VERSUCHE ZUR QUERKRAFTTRAGFÄHIGKEIT VON STAHLBETONPLATTEN UNTER AUFLAGERNAHEN EINZELLASTEN

Experimental investigations on shear capacity of concrete slabs with concentrated loads close to the support

Versuchsserie 2015 - 2017





Projektleiter: **Prof. Dr.-Ing. G. Rombach**
Wissenschaftlicher Mitarbeiter: **Dipl.-Ing. L. Henze**

Technische Universität Hamburg
Institut für Massivbau
Hamburg-Harburg, den 06.11.2017

Institut für Massivbau B-7
21073 Hamburg
Telefon + 49 40 428 78-3122| Fax -2969
E-Mail: rombach@tu-harburg.de
www.tuhh.de/mb

Zusammenfassung

Nachfolgend wird über Versuche zur Querkrafttragtragfähigkeit und zum Lastabtrag von Stahlbetonplatten (3,25×4,5 m, Dicke 0,25 m) unter auflagernahen Blocklasten berichtet. Die Platten besitzen keine Querkraftbewehrung. Die Forschungsarbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG Projekt KZ:RO 793/13-1 finanziert.

Summary

This report describes full-scale tests on cantilever concrete slabs (3.25×4.5 m, thickness 0,25 m) without shear reinforcement under concentrated loads. The experimental studies presented were conducted to get a better understanding of the load bearing behaviour of cantilever slabs and to quantify the influence of the direct load transfer of concentrated loads close to line supports.

Hamburg, den 08.11.2017

1 Inhaltsverzeichnis

1 INHALTSVERZEICHNIS ... 3
2 FORSCHUNGSZIEL ... 6
3 VERSUCHSPROGRAMM ... 7
3.1 Festlegung der Versuchskörper ... 7
3.2 Baustoffe – Materialeigenschaften ... 8
3.2.1 Beton ... 8
3.2.2 Bewehrung ... 12
3.2.3 Herstellung der Versuchskörper ... 13
3.3 Messtechnik ... 15
3.3.1 Messtechnik, Datenerfassung ... 16
3.4 Versuchsdurchführung ... 19
3.4.1 Versuchsanordnung ... 19
3.4.2 Erweiterung des Versuchsaufbaus für auflagernahe Lasten ... 19
3.4.3 Belastung ... 20
3.5 Erweiterung des Versuchsaufbaus für Doppellasten ... 21
3.6 Modifikationen für die Versuche an Plattenstreifen mit 1 m Breite ... 23
3.7 Versuchsbeschreibung ... 25
3.7.1 Versuch P1: $a_v = 3d$, Versuch 3d-1 ... 26
3.7.2 Versuch P2: $a_v = 5d$; Versuch 5d ... 27
3.7.3 Versuch P3: $a_v = 4d$, Versuch 4d-1 ... 28
3.7.4 Versuch P4: $a_v = 6d$; Versuch 6d ... 29
3.7.5 Versuch P5: $a_v = 2d$; Versuch 2d-1 ... 30
3.7.6 Versuch P6: $a_v = 1d$; Versuch 1d ... 31
3.7.7 Versuch P7: $a_v = 2d$; Versuch 2d-2 ... 31
3.7.8 Versuch P8: $a_v = 3d$, Doppellast; Versuch 3d×2 ... 32
3.7.9 Versuch P9: $a_v = 2d$, Doppellast; Versuch 2d×2 ... 33
3.7.10 Versuch P10: $a_v = 4d$, Doppellast; Versuch 4d×2 ... 33
3.7.11 Versuch P11: $a_v = 3d$; Versuch 3d-2 ... 34
3.7.12 Versuch P12: $a_v = 5d$, Doppellast; Versuch 5d×2 ... 35
3.7.13 Versuch P13: $a_v = 4d$; Versuch 4d-2; reduzierte Bewehrung auf der Plattenoberseite ... 38
3.7.14 Versuch P14: $a_v = 4d$; Versuch 4d-3; reduzierte Bewehrung auf der Plattenunterseite ... 39
3.7.15 Versuch P15: $a_v = 1{,}0d - 5{,}0d$; Meterstreifen ... 41
3.8 Dokumentation der Rissbilder und Zerlegung der Versuchskörper ... 45
3.8.1 Reale statische Nutzhöhe der Versuchskörper ... 47
3.9 Zusammenstellung der Ergebnisse ... 48
3.9.1 Versagenslasten und wichtige Parameter ... 48
3.9.2 Auswertung der Versuche mit einer Einzellast ... 49
3.9.3 Einfluss der veränderten Bewehrungsanordnung ... 54
3.9.4 Zusammenfassung der Versuche mit zwei Einzellasten ... 56
3.9.5 Versuche an äquivalenten Plattenstreifen mit 1 m Breite ... 63
3.9.6 Rissbilder ... 65
Versuch P1; $a_v = 3d$ ... 65
Versuch P2; $a_v = 5d$ ... 66
Versuch P3; $a_v = 4d$ ... 67
Versuch P4; $a_v = 6d$ ... 68
Versuch P5; $a_v = 2d$ ... 69
Versuch P6; $a_v = 1d$ ... 70
Versuch P7; $a_v = 2d$ ... 71
Versuch P8; $a_v = 3d \times 2$ ... 72
Versuch P9; $a_v = 2d \times 2$ ... 73
Versuch P10; $a_v = 4d \times 2$ ... 74

Versuch P11; $a_v = 3d$ ... 75
Versuch P12; $a_v = 2 \times 5d$ ... 76
Versuch P13; $a_v = 4d$; ∅14-100 mm oben ... 77
Versuch P14; $a_v = 4d$; #∅8-100 mm unten ... 78
Versuche mit Einzellast – Schnitt Mitte ... 79
Versuche mit Doppellast - Vergleich der Versagensrisse im Platteninneren ... 80
Versuch P15 Rissbilder von oben ... 81
Versuche P15 Rissbilder Oberseite ... 82
Versuch P15; $a_v = 5d$ ... 83
Versuch P15; $a_v = 3d$ ... 84
Versuch P15; $a_v = 2d$ ... 85
Versuch P15; $a_v = 1d$ ... 86

4 LITERATUR- UND ABBILDUNGSVERZEICHNIS ... 87
4.1 Literaturverzeichnis ... 87
4.2 Abbildungsverzeichnis ... 88

ANHANG A: MATERIALPRÜFUNGEN ... A-1
Betoneigenschaften ... A-1
Betonprüfungen zu Versuchskörper P1 (Herstellung am 03.03.2015) ... A-1
Betonprüfungen zu Versuchskörper P2 (Herstellung am 21.04.2015) ... A-4
Betonprüfungen zu Versuchskörper P3 (Herstellung am 21.07.2015) ... A-6
Betonprüfungen zu Versuchskörper P4 (Herstellung am 22.12.2015) ... A-8
Betonprüfungen zu Versuchskörper P5 (Herstellung am 26.01.2016) ... A-10
Betonprüfungen zu Versuchskörper P6 (Herstellung am 18.02.2016) ... A-12
Betonprüfungen zu Versuchskörper P7 (Herstellung am 18.03.2016) ... A-14
Betonprüfungen zu Versuchskörper P8 (Herstellung am 28.04.2016) ... A-16
Betonprüfungen zu Versuchskörper P9 (Herstellung am 30.05.2016) ... A-18
Betonprüfungen zu Versuchskörper P10 (Herstellung am 14.07.2016) ... A-20
Betonprüfungen zu Versuchskörper P11 (Herstellung am 17.08.2016) ... A-22
Betonprüfungen zu Versuchskörper P12 (Herstellung am 30.09.2016) ... A-24
Betonprüfungen zu Versuchskörper P13 (Herstellung am 18.11.2016) ... A-26
Betonprüfungen zu Versuchskörper P14 (Herstellung am 07.12.2016) ... A-28
Betonprüfungen zu Versuchskörper P15 (Herstellung am 02.02.2017) ... A-30
Datenblätter C20/25 ... A-32
Datenblätter C25/30 ... A-34
Stahleigenschaften ... A-37

ANHANG B: ANORDNUNG DER MESSAUFNEHMER ... B-1
Anordnung der Messaufnehmer Versuch P1 ... B-1
Anordnung der Messaufnehmer Versuch P2 ... B-2
Anordnung der Messaufnehmer Versuch P3 ... B-3
Anordnung der Messaufnehmer Versuch P4 ... B-4
Anordnung der Messaufnehmer Versuch P5 ... B-5
Anordnung der Messaufnehmer Versuch P6 ... B-6
Anordnung der Messaufnehmer Versuch P7 ... B-7
Anordnung der Messaufnehmer Versuch P8 ... B-8
Anordnung der Messaufnehmer Versuch P9 ... B-9
Anordnung der Messaufnehmer Versuch P10 ... B-10
Anordnung der Messaufnehmer Versuch P11 ... B-11
Anordnung der Messaufnehmer Versuch P12 ... B-12
Anordnung der Messaufnehmer Versuch P13 ... B-13
Anordnung der Messaufnehmer Versuch P14 ... B-14
Anordnung der Messaufnehmer Versuch P15-1d ... B-15
Anordnung der Messaufnehmer Versuch P15-2d ... B-16
Anordnung der Messaufnehmer Versuch P15-3d ... B-17
Anordnung der Messaufnehmer Versuch P15-5d ... B-18
Anordnung der Messaufnehmer Versuch P15-1d vg (vorgeschädigt) ... B-19

ANHANG C: SPEZIFIKATION DER MESSTECHNIK ... C-1
Kennwerte der Aufnehmer und Prüfmaschine ... C-1
Dehnungsmessung Bewehrungsstahl DS1-7 ... C-2

Verformungsmessung Auflager L1-8 und Messung der Rissweiten R1-4 ..... C-4
Messung der Plattendicke WP1-16 ..... C-5
Kraftmessung Rückverankerung K1-4 ..... C-7

ANHANG D: VERSUCHSERGEBNISSE D-1
Versuchsauswertung Diagramme sortiert je Versuch D-2
Versuch P1/3d-1 ..... D-2
Versuch P2/5d D-4
Versuch P3/4d-1 ..... D-6
Versuch P4/6d D-8
Versuch P5/2d-1 ..... D-10
Versuch P6/1d D-12
Versuch P7/2d-2 ..... D-14
Versuch P8/2×3d D-16
Versuch P9/2×2d D-18
Versuch P10/2×4d D-20
Versuch P11/3d-2 ..... D-22
Versuch P12/2×5d D-24
Versuch P13/4d-2 ..... D-26
Versuch P14/4d-3 ..... D-28
Versuch P15/1d D-30
Versuch P15/1d vg (vorgeschädigt) D-31
Versuch P15/2d D-32
Versuch P15/3d D-34
Versuch P15/5d D-36
Versuchsauswertung sortiert nach Diagramm D-38
Kraft/Zeit D-38
Last/Verformung D-40
Bereinigte Last/Verformung D-42
Stahldehnung Querrichtung D-44
Rissweite/Zeit D-46
Rissweite/Kraft D-48
Kraft/Zeit D-50
Stahldehnung/Kraft D-52
Kraft/Zeit D-54
Dickenänderung /Kraft D-56
Stahldehnungen/Laststufen D-58
Dickenänderungen/Zeit D-60
Dickenänderungen/Kraft D-62

2 Forschungsziel

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, das Tragverhalten von Stahlbetonplatten ohne Querkraftbewehrung infolge von auflagernahen, konzentrierten Blocklasten zu studieren und einen Ansatz - entsprechend dem β-Faktor nach EC2 (1992 1-1, 2011) für Balken - zur Berücksichtigung des direkten Lastabtrages zu entwickeln. Die ersten Vorarbeiten zeigen, dass der derzeit gültige Ansatz Reserven aufweist, deren Berücksichtigung zu einer wirtschaftlicheren Bemessung von Stahlbetonplatten beitragen kann. Dazu ist es notwendig, die in Platten vorherrschenden Mechanismen des Lastabtrags und deren Zusammenwirken zu verstehen, sowie eine valide Grundlage anhand von Versuchsergebnissen zur Sicherstellung der vermuteten Tragreserven zu erhalten.

Es ergeben sich im Wesentlichen vier Fragen, die mit dem Forschungsvorhaben weitere Klärung finden sollen:

1. Wie lässt sich der Einfluss einer direkten Abstützung von auflagernahen Blocklasten bei Stahlbetonplatten quantifizieren? Wie groß ist dieser Bereich im Vergleich zu Balkentragwerken?
2. Ab welcher Plattenbreite lässt sich keine weitere Lastausbreitung von konzentrierten Einzellasten mehr feststellen?
3. Wie funktioniert der Lastabtrag von mehreren konzentrierten, auflagernahen Blocklasten?
4. Lässt sich beim Querkraftabtrag das Tragverhalten zwischen Durchstanzen und einem allgemeinen Querkraftversagen abgrenzen?

Obwohl bereits einige Untersuchungen von Platten unter Einzellasten durchgeführt wurden, ist deren Tragverhalten jedoch bis heute nicht in Gänze geklärt. Die geplanten Versuche sollen zu einem besseren Verständnis der Thematik und damit zu wirtschaftlicheren Konstruktionen führen.

3 Versuchsprogramm

3.1 Festlegung der Versuchskörper

Bei der Konzeption der Versuche konnte auf die experimentellen Untersuchungen an Stahlbetonplatten unter Blocklasten zurückgegriffen werden, welche am Institut für Massivbau im Jahre 2008 durchgeführt wurden (Rombach 2009, Latte 2011). Innerhalb der Versuchsserie wurden insgesamt 14 Stahlbetonplatten ohne Querkraftbewehrung (im Grundriss 3,25 m × 4,50 m, h = 25 cm) getestet (Tabelle 1).

Tabelle 1: Versuchsprogramm

Bezeichnung	a_v/d [-]	Anzahl der Lasten 40×40 cm	Beschreibung
P1 - P7, P11; 1d – 6d	1,0 – 6,0	1	Bewehrung wie in Bild 5
P8 - P10, P12; 2d×2 – 5d×2	2,0 – 5,0	2	
P13; 4d-2	4,0	1	Variation der oberen Längsbewehrung Ø14-10
P14; 4d-3	4,0	1	Variation der unteren Bewehrung Ø8-10#
P15-1d – P15-4d	2,0 – 5,0	1	Plattenstreifen (1 m)

Die Versuchskörpergröße ist erforderlich, um möglichst realistische Ergebnisse zu erhalten, da die Querkrafttragfähigkeit nichtlinear von der Trägerdicke und der Trägerbreite abhängt (Maßstabsfaktor). Die Belastung wurde in der Symmetrieachse über eine 40×40 cm große Stahlplatte aufgebracht. Ein Biegeversagen wurde durch eine ausreichend starke Biegelängsbewehrung verhindert. Diese wurde in Anlehnung an (Rombach, Latte, & Steffens, 2009) gewählt, um die Versuchsergebnisse vergleichen zu können. Die Platten weisen keine Bügelbewehrung auf.

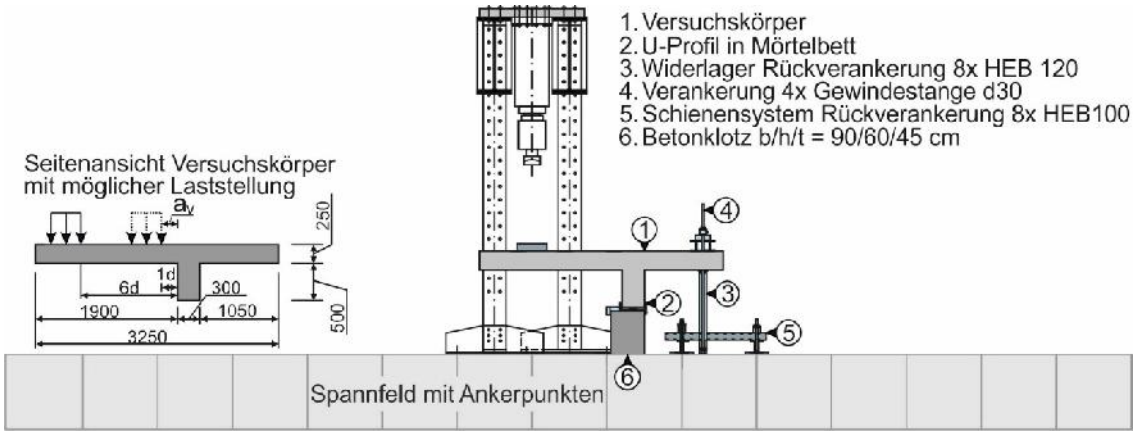


Bild 1: Versuchsaufbau

Die Versuchskörper wurden unterhalb des monolithisch angeschlossenen Steges starr gelagert. Über eine Rückspannung auf der lastabgewandten Seite wurde eine elastische Einspannung realisiert.

