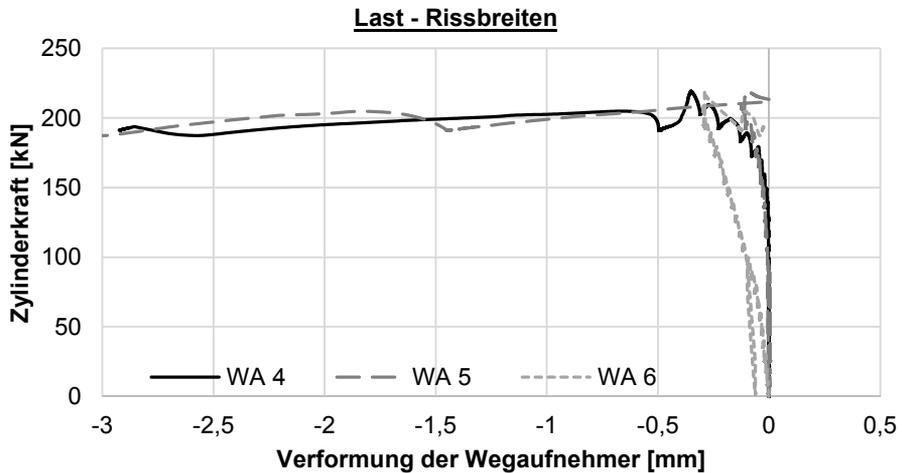
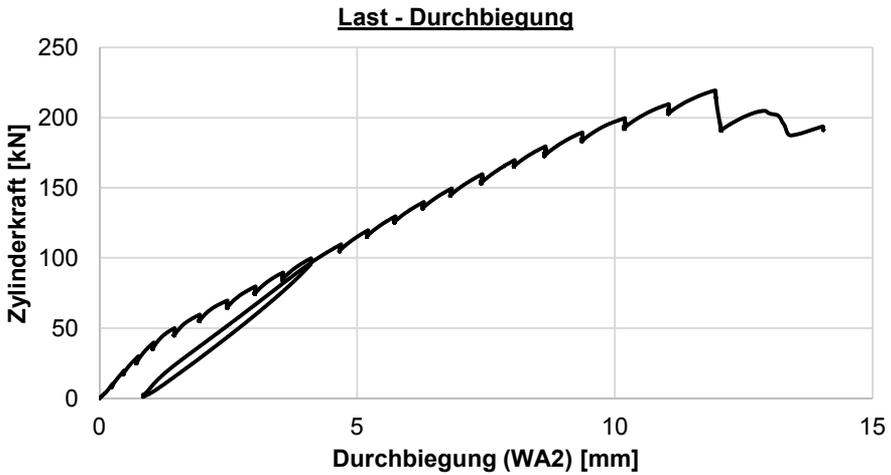
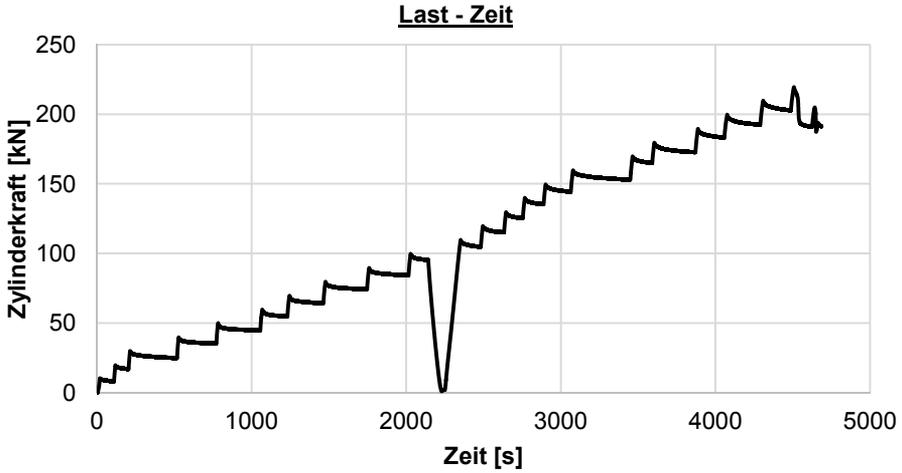
Hinweise zum Rissbild

keine

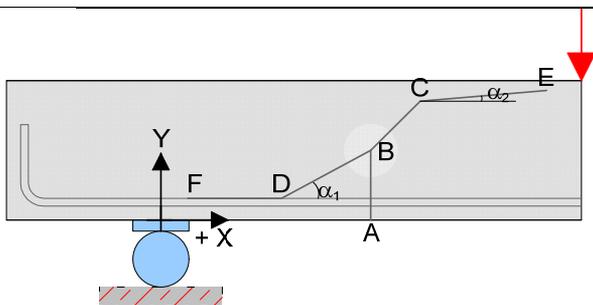


GT_V3-3 = GT_C30/37-25-40-0,35-1-7-2-Quer_V3-3

Datum	16.12.13	Beginn	18:30	Ende	20:00
Bezeichnung	GT_C30/37-25-40-0,35-1-7-2-Quer_V3-3				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,9 N/mm ²	Betonalter	19 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
Abplatzungen in der Druckzone oberhalb der Öffnung					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	100	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	4,2	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,86	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,2	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	L / 500 =		4,40 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			102	kN	
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	215	kN	erreichte Zylinderlast	220	kN
			Durchbiegung	11,9	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



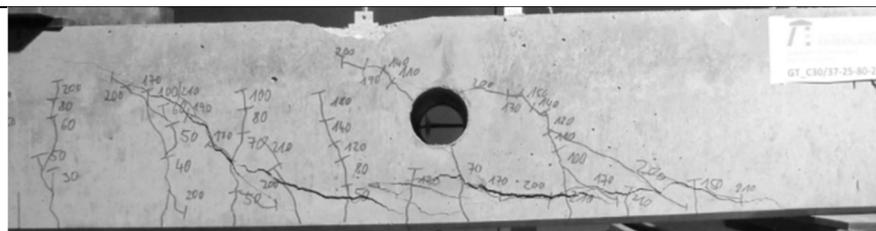
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	75 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	75 cm	9 cm
C	zweite Richtungsänderung	88 cm	18 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	73 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	21,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	8 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		43°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		15°

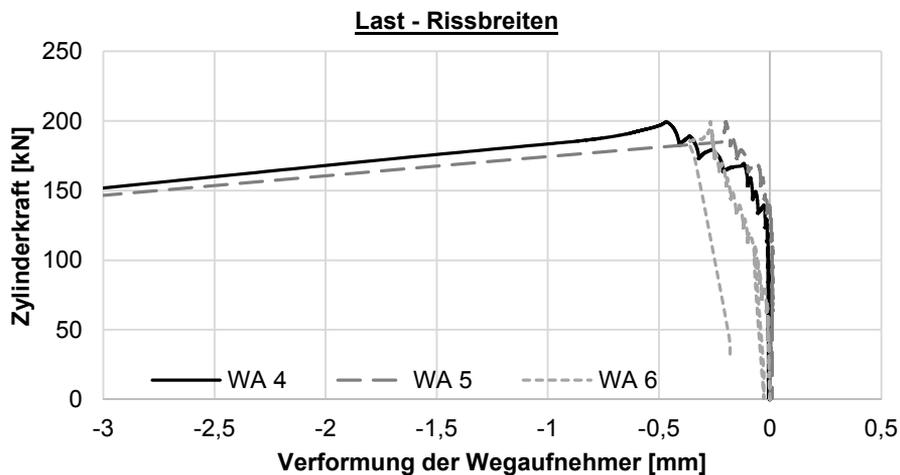
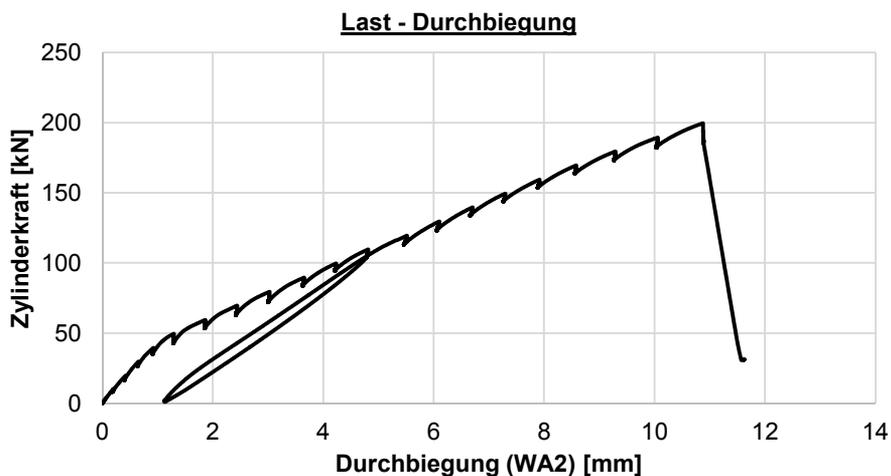
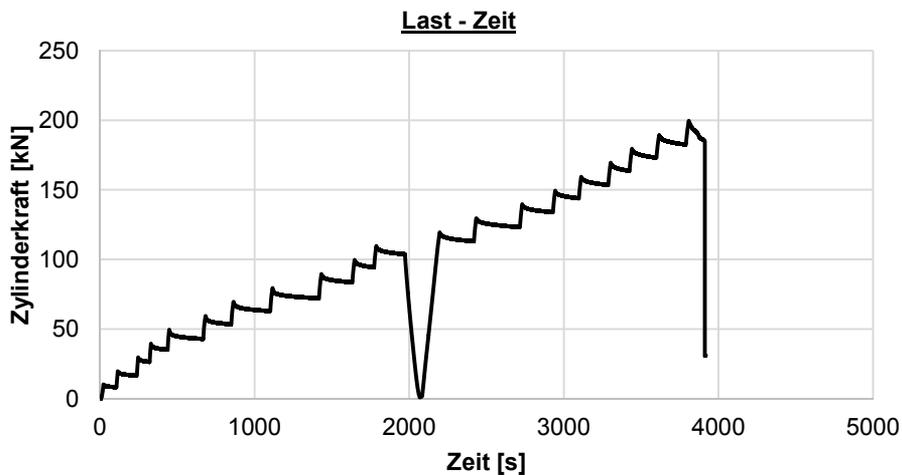
Hinweise zum Rissbild

keine

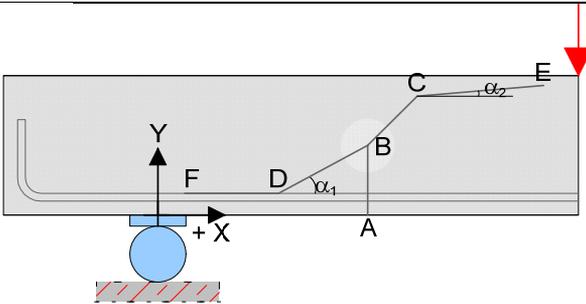


GT_V4-1 = GT_C30/37-25-40-0,35-1-7-1-Quer_V4-1

Datum	16.12.13	Beginn	15:00	Ende	16:45
Bezeichnung	GT_C30/37-25-40-0,35-1-7-1-Quer_V4-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,9 N/mm ²	Betonalter	19 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
<p>Detail</p> <p>Diagram showing the specimen geometry and measurement points (WA 1 to WA 7) and load point. Dimensions are given in mm: 28, 50, 100, 50, 60, 120, 60, 28, 275.</p>					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	110	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	4,81	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	1,13	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,2	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40		mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	100	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235	kN	erreichte Zylinderlast	200	kN
			Durchbiegung	10,8	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



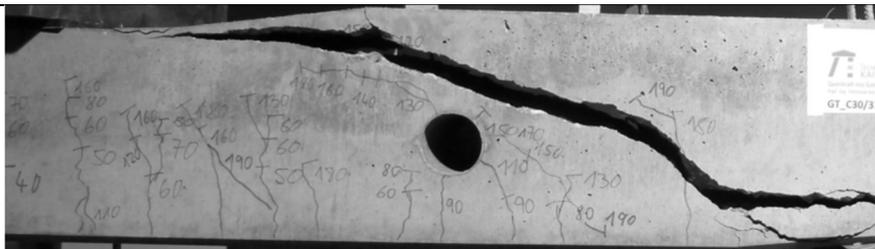
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	22 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	23 cm	10 cm
C	zweite Richtungsänderung	- cm	- cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	19 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	24 cm
F	Ende des Dübelrisses	-20 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		44°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		15°

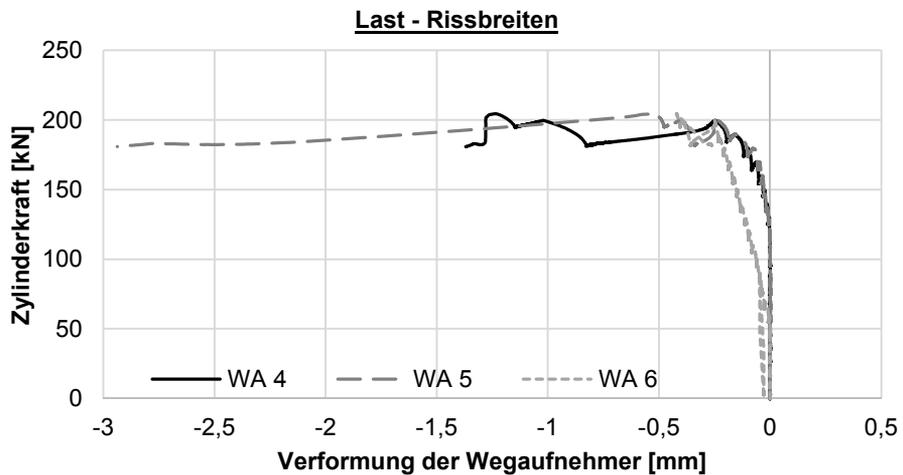
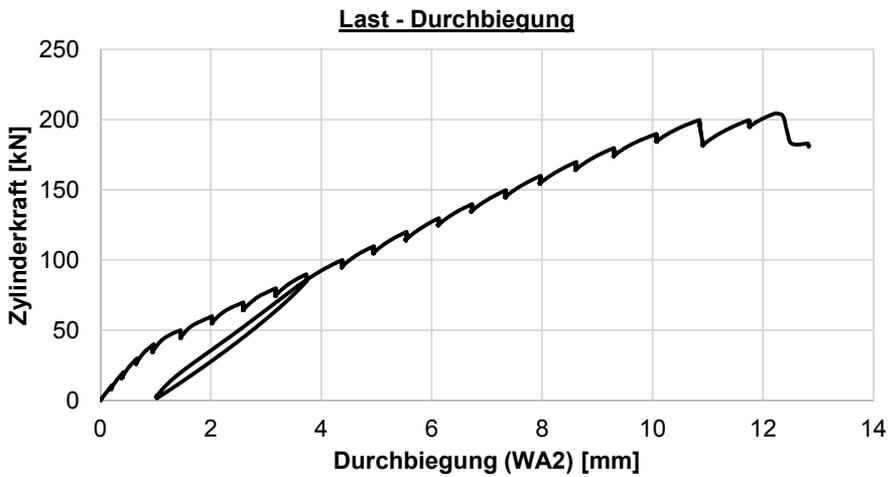
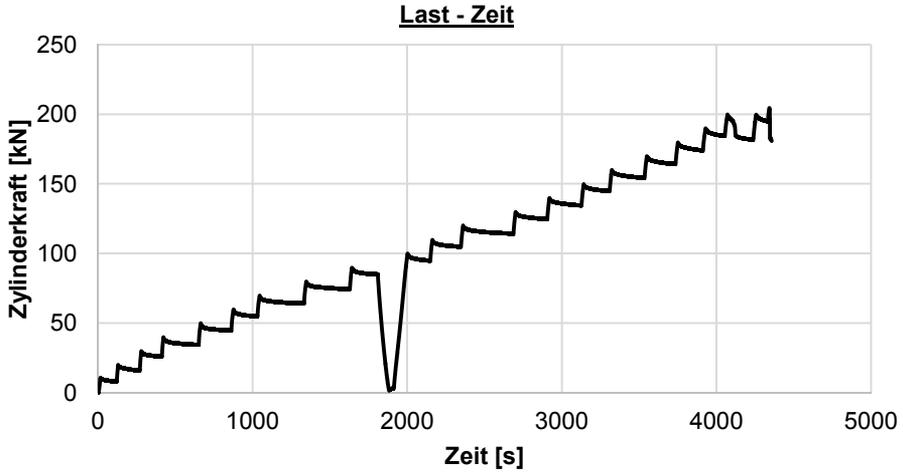
Hinweise zum Rissbild

keine

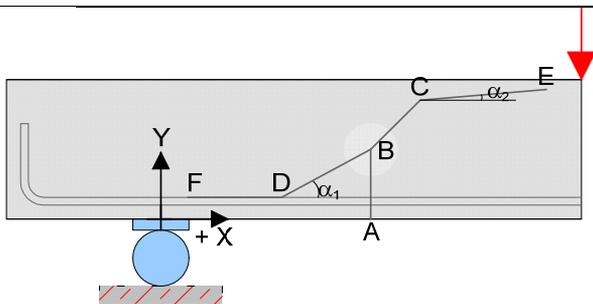


GT_V4-2 = GT_C30/37-25-40-0,35-1-7-1-Quer_V4-2

Datum	18.12.13	Beginn	08:05	Ende	09:50
Bezeichnung		GT_C30/37-25-40-0,35-1-7-1-Quer_V4-2			
Beton		C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn			
Würfeldruckfestigkeit		53,9 N/mm ²	Betonalter	21 Tage	
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei		90	kN		
Durchbiegung vor Entlastung		3,73	mm		
Durchbiegung nach Entlastung		1,03	mm		
Rissbreite unter Lasteinleitung		0,05	mm		
Rissbreite unter der Öffnung		0,1	mm		
Grenzdurchbiegung		$L / 500 =$	4,40 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung				100	kN
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	200	kN	erreichte Zylinderlast	200	kN
			Durchbiegung	10,8	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



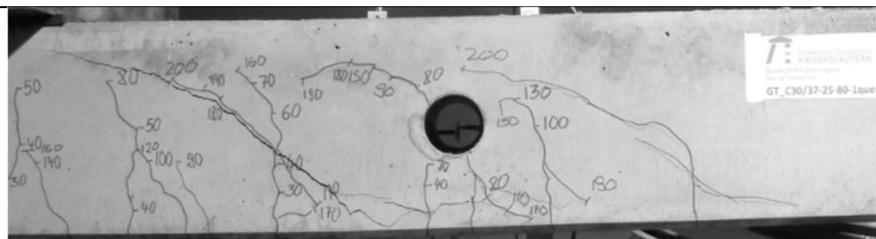
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	70 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	70 cm	9 cm
C	zweite Richtungsänderung	78 cm	15 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	63 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	22,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	2 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		39°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		18°

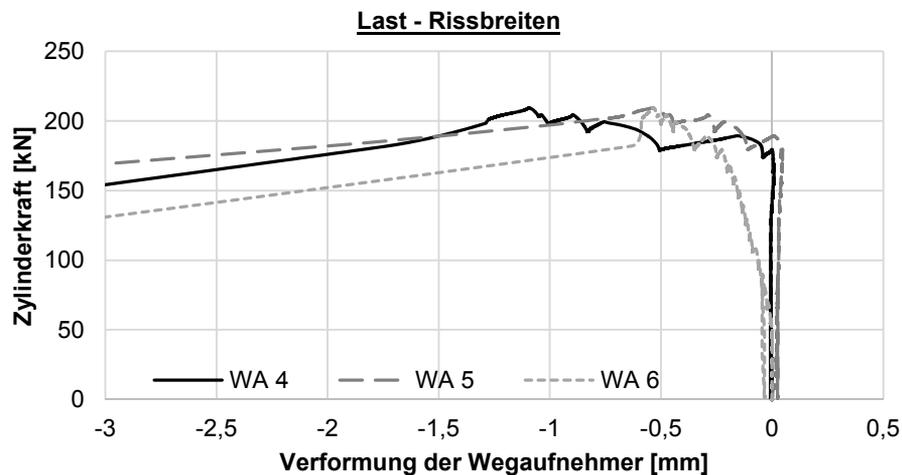
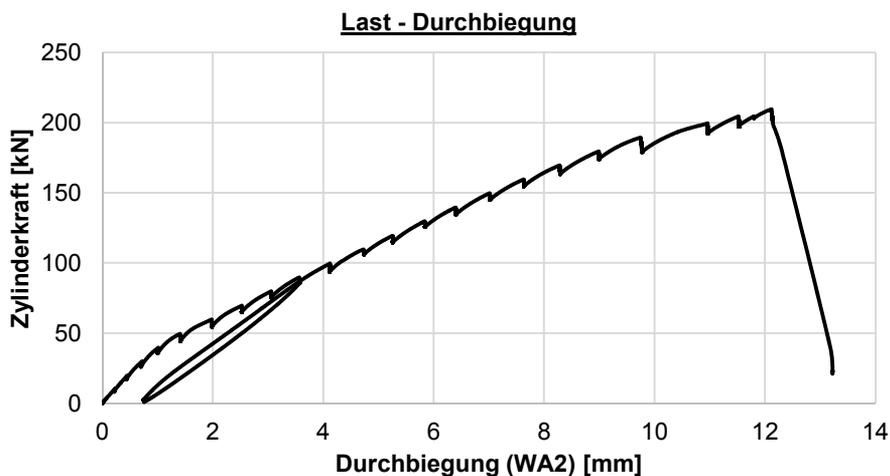
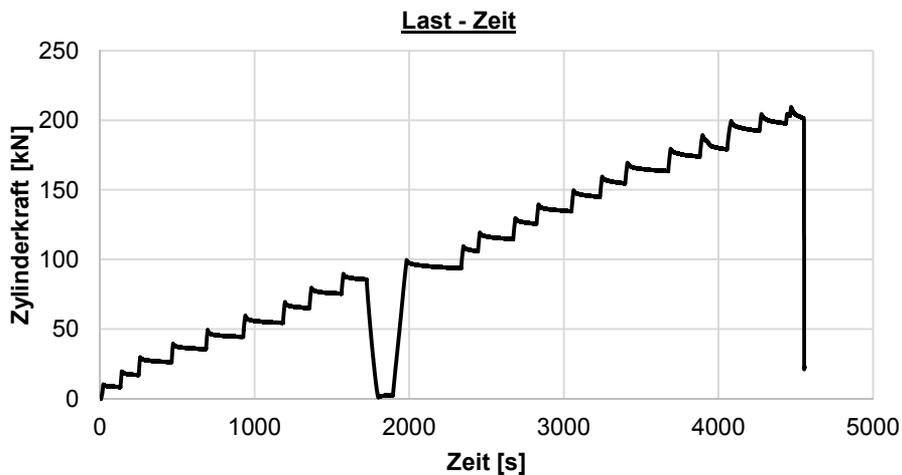
Hinweise zum Rissbild

keine

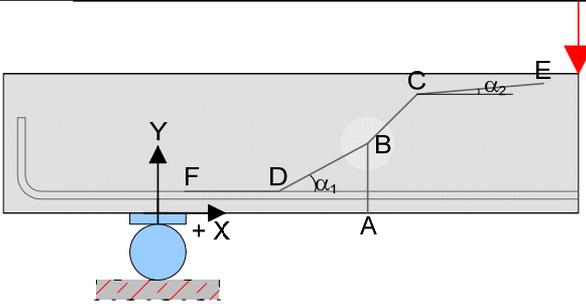


GT_V4-3 = GT_C30/37-25-40-0,35-1-7-1-Quer_V4-3

Datum	18.12.13	Beginn	10:15	Ende	11:30
Bezeichnung	GT_C30/37-25-40-0,35-1-7-1-Quer_V4-3				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,9 N/mm ²	Betonalter	21 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	90	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,57	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,75	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,1	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	102	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	200	kN	erreichte Zylinderlast	210	kN
			Durchbiegung	12	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



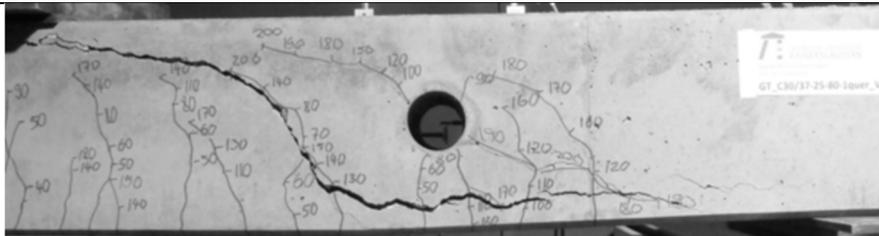
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	66 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	65 cm	8 cm
C	zweite Richtungsänderung	77 cm	18 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	58 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	23 cm
F	Ende des Dübelrisses	4 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		60°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		10°

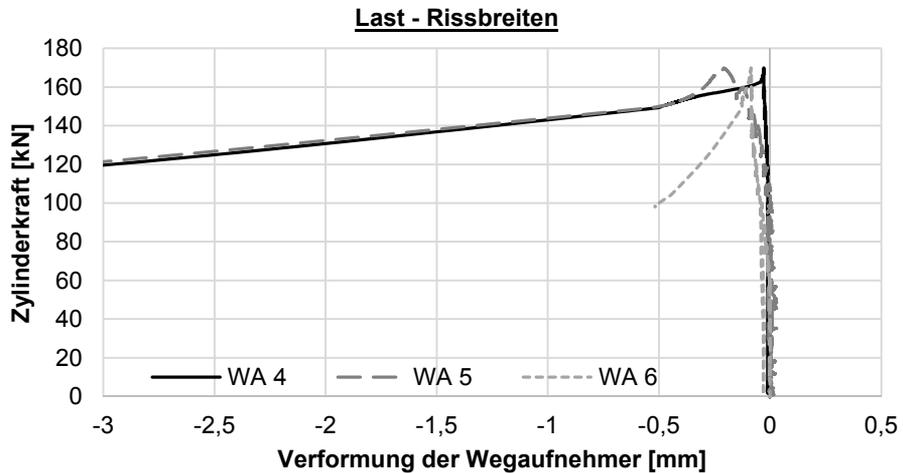
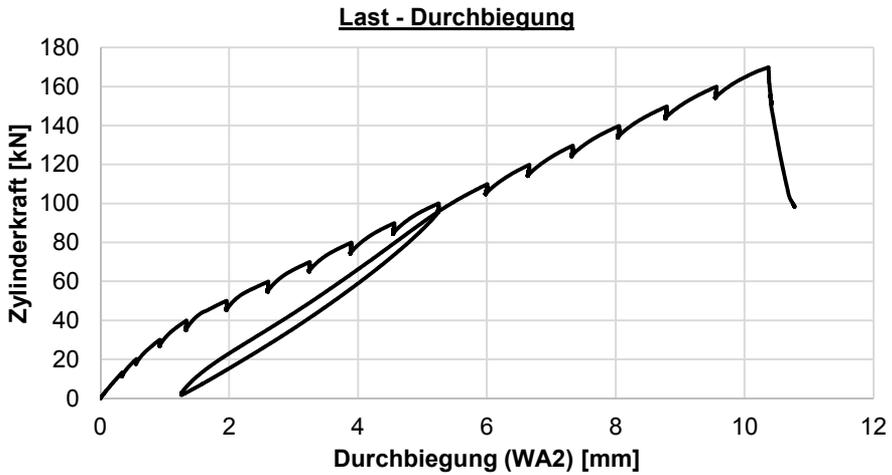
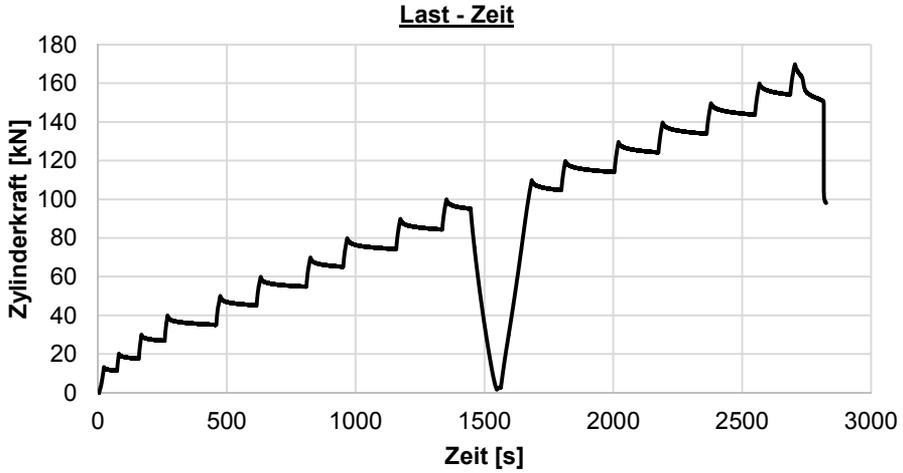
Hinweise zum Rissbild

keine

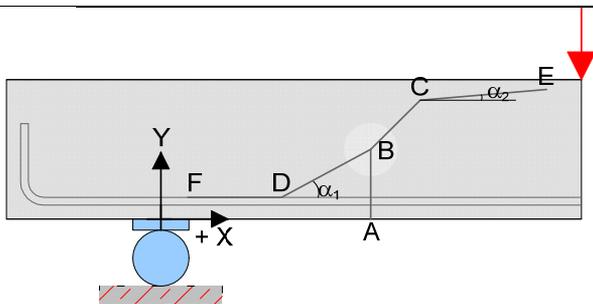


GT_V5-1 = GT_C30/37-25-40-0-0-0-0-0_V5-1

Datum	17.12.13	Beginn	14:10	Ende	15:35
Bezeichnung	GT_C30/37-25-40-0-0-0-0-0_V5-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,9 N/mm ²	Betonalter	20 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	100	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	5,25	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	1,26	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	87				kN
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	215	kN	erreichte Zylinderlast	170	kN
			Durchbiegung	10,4	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