Die Abstände der Blocklasten vom Auflager und die daraus resultierenden Schubschlankheiten wurden sukzessive von a_v/d = 1,0 bis 6,0 variiert. Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

zu kontrollieren, wurden für die Laststellungen 2,0*d* und 3,0*d* jeweils zwei Versuche durchgeführt (Versuch P5/2d-1 bzw. P7 /2d-2 und P1/3d-1 bzw. P11/3d-2).

Die Versuche sind von P1 bis P15 durchnummeriert. Teilweise wird auch der Versuch durch den Lastabstand a_v und die Anzahl der Lasten charakterisiert (bspw. 3d×2 bedeutet $a_v = 3d$ und 2 Blocklasten), falls es die Verständlichkeit steigert.

3.2 Baustoffe – Materialeigenschaften

Die Ergebnisse aller im Zuge der Versuchsreihe durchgeführten Materialversuche sind ausführlich im Anhang A dargestellt.

3.2.1 Beton

Die Platten sollten, wie in der Baupraxis bei Brücken üblich, aus einem Beton der angestrebten Güte eines C35/45 hergestellt werden. Bei vorangegangenen Versuchsreihen wurde die Erfahrung gemacht, dass die Betonfestigkeiten zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung teilweise stark nach oben von der Sollgüte des bestellten Betons abwichen. Es wurde zunächst ein Beton C20/25 bestellt, da u.a. aus den Versuchsreihen von (Kohl, 2014) eine Festigkeit größer 40 MPa zu erwarten war. Die Festigkeiten entwickelten sich aber bis zur Versuchsdurchführung nicht entsprechend den Erwartungen. Der Mittelwert der Betondruckfestigkeit lag für den Versuch P1 bei f_{cm} = 37,8 N/mm². Angestrebt werden sollte aber ein Beton von f_{cm} > 40 N/mm², um die bei Brücken typischen Werte zu erreichen.

Es wurde daher für die nachfolgenden Versuche ein Beton der Sollgüte C25/30 bestellt, welcher die angestrebten Festigkeitswerte erzielte.

Die Betonfestigkeiten wurden im Alter von 28 Tagen und zu Versuchsbeginn mittels zylindrischer Probekörper ∅150 mm experimentell bestimmt, die unter den gleichen Bedingungen wie der Versuchskörper gelagert wurden. Die Lagerung erfolgte direkt neben den Versuchskörpern. Wie der Versuchskörper wurden die Proben zunächst 3-5 Tage mit Folie abgedeckt und feucht gehalten, um eine vorzeitige Austrocknung und damit einhergehende Bildung von Schwindrissen zu verhindern. Bei den Versuchskörpern P1 – P6 wurde zusätzlich die 28 Tage Festigkeit nach Norm mit Wasserlagerung bestimmt.

Alle Materialeigenschaften wurden an zylindrischen Probekörpern ∅150 mm und einer Höhe von 300 mm ermittelt.

Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit wurde an 3 Prüfzylinder je Versuchskörper nach 28 Tagen und zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung mittels einer hydraulischen Presse gemäß DIN EN 12390-3 bestimmt. Die mittlere Betondruckfestigkeit f_{cm} ergibt sich aus dem Mittelwert der 3 Versuchswerte ohne Berücksichtigung der statistischen Streuungen.

Spaltzugfestigkeit

Die Spaltzugfestigkeit wurde gemäß DIN EN 12390-6 experimentell ermittelt.



Bild 2: Prüfzylinder a) Schleifen der Betonzylinder; b) Betonprobe nach der Druckfestigkeitsprüfung

E-Modul

Die Proben wurden in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A getestet.

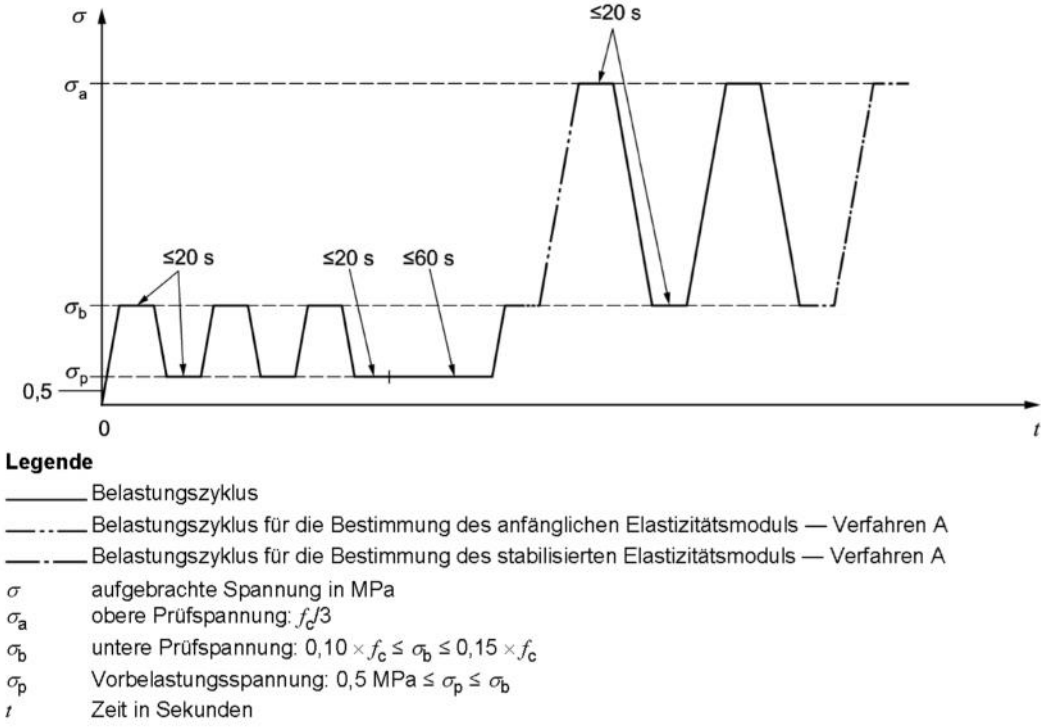


Bild 3: Belastungszyklus zur Bestimmung des E-Moduls nach DIN EN 12390-13, Verfahren A

Die Betonproben werden gemäß dem in Bild 3 dargestellten Belastungszyklus in Abhängigkeit der zu erwartenden Druckfestigkeit belastet. Die Druckfestigkeit f_c wird dabei anhand den zuvor durchgeführten Druckfestigkeitsprüfungen abgeschätzt. Für die Durchführung gelten nach der o.g. Norm folgende Bedingungen:

Die Spannung ist mit einer Geschwindigkeit von (0,6 ± 0,2) MPa/s von der Vorbelastungsspannung σ_p auf die untere Prüfspannung σ_b zu steigern und für eine Dauer von höchstens 20 s innerhalb von ± 5 % auf dem Nennwert zu halten.

Am Ende dieser Phase ist die Dehnung im Verlauf jeder Messlinie zu protokollieren und daraus die mittlere Dehnung $\varepsilon_{b,0}$ zu berechnen.

Danach werden drei weitere Belastungszyklen durchgeführt. Bei jedem dieser drei Belastungszyklen ist die auf den Probekörper aufgebrachte Spannung mit einer Geschwindigkeit von (0,6 ± 0,2) MPa/s bis zum Erreichen der oberen Prüfspannung σ_a zu steigern.

Die obere Prüfspannung σ_a ist für eine Dauer von höchstens 20 s innerhalb von ± 5 % auf dem Nennwert zu halten. Danach ist die Spannung bei den Belastungszyklen 1 und 2 mit einer Geschwindigkeit von (0,6 ± 0,2) MPa/s auf die untere Prüfspannung σ_b zu verringern und für eine Dauer von höchstens 20 s innerhalb von ± 5 % auf dem Nennwert zu halten.

Am Ende der Phase der oberen Prüfspannung des ersten und dritten Belastungszyklus und bei konstanter Belastung sind die entsprechenden Dehnungen im Verlauf jeder Messlinie bei diesen Spannungswerten aufzuzeichnen und daraus die mittleren Dehnungen $\varepsilon_{a,1}$ und $\varepsilon_{a,3}$ zu berechnen.

Am Ende der Phase der unteren Prüfspannung des zweiten Belastungszyklus und bei konstanter Belastung ist die Dehnung im Verlauf jeder Messlinie bei diesem Spannungswert aufzuzeichnen und daraus die mittlere Dehnung $\varepsilon_{b,2}$ zu berechnen. Der Messwert der unteren Prüfspannung σ_b^m sowie oberen Prüfspannung σ_a^m sind zu protokollieren.

Nach Abschluss aller Messungen bei der oberen Prüfspannung des dritten Belastungszyklus ist die Druckfestigkeit des Probekörpers nach dem in EN 12390-3 angegebenen Belastungsverfahren zu bestimmen. Die so ermittelte Druckfestigkeit ist auf 0,1 MPa aufzuzeichnen. Falls die gemessene Druckfestigkeit um mehr als 20 % von f_c abweicht, ist dies im Prüfbericht zu vermerken.

Die im Anhang A angegebenen Werte des Sekanten-E-Moduls nach Verfahren A sind:

- Anfänglicher Elastizitätsmodul: Der anfängliche Elastizitätsmodul $E_{C,0}$ ist definiert als:

$$E_{C,0} = \frac{\Delta\pm}{\Delta£_0} = \frac{\pm_a - \pm_b}{£_{a,1} - £_{b,0}} \tag{3.1}$$

- Stabilisierter Elastizitätsmodul: Der stabilisierte Elastizitätsmodul $E_{C,S}$ ist definiert als:

$$E_{C,S} = \frac{\Delta\pm}{\Delta£_S} = \frac{\pm_a^m - \pm_b^m}{£_{a,3} - £_{b,2}} \tag{3.2}$$

Festigkeitsentwicklung bzw. Nachverfestigung

Nach EC2 (1992_1-1, 2011) kann die Festigkeitsentwicklung des Betons über folgende Werkstoffbeziehungen abgeschätzt werden:

$$f_{cm}(t) = {}_{cc}(t) \cdot f_{cm} \qquad \text{(EC2, Gl. 3.1)} \tag{3.3}$$

$${}_{cc}(t) = e^{s(1-\sqrt{28/t})} \qquad \text{(EC2, Gl. 3.2)} \tag{3.4}$$

Dabei gilt:

	f_{cm} (t)	die mittlere Druckfestigkeit im Alter von *t* Tagen
	f_{cm}	die mittlere Druckfestigkeit nach 28 Tagen
	β_{cc}	ein vom Alter des Betons *t* abhängiger Beiwert
	t	das Alter des Betons in Tagen
	s	Beiwert zur Berücksichtigung des Zementtyps

Tabelle 2: Vergleich der realen Nacherhärtung mit dem Verfahren nach EC2

Versuch	$f_{cm,28\ Tage}$	$f_{cm}(t)$	$f_{cm(t),Test}$	Anzahl Tage	s	$f_{cm(t),Test}/f_{cm}\ (t)$
P1	31,2	35,2	37,8	106	0,25	107 %
P2	38,9	43,5	46,4	91	0,25	107 %
P3	35,5	37,3	40,0	44	0,25	107 %
P4	43,0	46,7	43,0	63	0,25	92 %
P5	40,3	45,0	47,3	90	0,25	105 %
P6	36,1	40,9	43,4	110	0,25	106 %
P7	41,9	47,0	55,5	95	0,25	118 %
P8	43,6	48,2	52,8	78	0,25	110 %
P9	40,6	47,0	57,6	165	0,25	123 %
P10	39,3	43,4	45,9	76	0,25	106 %
P11	40,5	45,7	49,5	106	0,25	108 %
P12	42,2	47,9	54,4	116	0,25	114 %
P13	39,7	44,2	47,1	87	0,25	107 %
P14	38,1	42,3	44,8	83	0,25	106 %

Es zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den mittleren Betondruckfestigkeiten nach Norm und den experimentell ermittelten Werten. Die relevanten Betonkenngrößen sind daher möglichst zu Versuchsbeginn zu bestimmen und nicht aus den 28Tage-Werten zu extrapolieren.

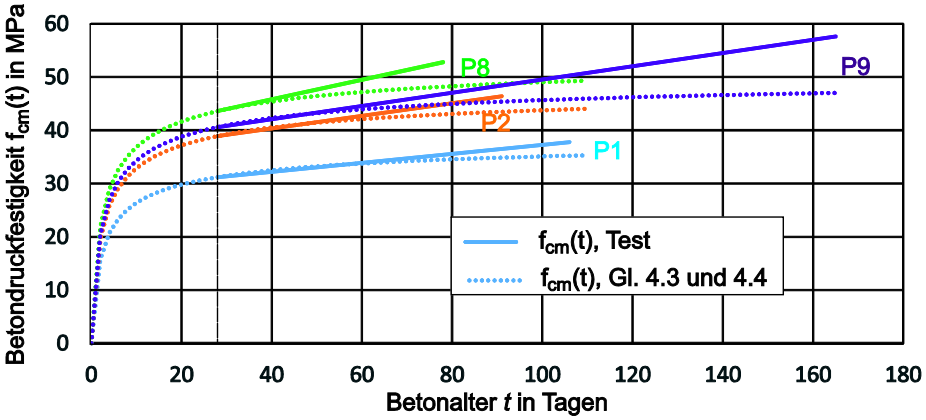


Bild 4: Festigkeitsentwicklung für ausgewählte Versuchsreihen im Vergleich zu Normwerten

Bis auf den Beton des Versuchskörpers P4 verlief die Festigkeitsentwicklung im Vergleich zum rechnerischen Wert nach EC2 bei allen Versuchskörpern schneller als erwartet. Warum die Festigkeitsentwicklung bei P4 langsamer ablief ist nicht zu erklären, da bis auf P1 immer die gleiche Rezeptur bestellt wurde.

Es ist festzuhalten, dass die Streuung der Betongüte über die gesamte Versuchsreihe hinweg generell recht groß war. Die Ursache hierfür konnte nicht festgestellt werden. Bei der bestellten Betonmischung handelte es sich um eine Standardrezeptur des Lieferanten. Für den C25/30 variierte die mittlere Festigkeit nach 28 Tagen zwischen 35 MPa und 44 MPa bei einem Erwartungswert nach Norm von 33 MPa (f_{ck} + 8 MPa = 25 + 8 = 33 MPa). Die angelieferte Konsistenz war teilweise sehr unterschiedlich, und entsprach häufig nicht der Konsistenzklasse F3.

Meistens wurde ein deutlich steiferer Beton geliefert, was auf einen geringeren w/z-Wert als im Rezept angenommen schließen lässt. Der *w/z*-Wert hat auf die Festigkeit des Betons einen entscheidenden Einfluss, sodass hier die Abweichungen nach oben begründet sein könnten.

3.2.2 Bewehrung

Die Bewehrung der Versuchskörper ist in Bild 5 dargestellt. Die Hauptlängsbewehrung der Platten bestand aus Stabstahl Ø16 mm im Abstand von a = 80 mm oben und Ø12 mm alle 100 mm unten. In Querrichtung waren jeweils Ø12 mm alle 100 mm oben und unten eingebaut. Umlaufend wurden zur Einfassung der freien Ränder Stecker Ø10 mm alle 80 bzw. 100 mm verbaut. Alle Stäbe hatten die Güte B 500 B. In Anhang A sind die maßgebenden experimentell bestimmten Stahleigenschaften zusammengestellt.

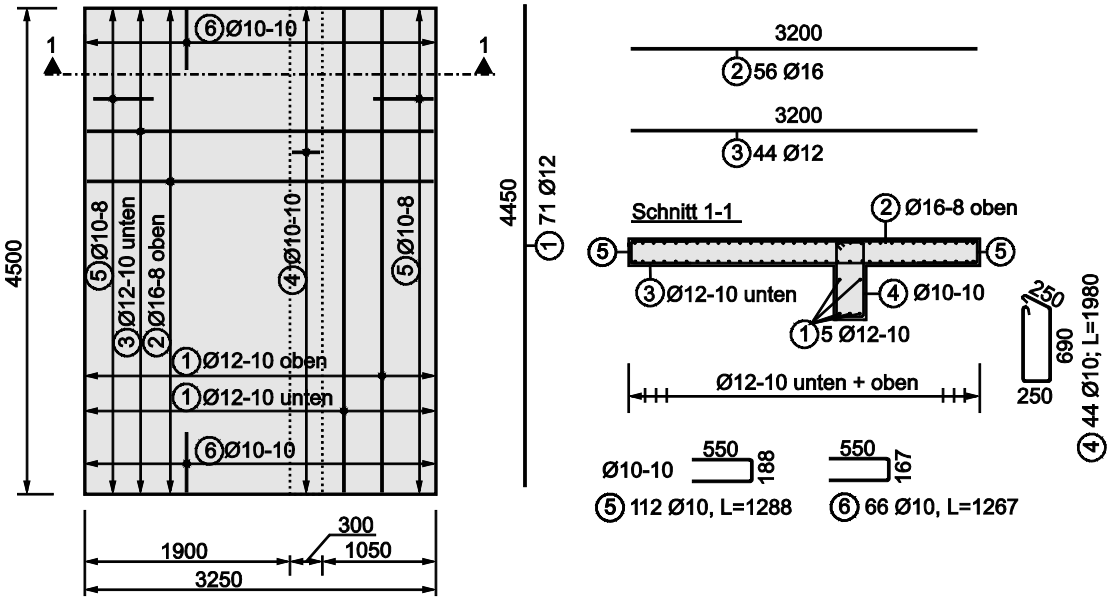


Bild 5: Bewehrungsplan

Die Bestimmung der Stahleigenschaften erfolgte gemäß DIN EN ISO 6892-1. Die Ergebnisse der Materialprüfung sind im Anhang A zusammengestellt.

Der Bewehrungsstahl wurde in 4 verschiedenen Lieferungen bestellt, bei denen sich die Materialeigenschaften teilweise unterschieden. Während die Spannungs-Dehnungsbeziehung der ersten Lieferung eine deutliche Streckgrenze erkennen ließ, konnte dieses bei den weiteren Lieferungen nicht immer beobachtet werden. Die nachfolgenden Abbildungen erläutern die im Anhang A dokumentierten Eigenschaften des Bewehrungsstahls anhand der Kurvenverläufe der Spannungs-Dehnungsbeziehungen.

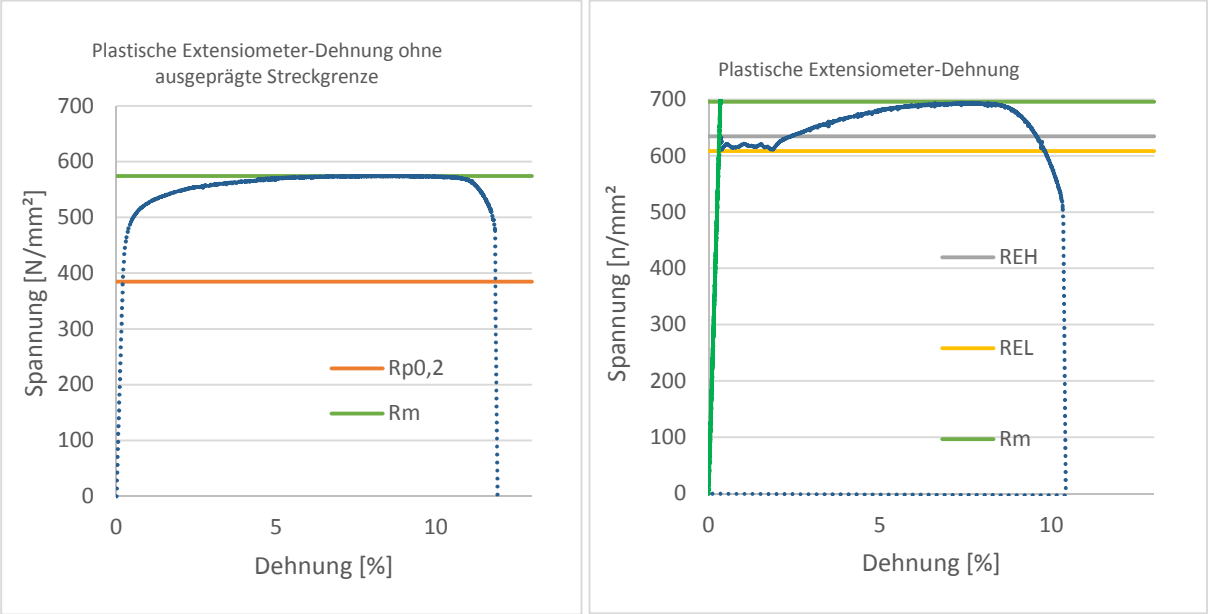


Bild 6: Exemplarische Spannungs-Dehnungsbeziehungen des Bewehrungsstahls mit Erläuterung der im Anhang A dokumentierten Werte

3.2.3 Herstellung der Versuchskörper

Die Versuchskörper wurden in der Versuchshalle des Institutes für Massivbau an der Technischen Universität Hamburg-Harburg hergestellt und dort auch bis zur Versuchsdurchführung gelagert. Es wurde –wie bereits beschrieben– Transportbeton der Sollgüte C20/25 bzw. C25/30 verwendet. Der Betonmischer konnte jeweils direkt an die vorbereitete Schalung fahren. Der Beton wurde dann über die angehängte Schütte in die Schalung eingefüllt und mittels Flaschenrüttler verdichtet.



(a) Schalung mit Bewehrung



(b) Betonprüfkörper



(c) Kurz vor dem Betonieren – Anlieferung des Betons



(d) Nach dem Verdichten

Bild 7: Herstellung der Platten und der Prüfkörper

3.3 Messtechnik

Die Datenblätter der verwendeten Aufnehmer sind Anhang C zu entnehmen. Bild 8 zeigt eine exemplarische Übersicht zur Anordnung der Messtechnik. Die konkrete Lage wurde der jeweiligen Laststellung angepasst, da sich durch die unterschiedlichen Laststellungen jeweils andere geometrische Randbedingungen ergaben und jeweils neuere Erkenntnisse hinsichtlich der Ergebnisse einflossen. In Anhang B ist die jeweilige Anordnung der Messelemente für jeden Versuch dokumentiert.

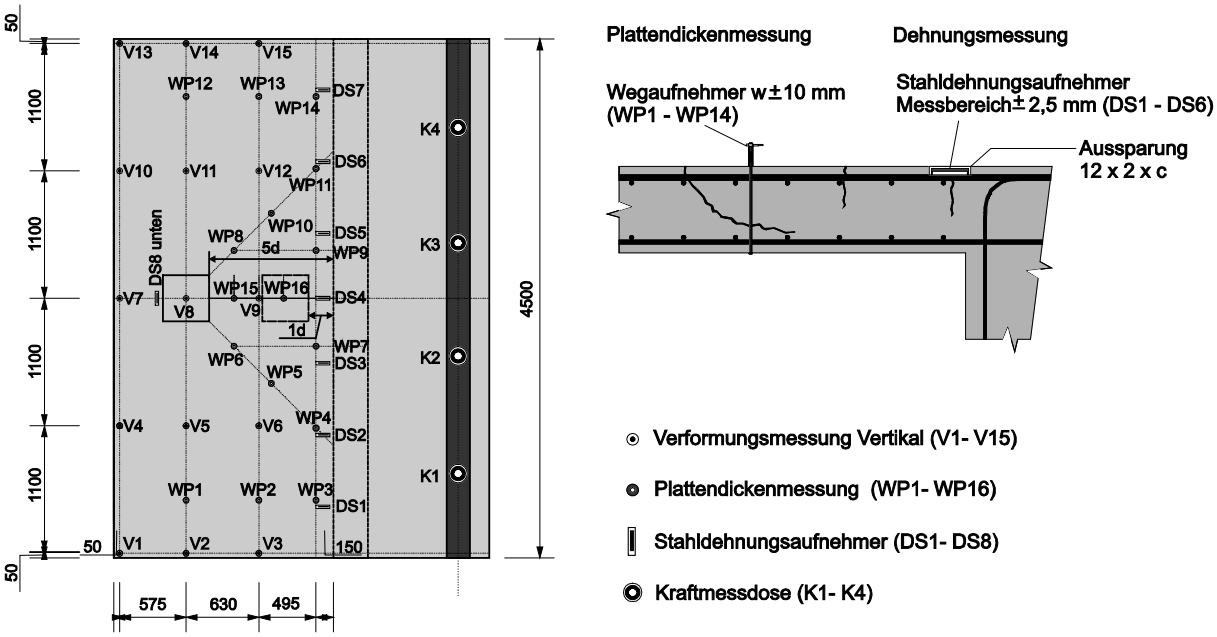


Bild 8: Messtechnik – Exemplarische Anordnung

3.3.1 Messtechnik, Datenerfassung

Während der Versuche wurden an verschiedenen Punkten die Verformungen an der Plattenober- und -unterseite gemessen (Anordnung der Messtechnik in Bild 8, Bild 9). Des Weiteren wurden die Auflagerverformungen aufgezeichnet. Die Dehnungen der Bewehrung an der Plattenoberseite (Zug) im Übergang zum monolithisch angeschlossenen Steg, wurden an 7 Stellen direkt am Bewehrungsstab ermittelt. Hierzu wurden zunächst bei der Betonage bei den entsprechenden Bewehrungsstäben im Übergang zum Steg Abschalelemente aus Polystyrol angebracht, um Hohlräume für den späteren Einbau der Dehnungsaufnehmer zu schaffen (Bild 10).

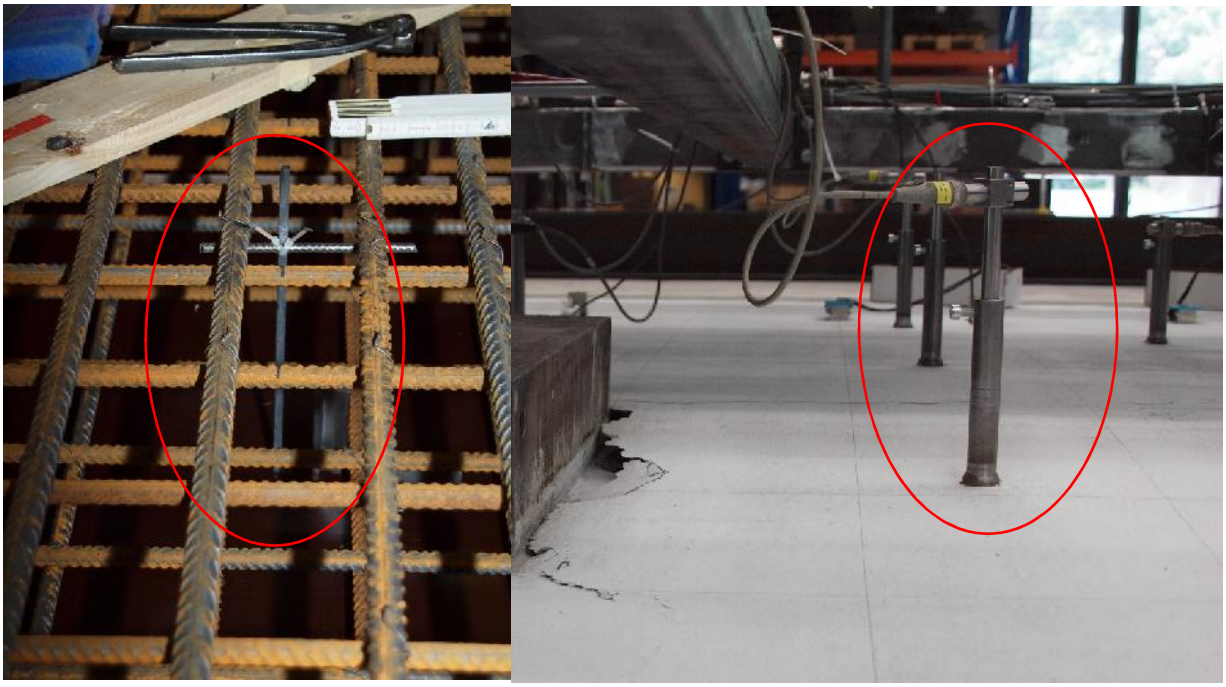


Bild 9: Links: Stahlstift mit Schlauchummantelung vor der Betonage; Rechts: Messung der Plattendicke im Bereich der Lasteinleitung während des Versuchs P3



Bild 10: Dehnungsaufnehmer DD1 zur Bestimmung der Stahldehnung in eingebautem Zustand

Während der Versuche wurde die Plattendicke an mehreren Punkten aufgezeichnet. Hierdurch konnte das Entstehen und das Fortschreiten der Schrägrisse innerhalb der Platte ermittelt werden. Um die für die Dickenmessungen benötigten Wegaufnehmer in die fertige Betonplatte einbauen zu können, wurden vor der Betonage Stahlstifte und in die Schalung eingeschlagen, welche mit einem Schrumpfschlauch versehen waren(Bild 9). Die Stahlstifte konnten nach der Betonage durch die zuvor gefetteten Schläuche wieder entfernt werden. So entstand eine Röhre, durch die der Wegaufnehmer zur Dickenmessung gefädelt wurde.

Nach dem Auftreten der ersten Biegerisse unter Belastung wurden im Auflagerbereich (Steg) jeweils vier Rissaufnehmer am Hauptbiegeriss angebracht. Dafür wurde zunächst bis auf 5 kN entlastet und die Messelemente eingebaut. Anschließend wurde bis zur vorher erreichten Laststufe wieder belastet. So ließen sich Rissweiten der Biegerisse bestimmen.

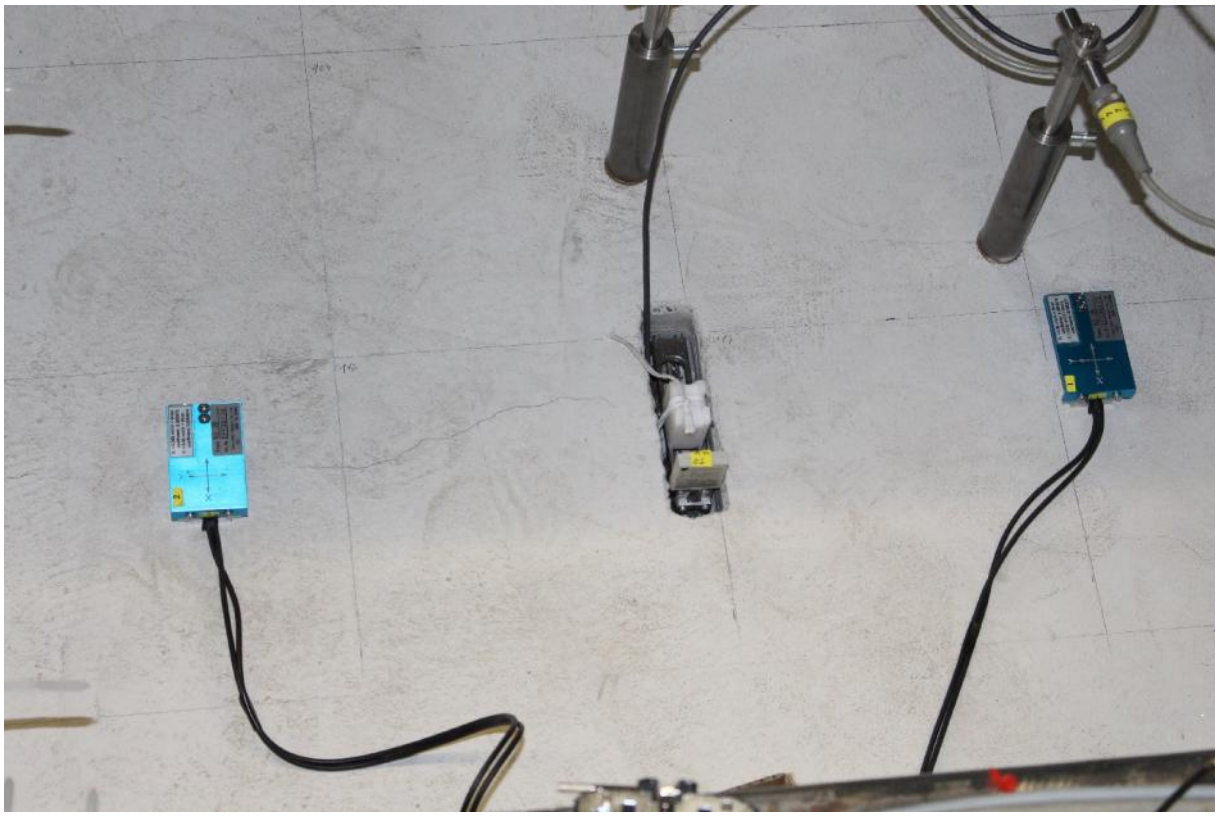


Bild 11: Rissweitenmessung am Hauptbiegeriss im Bereich des Auflagers (Steg) der Platte - Draufsicht

Um einen reibungslosen Ein- und Ausbau der Messtechnik zu ermöglichen, und um die Messtechnik vom Versuchskörper zu entkoppeln wurde ein Stahlrahmen entwickelt, der sich direkt am Versuchstand unabhängig vom Versuchskörper befestigt ließ. So konnte auch erreicht werden, dass beim Umbau von Laststellung zu Laststellung die Messtechnik nicht ausgebaut sondern nur entsprechend verschoben werden musste. Bild 12 zeigt den Versuchsstand mit dem Messrahmen.