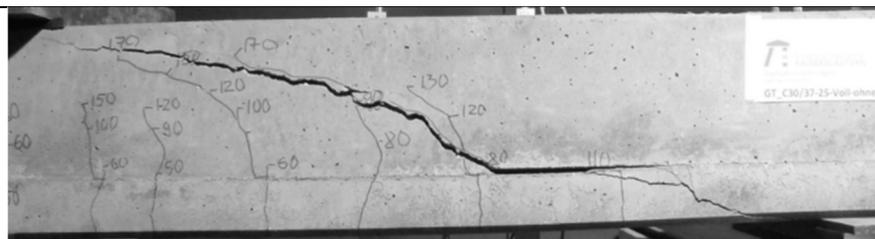
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	46 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	85 cm	15 cm
C	zweite Richtungsänderung	- cm	- cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	74 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	cm
F	Ende des Dübelrisses	- cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		38°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		12°

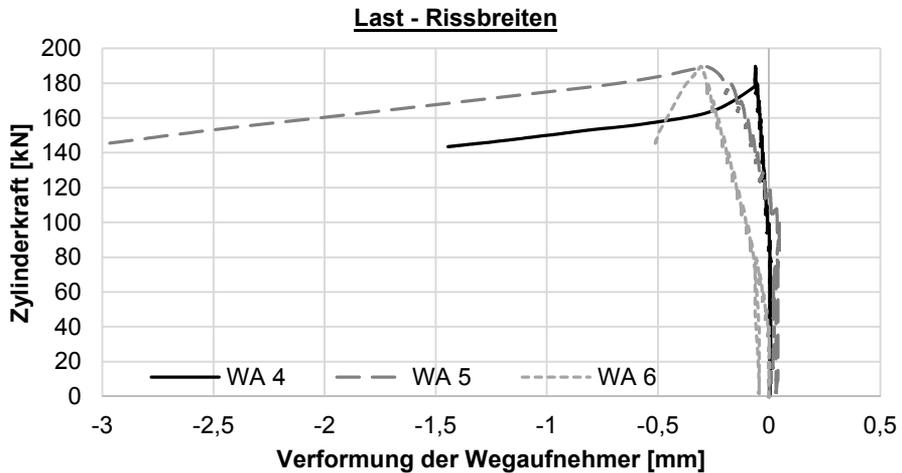
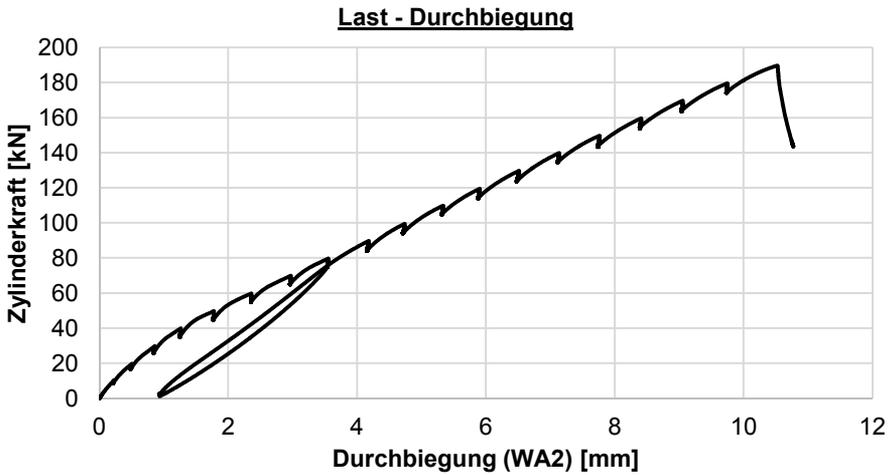
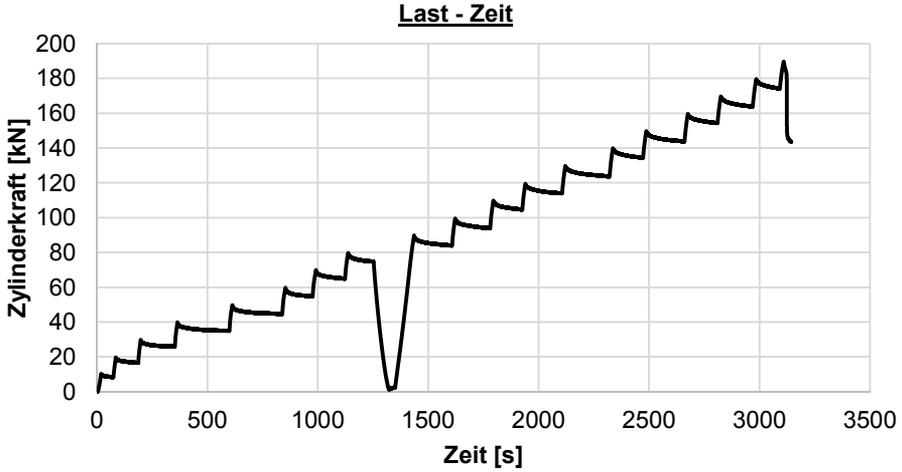
Hinweise zum Rissbild

keine

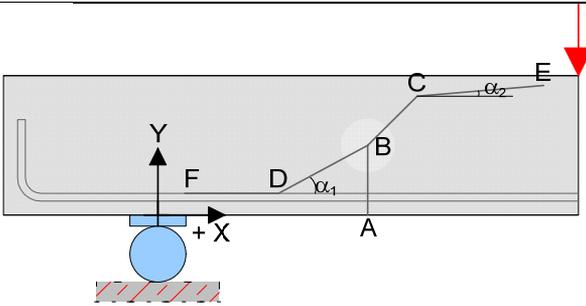


GT_V5-2 = GT_C30/37-25-40-0-0-0-0-0_V5-2

Datum	17.12.13	Beginn	15:30	Ende	17:05
Bezeichnung	GT_C30/37-25-40-0-0-0-0-0_V5-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,9 N/mm ²	Betonalter	20 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	80	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,56	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,94	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,15	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,1	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40		mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			92	kN	
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	170	kN	erreichte Zylinderlast	190	kN
			Durchbiegung	10,5	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



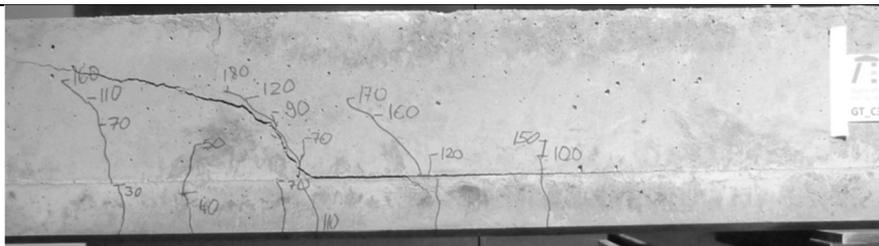
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	- cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	69 cm	13 cm
C	zweite Richtungsänderung	- cm	- cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	61 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	22 cm
F	Ende des Dübelrisses	- cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		55°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		14°

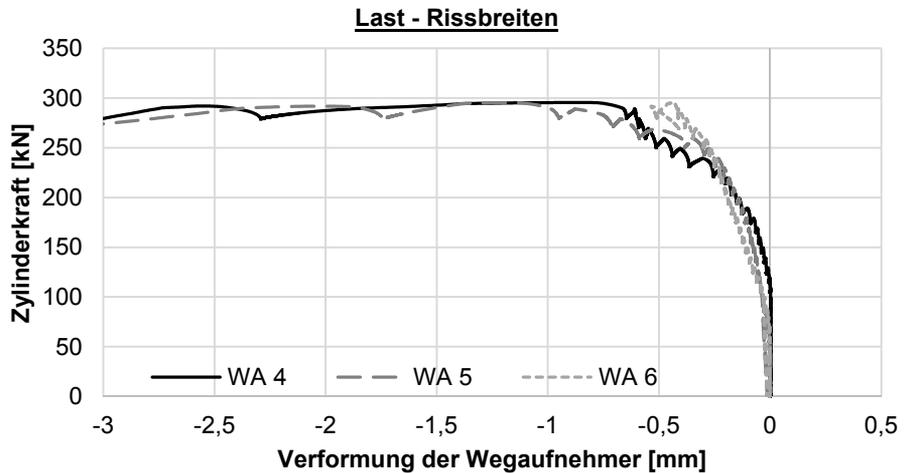
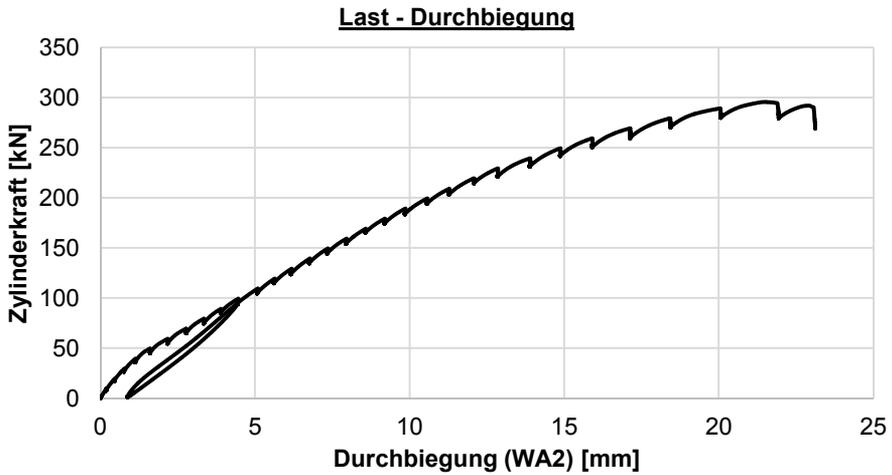
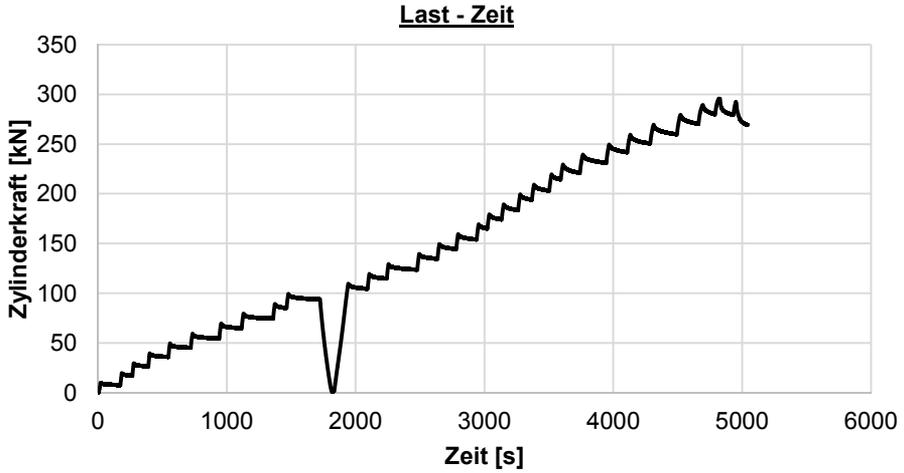
Hinweise zum Rissbild

keine

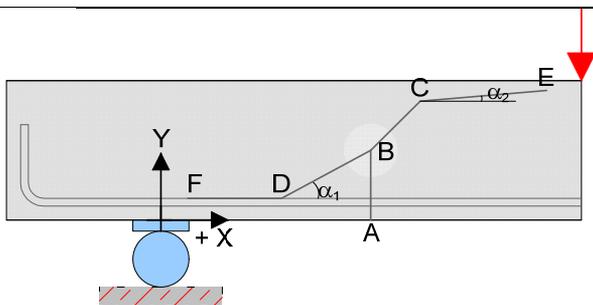


GT_V6-1 = GT_C30/37-25-40-0-0-7-2-Längs_V6-1

Datum	17.12.13	Beginn	13:30	Ende	15:20
Bezeichnung	GT_C30/37-25-40-0-0-7-2-Längs_V6-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,9 N/mm ²	Betonalter	20 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
Schwindrisse an oberhalb der äußeren Öffnungen Schwindrisse oberhalb entlang des Gitterträger-Obergurts					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	100	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	4,44	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,87	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,1	mm			
Grenzdurchbiegung	L / 500 =		4,40 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			100	kN	
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	215	kN	erreichte Zylinderlast	295	kN
			Durchbiegung	22	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



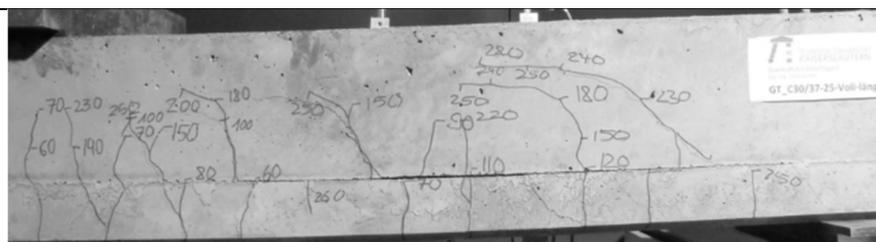
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	cm	cm
C	zweite Richtungsänderung	cm	cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	cm
F	Ende des Dübelrisses	cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		°

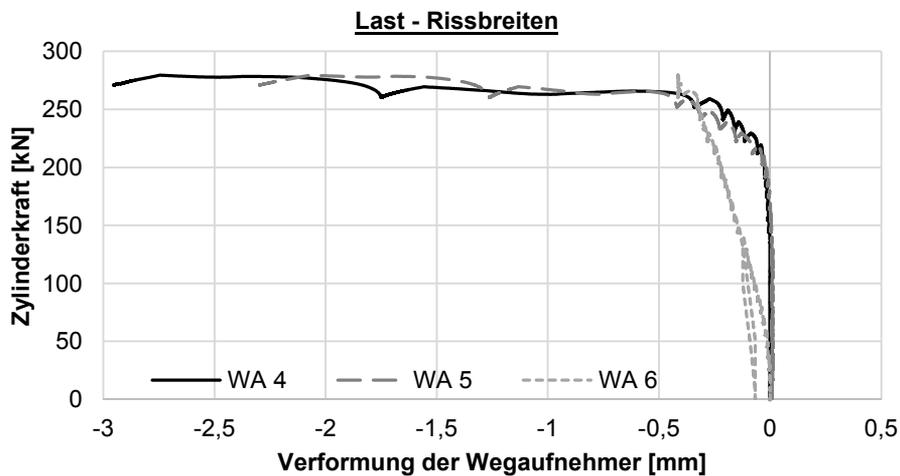
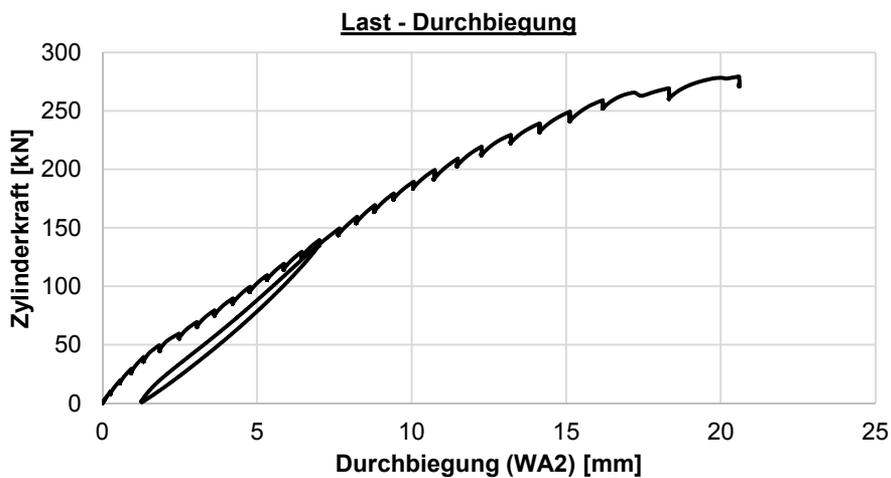
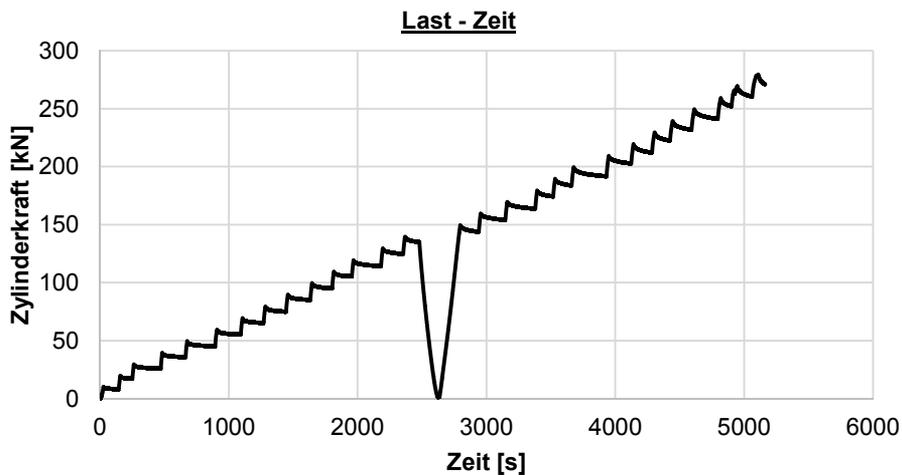
Hinweise zum Rissbild

keine

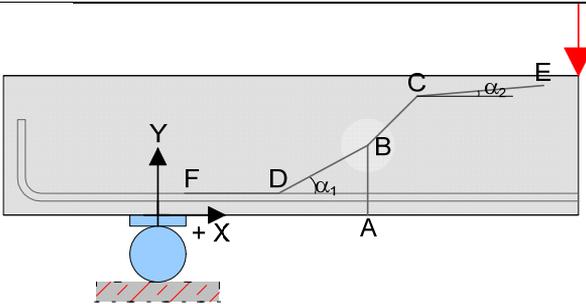


GT_V6-2 = GT_C30/37-25-40-0-0-7-2-Längs_V6-2

Datum	17.12.13	Beginn	16:45	Ende	18:10
Bezeichnung	GT_C30/37-25-40-0-0-7-2-Längs_V6-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,9 N/mm ²	Betonalter	20 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
Schwindrisse an oberhalb der äußeren Öffnungen Schwindrisse oberhalb entlang des Gitterträger-Obergurts					
Messtechnik					
<p>Detail</p>					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	140	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	7,00	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	1,27	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,15	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40		mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	91		kN		
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	300	kN	erreichte Zylinderlast	270	kN
			Durchbiegung	20	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



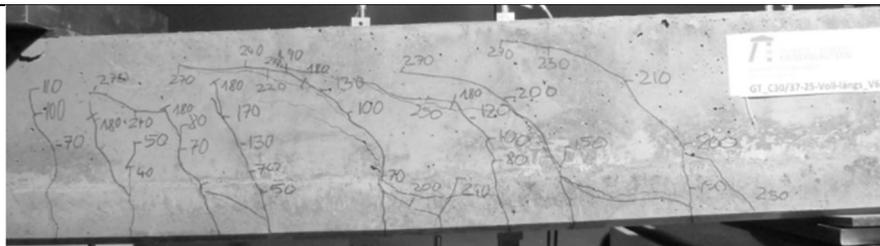
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	cm	cm
C	zweite Richtungsänderung	cm	cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	cm
F	Ende des Dübelrisses	cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		°

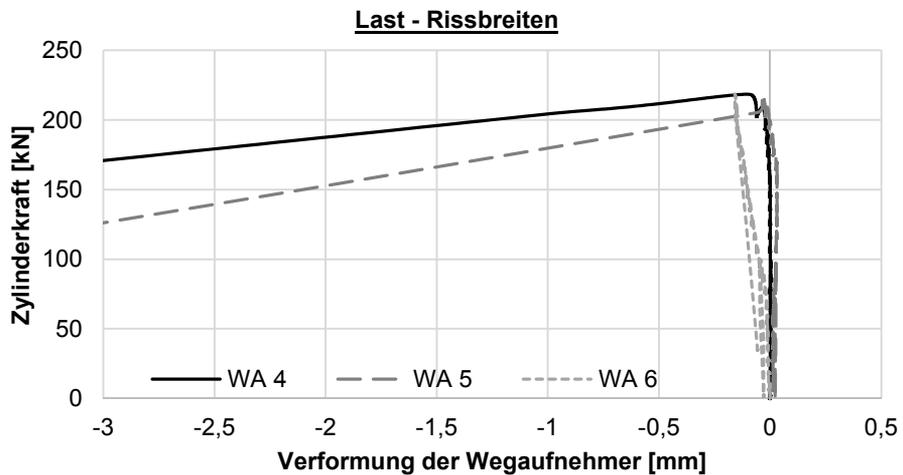
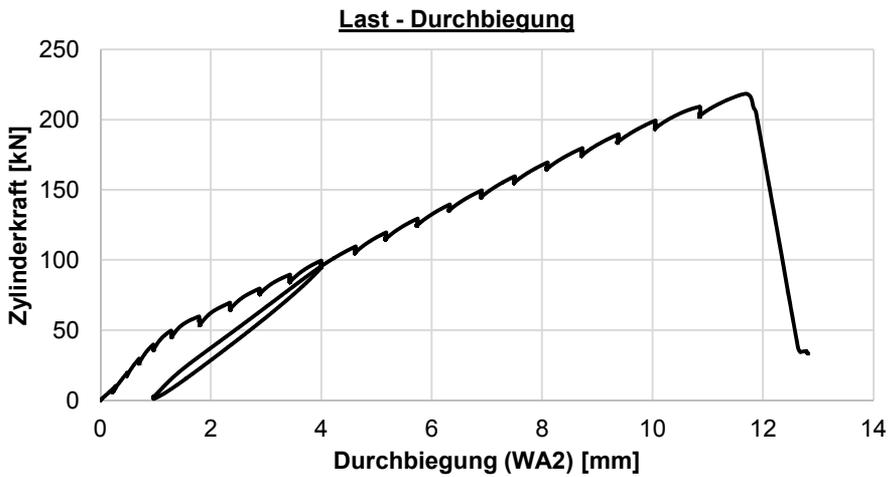
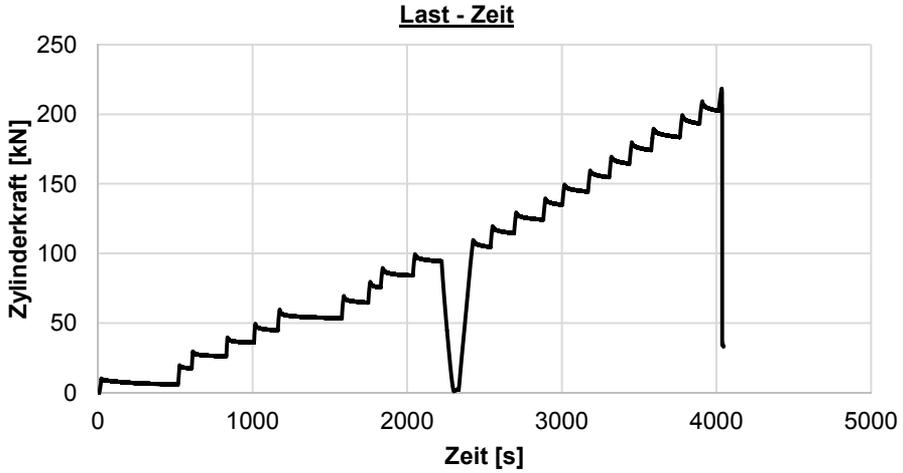
Hinweise zum Rissbild

keine

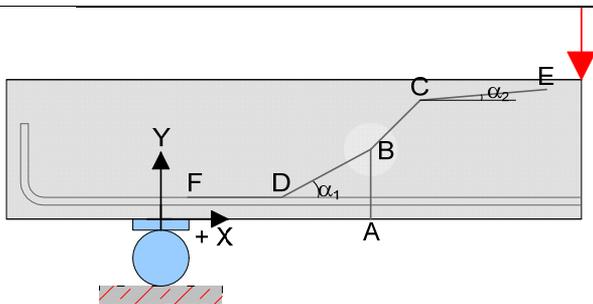


GT_V7-1 = GT_C30/37-25-40-0-0-7-2-Quer_V7-1

Datum	16.12.13	Beginn	11:50	Ende	13:10
Bezeichnung	GT_C30/37-25-40-0-0-7-2-Quer_V7-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,9 N/mm ²	Betonalter	19 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
<p>Detail</p> <p>Diagram showing measurement points (WA 1-7) and dimensions for the specimen. The total length is 275 mm. Measurement points are located at 28 mm, 50 mm, 100 mm, 150 mm, 210 mm, 270 mm, and 275 mm from the left end. A red arrow indicates a load point at 150 mm. Supports are located at 28 mm and 275 mm.</p>					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	100	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	4,00	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,97	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,2	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	L / 500 =		4,40 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	110		kN		
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	210	kN	erreichte Zylinderlast	218	kN
			Durchbiegung	11,8	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



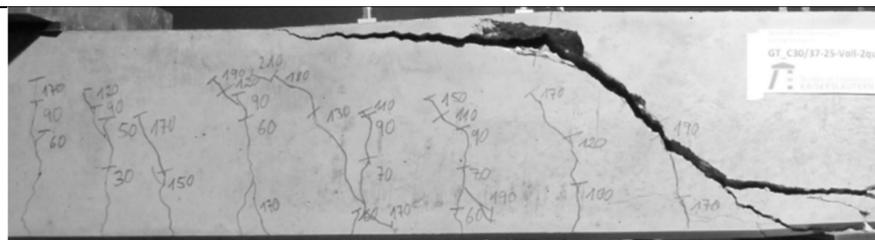
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	21 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	23 cm	11 cm
C	zweite Richtungsänderung	36 cm	22 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	17 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	24 cm
F	Ende des Dübelrisses	-22 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		37°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		17°

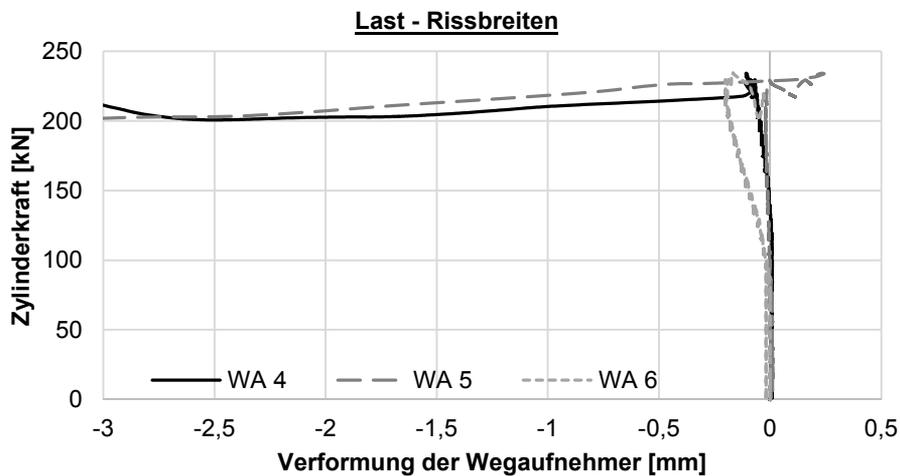
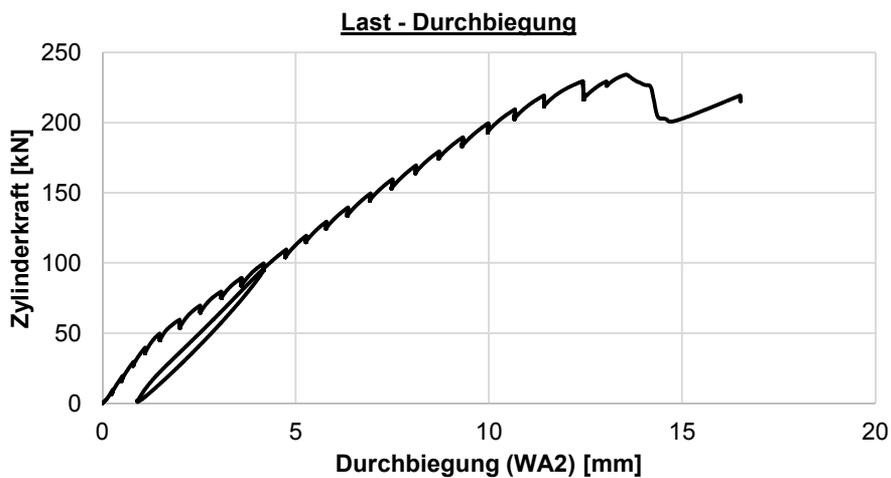
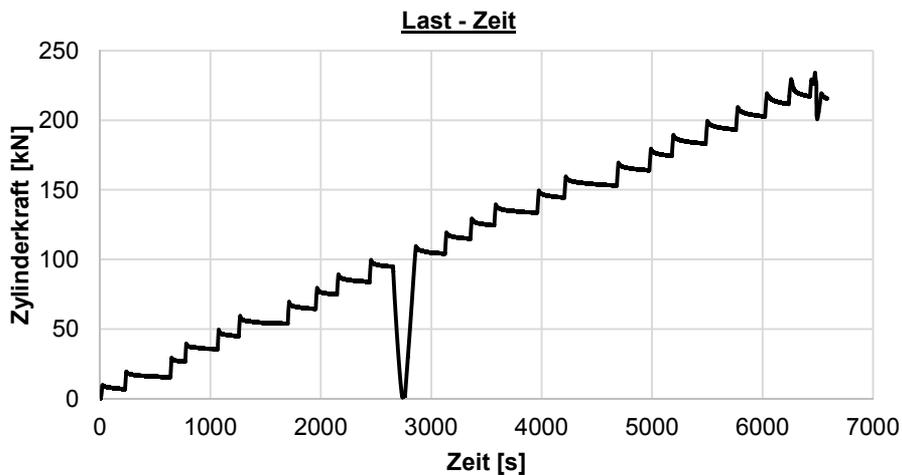
Hinweise zum Rissbild

keine

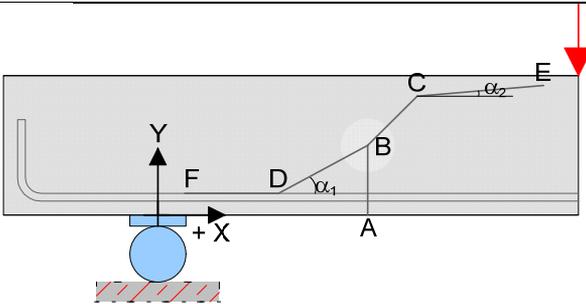


GT_V7-2 = GT_C30/37-25-40-0-0-7-2-Quer_V7-2

Datum	16.12.13	Beginn	14:10	Ende	16:00
Bezeichnung	GT_C30/37-25-40-0-0-7-2-Quer_V7-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	53,9 N/mm ²	Betonalter	19 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	100	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	4,17	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,91	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$		4,40 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	100		kN		
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	210	kN	erreichte Zylinderlast	230	kN
			Durchbiegung	13	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