Bild 12: Versuchsstand mit Messrahmen

Eine Verformung der Auflager unter Last kann großen Einfluss auf das globale Last/Verformungsverhalten haben. Ergänzend zu den vertikalen Verschiebungen der Platte im auskragenden Bereich wurden daher auch die Auflagerverformungen gemessen, um deren Einfluss auf das Verformungsverhalten der Gesamtkonstruktion zu verifizieren. Bild 13 stellt den Versuchsaufbau mit entkoppeltem Messrahmen und der Zusatzkonstruktion zur Bestimmung der Auflagerverformungen schematisch dar.

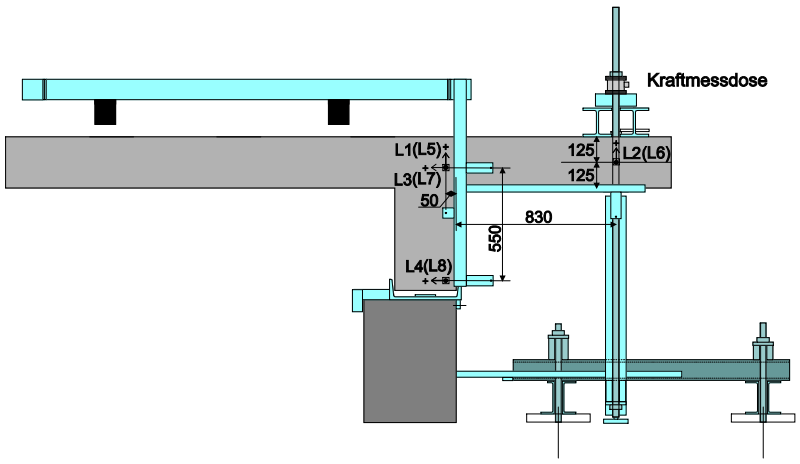
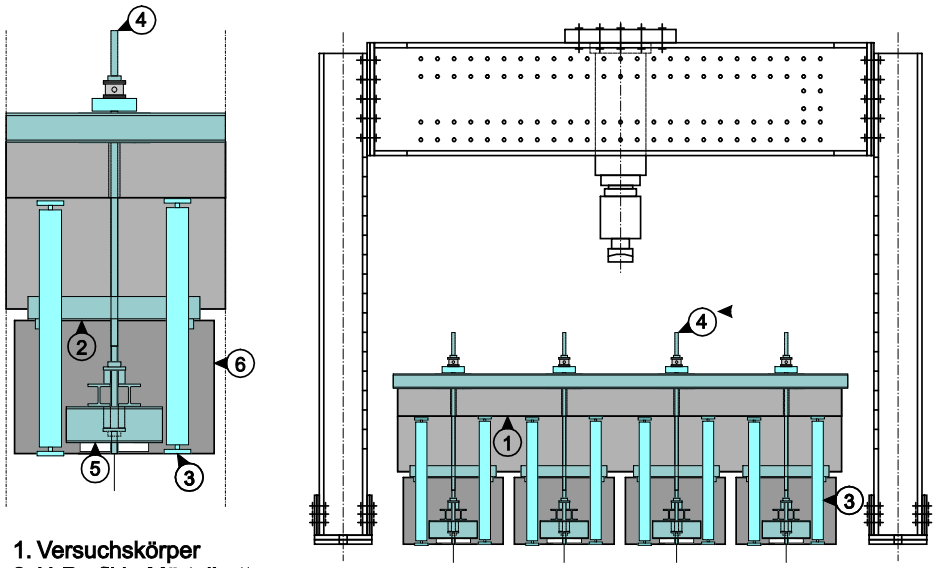


Bild 13: Versuchsaufbau mit Messrahmen und Zusatzkonstruktion zur Messung der Auflagerverformungen

Die Kräfte in der Rückspannung des hinteren Kragarms wurden mittels Kraftmessdosen gemessen, um sicherzustellen, dass es in den Spannstangen zu keiner Überlastung kam. Die Platte wurde mittels Gewindestangen gegen die Verankerungspunkte im Spannfeld vorgespannt. Dabei wurde eine Vorspannung von ca. 300 kN je Verankerungspunkt aufgebracht, die für die maximal zu erwartenden Verankerungskraft bei einem Biegeversagen des Systems ausgelegt war. Die Verankerung wurde vorgespannt, um die Auflagerverformung möglichst klein zu halten. Die Vorspannung erfolgte gegen 8 Stahlstützen HEB 120, die zwischen Versuchskörper und Spannfeld angeordnet wurden (Bild 14).



1. Versuchskörper
2. U-Profil in Mörtelbett
3. Stützung der Rückverankerung 8x HEB 120
4. Rückverankerung Gewindestange 4x d30
5. Schienensystem Rückverankerung 8x HEB100 verschieblich
6. Betonklotz b/h/t = 90/60/45 cm

Bild 14: Detail Rückverankerung des Versuchskörpers

Weiterhin wurden die Versuche mit Videokameras aufgezeichnet.

3.4 Versuchsdurchführung

3.4.1 Versuchsanordnung

Die Platten wurden durch eine hydraulische Presse bis zum Bruch stufenweise belastet. Die Kontaktfläche der Lastverteilungsplatte betrug 400 mm × 400 mm. Die Lastplatte wurde in ein Mörtelbett gelegt, um Belastungsspitzen im Bereich der Lasteinleitung zu vermeiden. Weiterhin war der Druckstempel der Presse über eine Kalottenkonstruktion gelagert, um zwängungsfreie Verdrehungen der Lastplatte zu ermöglichen. Hierdurch wurde eine stark asymmetrische Kantenpressung im Bereich der Lastplatte verhindert. Die Versuchsanordnung kann Bild 1 entnommen werden.

3.4.2 Erweiterung des Versuchsaufbaus für auflagernahe Lasten

Aus den Ergebnissen der Versuche mit Laststellung $a_v = 3d$ bis $6d$ und den begleitenden numerischen Simulationen konnte abgeleitet werden, dass die zu erwartenden Traglasten der Versuche mit $a_v < 2d$ Werte gleich oder über der maximalen Kraft der zentralen Presse von 1 MN

liegen würden. Der Versuchsaufbau wurde dementsprechend um eine Traverse HEB 300 mit Verstärkungsblechen und zwei zusätzliche Pressen mit externen Hydraulik erweitert (vgl. Bild 15). Unter der Traverse wurde entsprechend dem bisherigen Versuchsaufbau eine Kalotte angeordnet um eine freie Verdrehbarkeit der Lastplatte zu gewährleisten und exzentrische Kantenpressungen zu vermeiden.

Die Hydraulik der drei Pressen wurde zentral gesteuert um gleichen Kräfte einzuleiten. Die Pressenkräfte wurden direkt mit Kraftmessdosen gemessen und aufgezeichnet.

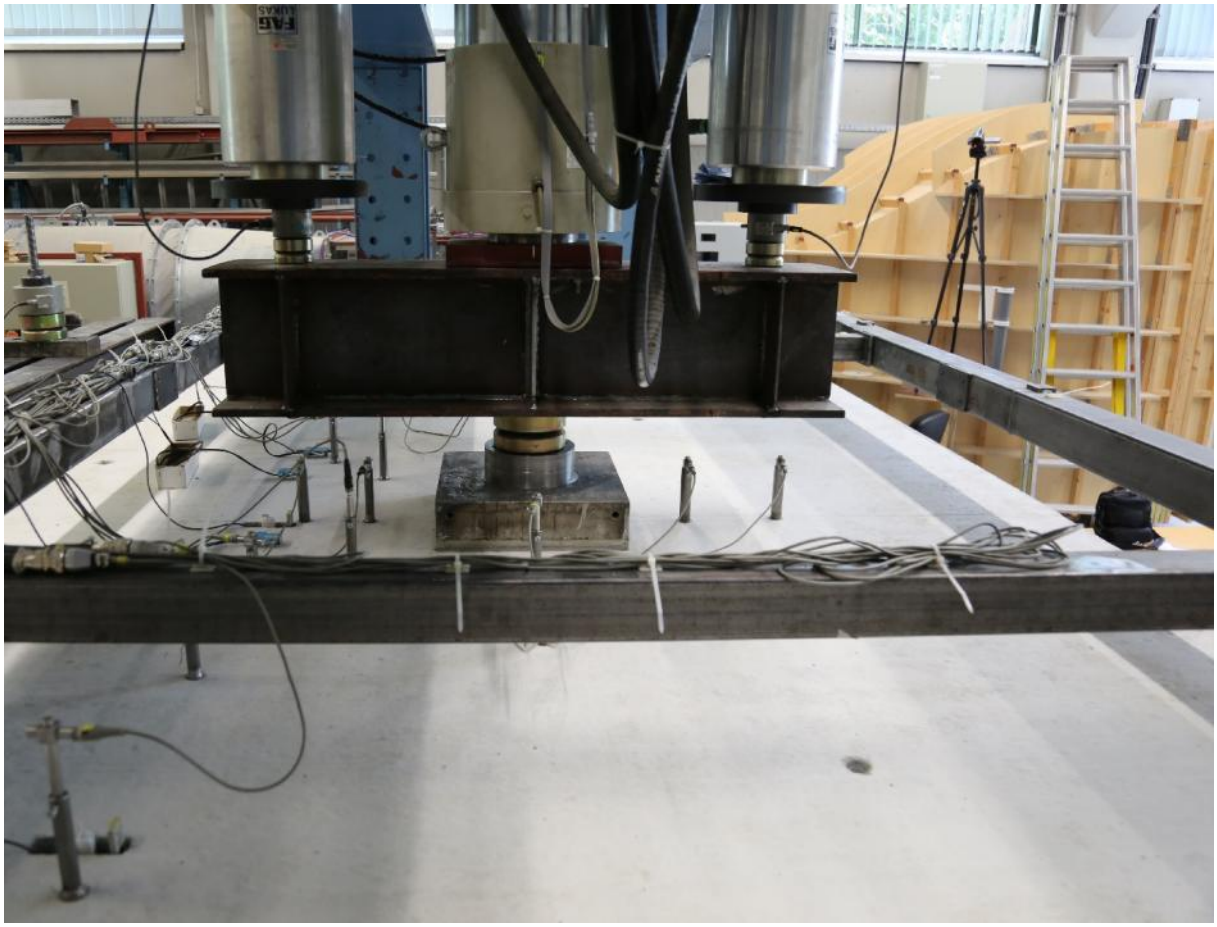


Bild 15: Erweiterung des Versuchsaufbaus für die Versuche mit auflagernaher Laststellung

3.4.3 Belastung

Die Belastung wurde stufenweise um 100 kN erhöht. Bis etwa. zur Hälfte der zu erwartenden Traglast wurde die Last kraftgesteuert gesteigert. Danach wurde auf Wegsteuerung umgestellt, wobei die Weginkremente so aufgebracht wurden, dass in etwa wieder 100 kN je Schrittweite eingehalten wurden. Die Belastungsgeschwindigkeit entsprach in etwa 1,67 kN/s bzw. 100 kN/min. Nachdem die jeweilige Kraft aufgebracht worden war, wurde der Laststschritt für 5 Minuten gehalten. Danach wurde die nächste Laststufe aufgebracht. Die Rissaufnehmer, die die Breite der Biegerisse am Anschnitt aufnahmen, konnten erst nach Auftreten der ersten Biegerisse angebracht werden. Hierzu wurde das System entlastet. Danach wurde die Belastung wieder bis auf die vorherige Laststufe hochgefahren, und dann weiter in ca. 100 kN Schritten weggesteuert gesteigert. Bild 16 zeigt die Last-Zeit-Kurve exemplarisch für den Versuch P2.

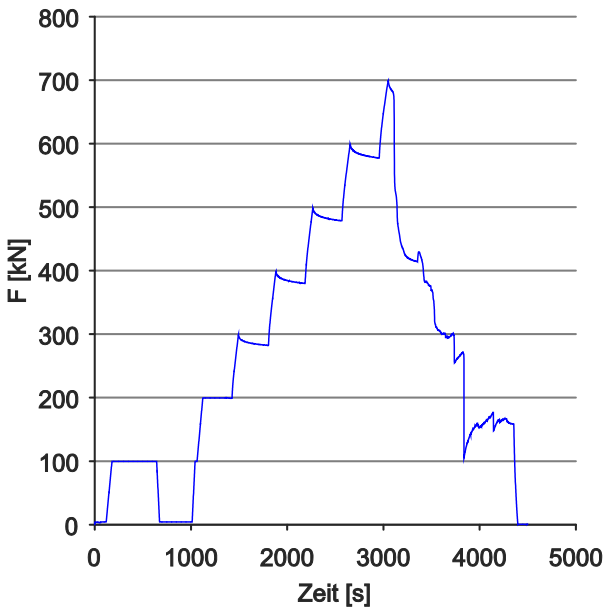


Bild 16: Last-Zeit-Kurve für den Versuch P2

3.5 Erweiterung des Versuchsaufbaus für Doppellasten

Für die Versuche mit zwei Einzellasten wurde der vorhergehend beschriebene Versuchsaufbau erweitert. Zunächst wurden für die Versuche mit $a_v = 3d$ und $4d$ zwei Pressen unter einem der Riegel des Versuchstandes angeordnet. Die beiden Pressen wurden über eine externe Hydraulik betrieben, wobei der Druck für beide Pressen gekoppelt wurde. Für den Fall des vorzeitigen Versagens der Platte im Bereich einer der beiden Lasten wurde eine Weiche mit Absperrventil zwischengeschaltet, sodass der Druck wahlweise bei einer der beiden Pressen unabhängig von der zweiten gesteuert werden konnte (Bild 18).

Aus den Ergebnissen der Versuche mit Einzellast war zu erwarten, dass die Versuche mit stegnah angeordneten Lasten mehr als 1 MN Traglast erreichen würden, was die maximale Pressenkraft der beiden Pressen im Versuchsstand überschritten hätte. Auch die Rückspannung war für die zu erwartenden Lasten nicht ausreichend dimensioniert. Die Konstruktion wurde entsprechend modifiziert. Für den Versuch mit $a_v = 2d$ wurde der Versuchskörper um 90° gedreht in den Versuchsstand eingebaut, sodass die Lasten über die im Abschnitt 3.4.2 beschriebene Traverse mit den zwei separaten Pressen unter den Riegeln des Versuchsstandes und der zentralen Presse aufgebracht werden konnte. Die Rückverankerung erfolgte abweichend von der bisher verwendeten Bockkonstruktion gemäß Bild 13 direkt über M36 Gewindestangen in den Verankerungstöpfen des Spannfeldes (Bild 19).



Bild 17: Pressenanordnung für die Versuche mit Doppellast

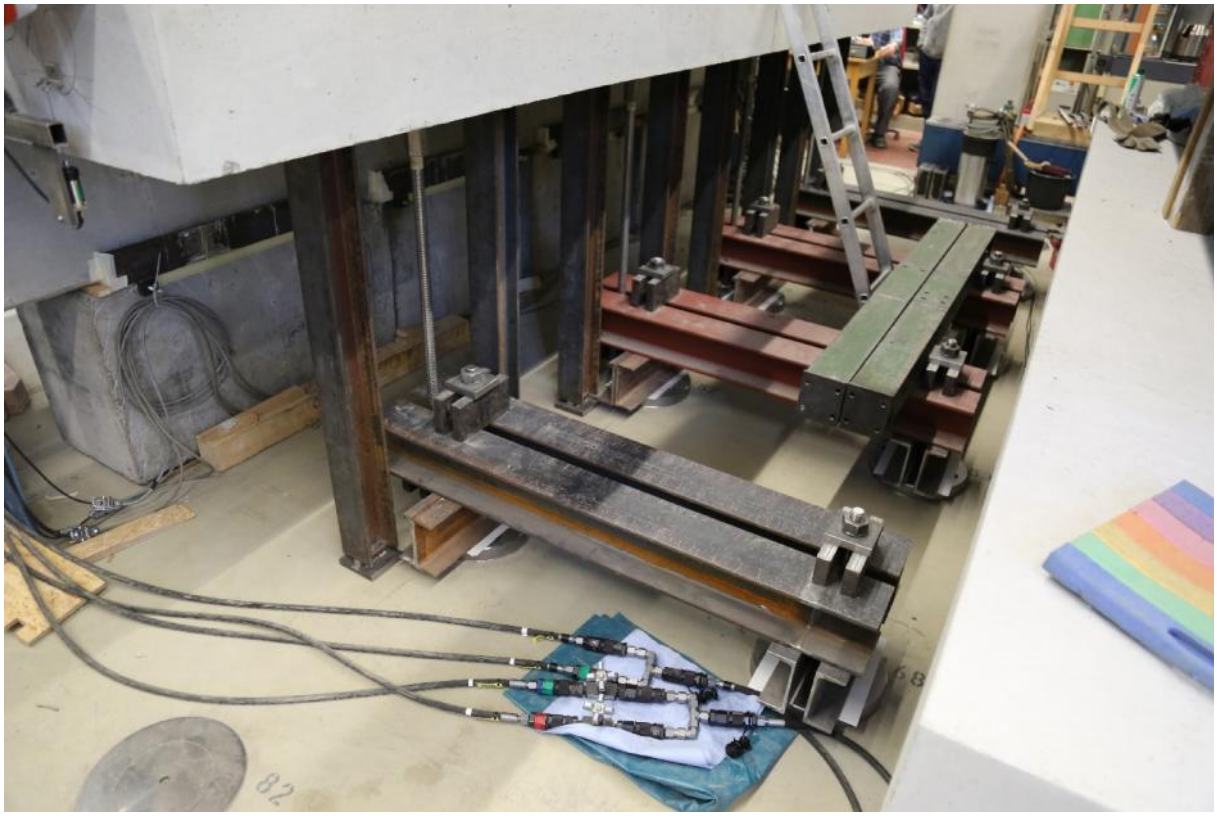


Bild 18: Rückspannung bei Versuch P12 und Weichenkonstruktion der Hydraulik zur Steuerung der beiden Pressen

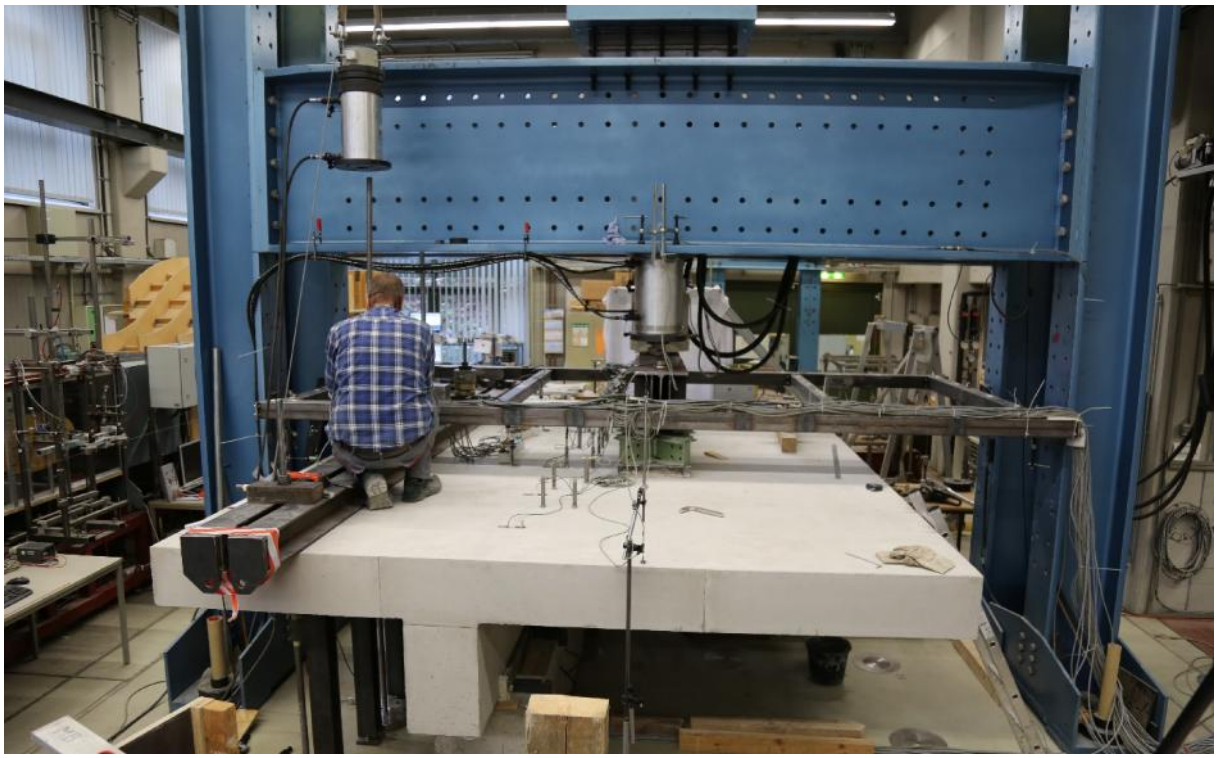


Bild 19: Versuchsaufbau für die Laststellung bei a_v = 2,0*d* mit Doppellast, 2*d*ò2

3.6 Modifikationen für die Versuche an Plattenstreifen mit 1 m Breite

Bei der Bemessung von Plattentragwerken wird im Allgemeinen die Tragfähigkeit der Platte auf eine äquivalente Tragfähigkeit eines 1 m breiten Plattenstreifens bzw. auf die Tragfähigkeit je laufenden Meter bezogen. Daher wurden auch ein Meter breite Plattenstreifen im Zuge dieser Versuchsreihe für verschiedene Laststellungen untersucht. Hierfür wurde die bereits für die 14 vorangegangenen Platten verwendete Schalung so modifiziert, dass vier 1 m breite auskragende Versuchskörper hergestellt werden konnten (Bild 20).



Bild 20: Schalung mit Unterteilung zur Herstellung der 1 m breiten Plattenstreifen

Für den Versuchsstand wurde jeweils einer der schon für die Plattenversuche verwendeten Betonblöcke als Unterbau verwendet und die auskragenden Platten gegen das Spannfeld vorgespannt.



Bild 21: Versuchsaufbau für die 1 m breiten Plattenstreifen exemplarisch für P15-2d



Bild 22: Versuchsaufbau für die 1 m breiten Plattenstreifen mit Rückspannung exemplarisch P15-2d

Es wurden die Laststellungen von a_v = 1*d* bis 3*d*, und 5*d* untersucht. Da der Versuch mit 5*d* als einziger auf Biegung versagte, was sich durch plastische Verformungen und ein Fließen der oberen Längsbewehrung mit ausgeprägtem plastischen Plateau erkennen ließ, wurde der Versuch vor einem endgültigen Abriss des Kragarmes an der Einspannstelle nach Überschreiten der Höchstlast abgebrochen. Der Versuchskörper wurde dann ein weiteres Mal mit der Laststellung bei 1*d* belastet.

3.7 Versuchsbeschreibung

Bei allen Plattenversuchen **P1-P14** trat ein Querkraftversagen mit geneigten Schubrissen ein. Letztere bildeten sich zunächst innerhalb der Platte. Die nach den Versuchen durchgeführten Sägeschnitte zeigen den Verlauf an diskreten Stellen und sind nachfolgend dokumentiert. Nach Auftreten der ersten Risse im Platteninneren, die sich indirekt über die während der Versuche aufgezeichneten Änderungen der Plattendicke verfolgen ließen, konnte die Last weiter gesteigert werden. Die Schrägrisse breiteten sich dann im Verlauf des Versuchs unter Steigerung der aufgebrachten Last weiter von der Plattenmitte zum Rand hin aus. Nach Überschreiten der Bruchlast, waren die internen Risse noch nicht bis zu den Außenseiten der Platten vorgedrungen. Erst nach weiterer Steigerung des Weges waren die Schrägrisse an den Außenseiten der Platten zu sehen, was zu einem weiteren Absinken der Tragfähigkeit der Platten führte.

Die Lastplatte wurde bei allen Versuchen durch die obere Betondeckung in das Platteninnere gedrückt. Bei den Versuchen mit einer Last begann das Versagen immer im Bereich der Lasteinleitung und breitete sich danach in die benachbarten Plattenbereiche aus.

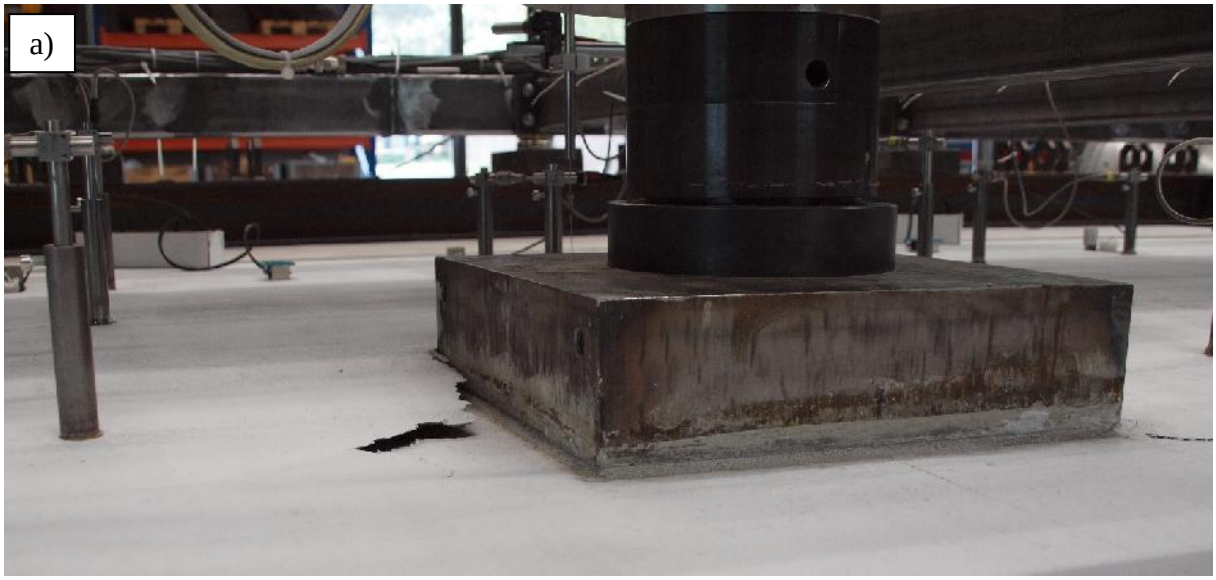




Bild 23: a) Eingedrückte Lastplatte während des Versuchs;
b) Sägeschnitt durch den Bereich der Lasteinleitung

Beide Bewehrungslagen wurden ausgehend von der Lasteinleitung in einem großen Bereich von der oberen Betondeckung abgetrennt, bzw. nach unten herausgedrückt.

3.7.1 Versuch P1: $a_v = 3d$, Versuch 3d-1

Die Bruchlast der Platte P1 betrug F_u = 630,1 kN.

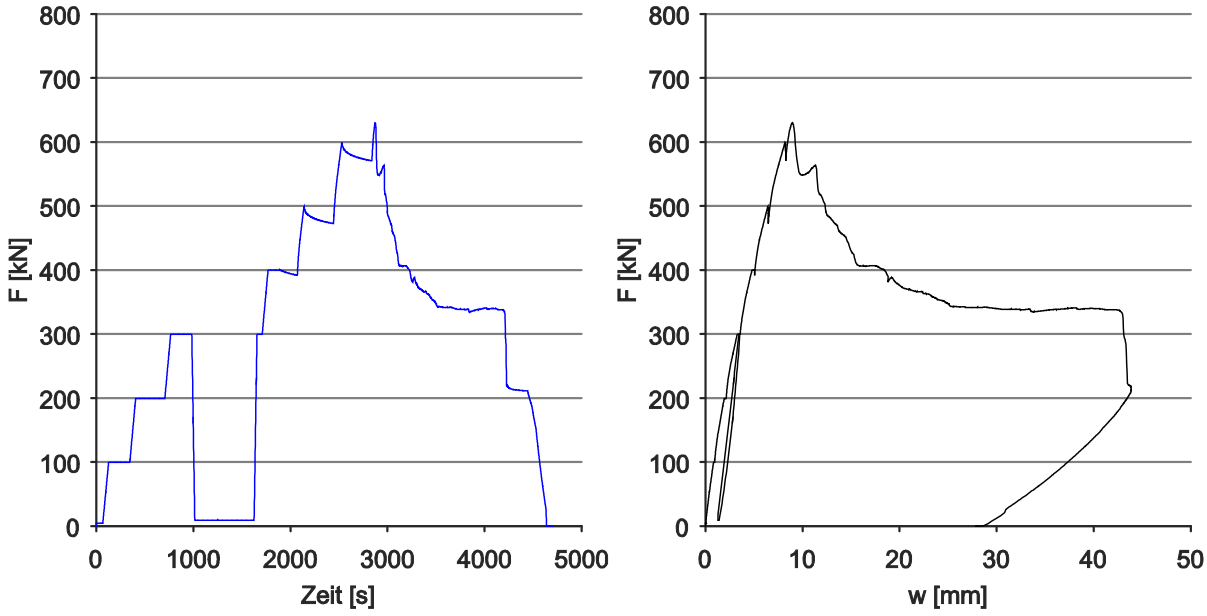


Bild 24: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P1, 3d-1

Nach Überschreiten der Höchstlast von F_u = 630,1 kN fiel die Tragfähigkeit der Platte schlagartig auf ca. 550 kN ab. Im weiteren Verlauf sank die Tragfähigkeit bei weiterer Wegsteigerung bis auf 350 kN ab.

Der Schrägriss trat zunächst auf der rechten Seite von vorne gesehen nach außen durch. Dieses führte zu einem weiteren Absinken der Tragfähigkeit auf ca. 200 kN. Im Anschluss schlug der Schrägriss auch auf der linken Seite nach außen durch. Daraufhin wurde der Versuch abgebrochen, da die Verformungen sehr schnell weiter zunahmen.

Die Lastplatte drückte im Verlauf des Versuchs die obere Betondeckung in das Platteninnere.

Beide Bewehrungslagen wurden ausgehend von der Lasteinleitung in einem großen Bereich von der oberen Betondeckung abgetrennt, bzw. nach unten herausgedrückt. In der Nähe des Steges verlief der Riss, der sich entlang der oberen Bewehrung ausbildete dann auf die Unterseite der Platte. Es bildete sich ein für das Querkraftversagen charakteristischer schräger Rissverlauf aus.

Der Schrägriss trat unmittelbar am monolithisch angeschlossenen Steg an der Unterseite aus, und verlief auch direkt am Anschnitt entlang.

3.7.2 Versuch P2: $a_v = 5d$; Versuch 5d

Die Bruchlast der Platte P2 betrug F_u = 699,2 kN.

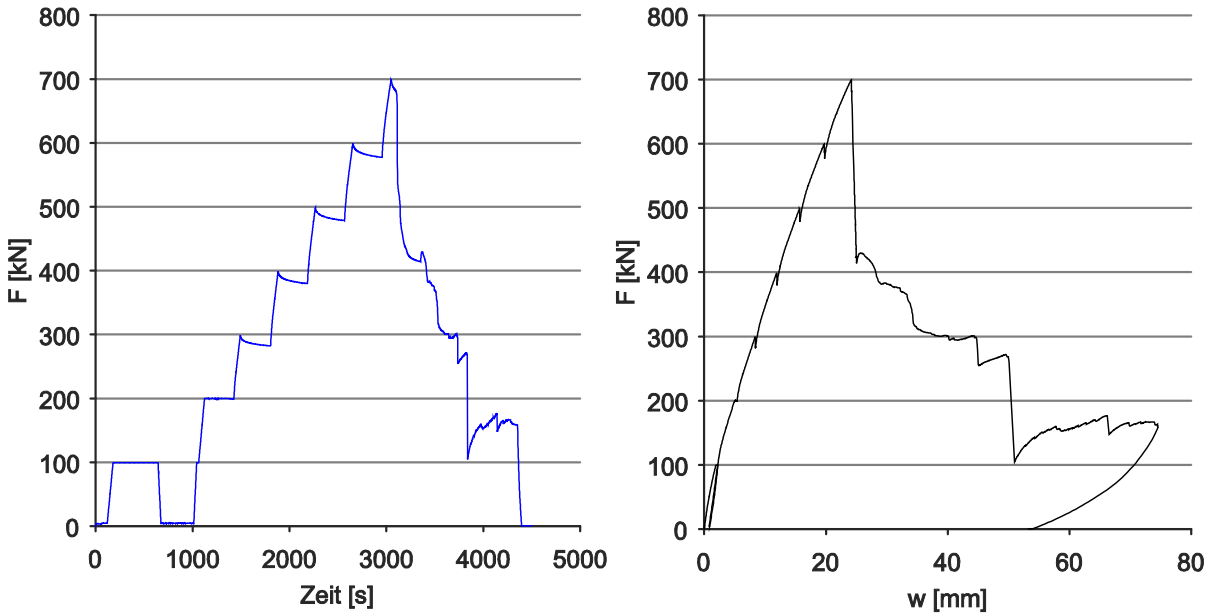


Bild 25: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P2, 5d

Nach Überschreiten der Höchstlast von F_u = 699,2 kN viel die Tragfähigkeit der Platte schnell auf ca. 430 kN ab.

Der Schrägriss trat zunächst auf der rechten Seite von vorne gesehen nach außen durch. Dieses führte zu einem weiteren Absinken der Tragfähigkeit auf ca. 300 kN. Im weiteren Verlauf des

Versuchs schlug der Schrägriss auch auf der linken Seite nach außen durch. Es wurde weiterhin Verformung aufgebracht, bis die Verformungen sehr schnell zunahmen.