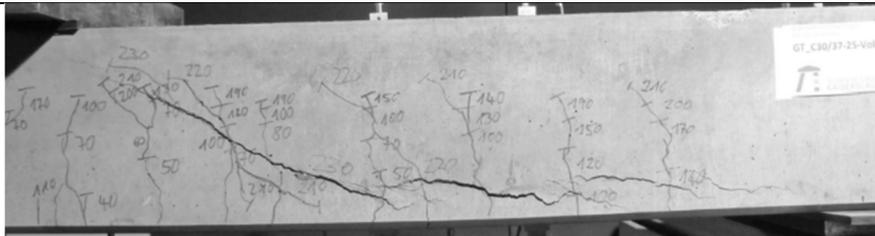
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	76 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	76 cm	11 cm
C	zweite Richtungsänderung	- cm	- cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	64 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	20,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	2 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		30°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		30°

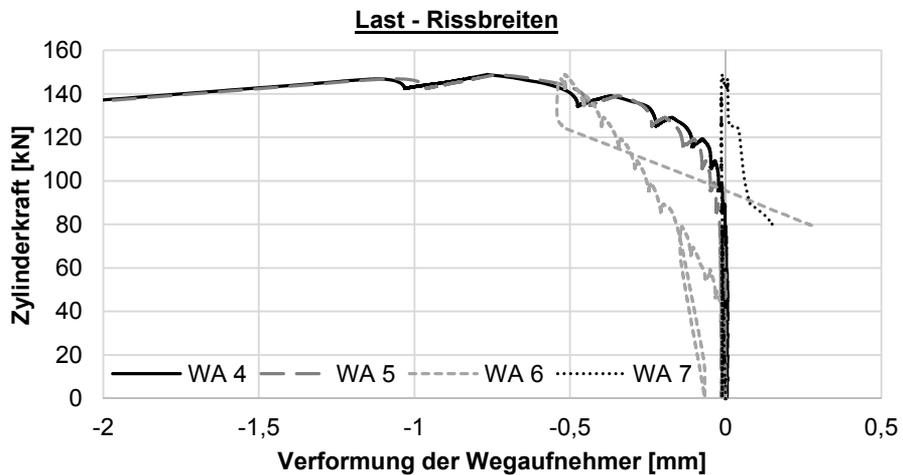
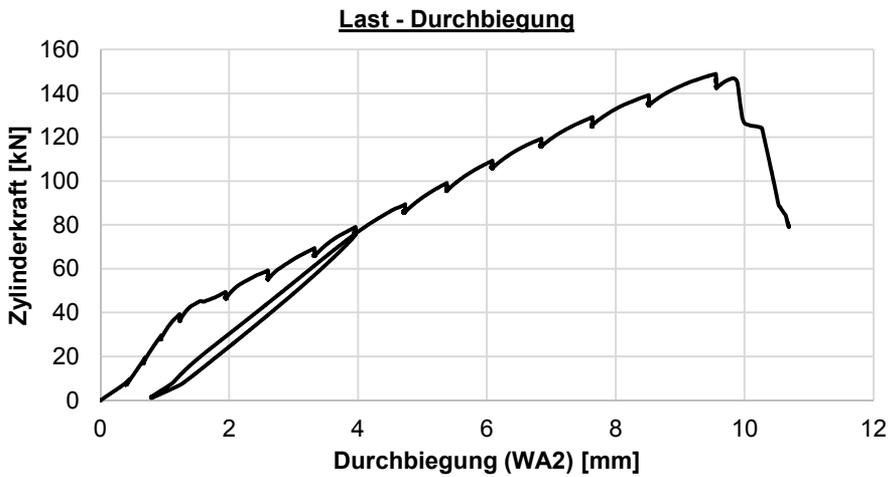
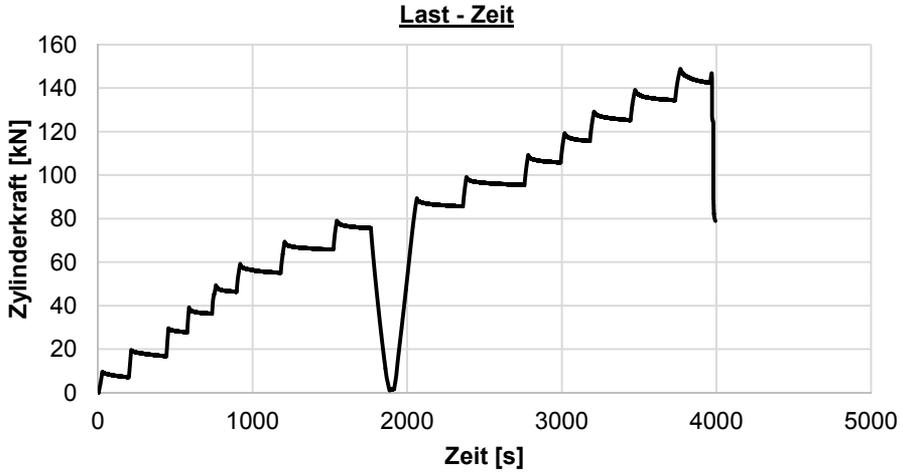
Hinweise zum Rissbild

keine

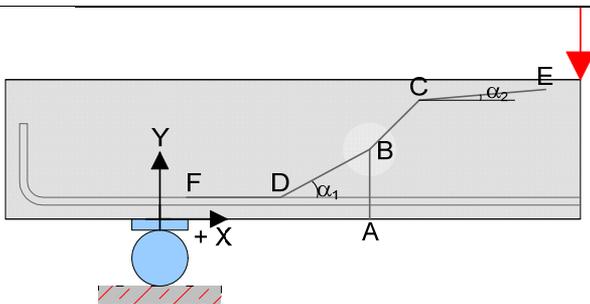


1GT_V1-1 = 1GT_C30/37-25-30-0,33-3-7-1-Längs_V1-1

Datum	14.07.14	Beginn	14:05	Ende	15:55
Bezeichnung	1GT_C30/37-25-30-0,33-3-7-1-Längs_V1-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	51,7 N/mm ²	Betonalter	17 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
<p>Detail</p> <p>Diagram showing measurement points (WA 1-7) and dimensions for the specimen. The total length is 275 mm. Measurement points are located at 28 mm, 50 mm, 100 mm, 150 mm, 210 mm, 270 mm, and 275 mm from the left end. A red arrow indicates the load application point at 150 mm. Supports are located at 28 mm and 275 mm.</p>					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	80	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,96	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,79	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	L / 500 =		4,40 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			85	kN	
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	175	kN	erreichte Zylinderlast	150	kN
			Durchbiegung	9,6	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	48 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	50 cm	8 cm
C	zweite Richtungsänderung	54 cm	17,5 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	42 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	23,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	5 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		56°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		5°

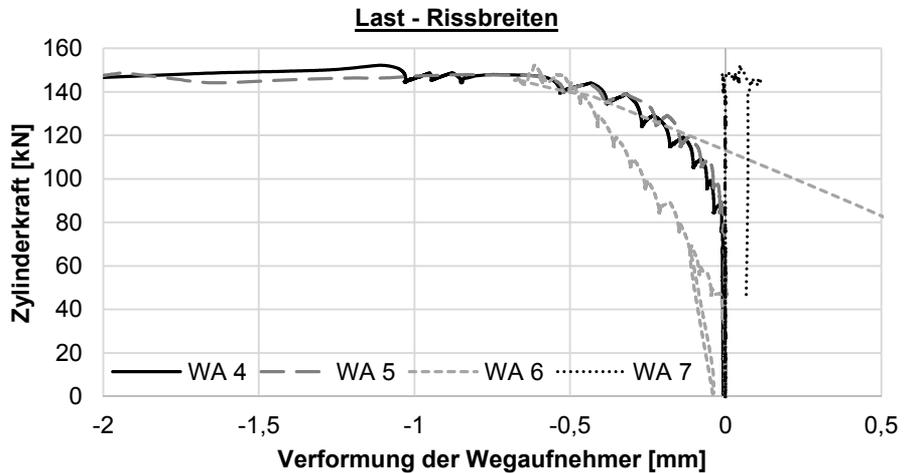
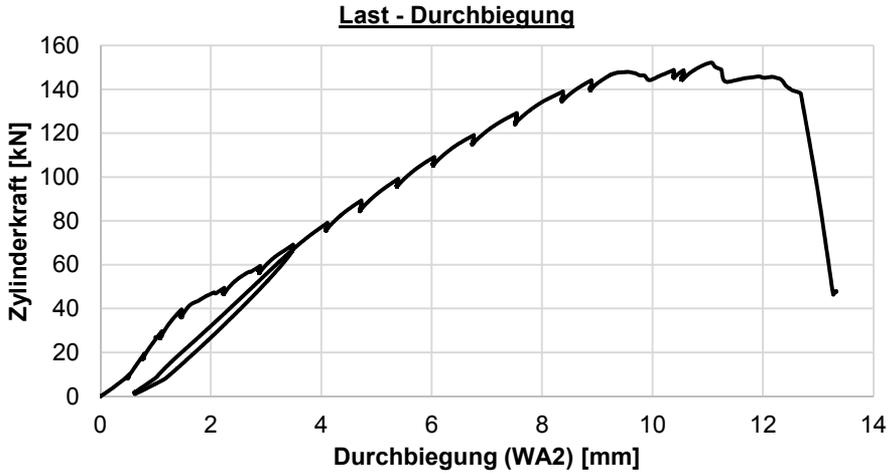
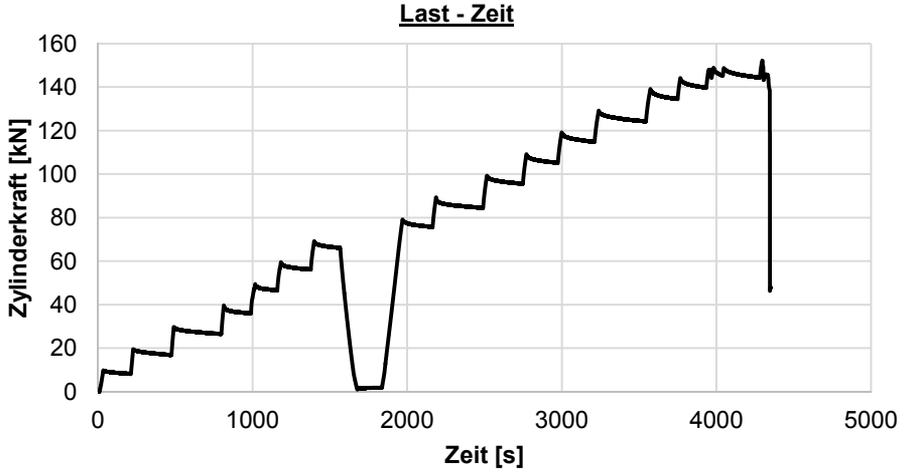
Hinweise zum Rissbild

keine

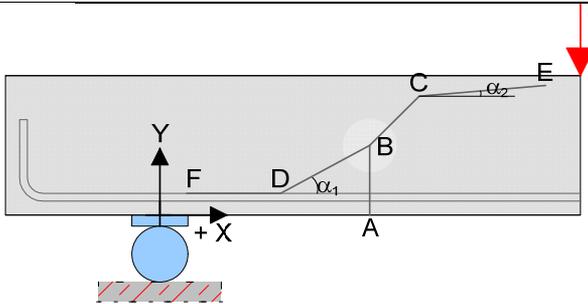


1GT_V1-2 = 1GT_C30/37-25-30-0,33-3-7-1-Längs_V1-2

Datum	15.07.14	Beginn	07:40	Ende	09:00
Bezeichnung	1GT_C30/37-25-30-0,33-3-7-1-Längs_V1-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	51,7 N/mm ²	Betonalter	18 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	70	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,47	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,62	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40		mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	85		kN		
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	150	kN	erreichte Zylinderlast	152	kN
			Durchbiegung	10,5	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



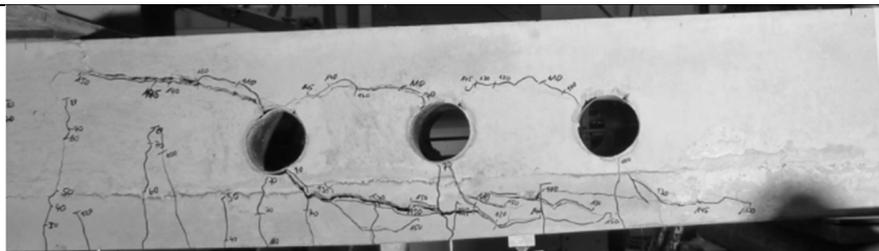
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	66,5 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	67 cm	6 cm
C	zweite Richtungsänderung	74 cm	17,5 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	51,5 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	21,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	7,5 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		46°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		7°

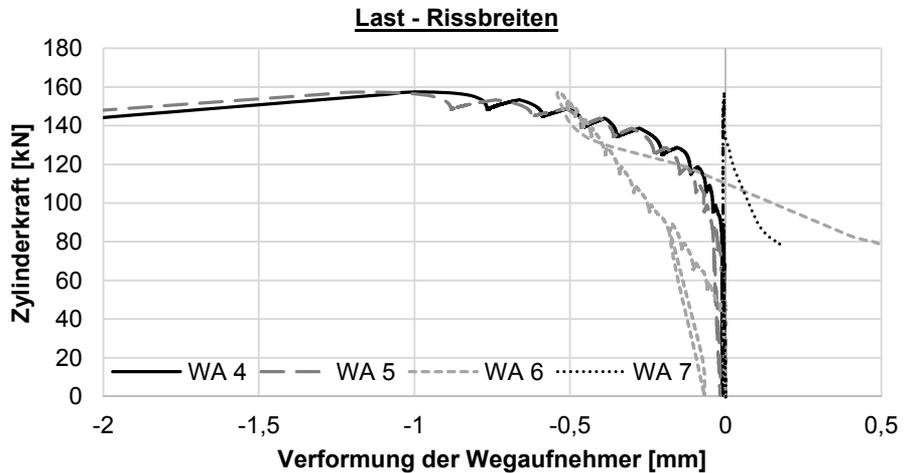
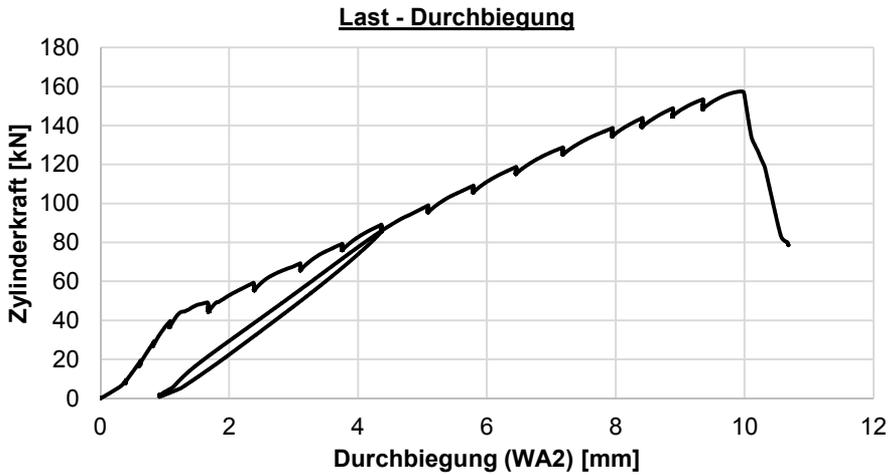
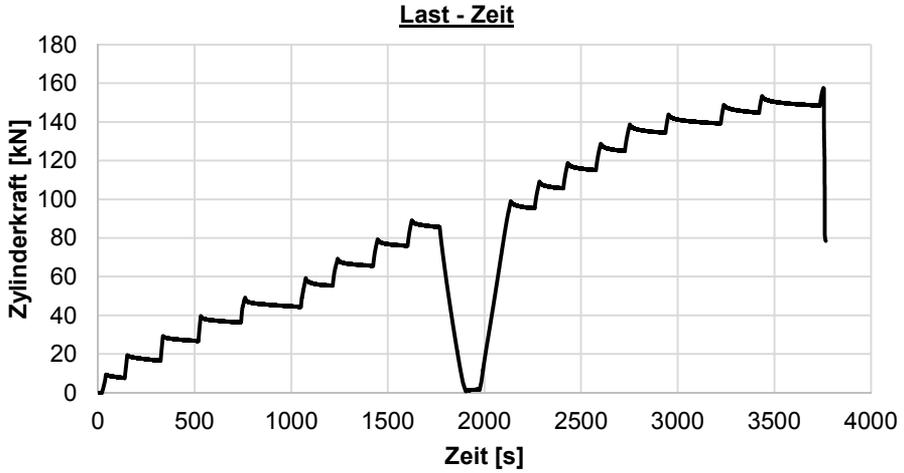
Hinweise zum Rissbild

keine

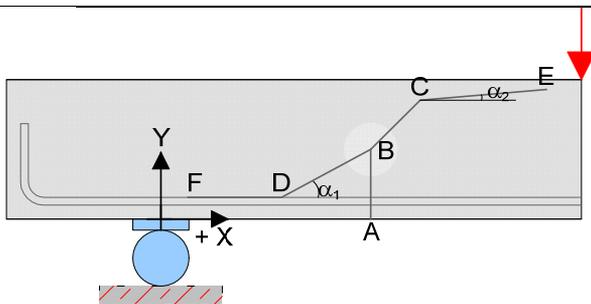


1GT_V2-1 = 1GT_C30/37-25-35-0,33-3-7-1-Längs_V2-1

Datum	15.07.14	Beginn	10:00	Ende	11:20
Bezeichnung	1GT_C30/37-25-35-0,33-3-7-1-Längs_V2-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	51,7 N/mm ²	Betonalter	18 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
<p>Detail</p> <p>WA 4 WA 5 WA 6 WA 7 WA 1 WA 2 WA 3</p> <p>28 50 100 150 210 270 275</p>					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	90	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	4,37	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,92	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,15	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	90	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	165	kN	erreichte Zylinderlast	157	kN
			Durchbiegung	10	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



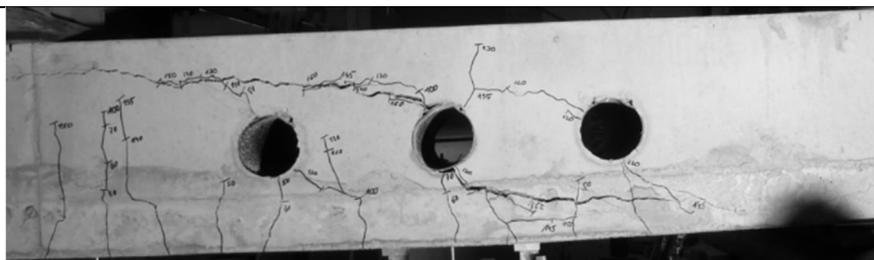
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	76 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	77,5 cm	9 cm
C	zweite Richtungsänderung	80 cm	17 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	58 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	21,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	9 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		65°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		8°

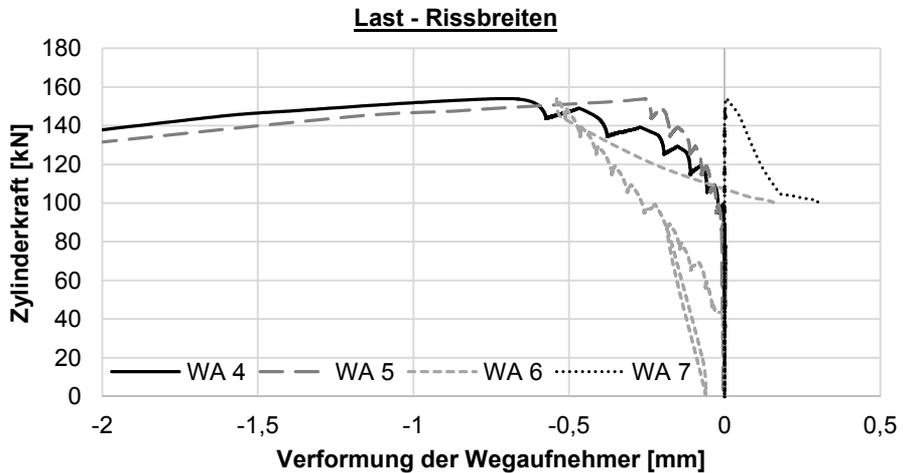
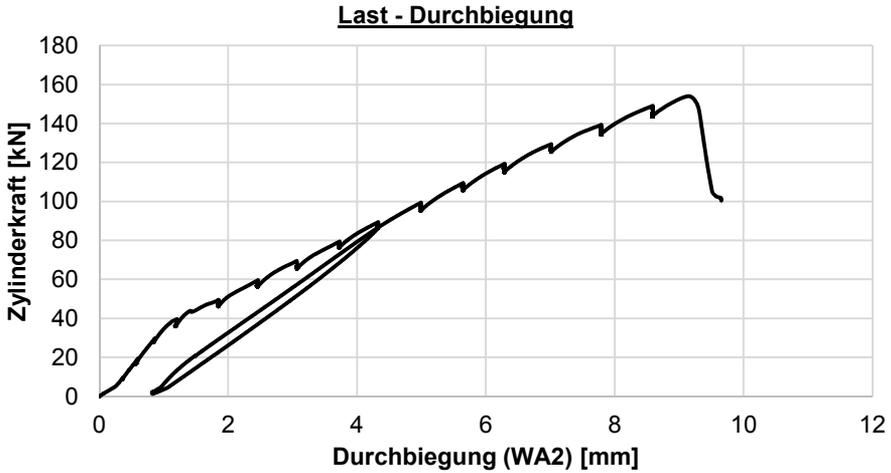
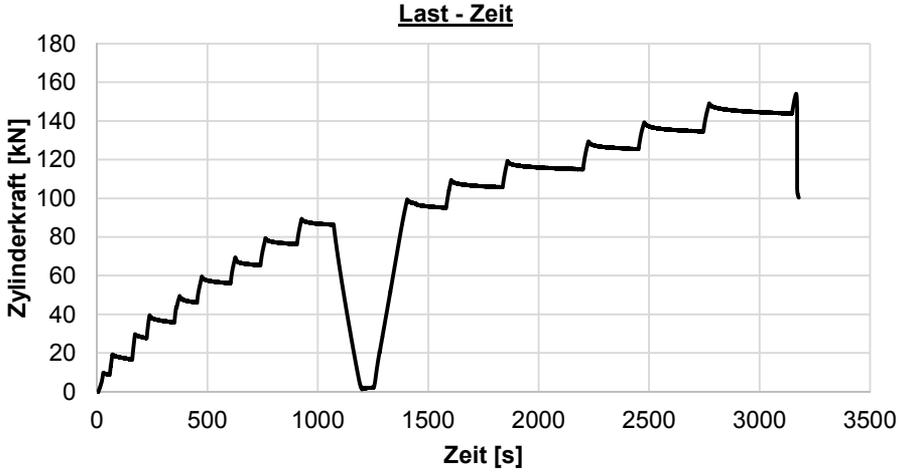
Hinweise zum Rissbild

keine

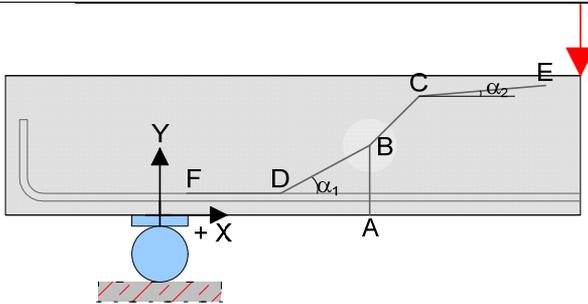


1GT_V2-2 = 1GT_C30/37-25-35-0,33-3-7-1-Längs_V2-2

Datum	15.07.14	Beginn	12:30	Ende	14:00
Bezeichnung	1GT_C30/37-25-35-0,33-3-7-1-Längs_V2-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	51,7 N/mm ²	Betonalter	18 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	90	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	4,31	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,82	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40		mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	90	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	165	kN	erreichte Zylinderlast	154	kN
			Durchbiegung	9,1	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



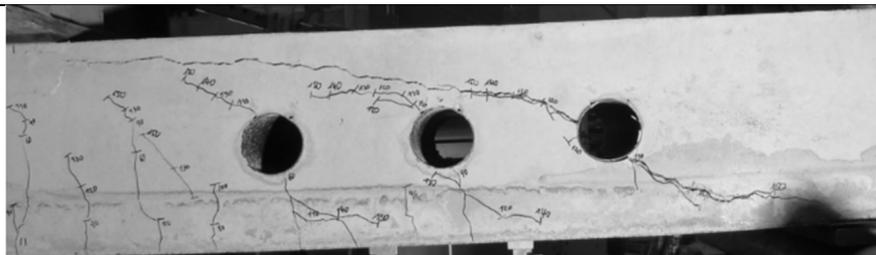
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	27,5 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	24 cm	6,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	41,5 cm	17,5 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	17,5 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	23,0 cm
F	Ende des Dübelrisses	-1,0 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse	37°	
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse	8°	