Der Schrägriss trat nicht unmittelbar am monolithisch angeschlossenen Steg an der Unterseite aus, sondern ca. 35- 40 cm vom Anschnitt entfernt (Bild 26). Im mittleren Bereich der Platte verlief der Riss auf der Unterseite zunächst um die Lasteinleitung herum, bog dann Richtung Steg ab, und verlief am Anschnitt entlang nach außen.



Bild 26: Ausschnitt aus dem Rissverlauf; Austreten des Schrägrisses auf der Unterseite der Platte

3.7.3 Versuch P3: $a_v = 4d$, Versuch 4d-1

Die Bruchlast der Platte P3 betrug F_u = 677,4 kN.

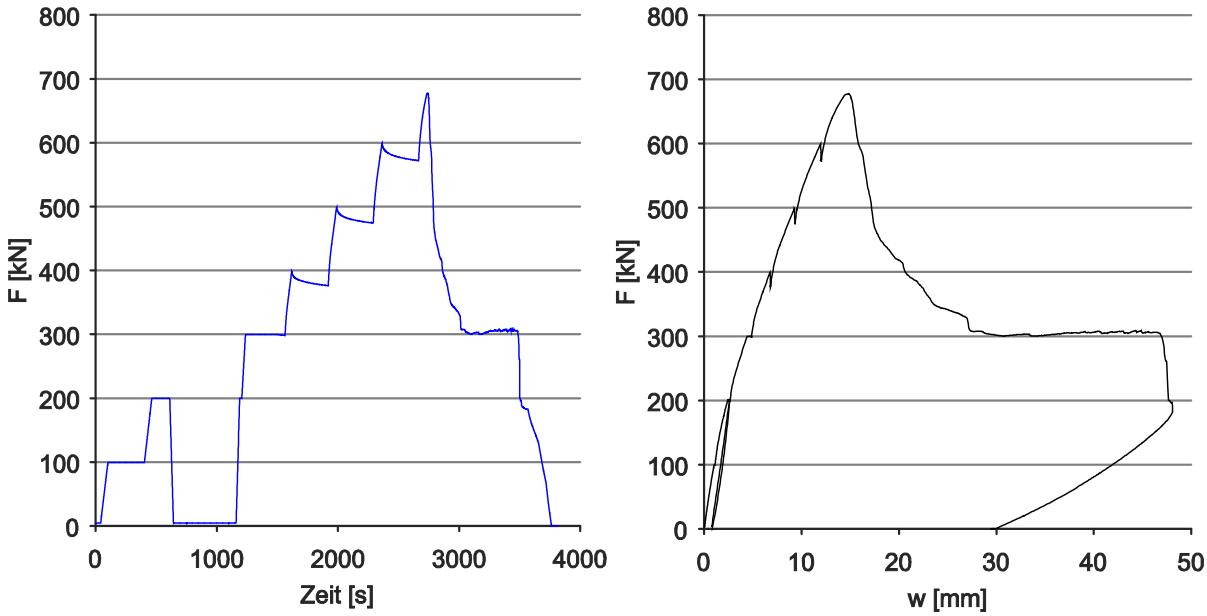


Bild 27: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P3, 4d-1

Nach Überschreiten der Höchstlast viel die Tragfähigkeit der Platte schnell auf ca. 450 kN ab. Nach weiterer Wegsteigerung wurde ein Traglastniveau von ca. 300 kN erreicht.

Der Schrägriss trat zunächst auf der rechten Seite von vorne gesehen nach außen durch. Dieses führte zu einem weiteren Absinken der Tragfähigkeit auf ca. 200 kN. Im Anschluss schlug der Schrägriss auch auf der linken Seite nach außen durch. Daraufhin wurde der Versuch beendet.

Der Schrägriss trat unmittelbar am monolithisch angeschlossenen Steg an der Unterseite aus, und verlief am Anschnitt entlang nach außen.

3.7.4 Versuch P4: $a_v = 6d$; Versuch 6d

Die Bruchlast der Platte P4 betrug F_u = 655,5 kN.

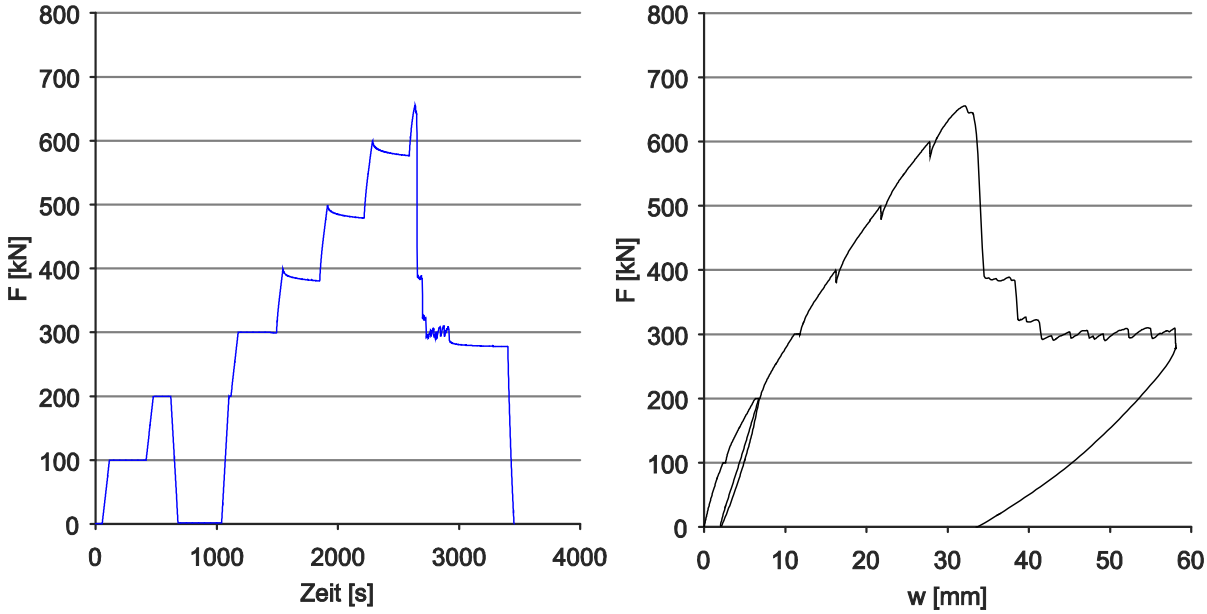


Bild 28: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P4, 6d

Nach Überschreiten der Höchstlast viel die Tragfähigkeit der Platte schlagartig auf ca. 390 kN ab. Nach weiterer Wegsteigerung wurde ein Traglastniveau von ca. 280 kN erreicht.

Der Schrägriss trat auf der auflagerparallelen Vorderseite der Platte nach außen durch. Der Versagensriss verlief elliptisch um die Last herum.



Bild 29: Schrägriss auf der Vorderseite des Kragarms

Der Schrägriss trat umlaufend an der Unterseite aus. Bild 30 zeigt das Versagensbild von P4 von unten. Zu erkennen ist der elliptisch um die Lasteinleitung verlaufende und auf der Vorderseite durchgetretene Schrägriss.



Bild 30: Versagensbild von unten

3.7.5 Versuch P5: $a_v = 2d$; Versuch 2d-1

Die Bruchlast der Platte P5 betrug F_u = 983,5 kN.

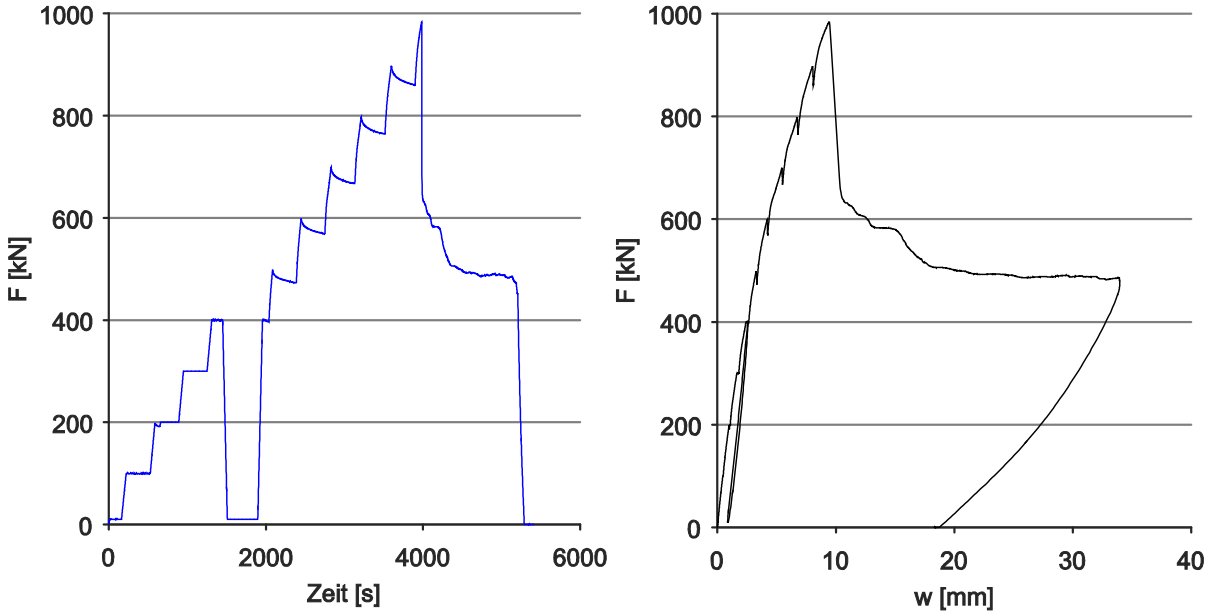


Bild 31: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P5; 2d-1

Nach Überschreiten der Höchstlast viel die Tragfähigkeit der Platte schlagartig auf ca. 600 kN ab. Nach weiterer Wegsteigerung wurde ein Traglastniveau von ca. 500 kN erreicht.

Der Schrägriss schlug während des Versuchs nicht bis nach außen durch.

3.7.6 Versuch P6: $a_v = 1d$; Versuch 1d

Die Bruchlast der Platte P6 betrug F_u = 1496,4 kN.

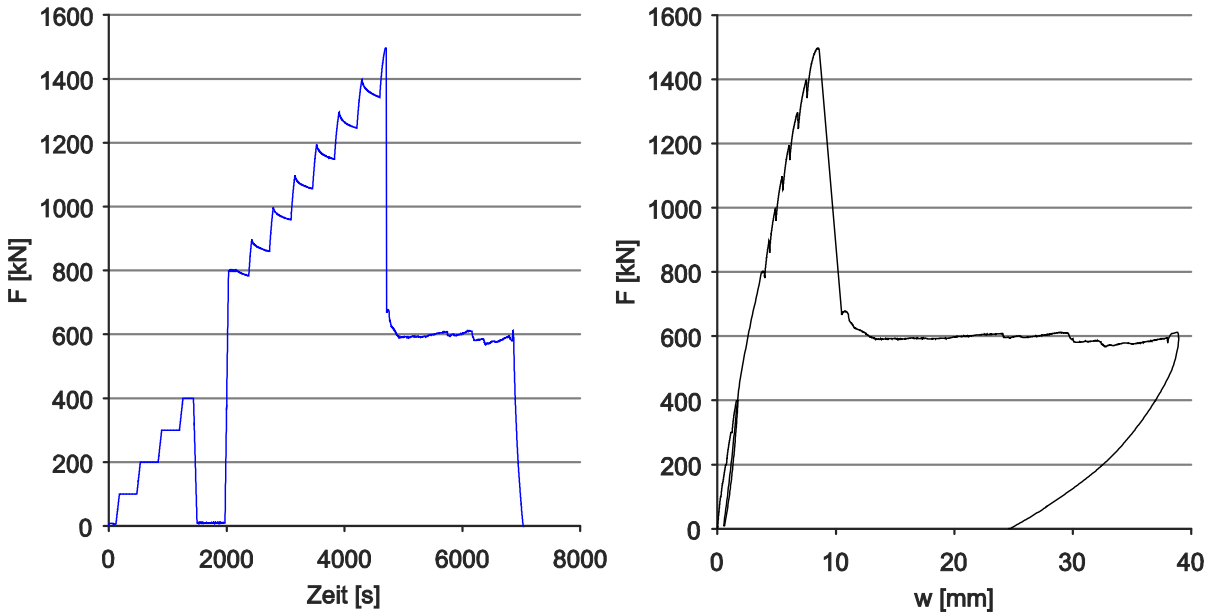


Bild 32: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P6, 1d

Nach Überschreiten der Höchstlast viel die Tragfähigkeit der Platte schlagartig auf ca. 600 kN ab. Dieser Wert wurde bis zum Ende des Versuchs gehalten.

Der Schrägriss schlug während des Versuchs nicht bis nach außen durch, der Verlauf auf der Außenseite deutete sich aber bereits an. Der Versuch wurde aufgrund der starken Zerstörung im Lasteinleitungsbereich abgebrochen, um diesen Bereich auch nach dem Zerschneiden noch auswerten zu können.

3.7.7 Versuch P7: $a_v = 2d$; Versuch 2d-2

Die Bruchlast der Platte P7 betrug F_u = 896,5 kN. P7 war der erste Wiederholungsversuch der Versuchsreihe. Der Versuchsaufbau entsprach dem von P5.

Nach Überschreiten der Höchstlast viel die Tragfähigkeit der Platte auf ca. 550 kN ab. Das Verhalten entsprach bis auf die Traglast dem Verhalten von P5 mit gleicher Laststellung. Die Traglast lag aber ca. 90 kN niedriger, was einer Abweichung von 10 % entspricht.

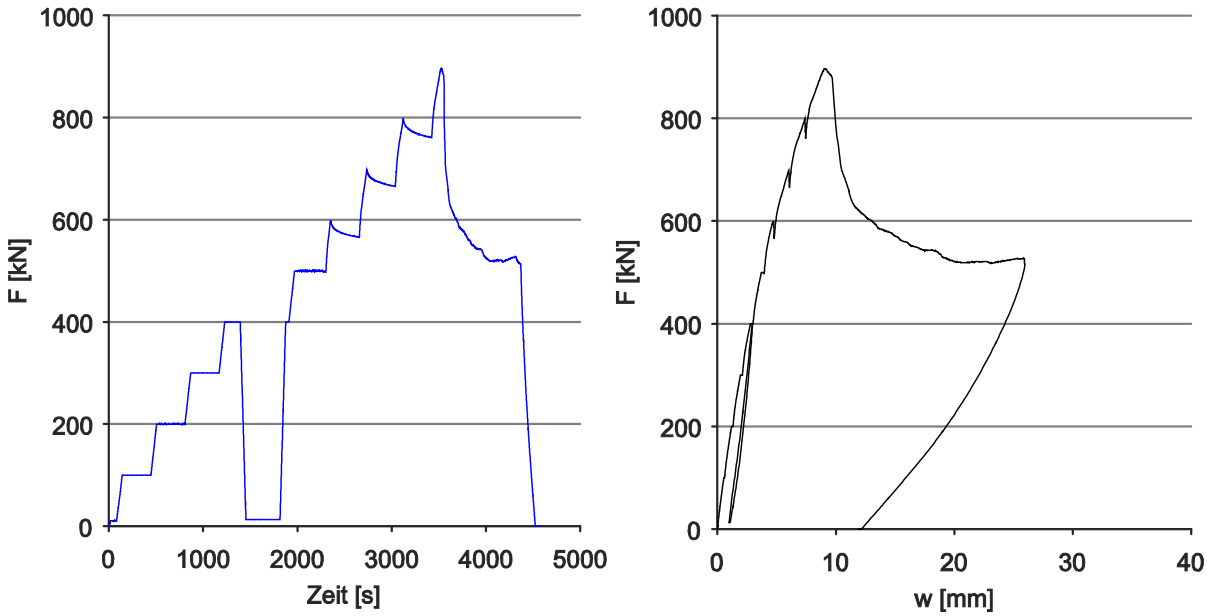


Bild 33: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P7, 2d-2

3.7.8 Versuch P8: $a_v = 3d$, Doppellast; Versuch 3dò2

Die Bruchlast der Platte P8 betrug F_u = 873,8 kN. Die Lasten wurden jeweils in 100 kN-Schritten je Einzellast gesteigert. Es ergaben sich daher im Lastzeitdiagramm Laststufen zu 200 kN.

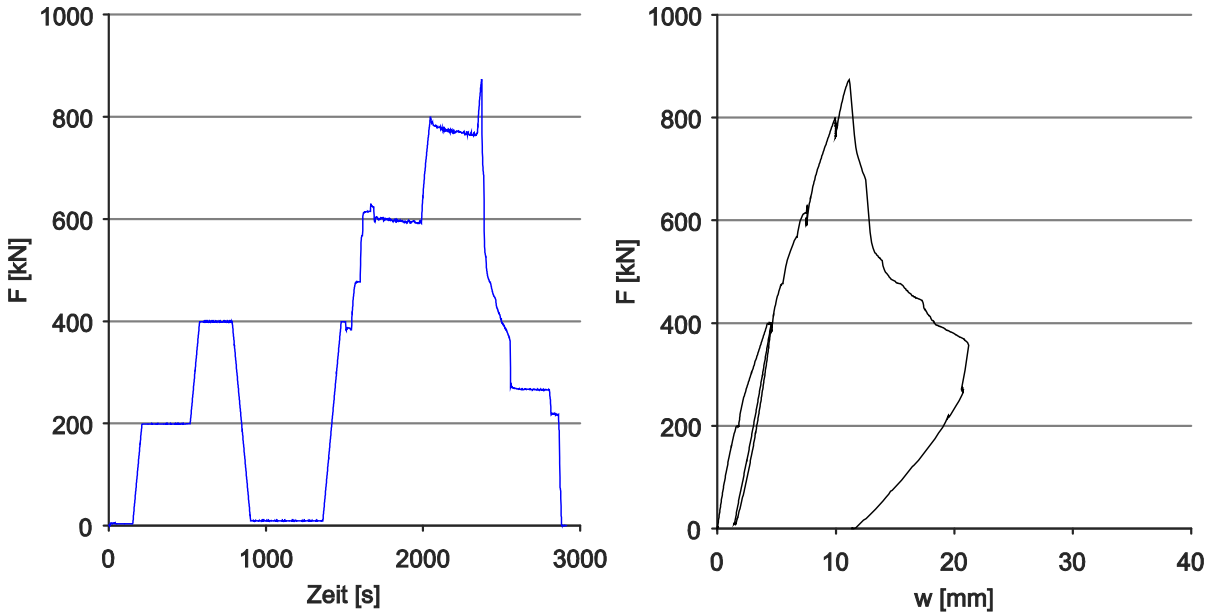


Bild 34: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P8, 3dò2

Nach Erreichen der Höchstlast fiel die Traglast schnell bis auf ca. 500 kN als Summe für beide Lasten ab. Nach weiterer Wegsteigerung wurde ein Traglastniveau von ca. 280 kN erreicht.

3.7.9 Versuch P9: a_v = 2*d*, Doppellast; Versuch 2dò2

Die Bruchlast der Platte P9 betrug F_u =992,5 kN.

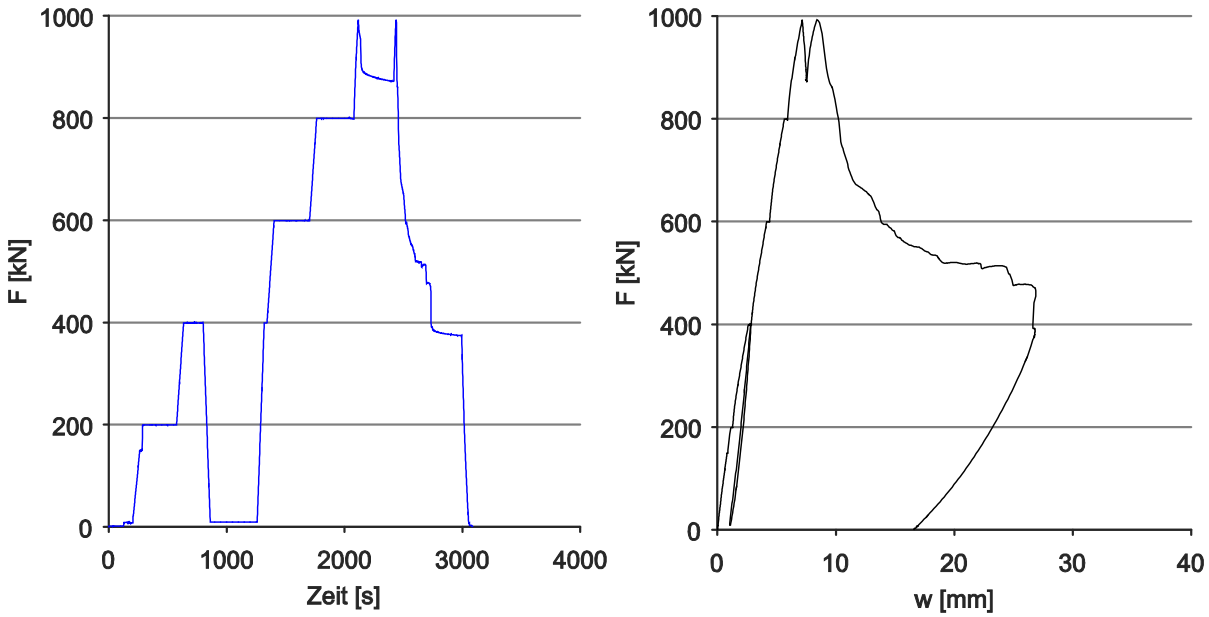


Bild 35: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P9, 2dò2

Nach Erreichen der Höchstlast fiel die Traglast zunächst bis auf 871 kN ab, konnte aber im weiteren Verlauf wieder exakt bis auf den Wert von 992,5 kN gesteigert werden. Das Versagen der Platte ging im Vergleich zu den bisher durchgeführten Versuchen sehr geräuscharm und ohne größerer Vorankündigung einher. Dass die Platte wirklich die Maximalkraft überschritten hatte, konnte nur anhand der Lastverformungskurve während des Versuchs erkannt werden. Die Erwartungen hinsichtlich der Traglast lagen im Vorhinein deutlich höher. Danach fiel die Last schnell bis auf ca. 600 kN für beide Lasten ab. Nach weiterer Wegsteigerung fiel die Resttragfähigkeit bis auf 500 kN ab. Nach Austreten des Schrägrisses auf der linken Seite wurde ein Traglastniveau von ca. 380 kN erreicht.

3.7.10 Versuch P10: a_v = 4*d*, Doppellast; Versuch 4dò2

Die Bruchlast der Platte P10 betrug F_u = 930,3 kN. Die Lasten wurden jeweils in 100 kN-Schritten je Einzellast gesteigert. Nach Überschreiten der Höchstlast bewegte sich die Resttragfähigkeit zunächst in einem Bereich um 850 kN – 900 kN und fiel dann schlagartig auf ca. 450 kN ab. Der Schrägriss trat auf der linken Seite von vorne gesehen aus. Danach fiel die Resttragfähigkeit auf ca. 280 kN ab.

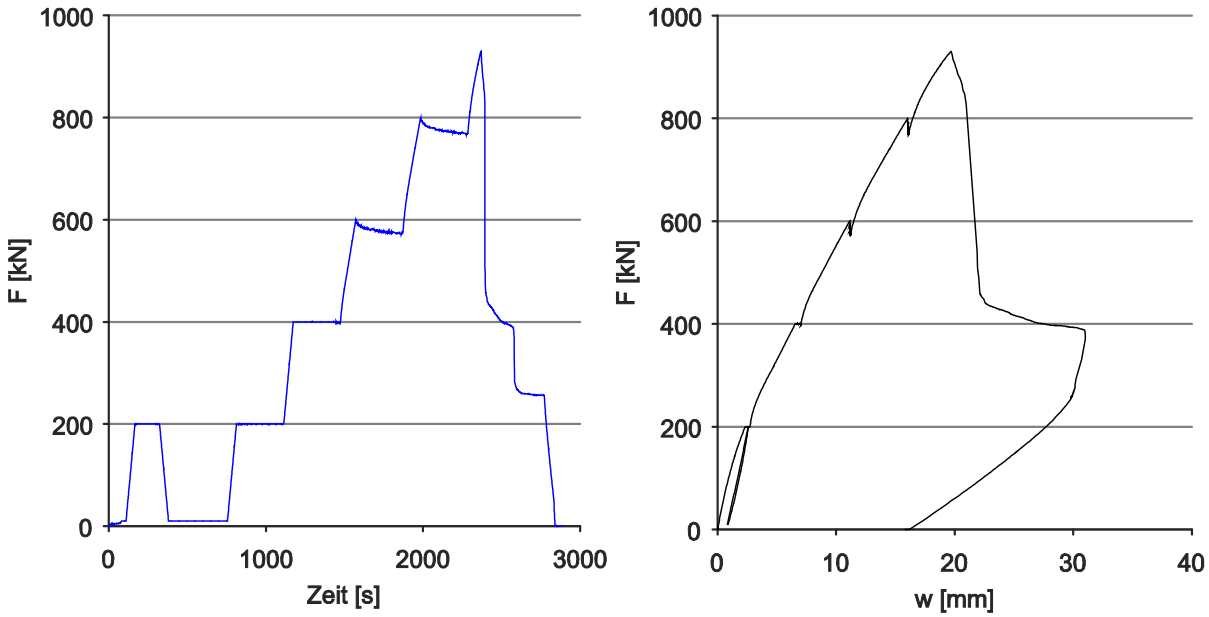


Bild 36: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P10, 4dò2

3.7.11 Versuch P11: $a_v = 3d$; Versuch 3d-2

Die Bruchlast der Platte P11 betrug F_u = 679,6 kN. Die Lasten wurden jeweils in 100 kN-Schritten gesteigert. P11 ist der zweite Wiederholungsversuch.

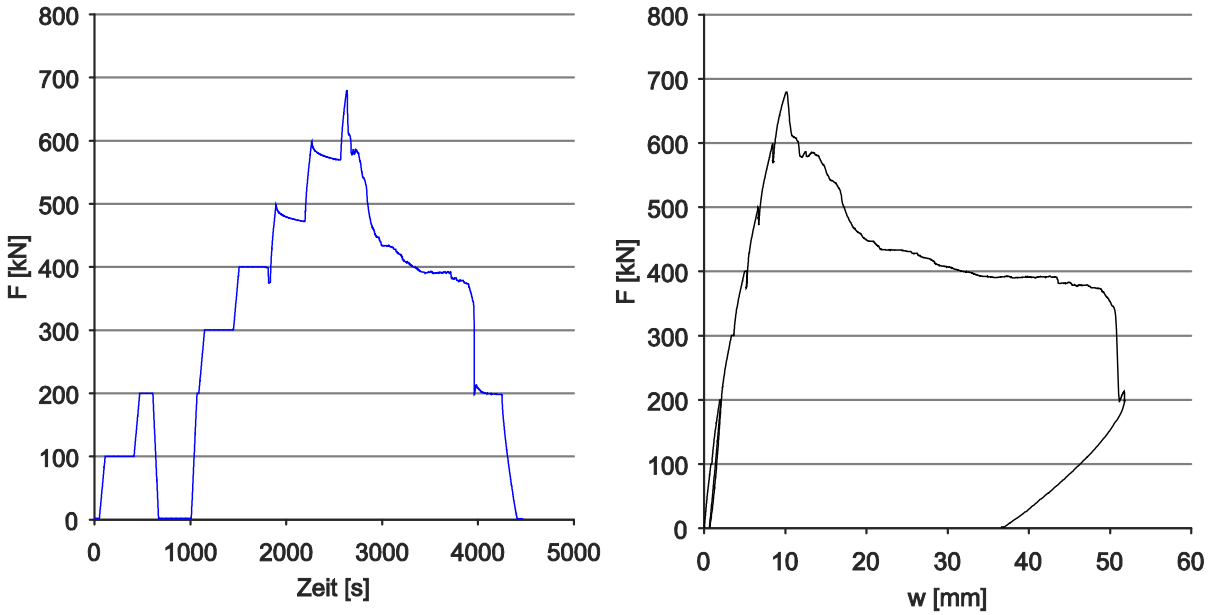


Bild 37: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P11, 3d-2

Nach Überschreiten der Höchstlast viel die Tragfähigkeit zunächst auf 590 kN ab. Nach weiterer Wegsteigerung stellte sich ein Lastniveau von ca. 400 kN ein. Nachdem der Schrägriss auf der linken Seite austrat, fiel die Resttragfähigkeit auf 200 kN ab.

Die Lastanordnung entspricht der von P1. Die Traglast lag bei diesem Versuch um 50 kN über der von P1.

3.7.12 Versuch P12: $a_v = 5d$, Doppellast; Versuch 5dò2

Die Bruchlast der Platte P12 betrug F_u = 951,7 kN.

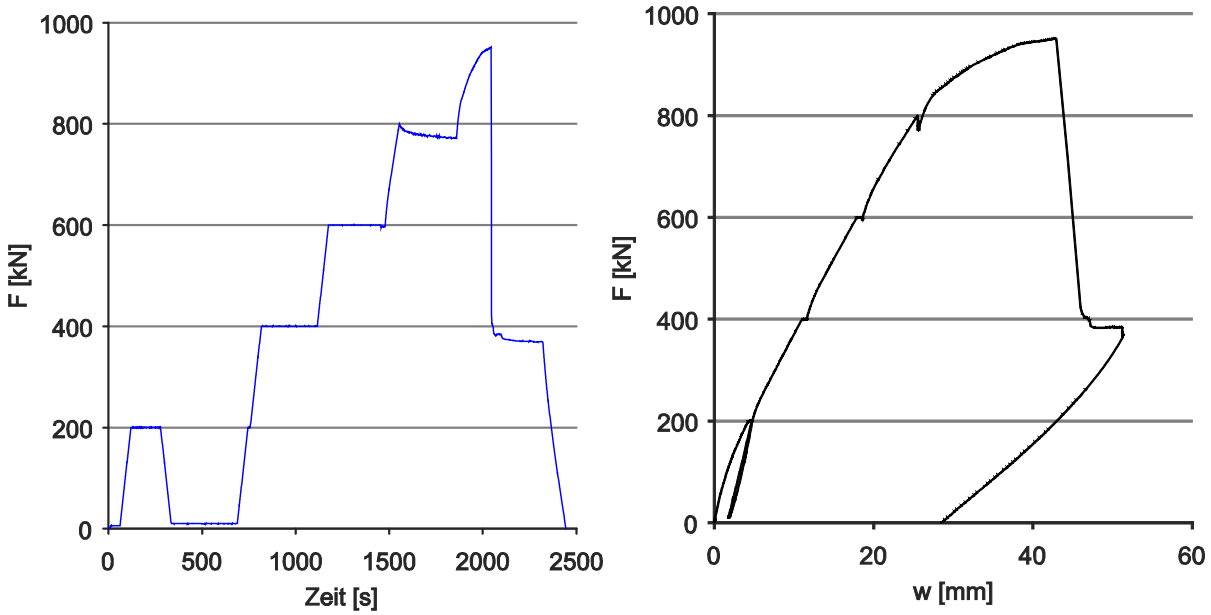


Bild 38: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P12, 5dò2

Dem Erreichen der Höchstlast ging eine Phase mit größerer Biegeverformung voraus, die ein Fließen der oberen Biegebewehrung vermuten ließ. Die spätere Auswertung ergab, dass die Biegebewehrung die Fließdehnung in einem größeren Bereich überschreitet, bevor es zu einem Versagen kommt. Die Lastverformungskurve zeigt eine deutliche Änderung der Steifigkeit ab ca. 850 kN. Trotzdem kam es zu einem Querkraftversagen der Platte mit charakteristischem Schrägriss. Dabei überlagerten sich mehrere Versagensfiguren. Auf der Unterseite der Platte trat der Schrägriss vor dem Steg aus. Wie schon bei den Versuchen unter einer Einzellast verläuft der Riss auf der Plattenunterseite zunächst bogenförmig um die Lasteileitung herum, und biegt dann Richtung Steg ab.



Bild 39: Rissbild auf der Plattenunterseite mit dem gekennzeichneten Verlauf des Austritts des Schrägrisses

Auf der rechten Seitenfläche ergab sich aber nicht der charakteristische Verlauf wie bei den anderen Versuchen, die ein auflagerparalleles Versagen aufweisen. Der Riss verläuft an den Seitenflächen in der Plattenmitte zwischen den beiden Bewehrungslagen und verläuft daher nicht wirklich schräg durch die Platte von oben nach unten. Der Riss geht zum Auflager hin nicht entlang der unteren Bewehrung.