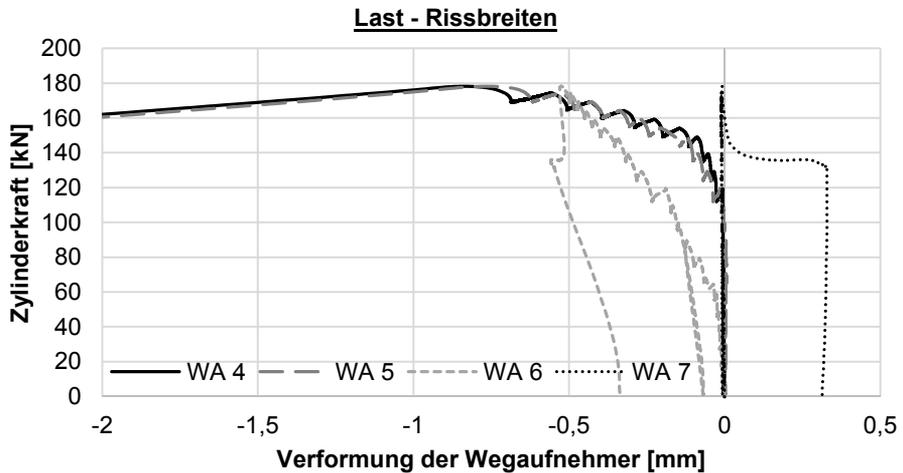
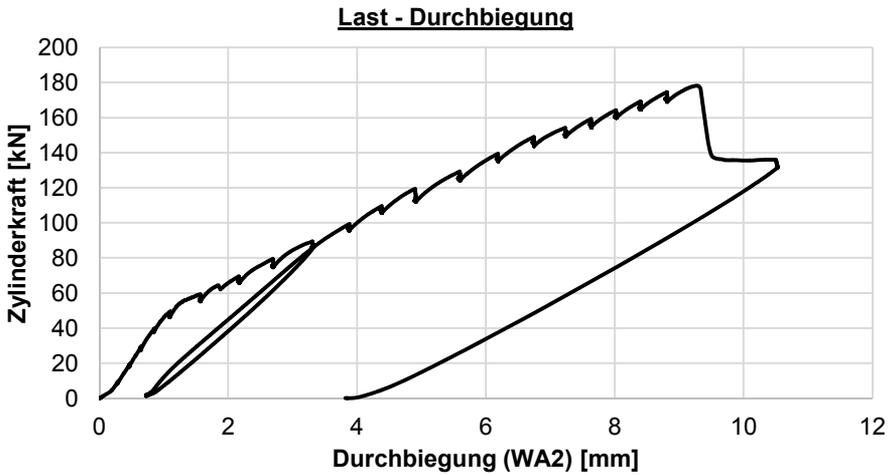
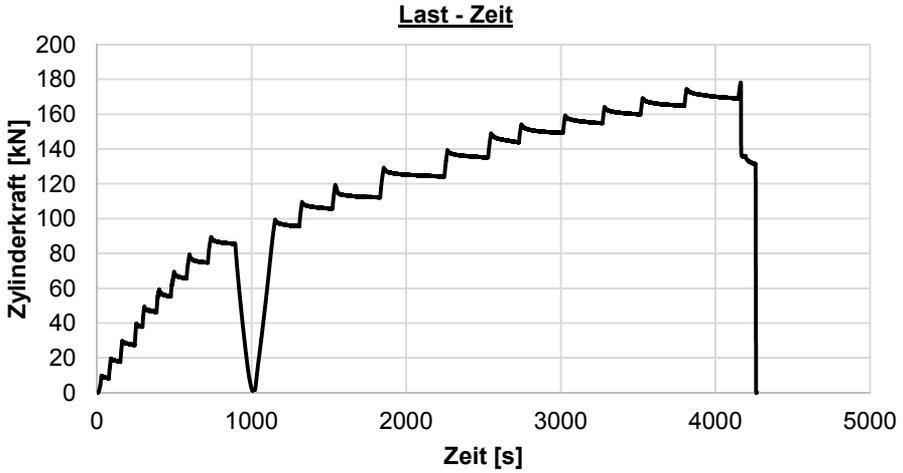
Hinweise zum Rissbild

keine

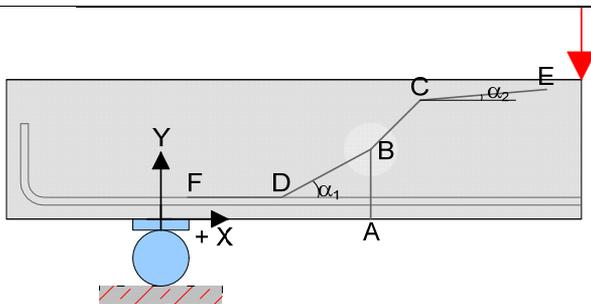


1GT_V3-1 = 1GT_C30/37-25-40-0,33-3-7-1-Längs_V3-1

Datum	15.07.14	Beginn	14:10	Ende	15:40
Bezeichnung	1GT_C30/37-25-40-0,33-3-7-1-Längs_V3-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	51,7 N/mm ²	Betonalter	18 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
<p>Detail</p>					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	90	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,31	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,72	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$		4,40 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			110		kN
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	185	kN	erreichte Zylinderlast	178	kN
			Durchbiegung	9,3	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



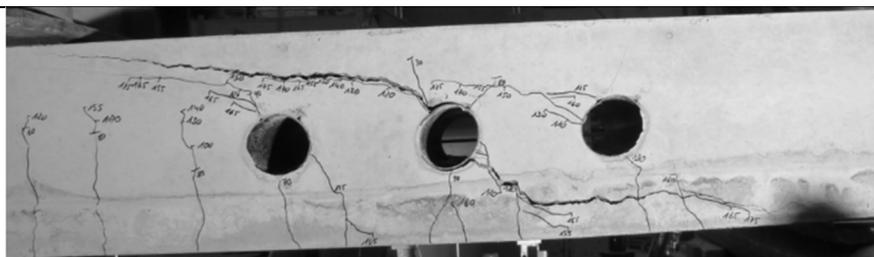
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	43 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	40,5 cm	4,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	57 cm	19,5 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	22,5 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	23,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	3 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		46°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		3°

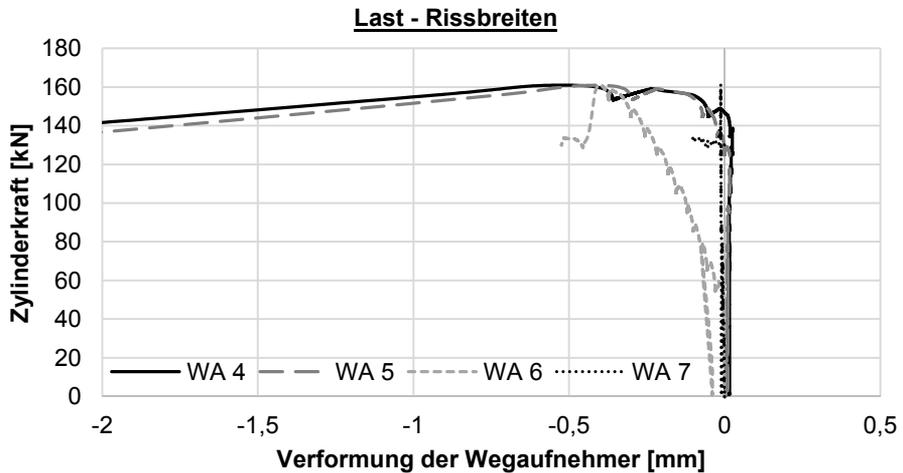
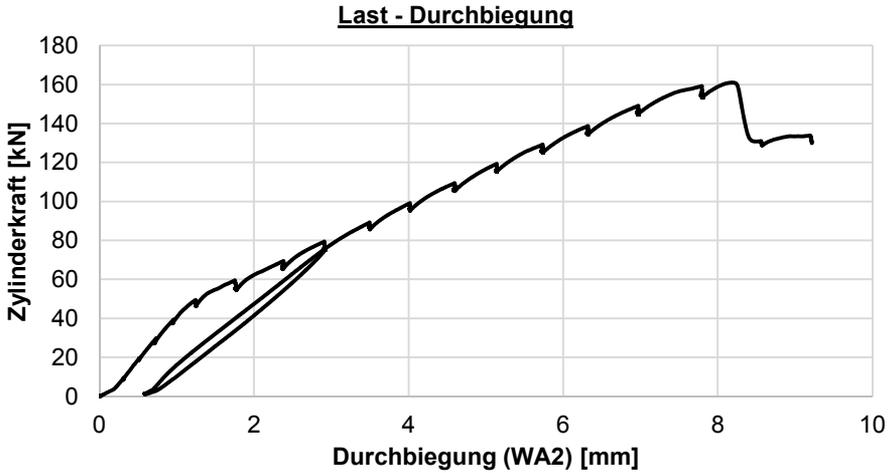
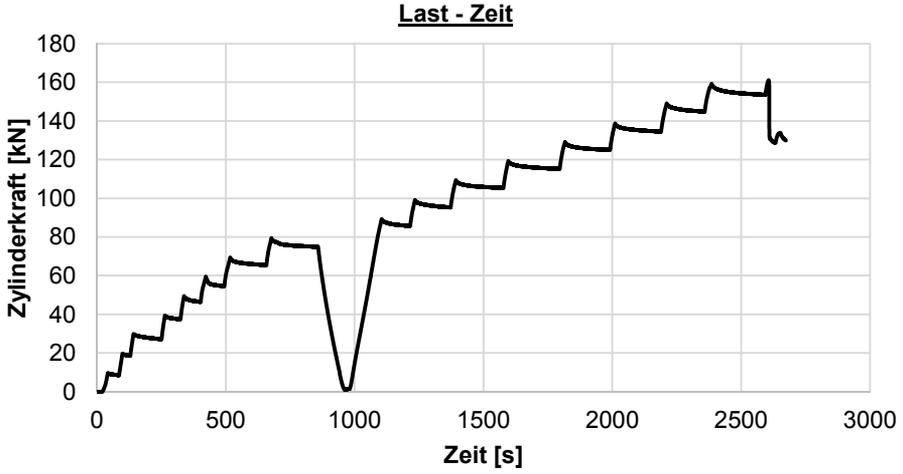
Hinweise zum Rissbild

keine

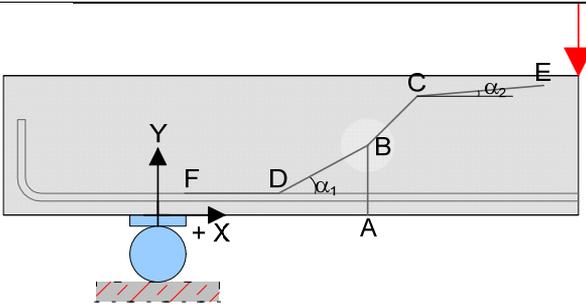


1GT_V3-2 = 1GT_C30/37-25-40-0,33-3-7-1-Längs_V3-2

Datum	15.07.14	Beginn	15:45	Ende	17:00
Bezeichnung	1GT_C30/37-25-40-0,33-3-7-1-Längs_V3-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	51,7 N/mm ²	Betonalter	18 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	80	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	2,91	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,59	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$		4,40 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			106		kN
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	175	kN	erreichte Zylinderlast	161	kN
			Durchbiegung	8,2	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



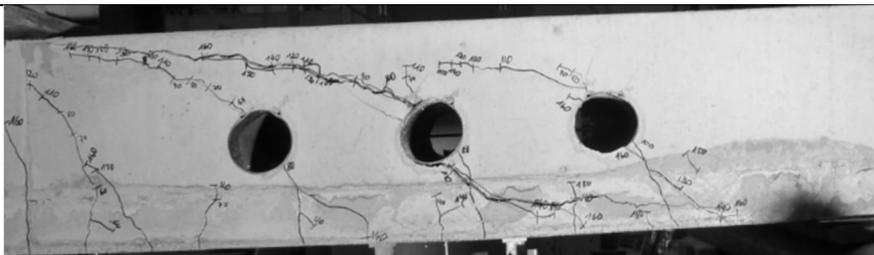
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	44 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	45,5 cm	6 cm
C	zweite Richtungsänderung	54 cm	17,5 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	27 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	23,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	14 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		39°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		15°

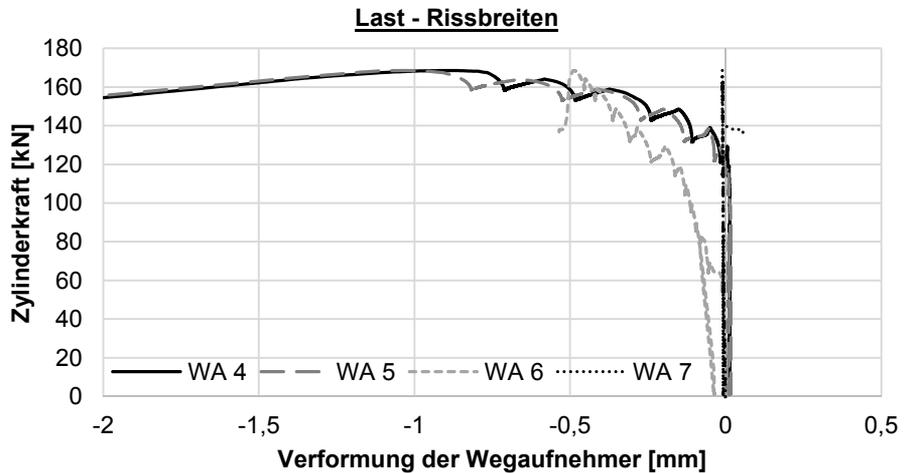
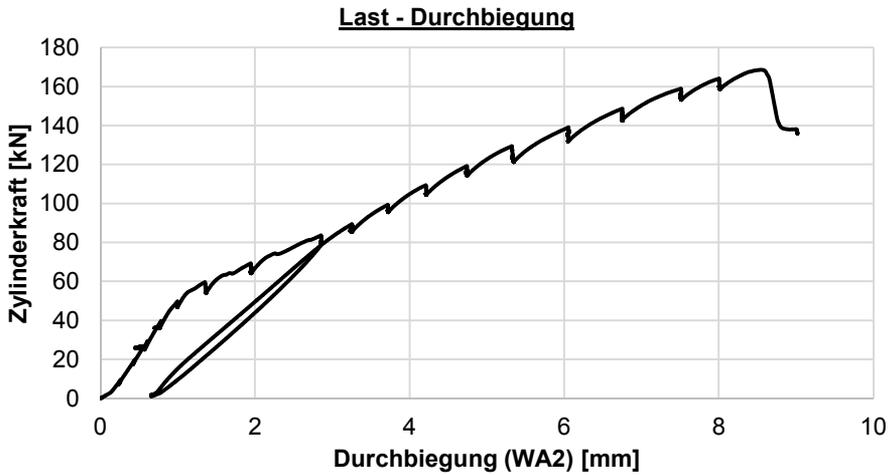
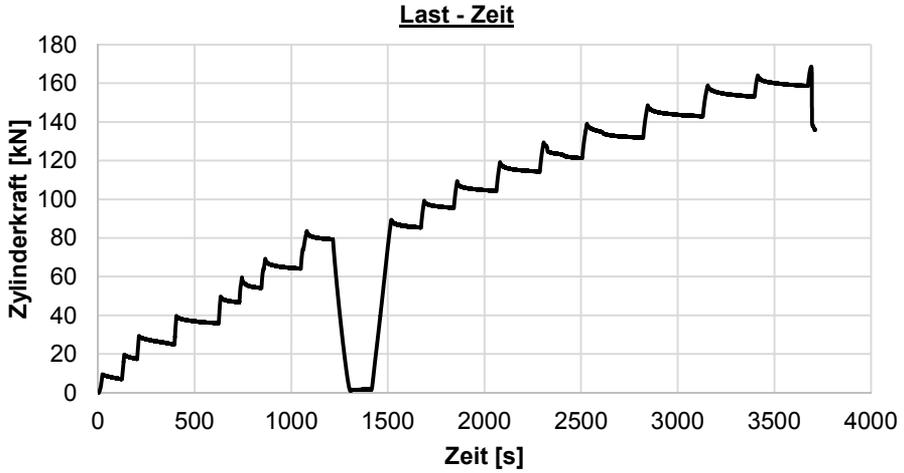
Hinweise zum Rissbild

keine

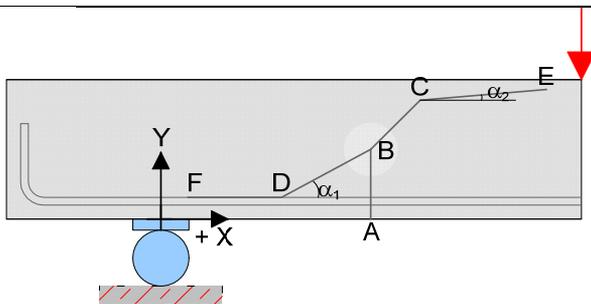


1GT_V4-1 = 1GT_C30/37-25-45-0,33-3-7-1-Längs_V4-1

Datum	15.07.14	Beginn	17:05	Ende	18:10
Bezeichnung	1GT_C30/37-25-45-0,33-3-7-1-Längs_V4-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	51,7 N/mm ²	Betonalter	18 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	80	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	2,86	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,66	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$		4,40 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			115 kN		
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	175	kN	erreichte Zylinderlast	170	kN
			Durchbiegung	9,0	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
ungewöhnliches Last-Verformungsverhalten bis zur Gebrauchslast Korrektur der Auflagerplatte nach Entlastung bei Gebrauchslast					



Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	45 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	47,5 cm	7 cm
C	zweite Richtungsänderung	56 cm	17 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	40 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	22 cm
F	Ende des Dübelrisses	16 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		28°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		6°

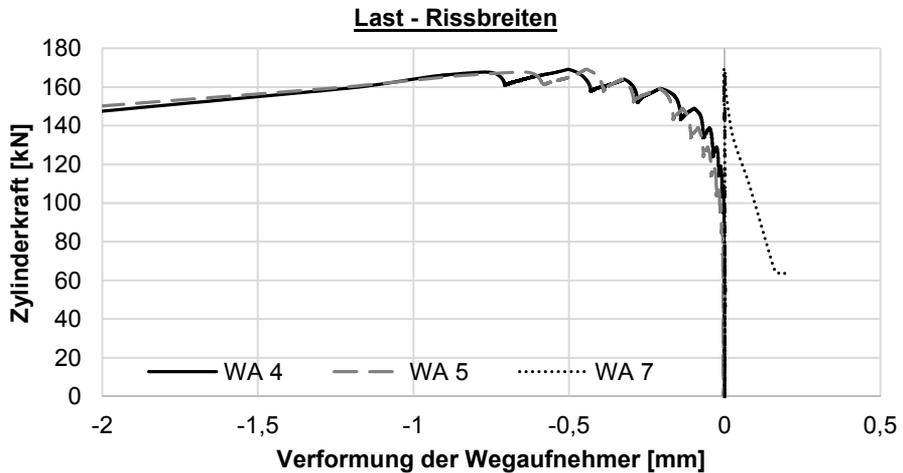
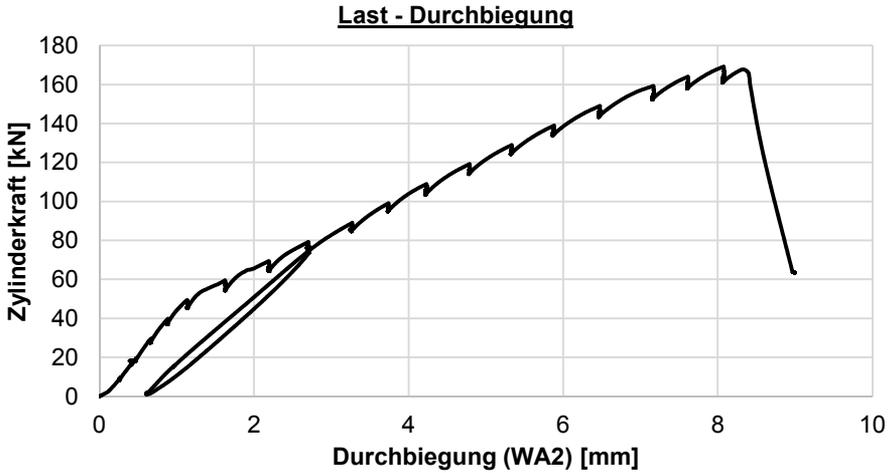
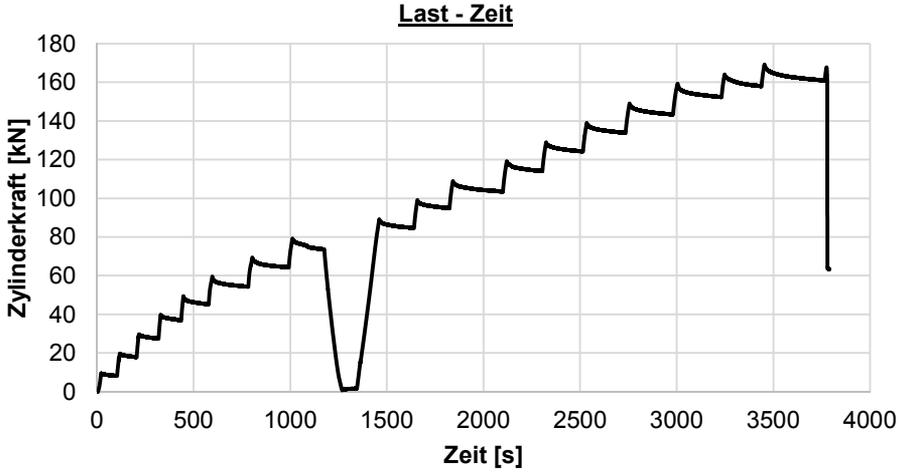
Hinweise zum Rissbild

keine

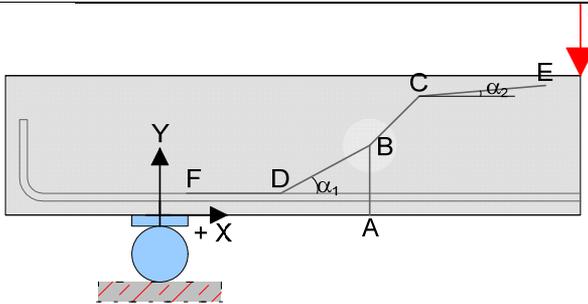


1GT_V4-2 = 1GT_C30/37-25-45-0,33-3-7-1-Längs_V4-2

Datum	16.07.14	Beginn	08:00	Ende	09:15
Bezeichnung	1GT_C30/37-25-45-0,33-3-7-1-Längs_V4-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	51,7 N/mm ²	Betonalter	19 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	80	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	2,71	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,61	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			114	kN	
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	170	kN	erreichte Zylinderlast	170	kN
			Durchbiegung	8,1	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



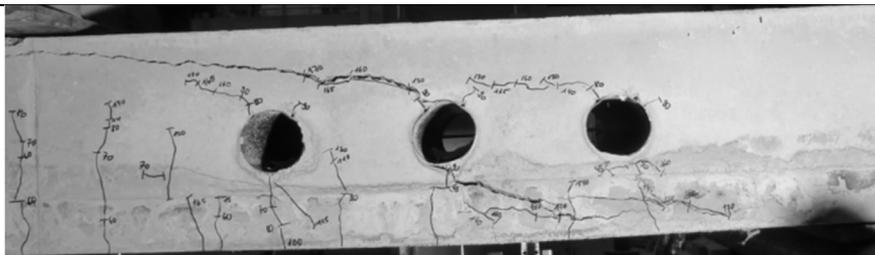
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	50 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	50 cm	7 cm
C	zweite Richtungsänderung	54 cm	18 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	36 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	23,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	4 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		68°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		6°

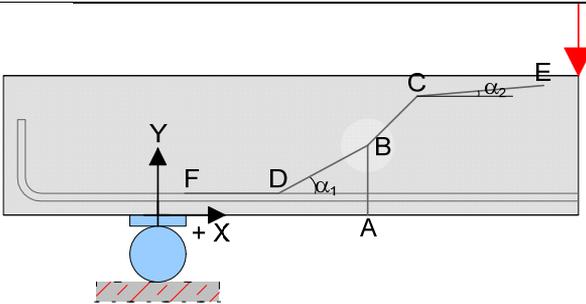
Hinweise zum Rissbild

keine



1GT_V5-1 = 1GT_C30/37-25-40-0-0-0-0-0_V5-1

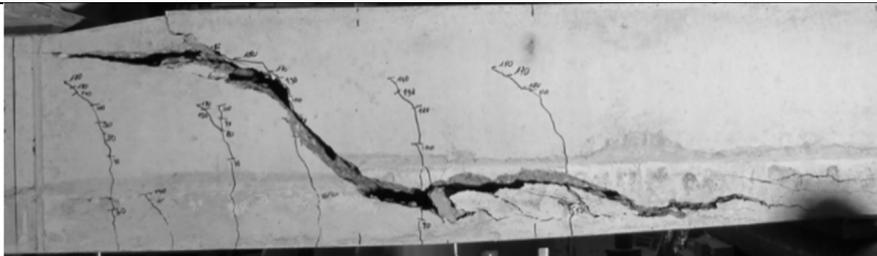
Datum	14.07.14	Beginn	13:05	Ende	14:20
Bezeichnung		1GT_C30/37-25-40-0-0-0-0-0_V5-1			
Beton		C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn			
Würfeldruckfestigkeit		51,7 N/mm ²	Betonalter	17 Tage	
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei		110	kN		
Durchbiegung vor Entlastung		4,49	mm		
Durchbiegung nach Entlastung		0,91	mm		
Rissbreite unter Lasteinleitung		0,1	mm		
Rissbreite unter der Öffnung		-	mm		
Grenzdurchbiegung		$L / 500 =$	4,40 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung		108	kN		
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	235	kN	erreichte Zylinderlast	189	kN
			Durchbiegung	9,5	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
DATENVERLUST					

Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	66 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	68 cm	16 cm
C	zweite Richtungsänderung	69 cm	19 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	60 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	23 cm
F	Ende des Dübelrisses	-12 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		45°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		19°

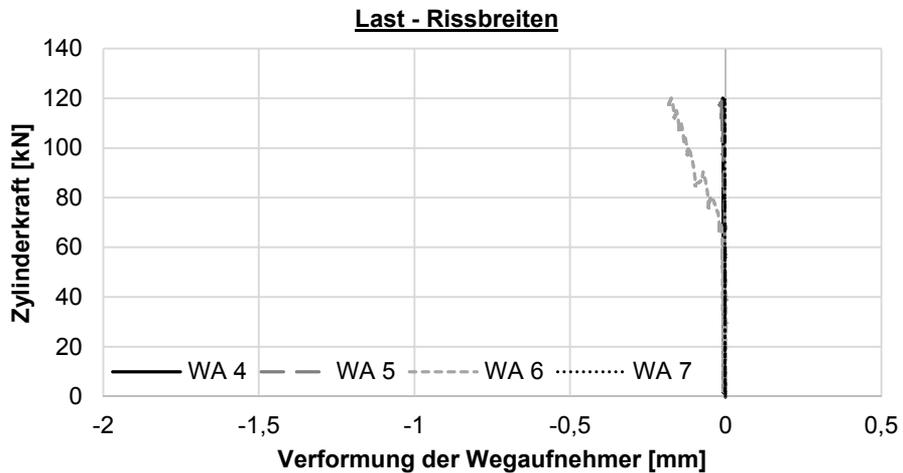
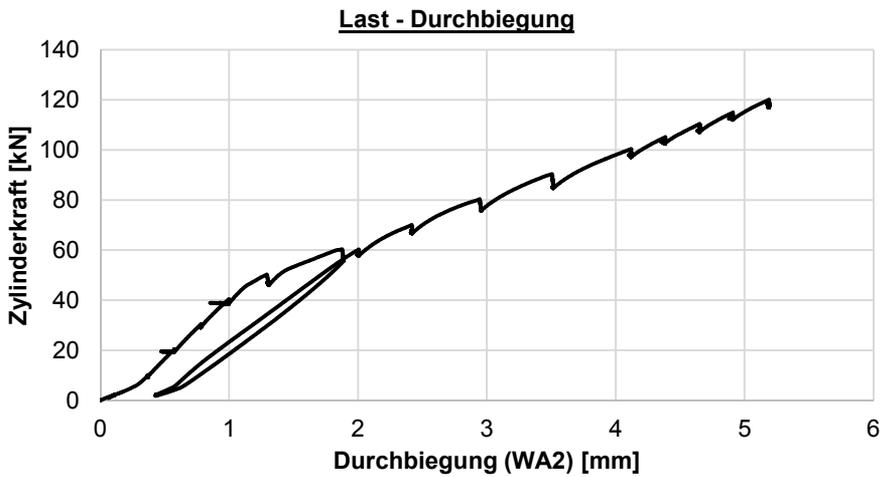
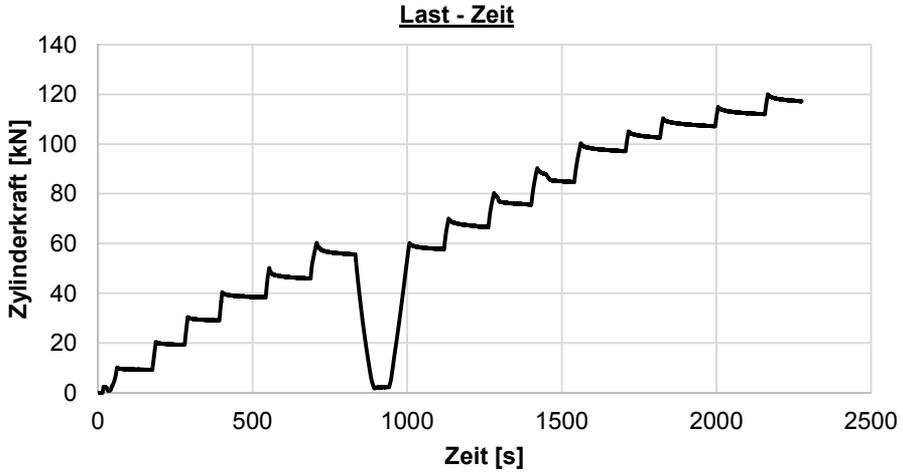
Hinweise zum Rissbild

keine

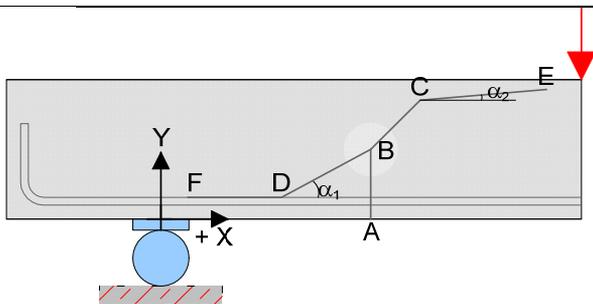


1GT_V5-2 = 1GT_C30/37-25-40-0,33-3-0-0-0_V5-2

Datum	14.07.14	Beginn	15:30	Ende	17:00
Bezeichnung	1GT_C30/37-25-40-0,33-3-0-0-0_V5-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	51,7 N/mm ²	Betonalter	17 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
<p>Detail</p> <p>Diagram showing measurement points (WA 1-7) and dimensions (28, 50, 100, 60, 120, 60, 28, 275) for the specimen.</p>					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	60	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	1,9	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,43	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	105	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	115	kN	erreichte Zylinderlast	135	kN
			Durchbiegung		mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
DATENVERLSUT ab 120kN					



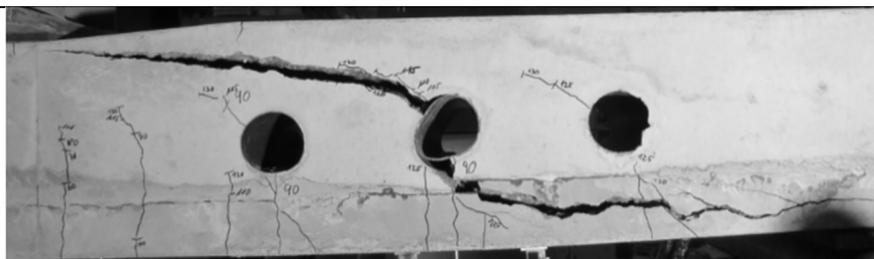
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	49 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	50 cm	8,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	54,5 cm	17 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	42,5 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	24 cm
F	Ende des Dübelrisses	-11 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		63°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		11°

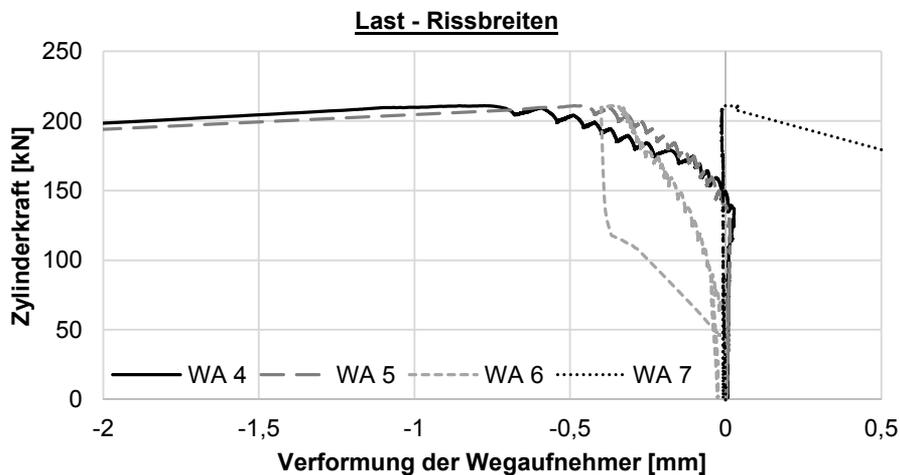
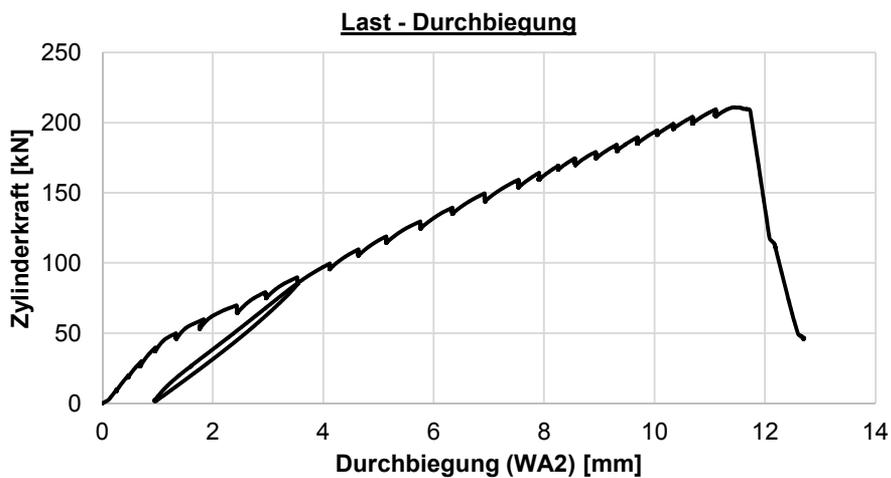
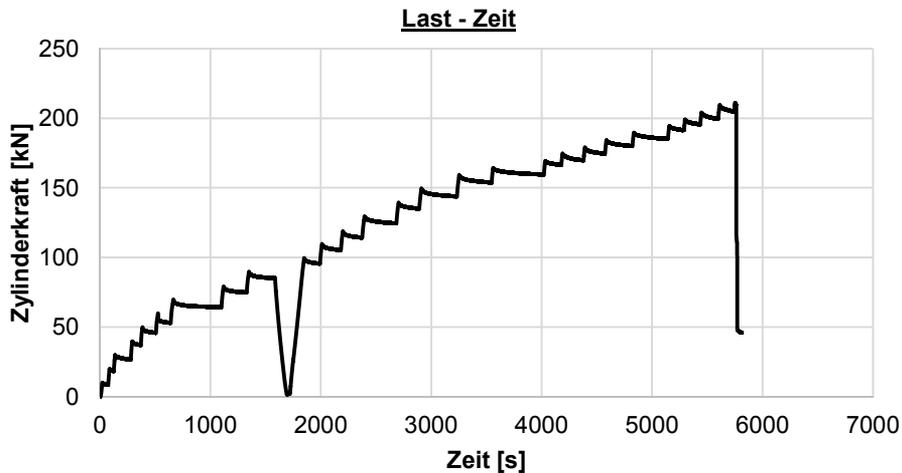
Hinweise zum Rissbild

keine

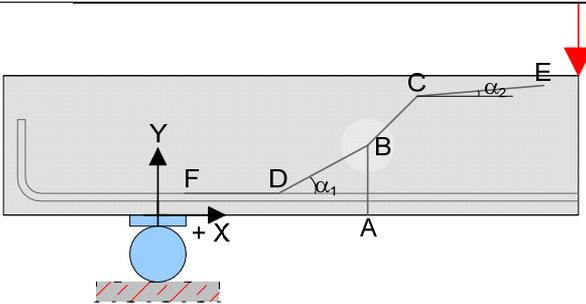


2GT_V1-1 = 2GT_C30/37-25-40-0,33-1-OB-7-1-Quer_V1-1

Datum	16.07.14	Beginn	13:50	Ende	15:30
Bezeichnung		2GT_C30/37-25-40-0,33-1-OB-7-1-Quer_V1-1			
Beton		C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn			
Würfeldruckfestigkeit		51,7 N/mm ²	Betonalter	19 Tage	
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei		90	kN		
Durchbiegung vor Entlastung		3,54	mm		
Durchbiegung nach Entlastung		0,95	mm		
Rissbreite unter Lasteinleitung		0,1	mm		
Rissbreite unter der Öffnung		0,05	mm		
Grenzdurchbiegung		$L / 500 =$	4,40 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			105	kN	
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	190	kN	erreichte Zylinderlast	210	kN
			Durchbiegung	12,7	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



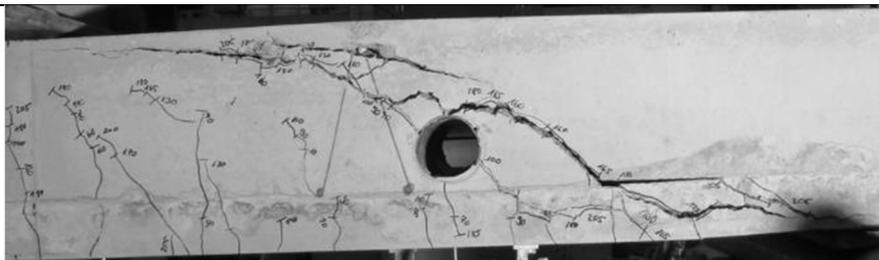
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	31 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	32 cm	6,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	44 cm	18 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	27,5 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	23,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	-5,0 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		35°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		11°

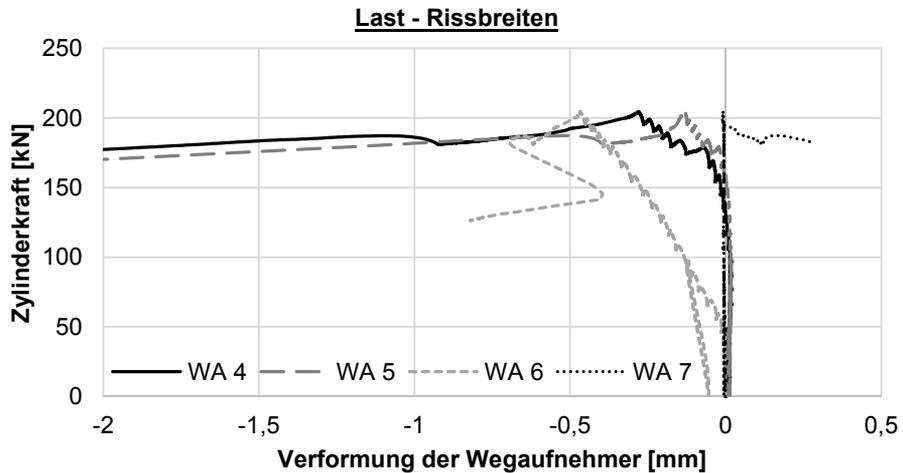
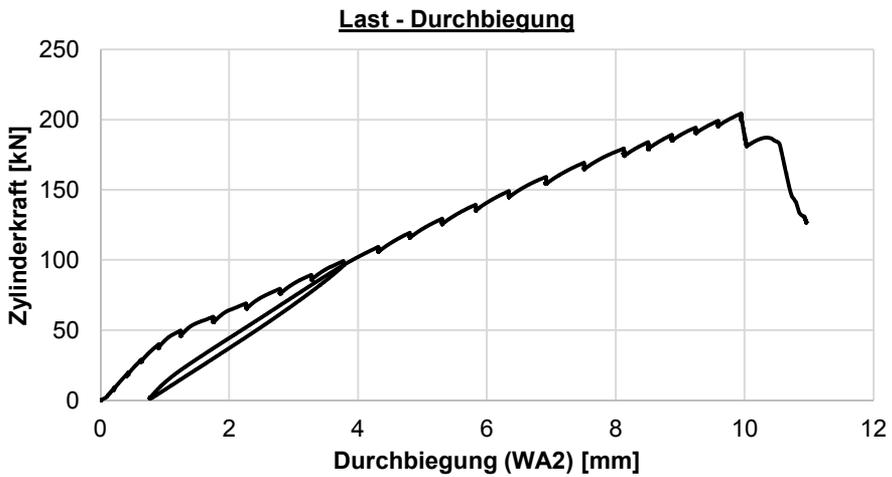
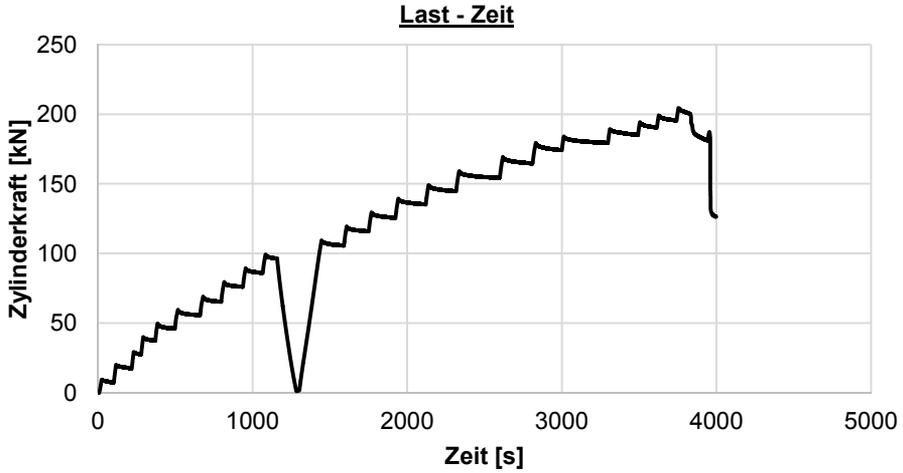
Hinweise zum Rissbild

keine

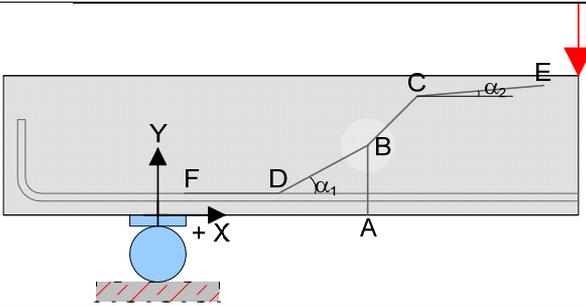


2GT_V1-2 = 2GT_C30/37-25-40-0,33-1-FT-7-1-Quer_V1-2

Datum	16.07.14	Beginn	16:00	Ende	17:15
Bezeichnung		2GT_C30/37-25-40-0,33-1-FT-7-1-Quer_V1-2			
Beton		C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn			
Würfeldruckfestigkeit		51,7 N/mm ²	Betonalter	19 Tage	
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei		100	kN		
Durchbiegung vor Entlastung		3,77	mm		
Durchbiegung nach Entlastung		0,77	mm		
Rissbreite unter Lasteinleitung		0,1	mm		
Rissbreite unter der Öffnung		0,05	mm		
Grenzdurchbiegung		$L / 500 =$	4,40 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung		110	kN		
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	210	kN	erreichte Zylinderlast	205	kN
			Durchbiegung	9,95	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



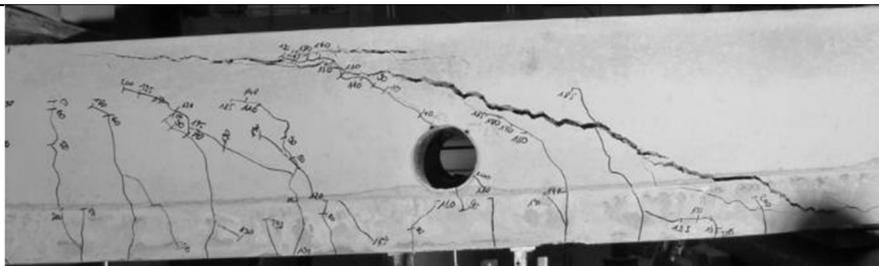
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	28 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	32 cm	13 cm
C	zweite Richtungsänderung	54 cm	20 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	10 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	24 cm
F	Ende des Dübelrisses	-2 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		17°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		9°

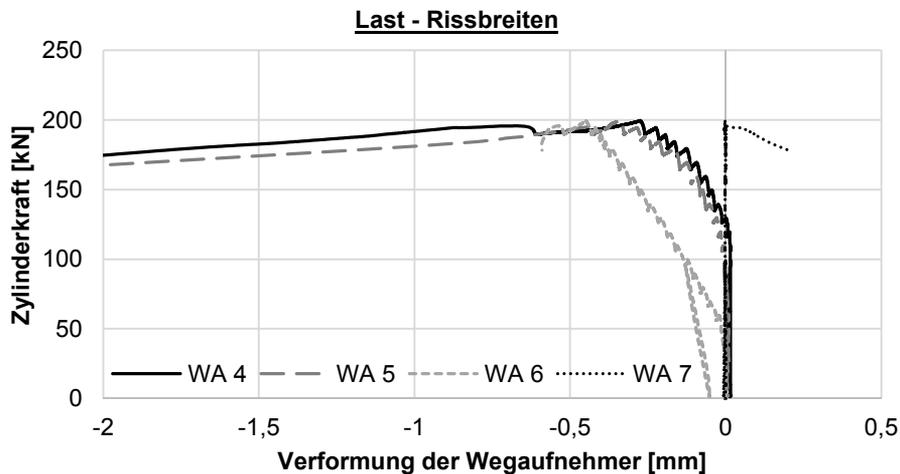
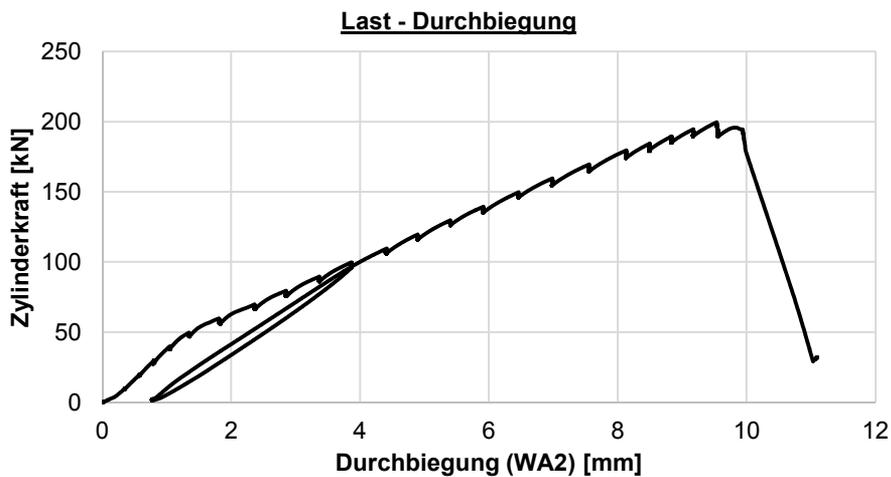
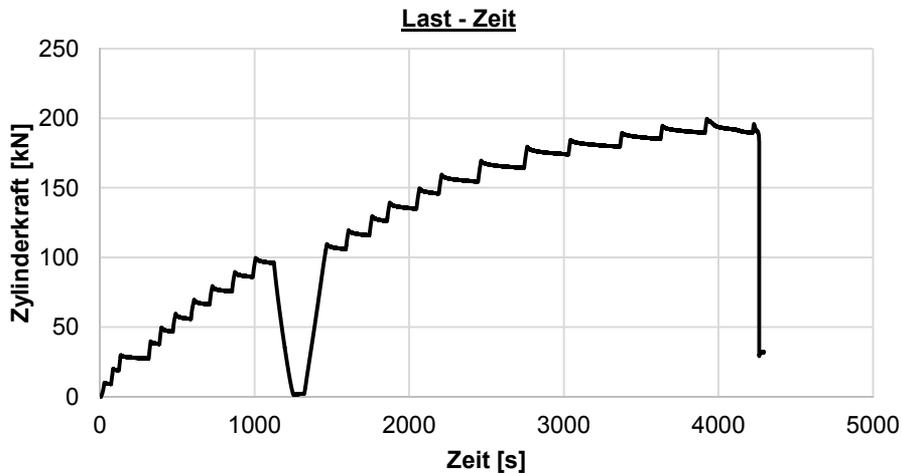
Hinweise zum Rissbild

keine

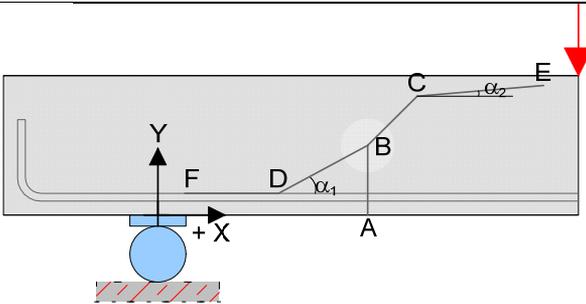


2GT_V2-1 = 2GT_C30/37-25-40-0,33-1-OB-6-1-Quer_V2-1

Datum	17.07.14	Beginn	10:00	Ende	11:30
Bezeichnung	2GT_C30/37-25-40-0,33-1-OB-6-1-Quer_V2-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	51,7 N/mm ²	Betonalter	20 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	100	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,87	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,77	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40		mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	110	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	210	kN	erreichte Zylinderlast	200	kN
			Durchbiegung	9,5	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



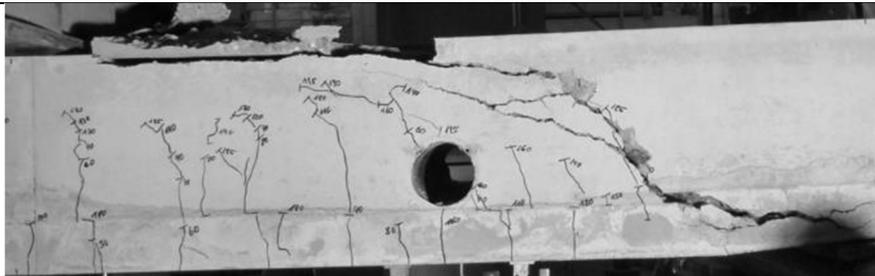
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	27 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	27 cm	8 cm
C	zweite Richtungsänderung	34 cm	14 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	21 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	24 cm
F	Ende des Dübelrisses	-16 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse	48°	
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse	18°	

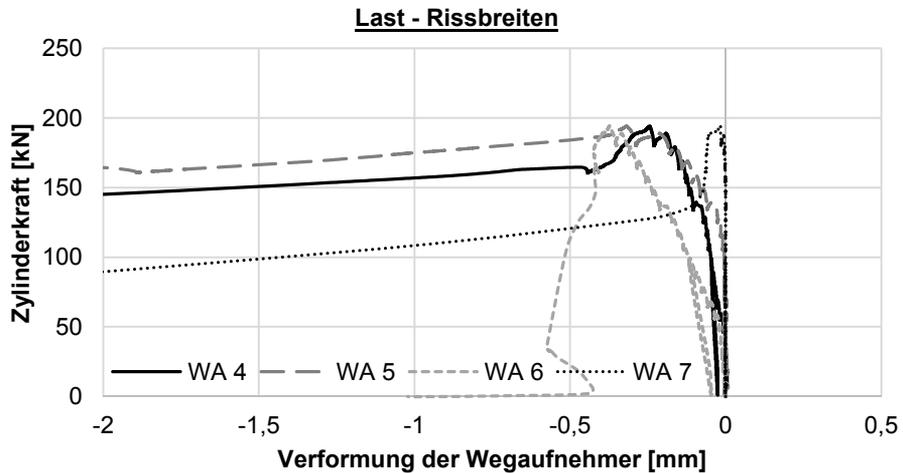
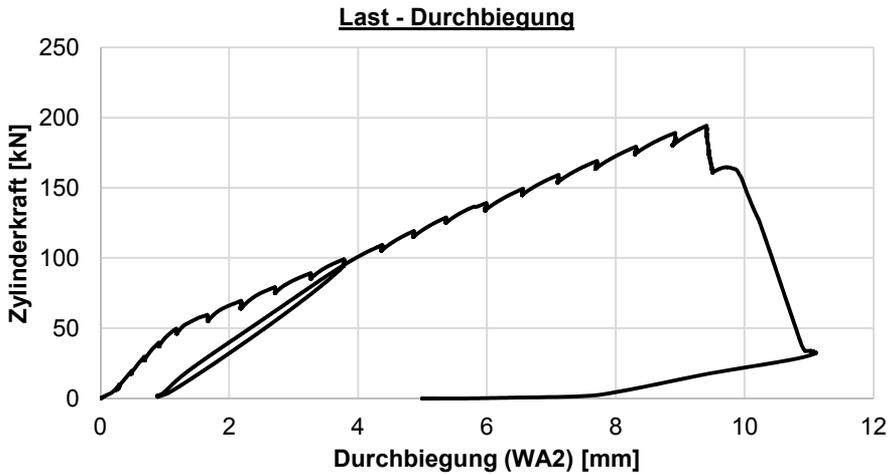
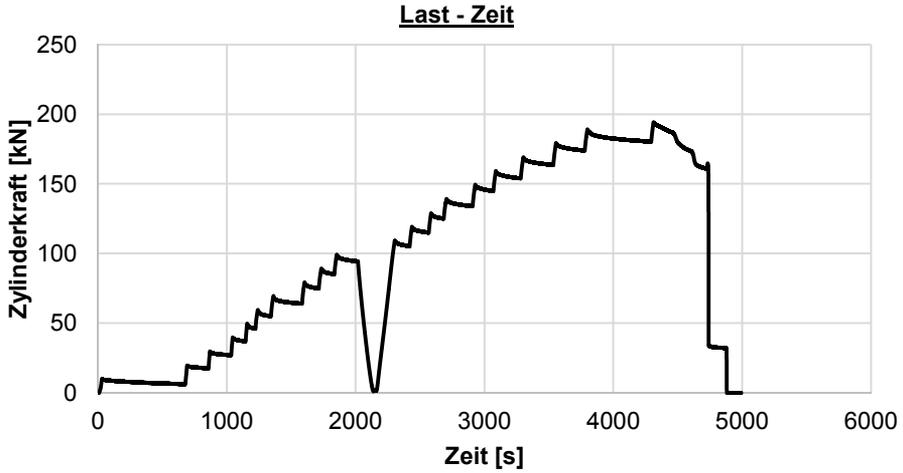
Hinweise zum Rissbild

keine

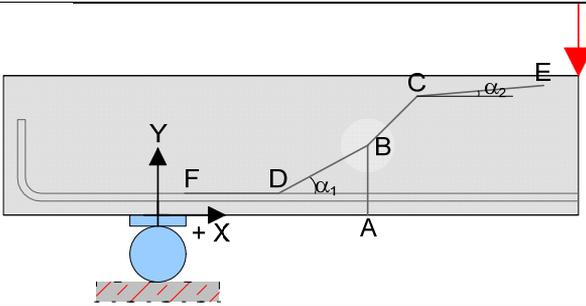


2GT_V2-2 = 2GT_C30/37-25-40-0,33-1-FT-6-1-Quer_V2-2

Datum	17.07.14	Beginn	07:45	Ende	09:15
Bezeichnung	2GT_C30/37-25-40-0,33-1-FT-6-1-Quer_V2-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	51,7 N/mm ²	Betonalter	20 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	100	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,78	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,89	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	110	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	210	kN	erreichte Zylinderlast	195	kN
			Durchbiegung	9,5	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



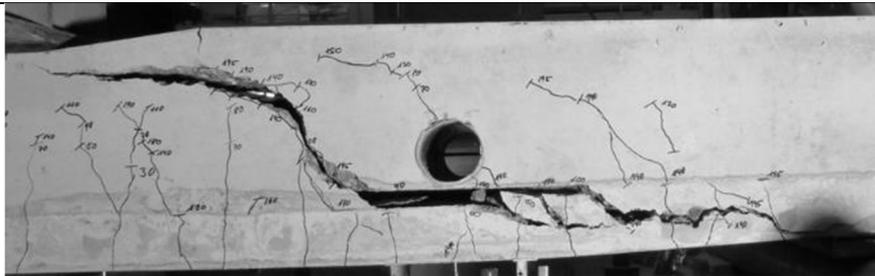
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	62 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	63 cm	6 cm
C	zweite Richtungsänderung	69 cm	18 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	41 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	23,5 cm
F	Ende des Dübelrisses	-11 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		61°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		21°

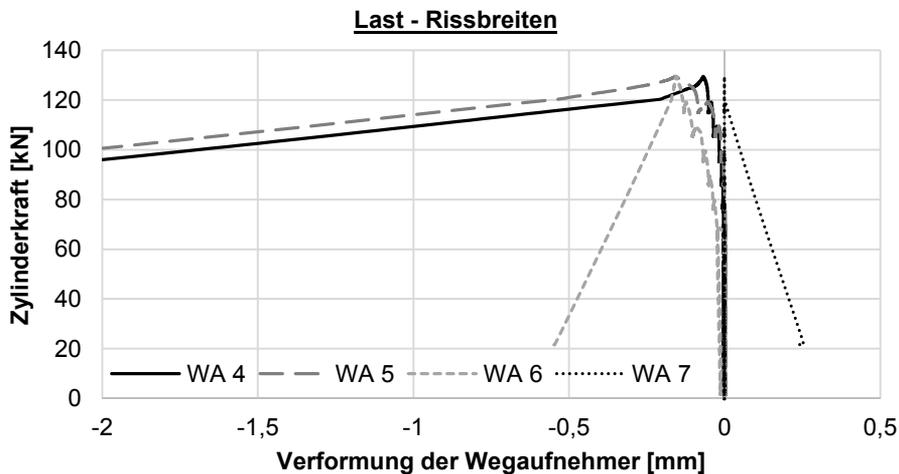
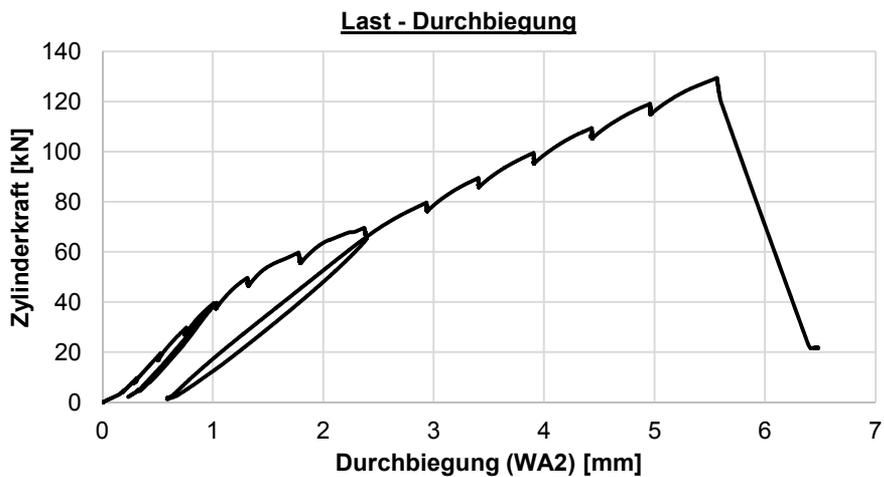
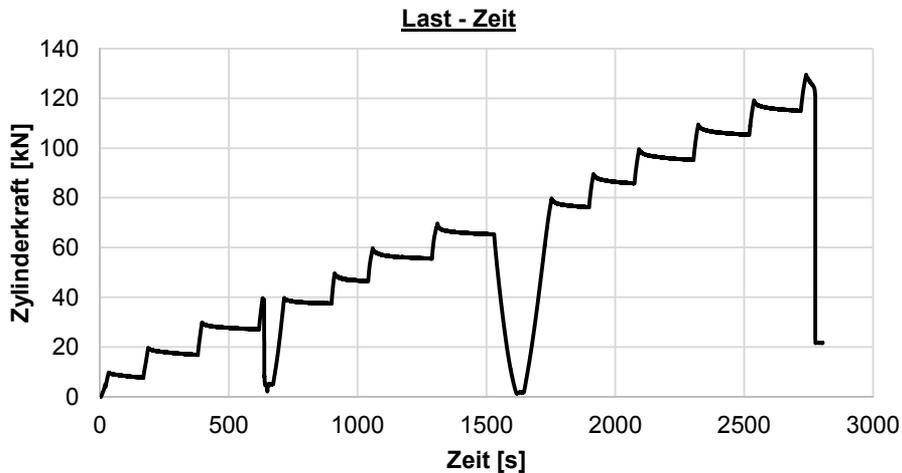
Hinweise zum Rissbild

keine

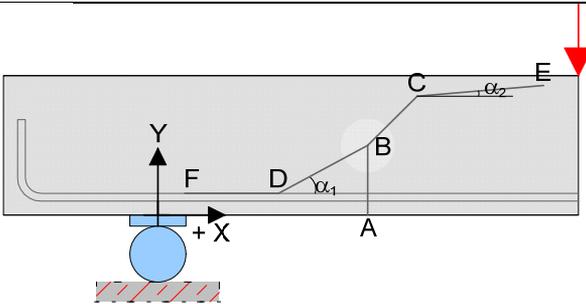


2GT_V3-1 = 2GT_C30/37-25-40-0,33-1-0-0-0_V3-1

Datum	16.07.14	Beginn	12:35	Ende	13:20
Bezeichnung	2GT_C30/37-25-40-0,33-1-0-0-0_V3-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	51,7 N/mm ²	Betonalter	19 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	70	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	2,38	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,59	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung					kN
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	145	kN	erreichte Zylinderlast	130	kN
			Durchbiegung	5,6	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



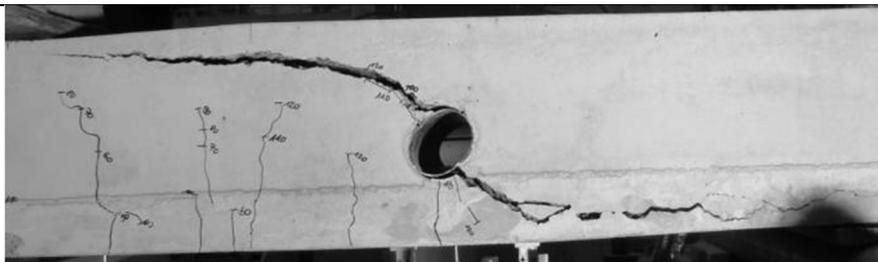
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	51,5 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	53 cm	16 cm
C	zweite Richtungsänderung	59 cm	19 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	40 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	23 cm
F	Ende des Dübelrisses	-7 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		25°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		12°

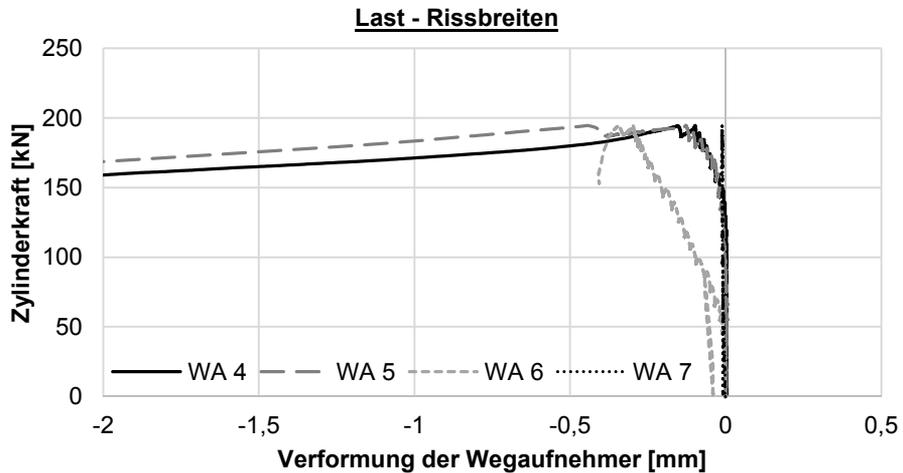
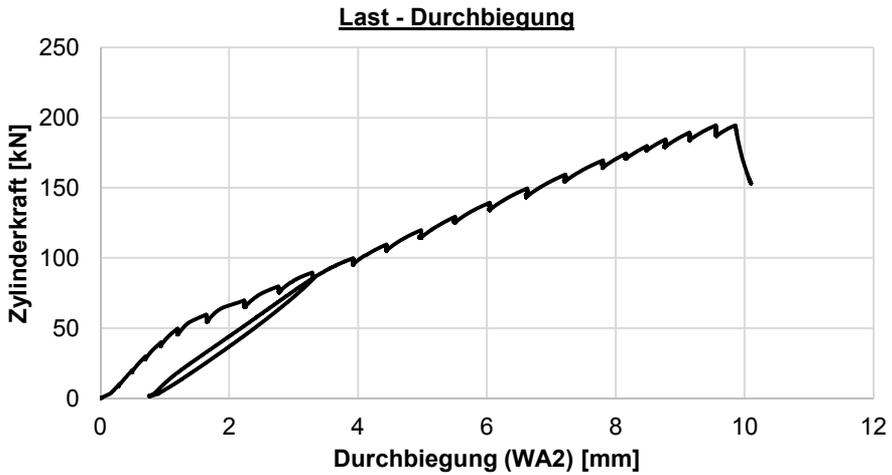
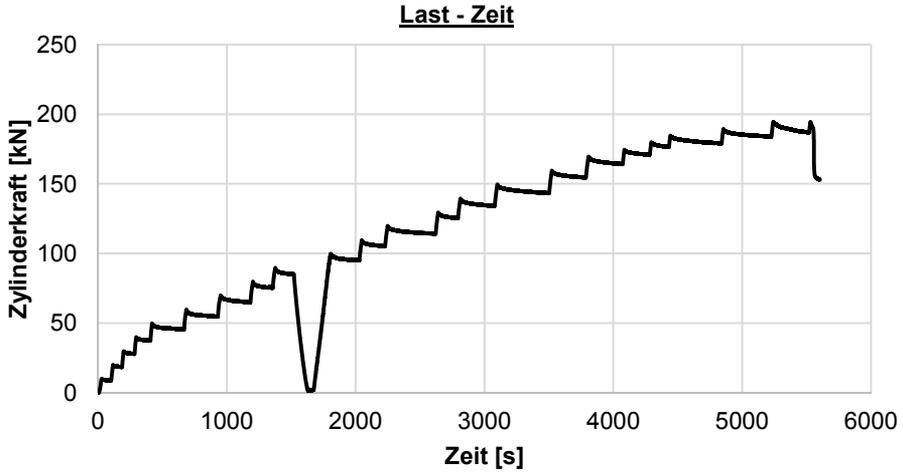
Hinweise zum Rissbild

keine

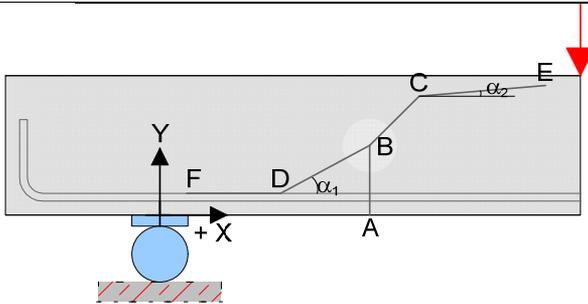


2GT_V3-2 = 2GT_C30/37-25-40-0-0-0-0-V3-2

Datum	16.07.14	Beginn	09:50	Ende	11:30
Bezeichnung		2GT_C30/37-25-40-0-0-0-0-V3-2			
Beton		C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn			
Würfeldruckfestigkeit		51,7 N/mm ²	Betonalter	19 Tage	
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei		90	kN		
Durchbiegung vor Entlastung		3,29	mm		
Durchbiegung nach Entlastung		0,77	mm		
Rissbreite unter Lasteinleitung		0,05	mm		
Rissbreite unter der Öffnung		0	mm		
Grenzdurchbiegung		$L / 500 =$	4,40 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung				110	kN
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	190	kN	erreichte Zylinderlast	195	kN
			Durchbiegung	9,6	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



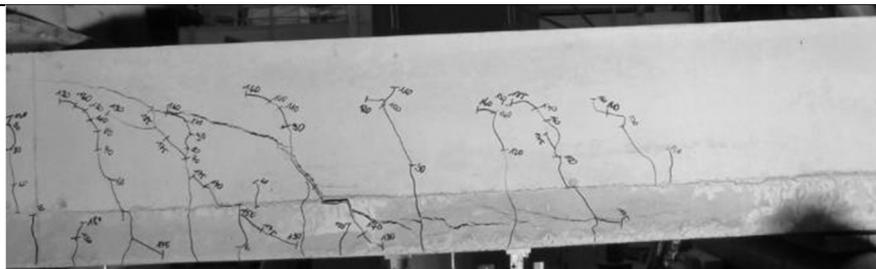
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	67 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	66 cm	9 cm
C	zweite Richtungsänderung	70 cm	14 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	57 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	22 cm
F	Ende des Dübelrisses	18 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		25°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		8°

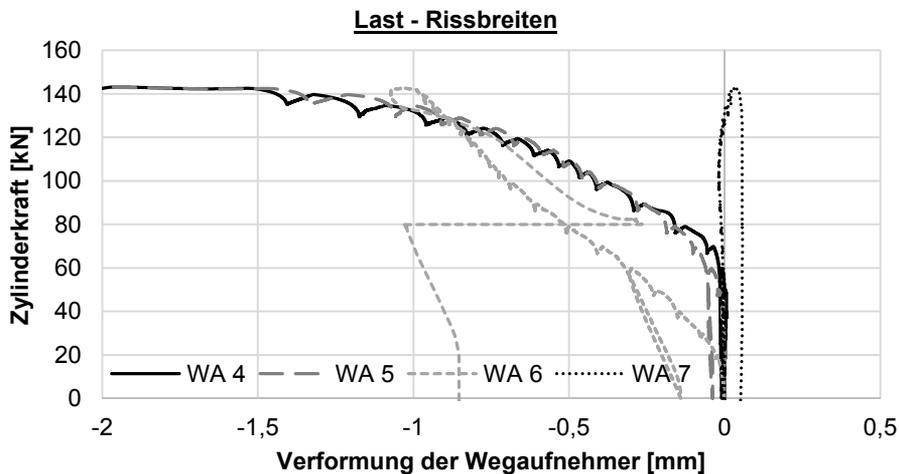
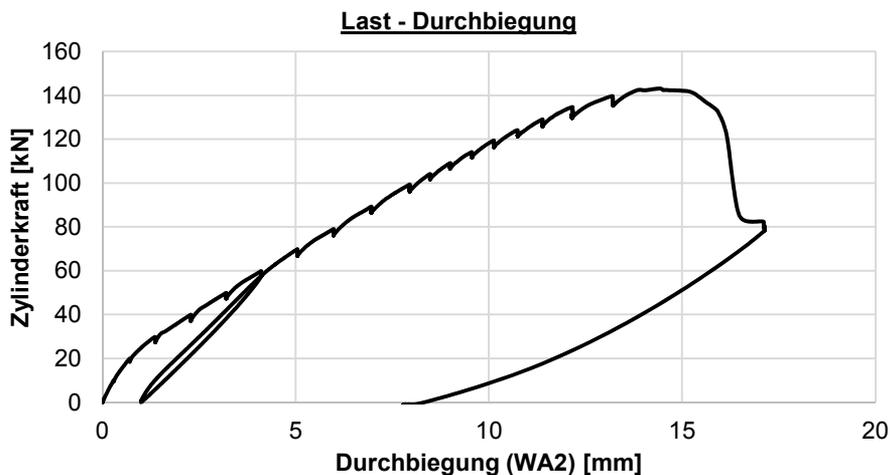
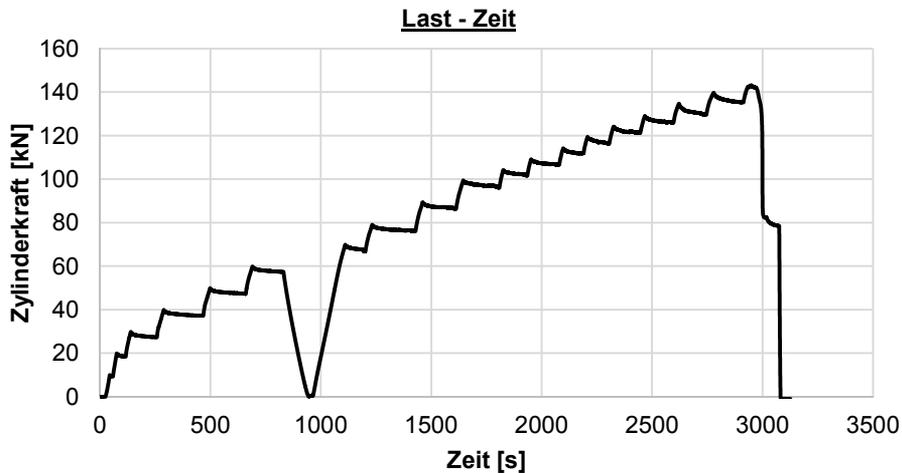
Hinweise zum Rissbild

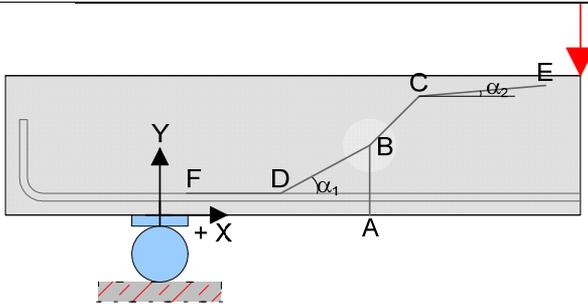
keine



3GT_V1-1 = 3GT_C30/37-25-25-0,33-3-7-1-Längs_V1-1

Datum	03.11.14	Beginn	11:30	Ende	12:20
Bezeichnung	3GT_C30/37-25-25-0,33-3-7-1-Längs_V1-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	41,0 N/mm ²	Betonalter	46 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	60	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	4,11	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	1,00	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	62	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	125	kN	erreichte Zylinderlast	142	kN
			Durchbiegung	14,0	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					

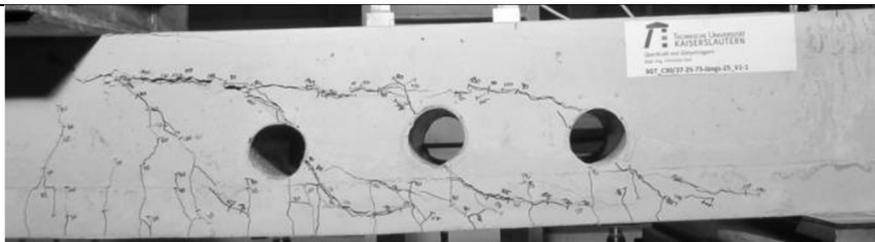


Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	69 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	69 cm	11 cm
C	zweite Richtungsänderung	74 cm	18 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	62 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	23 cm
F	Ende des Dübelrisses	4,5 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		43°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		3°

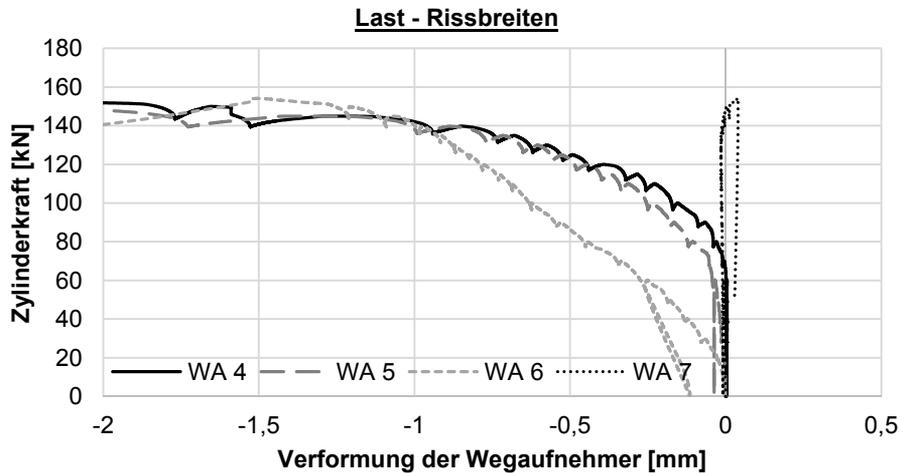
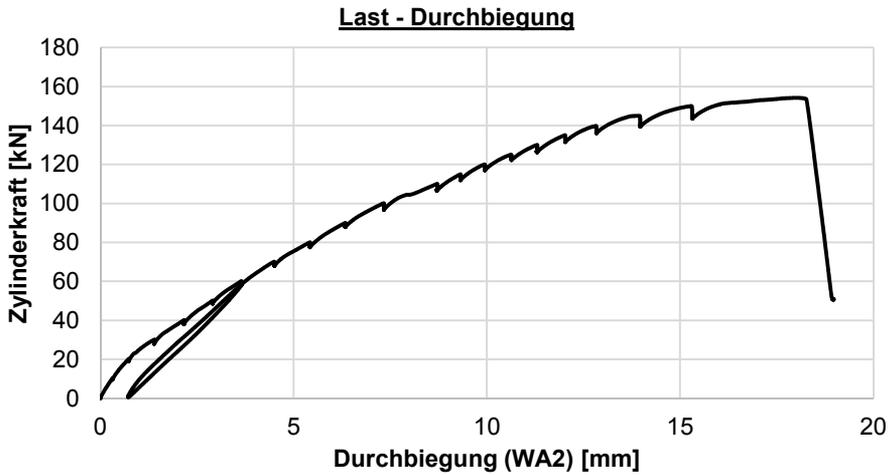
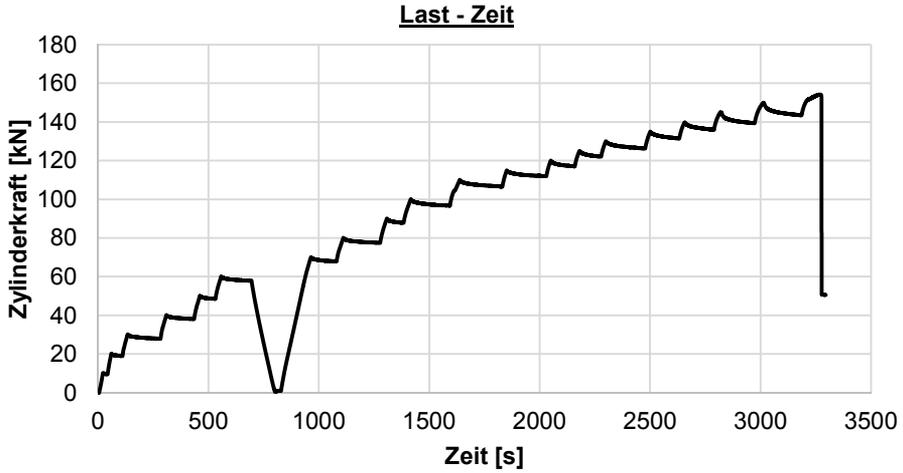
Hinweise zum Rissbild

keine

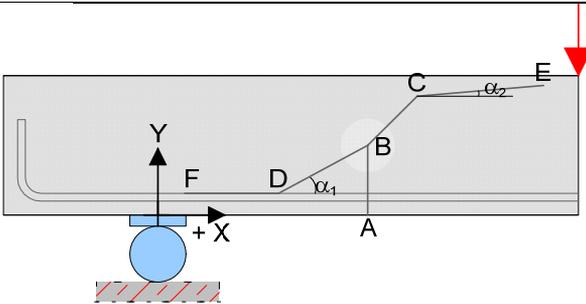


3GT_V1-2 = 3GT_C30/37-25-25-0,33-3-7-1-Längs_V1-2

Datum	03.11.14	Beginn	13:30	Ende	14:30
Bezeichnung	3GT_C30/37-25-25-0,33-3-7-1-Längs_V1-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	41,0 N/mm ²	Betonalter	46 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	60	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,65	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,72	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	68	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	140	kN	erreichte Zylinderlast	153	kN
			Durchbiegung	18,0	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



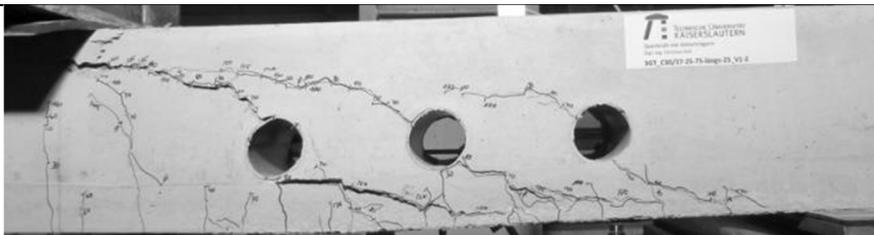
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	69 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	70 cm	7 cm
C	zweite Richtungsänderung	76 cm	18 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	53 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	24 cm
F	Ende des Dübelrisses	8 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		44°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		12°

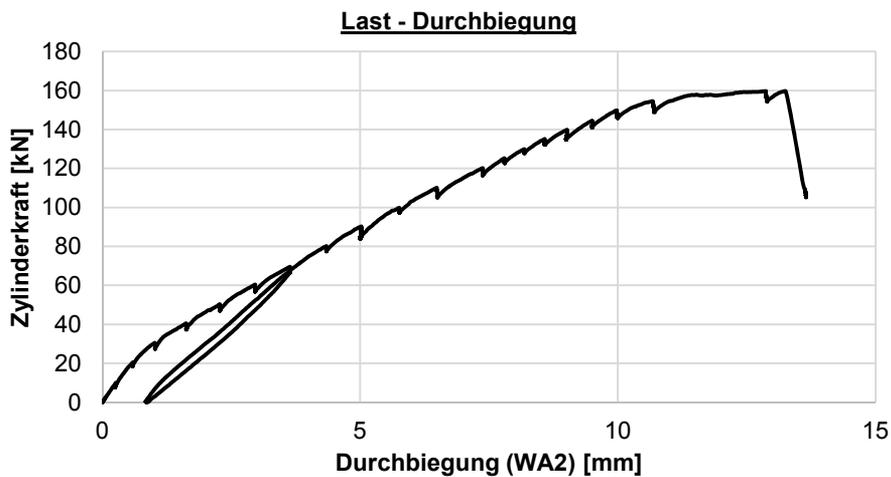
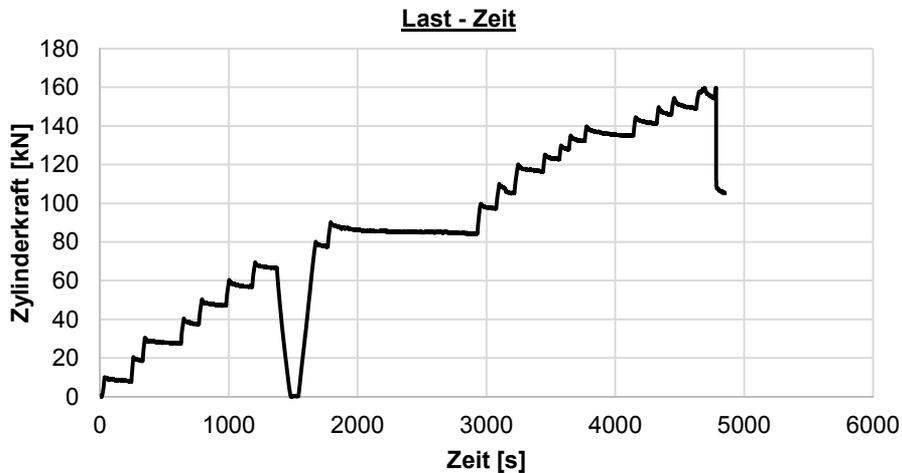
Hinweise zum Rissbild

keine

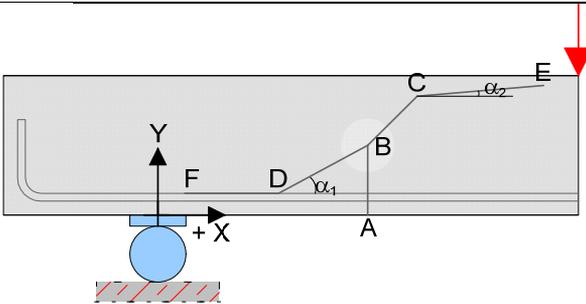


3GT_V2-1 = 3GT_C30/37-25-30-0,33-3-7-1-Längs_V2-1

Datum	04.11.14	Beginn	10:00	Ende	11:30
Bezeichnung	3GT_C30/37-25-30-0,33-3-7-1-Längs_V2-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	41,0 N/mm ²	Betonalter	47 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
<p>Detail</p> <p>WA 4 WA 5 WA 6 WA 7 WA 1 WA 2 WA 3</p> <p>28 50 100 50 60 120 60 28 275</p>					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	70	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,65	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,85	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,1	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	85	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	150	kN	erreichte Zylinderlast	160	kN
			Durchbiegung	11,5	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



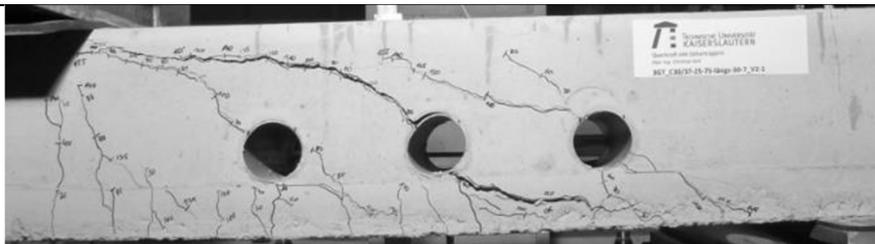
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	46 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	53 cm	12 cm
C	zweite Richtungsänderung	69 cm	20 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	41 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	24 cm
F	Ende des Dübelrisses	5 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse	37°	
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse	4°	

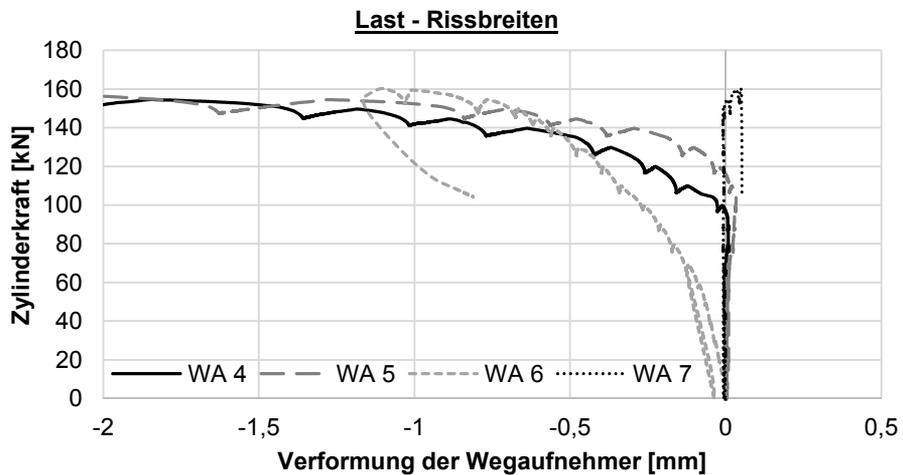
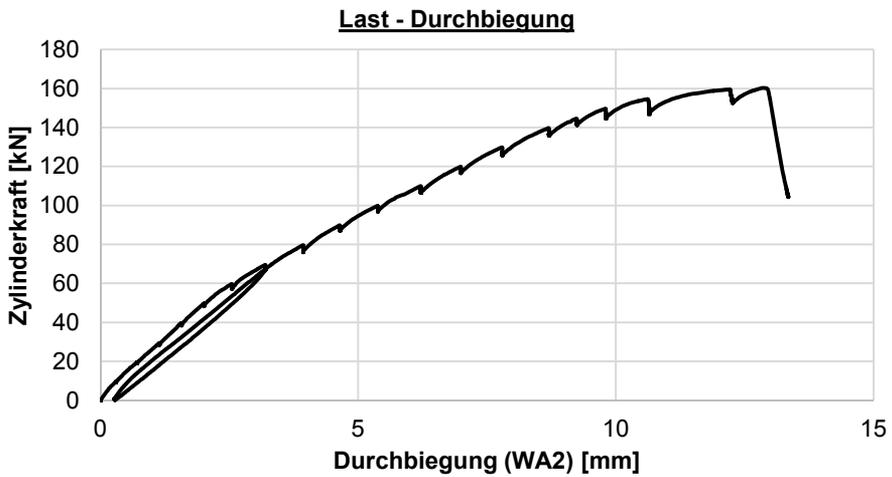
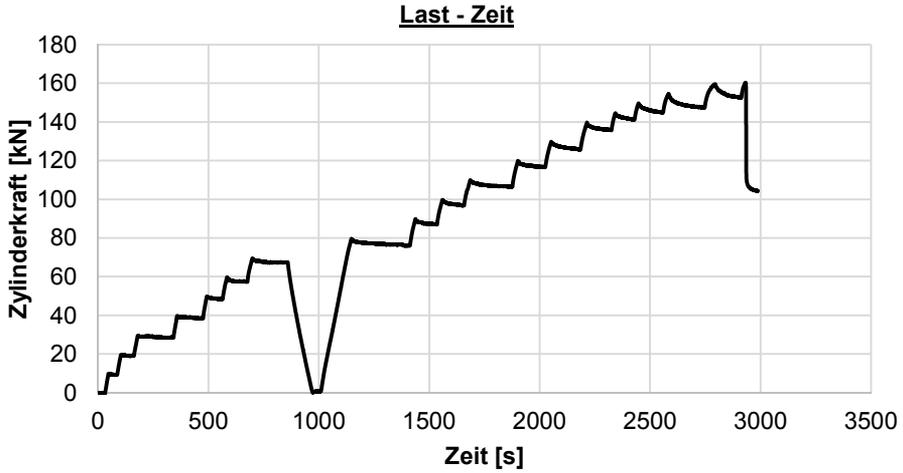
Hinweise zum Rissbild

keine

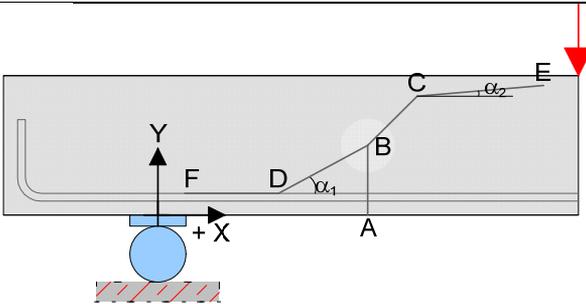


3GT_V2-2 = 3GT_C30/37-25-30-0,33-3-7-1-Längs_V2-2

Datum	04.11.14	Beginn	12:30	Ende	13:25
Bezeichnung	3GT_C30/37-25-30-0,33-3-7-1-Längs_V2-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	41,0 N/mm ²	Betonalter	47 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	70	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,20	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,27	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	85	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	160	kN	erreichte Zylinderlast	160	kN
			Durchbiegung	12,8	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



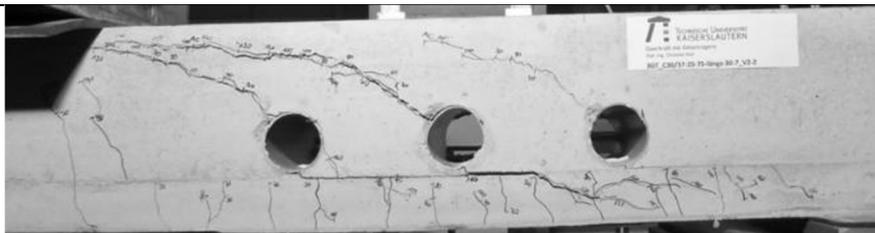
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	45 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	51 cm	14 cm
C	zweite Richtungsänderung	61 cm	22 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	34 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	24 cm
F	Ende des Dübelrisses	12 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		31°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		6°

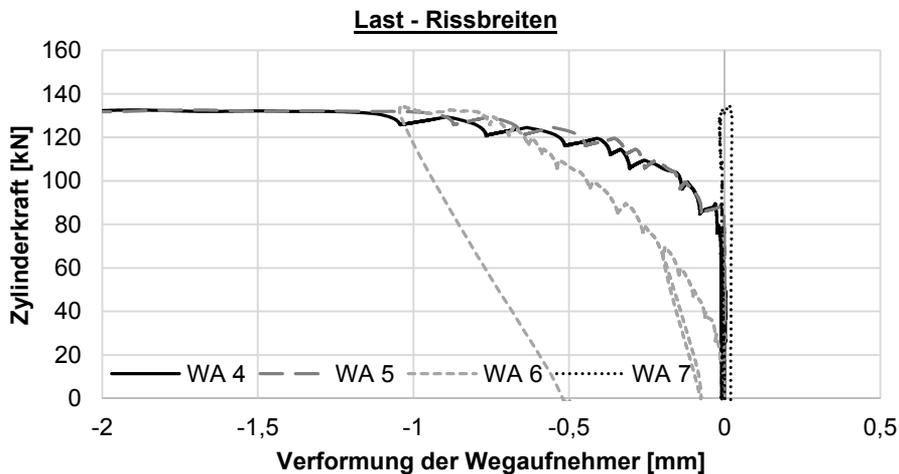
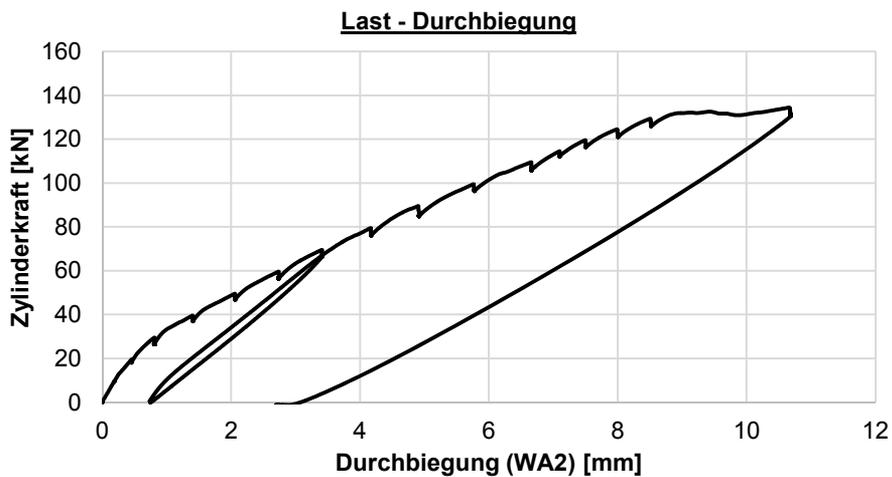
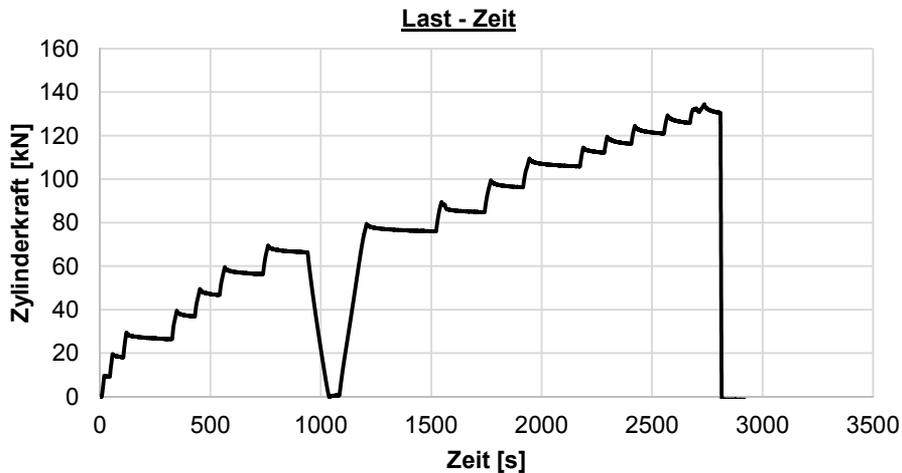
Hinweise zum Rissbild

keine

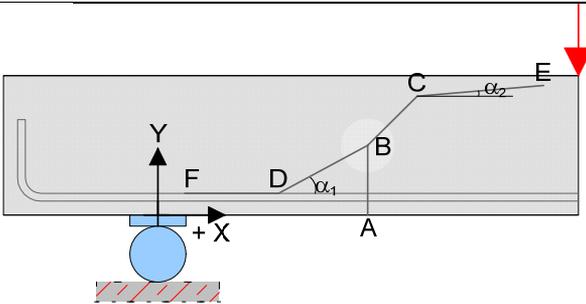


3GT_V3-1 = 3GT_C30/37-25-30-0,33-3-6-1-Längs_V3-1

Datum	03.11.14	Beginn	16:15	Ende	17:10
Bezeichnung	3GT_C30/37-25-30-0,33-3-6-1-Längs_V3-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	41,0 N/mm ²	Betonalter	46 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	70	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,41	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,74	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	82	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	150	kN	erreichte Zylinderlast	132	kN
			Durchbiegung	9,0	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



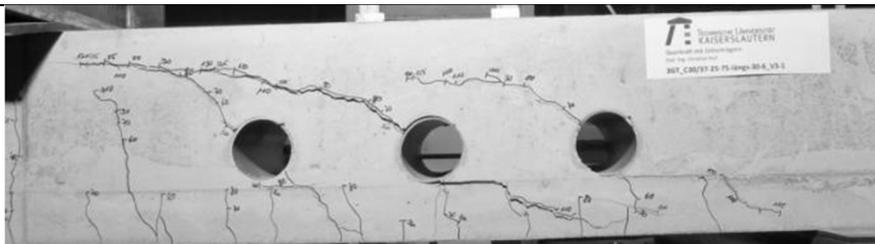
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	49 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	49 cm	9 cm
C	zweite Richtungsänderung	70 cm	19 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	36 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	22 cm
F	Ende des Dübelrisses	5 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		32°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		8°

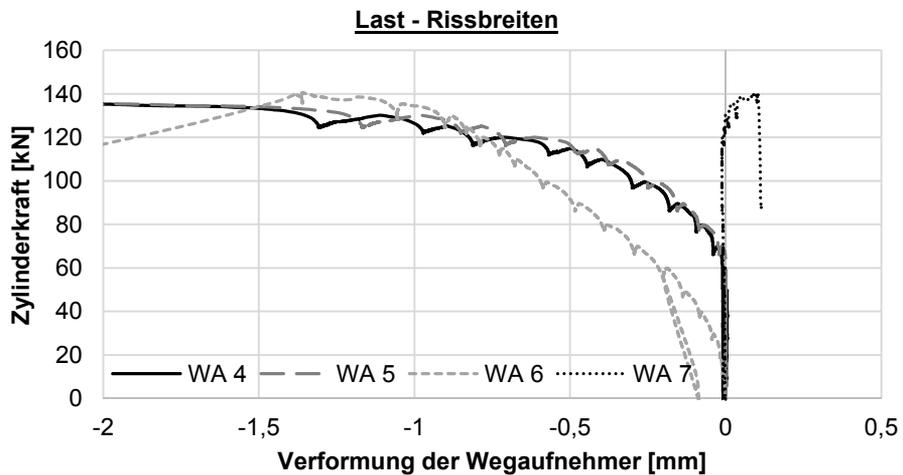
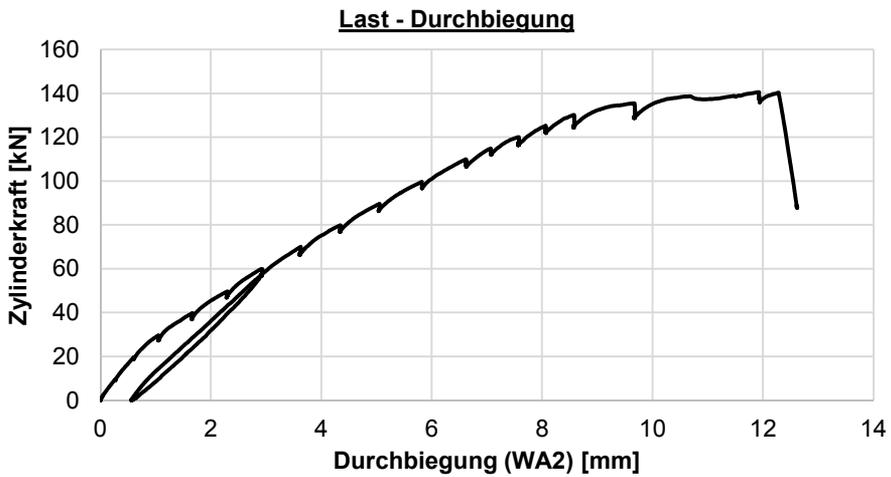
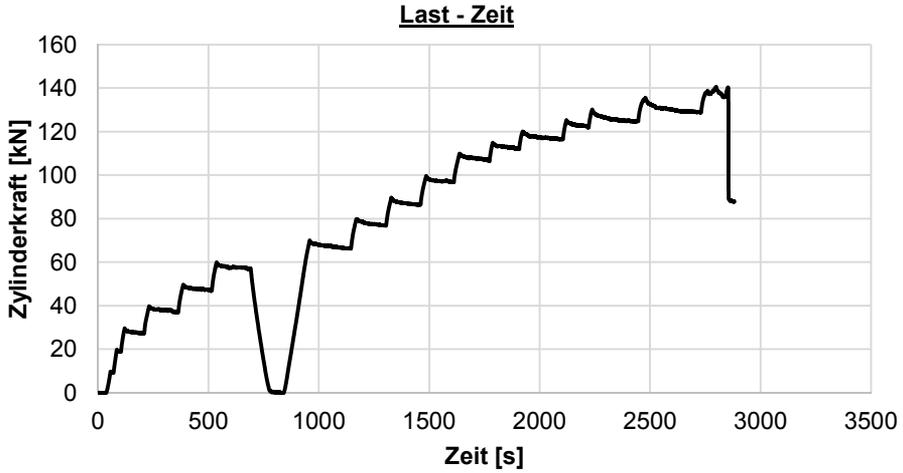
Hinweise zum Rissbild

keine

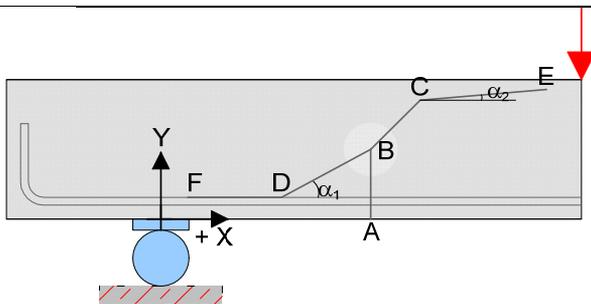


3GT_V3-2 = 3GT_C30/37-25-30-0,33-3-6-1-Längs_V3-2

Datum	04.11.14	Beginn	08:45	Ende	09:50
Bezeichnung	3GT_C30/37-25-30-0,33-3-6-1-Längs_V3-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	41,0 N/mm ²	Betonalter	47 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	60	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	2,94	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,57	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	79	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	130	kN	erreichte Zylinderlast	140	kN
			Durchbiegung	10,5	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



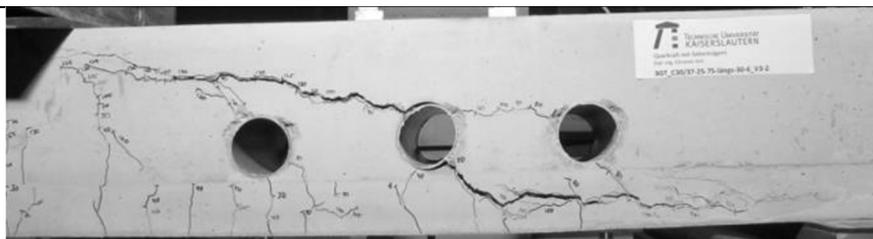
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	44 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	44 cm	5 cm
C	zweite Richtungsänderung	65 cm	18 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	40 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	24 cm
F	Ende des Dübelrisses	0 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse	43°	
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse	6°	

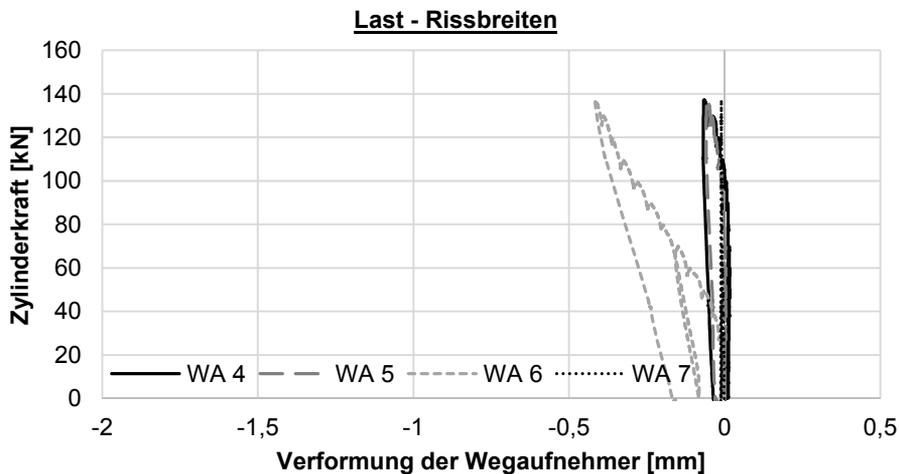
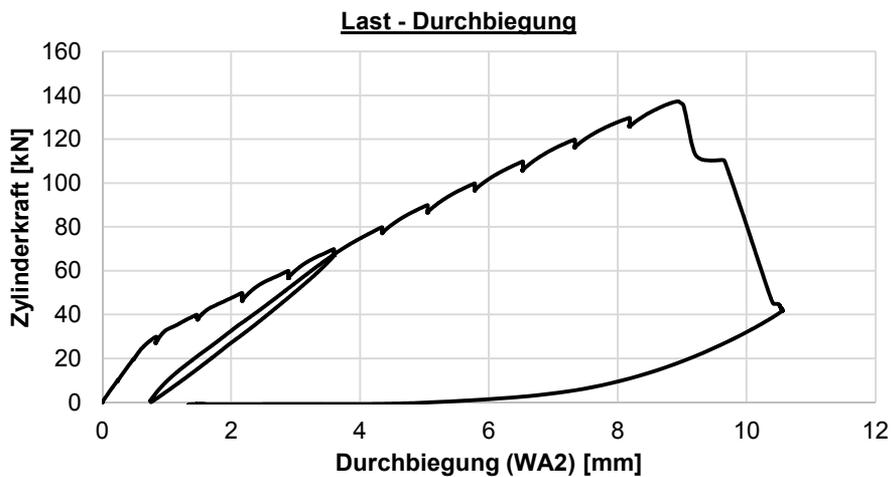
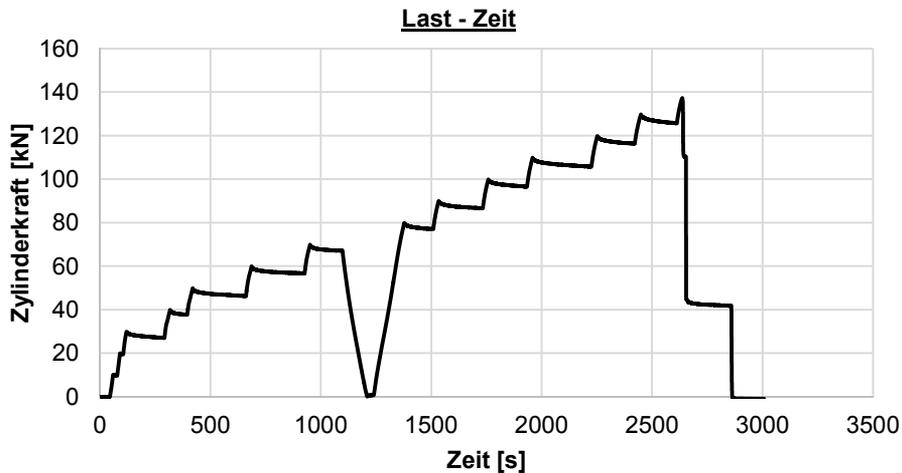
Hinweise zum Rissbild

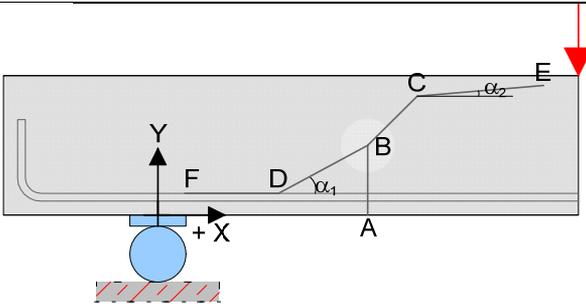
keine



3GT_V4-1 = 3GT_C30/37-25-30-0-0-0-0-0_V4-1

Datum	03.11.14	Beginn	15:00	Ende	16:00
Bezeichnung	3GT_C30/37-25-30-0-0-0-0-0_V4-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	41,0 N/mm ²	Betonalter	46 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	70	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,60	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,75	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	80	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	150	kN	erreichte Zylinderlast	138	kN
			Durchbiegung	9,0	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



Rissbild nach Überschreitung der Maximallast

		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	43 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	43 cm	4 cm
C	zweite Richtungsänderung	70 cm	18 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	30 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	24 cm
F	Ende des Dübelrisses	2 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		26°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		7°

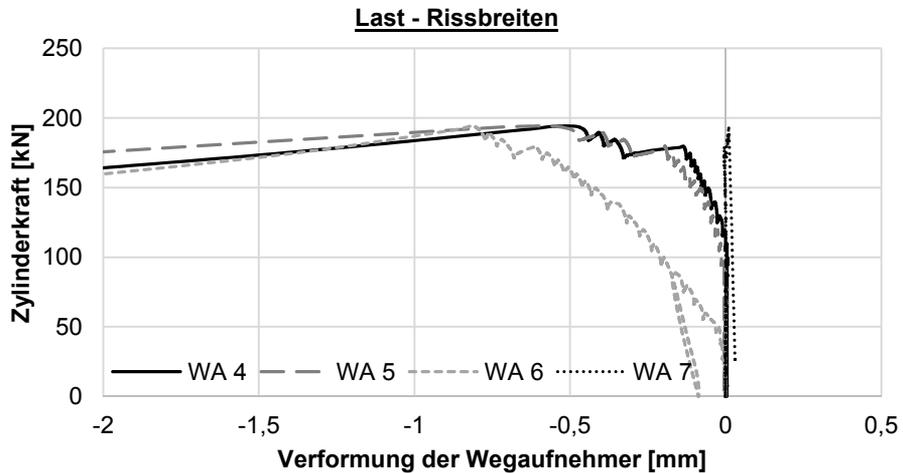
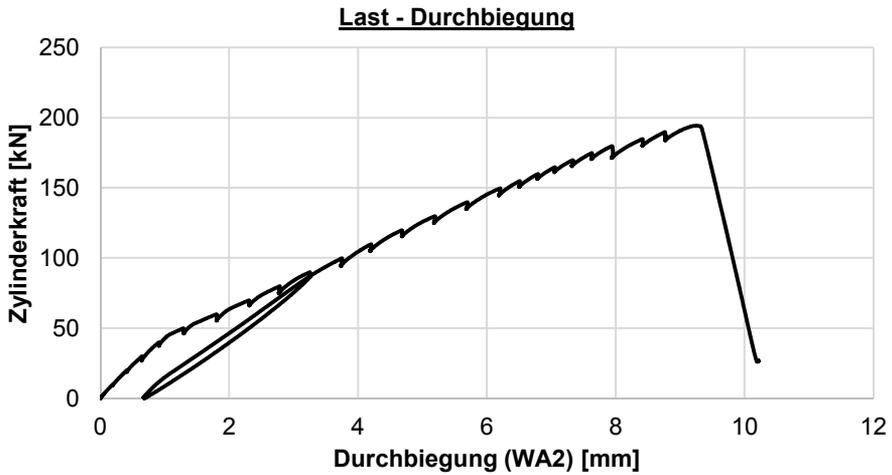
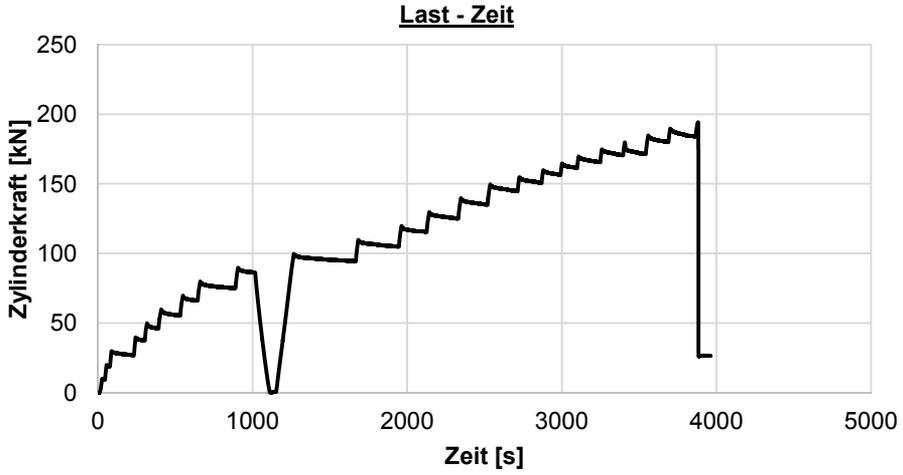
Hinweise zum Rissbild

Versagen auf der „falschen“ Seite

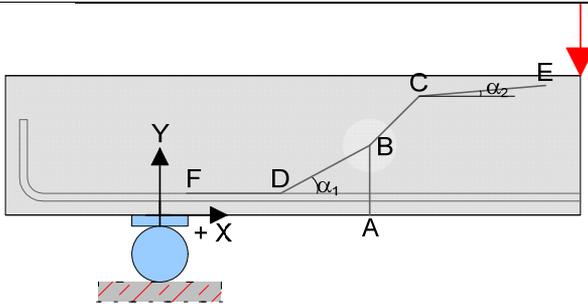
kein Foto vorhanden

4GT_V1-1 = 4GT_C30/37-25-40-0,33-1-FT-6-1-Quer_V1-1

Datum	31.10.14	Beginn	08:50	Ende	10:05
Bezeichnung	4GT_C30/37-25-40-0,33-1-FT-6-1-Quer_V1-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	41,0 N/mm ²	Betonalter	44 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	90	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,25	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,67	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0,05	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40		mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			113	kN	
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	190	kN	erreichte Zylinderlast	194	kN
			Durchbiegung	9,3	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



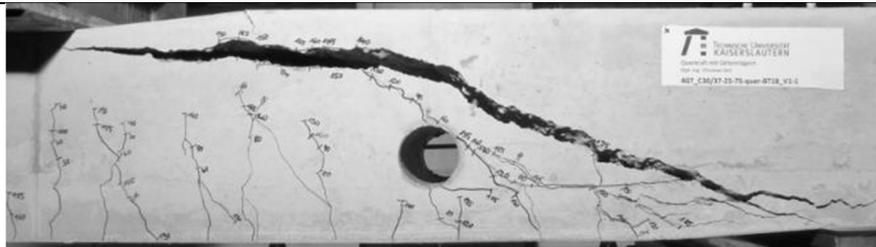
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	30 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	30 cm	9,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	48 cm	18 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	14,5 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	23 cm
F	Ende des Dübelrisses	-11 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse	22°	
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse	8,5°	

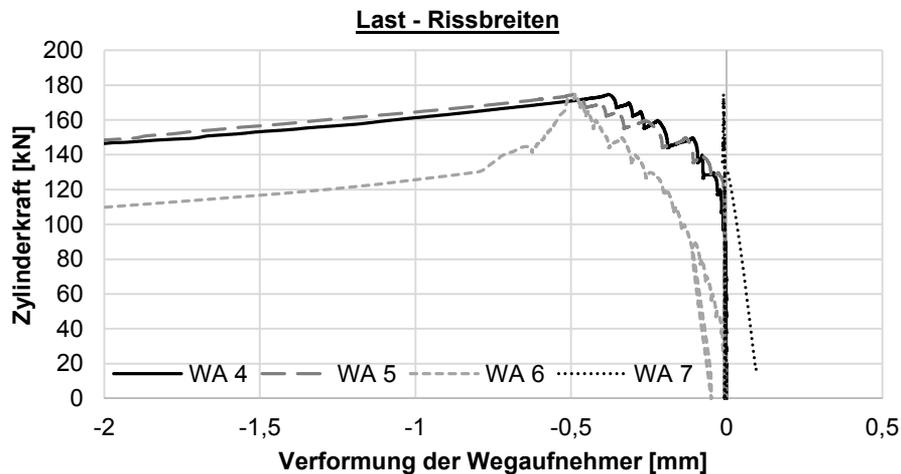
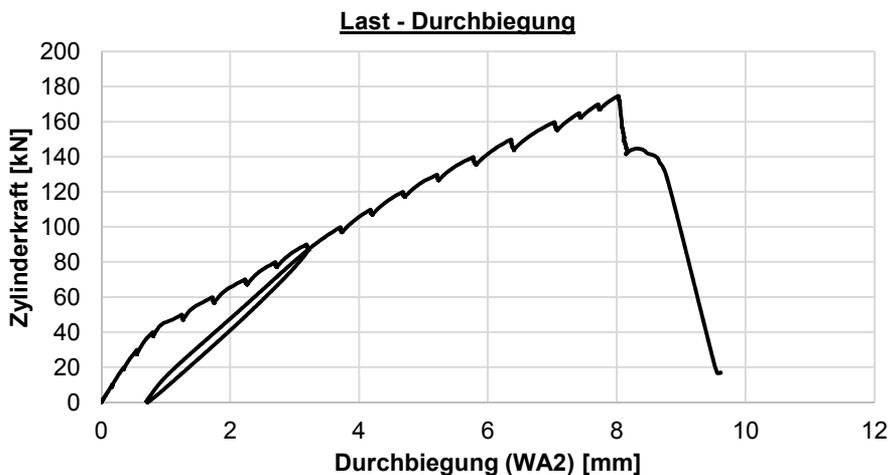
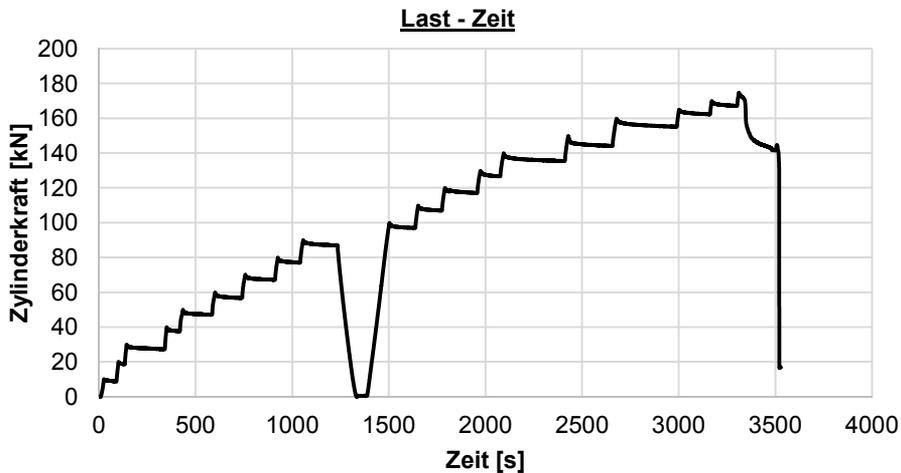
Hinweise zum Rissbild

keine

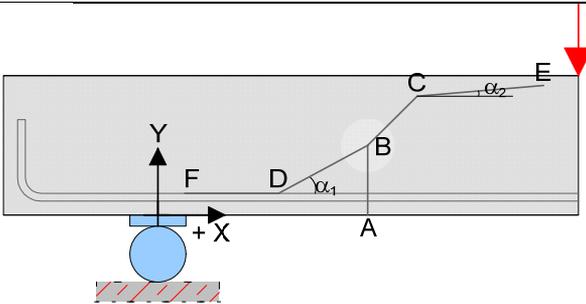


4GT_V1-2 = 4GT_C30/37-25-40-0,33-1-OB-6-1-Quer_V1-2

Datum	30.10.14	Beginn	16:30	Ende	17:20
Bezeichnung	4GT_C30/37-25-40-0,33-1-OB-6-1-Quer_V1-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	41,0 N/mm ²	Betonalter	43 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	90	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,2	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,71	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0	mm			
Grenzdurchbiegung	L / 500 =		4,40 mm		
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung			120		kN
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	200	kN	erreichte Zylinderlast	175	kN
			Durchbiegung	8,0	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



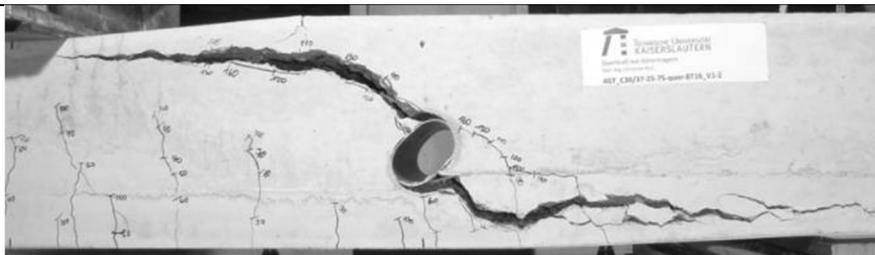
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	44 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	47 cm	6 cm
C	zweite Richtungsänderung	59 cm	20 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	42 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	23 cm
F	Ende des Dübelrisses	-18 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse	41°	
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse	8°	

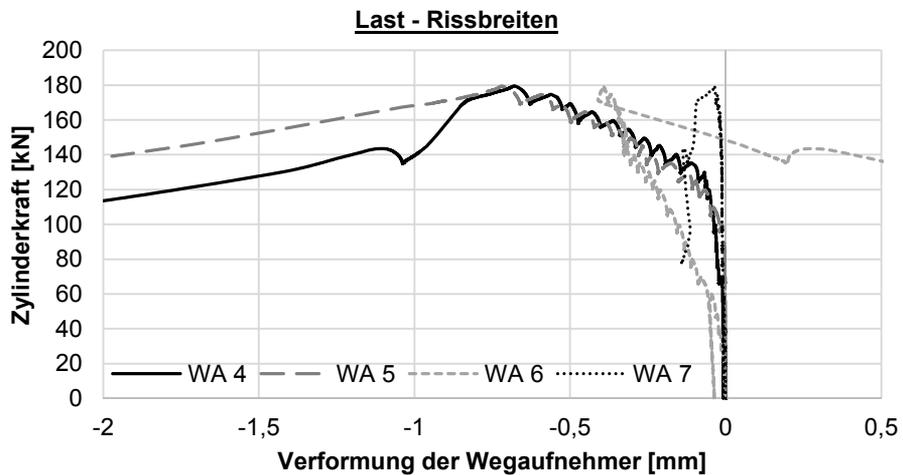
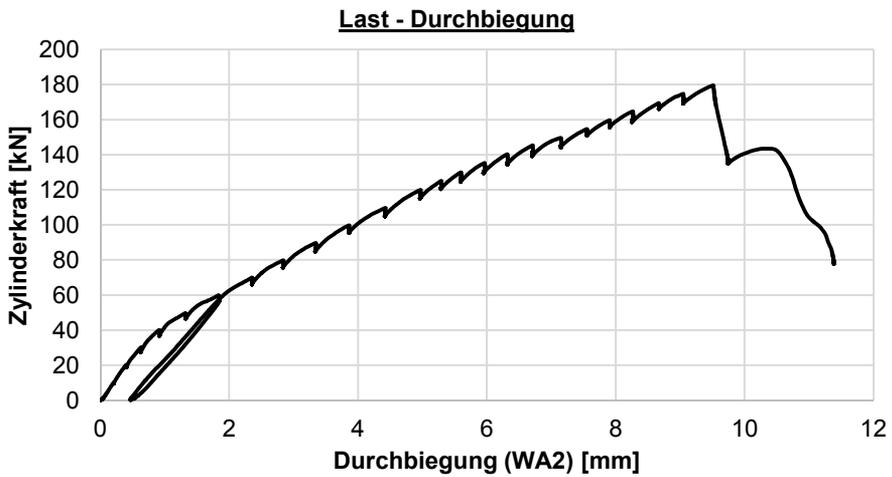
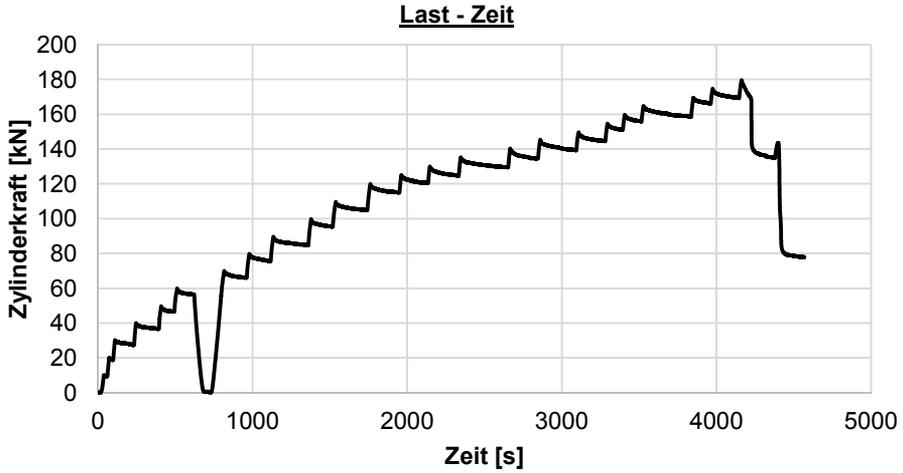
Hinweise zum Rissbild

keine

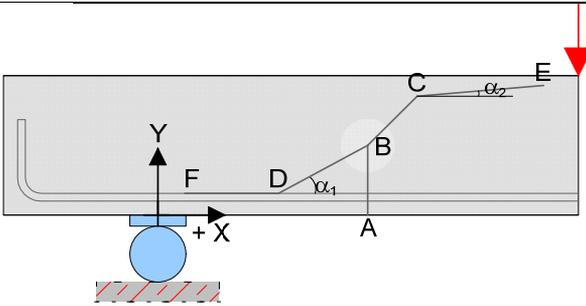


4GT_V2-1 = 4GT_C30/37-25-40-0,33-1-Eigen-6-2-Quer_V2-1

Datum	03.11.14	Beginn	08:30	Ende	09:45
Bezeichnung	4GT_C30/37-25-40-0,33-1-Eigen-6-2-Quer_V2-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	41,0 N/mm ²	Betonalter	47 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
<p>Detail</p> <p>Diagram showing measurement points (WA 1-7) and dimensions for the specimen. The total length is 275 mm. Measurement points are located at 28 mm, 50 mm, 100 mm, 150 mm, 210 mm, 270 mm, and 275 mm from the left end. A red arrow indicates a load point at 150 mm. Supports are located at 28 mm and 275 mm.</p>					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	60	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	1,84	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,47	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	110	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	140	kN	erreichte Zylinderlast	180	kN
			Durchbiegung	9,5	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



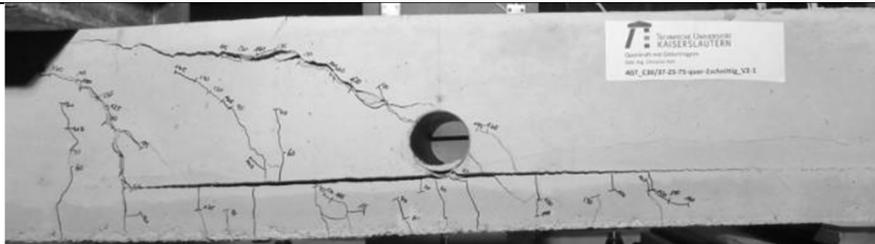
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	49 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	53 cm	14 cm
C	zweite Richtungsänderung	68 cm	22 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	40 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	24 cm
F	Ende des Dübelrisses	6 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		33°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		6°

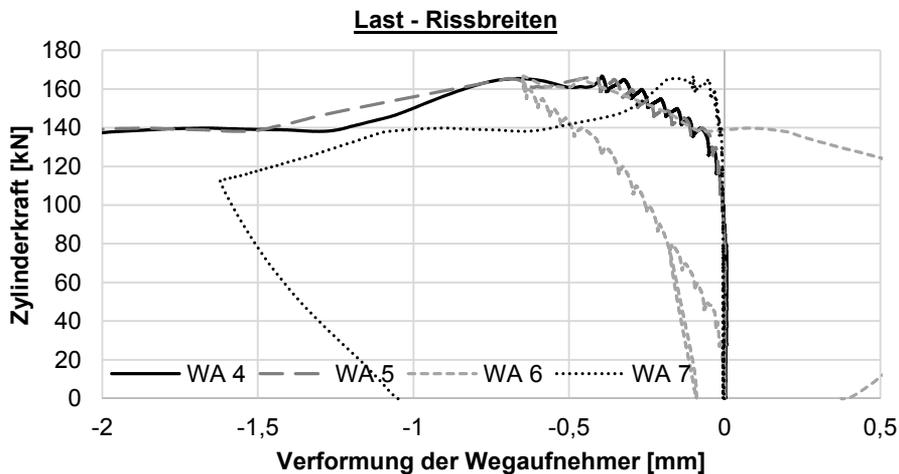
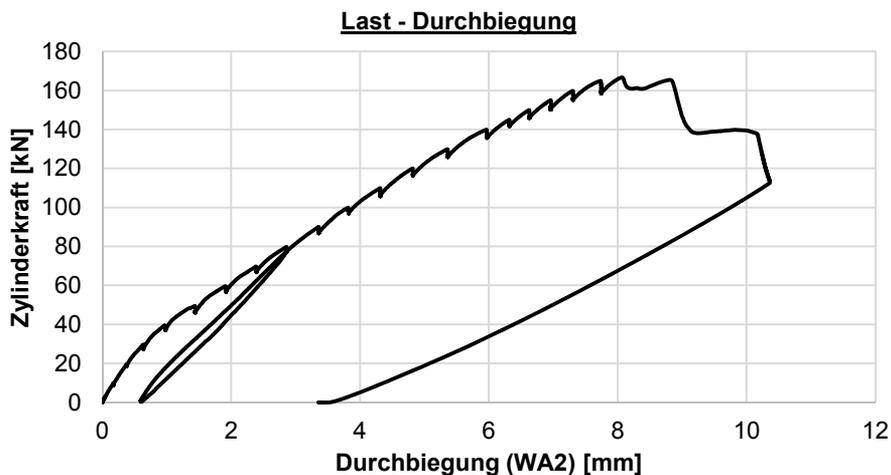
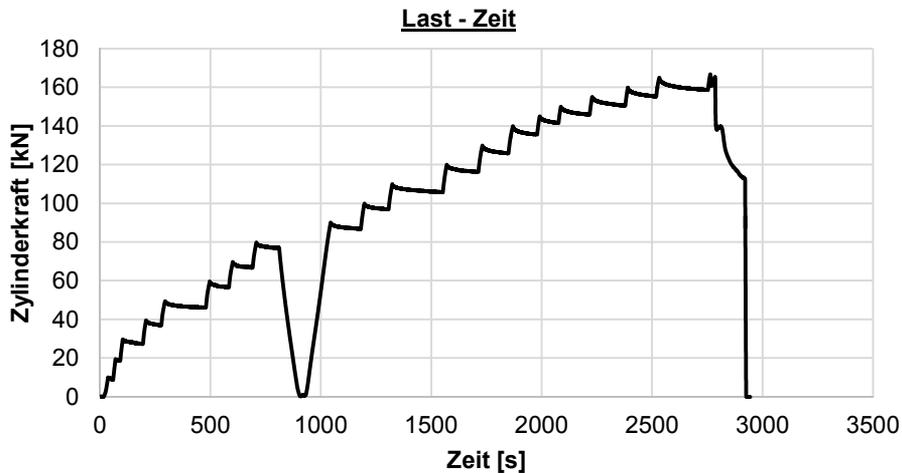
Hinweise zum Rissbild

keine

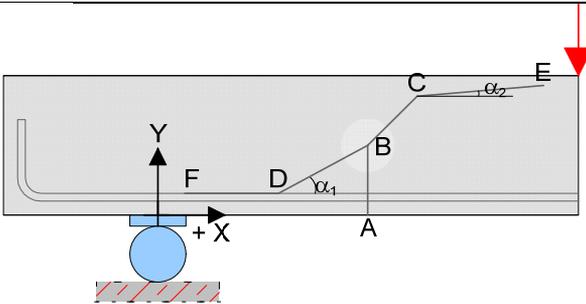


4GT_V2-2 = 4GT_C30/37-25-40-0,33-1-Eigen-6-3-Quer_V2-2

Datum	03.11.14	Beginn	10:05	Ende	10:55
Bezeichnung	4GT_C30/37-25-40-0,33-1-Eigen-6-3-Quer_V2-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	41,0 N/mm ²	Betonalter	47 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	80	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	2,86	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,60	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40		mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	110		kN		
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	180	kN	erreichte Zylinderlast	167	kN
			Durchbiegung	8,2	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



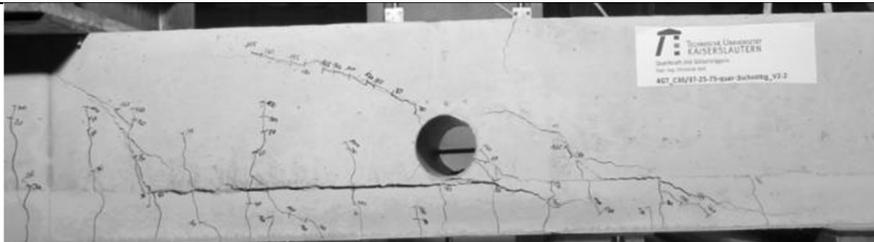
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	50 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	52 cm	13 cm
C	zweite Richtungsänderung	64 cm	20 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	36 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	22 cm
F	Ende des Dübelrisses	3,5 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		28°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		6°

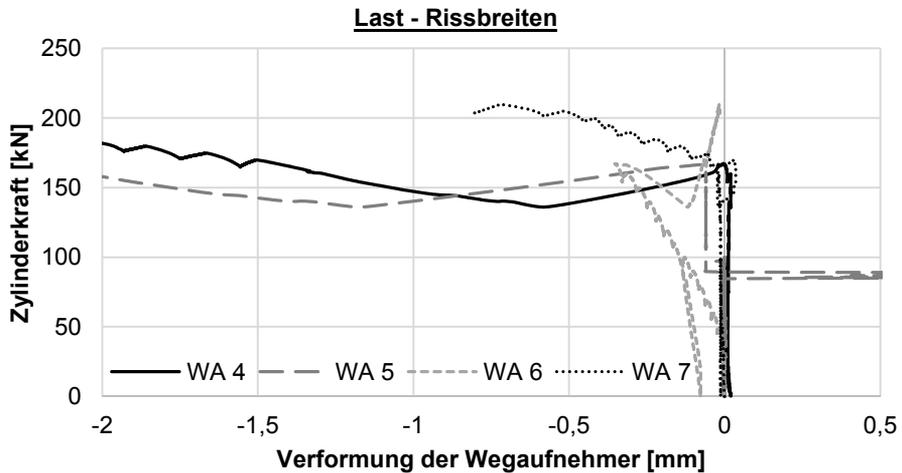
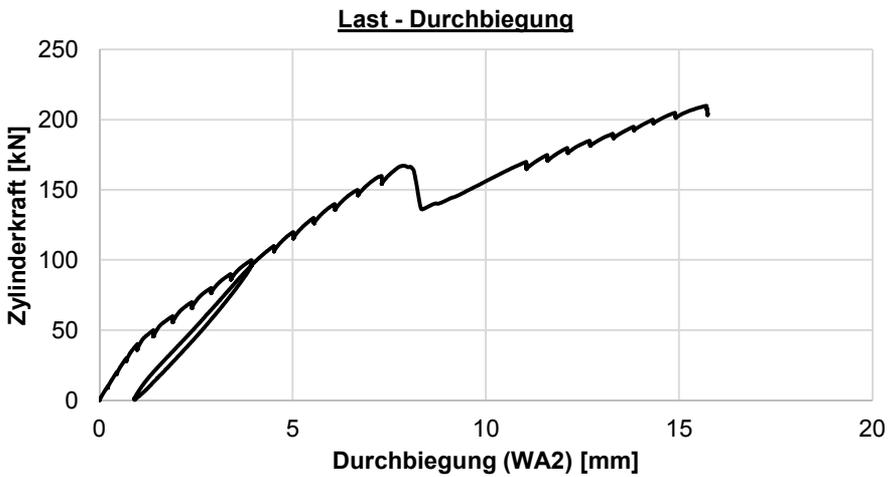
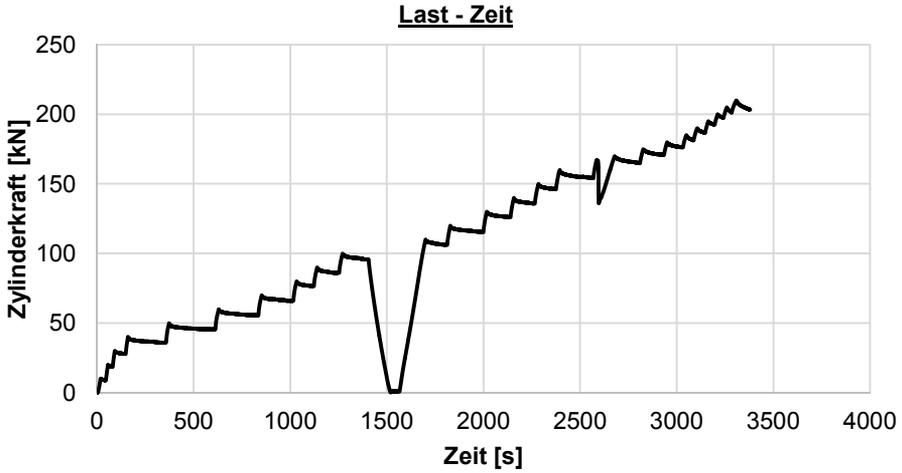
Hinweise zum Rissbild

keine

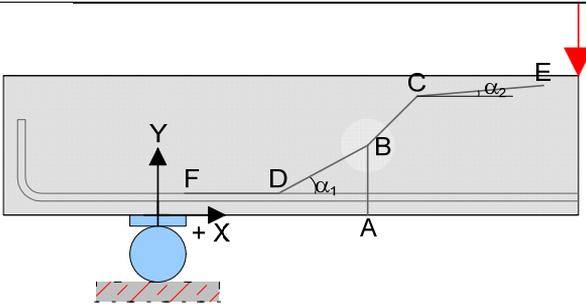


4GT_V3-1 = 4GT_C30/37-25-40-0-0-0-0-0_V3-1

Datum	31.10.14	Beginn	10:30	Ende	11:30
Bezeichnung	4GT_C30/37-25-40-0-0-0-0-0_V3-1				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	41,0 N/mm ²	Betonalter	44 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	100	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	3,94	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,91	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40		mm	
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	108		kN		
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	210	kN	erreichte Zylinderlast	210	kN
			Durchbiegung	16	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



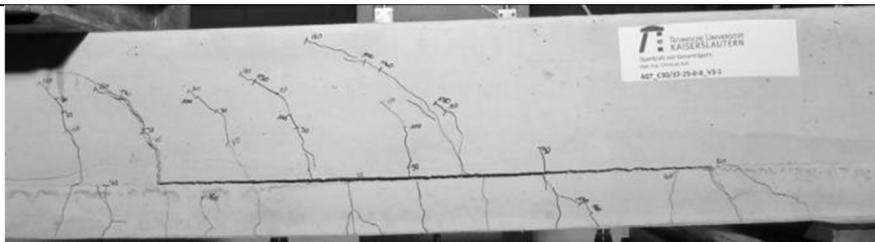
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	82 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	84 cm	10 cm
C	zweite Richtungsänderung	88 cm	17 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	83 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	21 cm
F	Ende des Dübelrisses	5,5 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse	57°	
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse	16°	

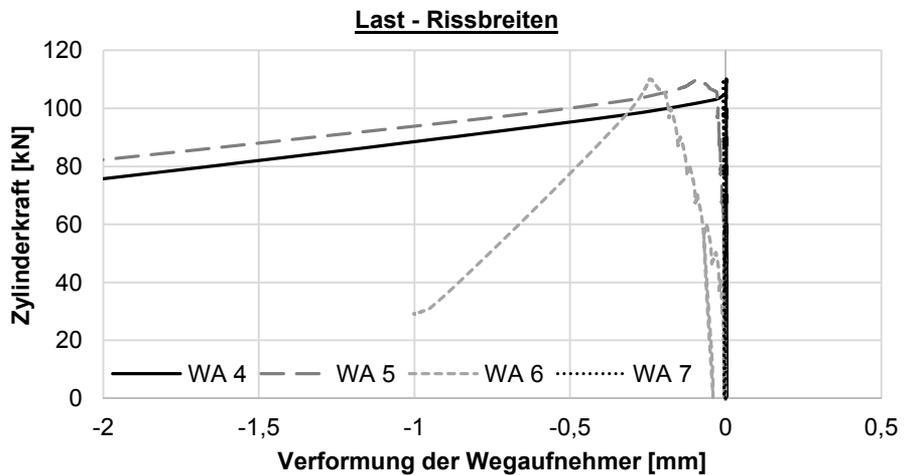
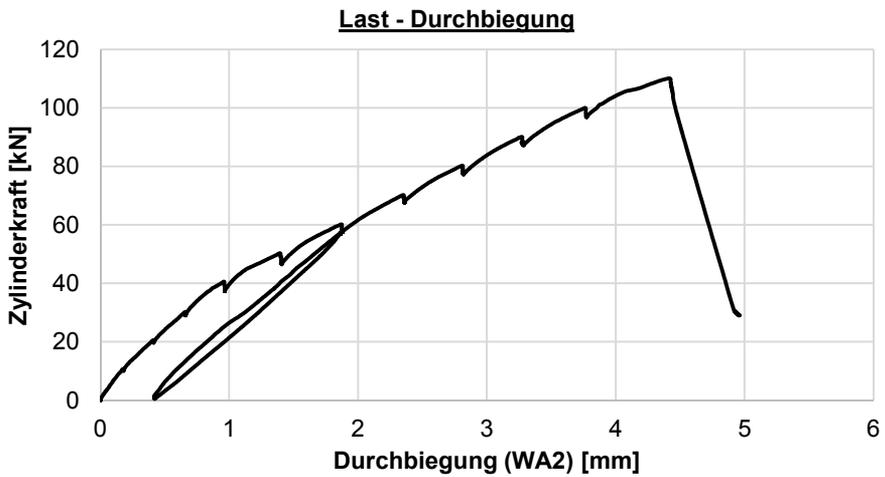
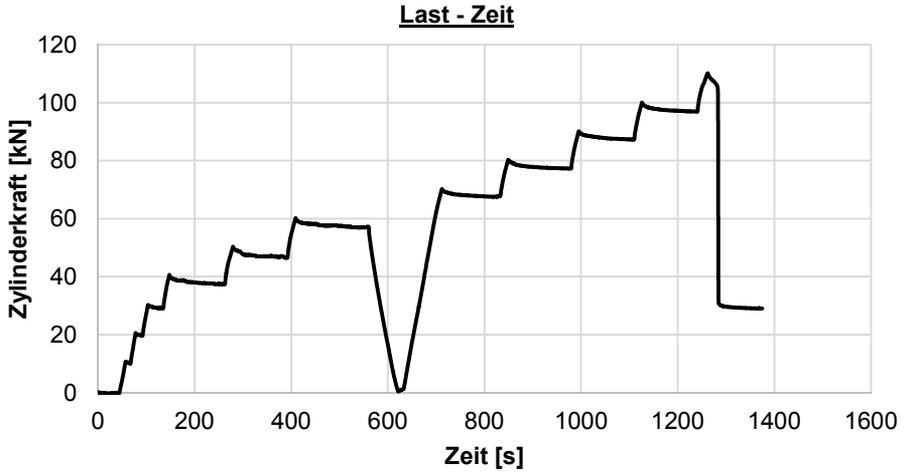
Hinweise zum Rissbild

Fuge hat sich geöffnet

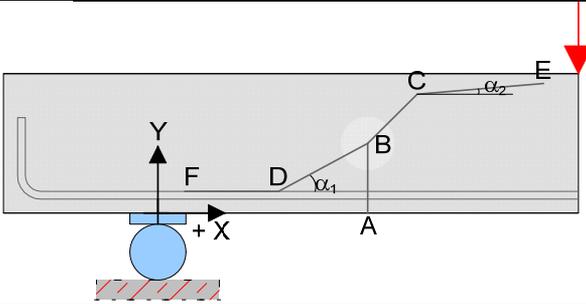


4GT_V3-2 = 4GT_C30/37-25-40-0,33-1-0-0-0_V3-2

Datum	31.10.14	Beginn	11:45	Ende	12:10
Bezeichnung	4GT_C30/37-25-40-0,33-1-0-0-0_V3-2				
Beton	C30/37, F3, $d_g = 16\text{mm}$, rundes Korn				
Würfeldruckfestigkeit	41,0 N/mm ²	Betonalter	44 Tage		
Auffälligkeiten am Versuchskörper vor Versuchsbeginn:					
keine					
Messtechnik					
Belastungsschema					
Laststeigerung in 10 kN Schritten; Pausen zwischen den Belastungsschritten von ca. 3-4 min; Entlastung und anschließende Belastung nach Erreichen des Gebrauchslastniveaus					
Gebrauchslastniveau geschätzt bei	60	kN			
Durchbiegung vor Entlastung	1,88	mm			
Durchbiegung nach Entlastung	0,42	mm			
Rissbreite unter Lasteinleitung	0,05	mm			
Rissbreite unter der Öffnung	0	mm			
Grenzdurchbiegung	$L / 500 =$	4,40 mm			
Last bei Erreichen der Grenzdurchbiegung	108	kN			
Traglastniveau					
erwartete Zylinderlast	130	kN	erreichte Zylinderlast	110	kN
			Durchbiegung	4,5	mm
Auffälligkeiten während des Versuchs					
keine					



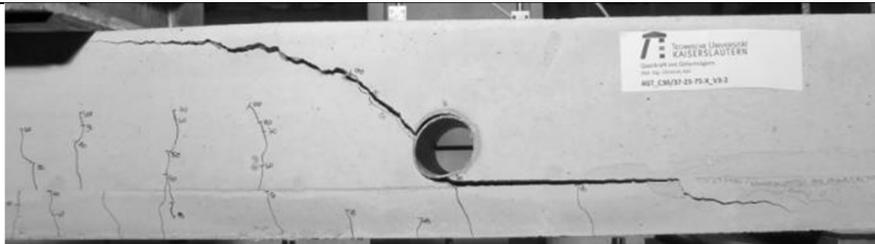
Rissbild nach Überschreitung der Maximallast



		Horizontal x	Vertikal y
A	Rissbeginn	47 cm	-
B	erste signifikante Richtungsänderung ab A	50 cm	6,5 cm
C	zweite Richtungsänderung	64 cm	20 cm
D	Schrägriss trifft auf Biegebewehrung	49 cm	-
E	Rissende in Druckzone	-	24 cm
F	Ende des Dübelrisses	8,5 cm	-
α_1	Rissneigung unterhalb der Schwerachse		37°
α_2	Rissneigung oberhalb der Schwerachse		14°

Hinweise zum Rissbild

keine



Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Christian Michael Keil

Beruflicher Werdegang

12/2011 – 09/2016: Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Kaiserslautern am Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion bei Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell

Hochschulausbildung

10/2006 – 11/2011: Studium des Bauingenieurwesens an der TU Kaiserslautern, Vertiefungsfächer: Massivbau, Stahlbau und Grundbau, Abschluss als Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

Schulbildung

06/2006: Abitur am Freiherr-vom-Stein-Gymnasium Fulda