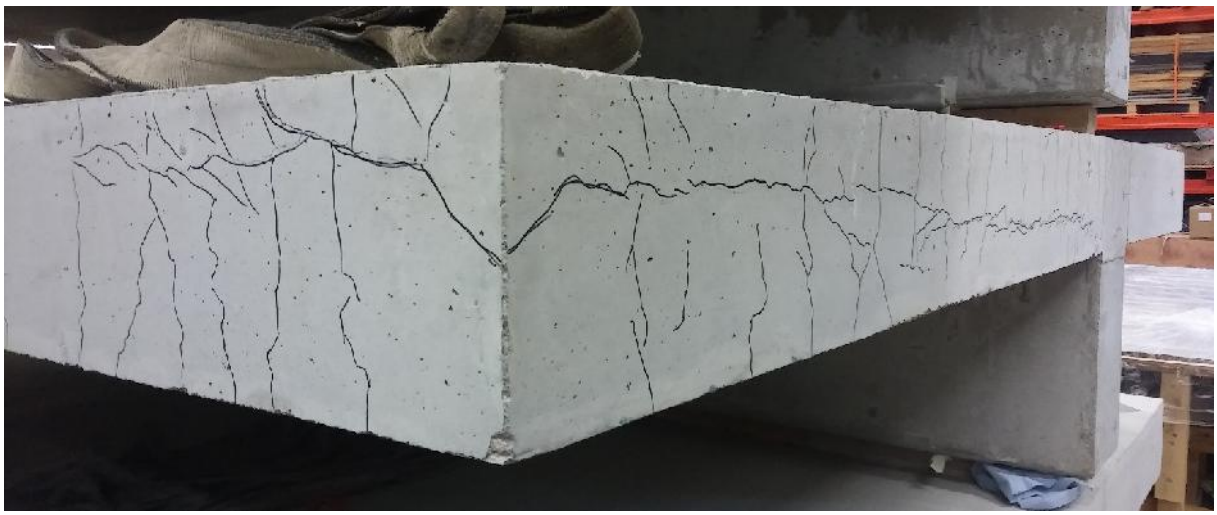


Bild 40: Rissbild auf den Seitenflächen – Versuch P12



Bild 41: Eingedrückte Lastplatten mit Versagensriss auf der Oberseite analog zu Bild 44

Es ergaben sich große Einrückungen der Lastplatte in die Stahlbetonplatte.
Auf der vorderen Fläche am Kragarmende wird im Bereich der von vorne gesehenen linken Last ein vertikaler Riss sichtbar, der für ein Ausbrechen oder Durchstanzen der Doppellast spricht.



Bild 42: Rissverlauf linke Seite (von vorne) - Versuch P12

Auf der linken Seitenfläche verläuft der sich ausbildende Schrägriss von oben nach unten durch die Platte und nähert sich der unteren Bewehrungslage an. Der Riss ist aber nicht voll ausgebildet. In der Videoaufzeichnung des Versuches ist eindeutig zu erkennen, dass der Bereich der Lasteinleitung nach unten herausgedrückt wird, während die Randbereiche der Platte rund um die Last entlastet werden und sich dabei nach oben bewegen. Der herausbrechende Bereich bildet sich dabei unmittelbar neben den beiden Lastplatten und zeichnet sich durch zwei parallele Risse jeweils rechts und links der Lasteinleitung aus (vgl. Bild 44).



Bild 43: Platte kurz vor Erreichen der maximalen Last für Versuch P12

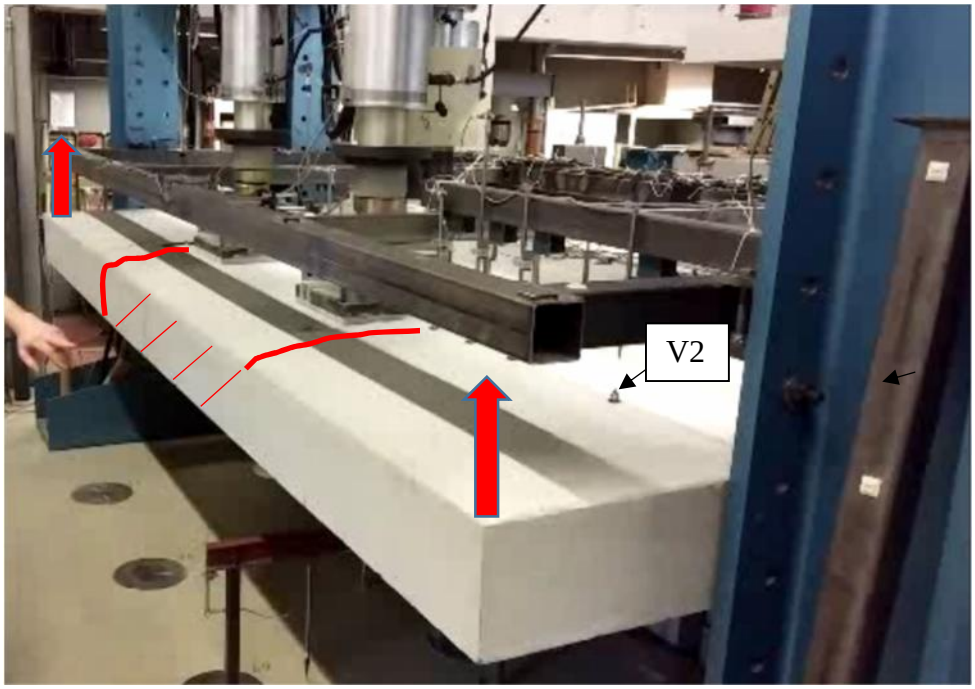


Bild 44: Platte nach Überschreiten der Maximallast für Versuch P12, V2 gekennzeichnet

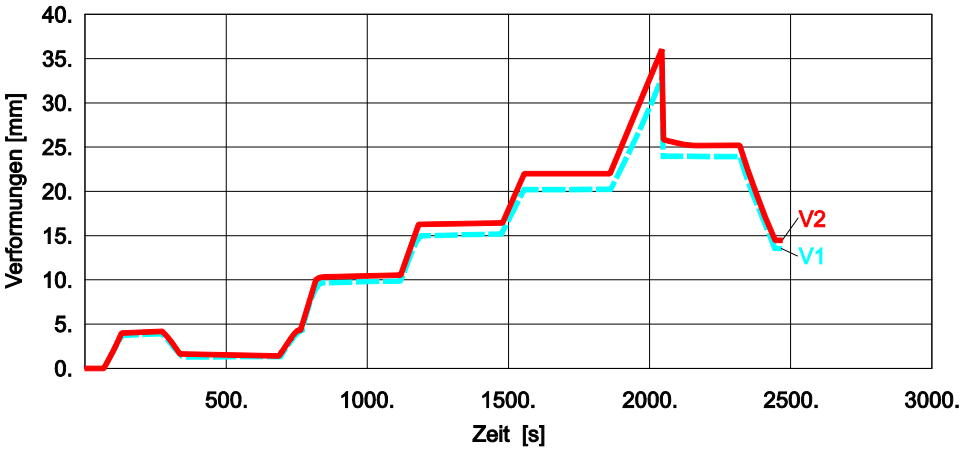


Bild 45: Verformungen gemessen durch die Wegaufnehmer V1 und V2

Bild 45 zeigt den Verlauf der beiden Verformungsmessungen V1 und V2 im rechten Außenbereich der Platte. Die genaue Anordnung der Wegaufnehmer kann Bild 103 S. B-12 entnommen werden. Deutlich ist der Sprung der Verformung nach ca. 2000 Sekunden nach Überschreiten der Höchstlast zu erkennen, wenn sich die Plattenränder sich um gut 1 cm wieder nach oben bewegen, was ca. 30 % der Gesamtverformung entspricht.

Nach Erreichen der Höchstlast fiel die Tragfähigkeit schlagartig auf 380 kN ab.

3.7.13 Versuch P13: $a_v = 4d$; reduzierte Bewehrung auf der Plattenoberseite

Die Bruchlast der Platte P13 betrug F_u = 725,5 kN.

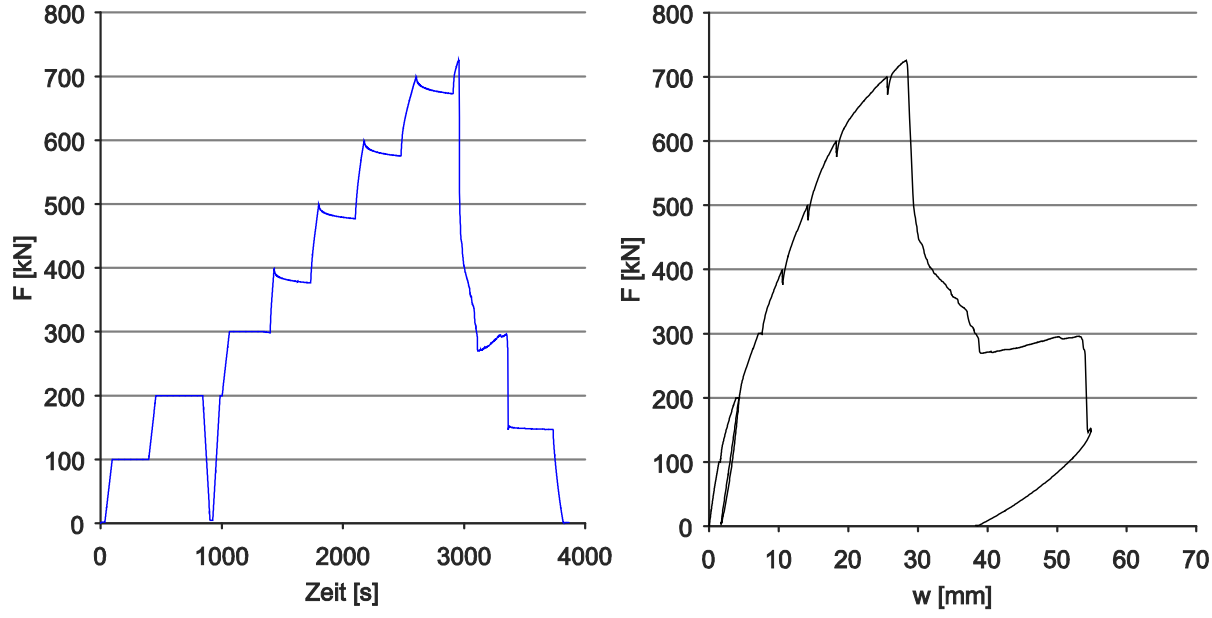


Bild 46: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P13, 4d-2

Oberhalb von 600 kN ist ein erhöhter Verformungsgradient zu erkennen, der darauf schließen lässt, dass die obere Kragarmbewehrung ∅14-10 ins Fließen übergeht. Nach Erreichen der Höchstlast fiel die Traglast schnell auf ca. 280 kN ab. Anschließend ist ein leichter Lastanstieg bei zunehmender Verformung bis 300 kN zu beobachten. Im Bereich der Lasteinleitung kommt

es zu einem starken Eindrücken der Lastplatte. Bei P13 wurden abweichend zu den vorangegangenen Versuchen die Betondehnungen an der Oberseite der Platte im Bereich der Lasteinleitung gemessen.

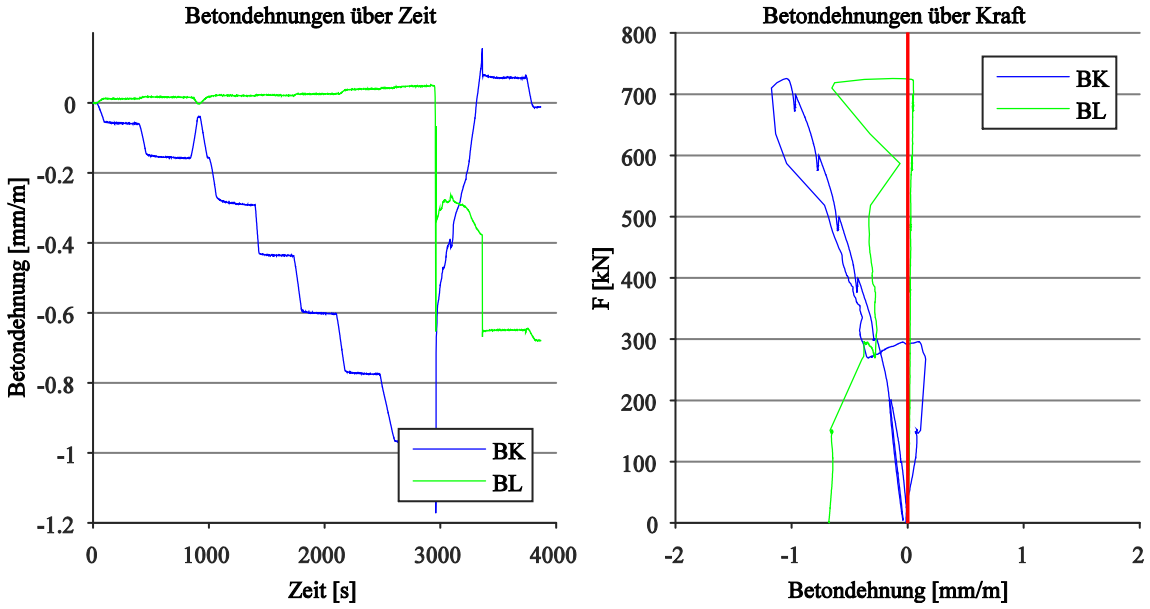


Bild 47: Betondehnungen im Bereich der Lasteinleitung für Versuch P13; 4d-2

Bis zum Erreichen der Maximallast steigt die Betonstauchung rechtwinklig zum Hauptlastabtrag (HK) kontinuierlich an. Das positive Biegemoment in Querrichtung im Bereich der Lasteinleitung nimmt demnach ebenfalls kontinuierlich und nahezu linear mit größer werdender Last zu. In Richtung des Lastabtrags zeigen die Betondehnungen (HL) kleine Werte im positiven Bereich an. Es liegt somit ein kleines negatives Biegemoment (Kragmoment) im Bereich vor der Lasteinleitung vor. Nach Überschreiten der Traglast schlägt das Biegemoment auf die negative Seite um und nimmt schlagartig große Werte an. Ob dieses Durchschlagen auf ein ruckartiges Versetzen des Dehnungsaufnehmers durch Erschütterungen beim Versagen der Platte oder durch Lastumlagerungen durch die Änderung des Systems beim Versagen zurückzuführen ist, lässt sich nicht abschließend klären.

3.7.14 Versuch P14: $a_v = 4d$; reduzierte Bewehrung auf der Plattenunterseite

Die Bruchlast der Platte P14 betrug F_u = 682 kN. Die Traglast entspricht damit in etwa dem Wert von P3/4d-1 mit 677 kN mit Standard-Querbewehrung.

Die Abminderung der unteren Bewehrung hat demnach keinen nachweisbaren Einfluss auf die Tragfähigkeit der Platte.

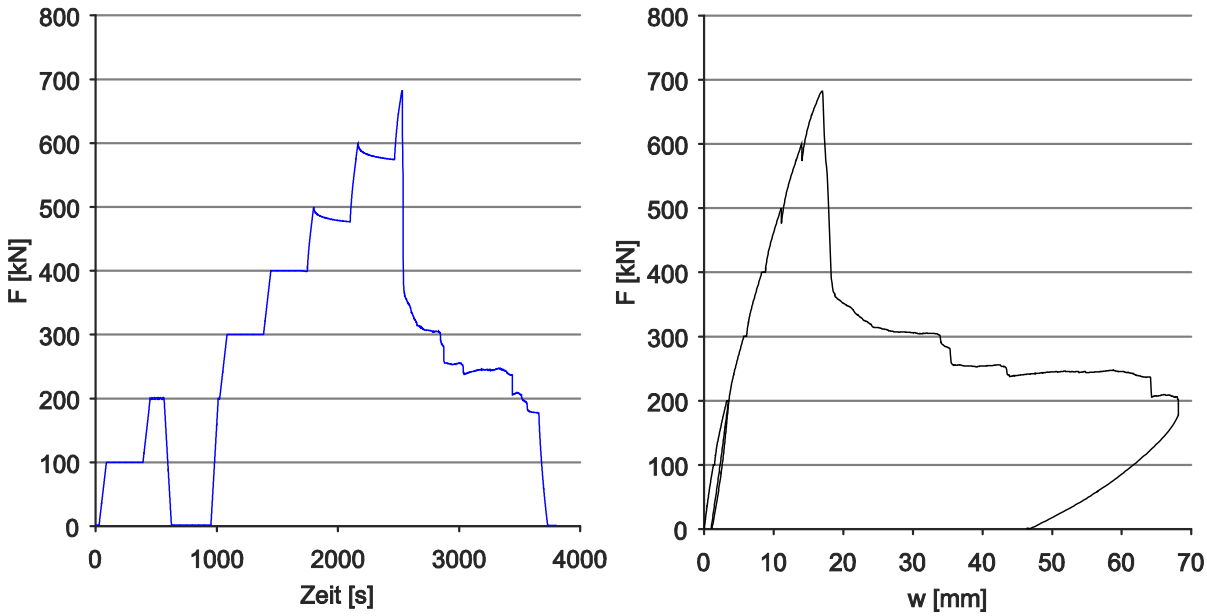


Bild 48: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P14

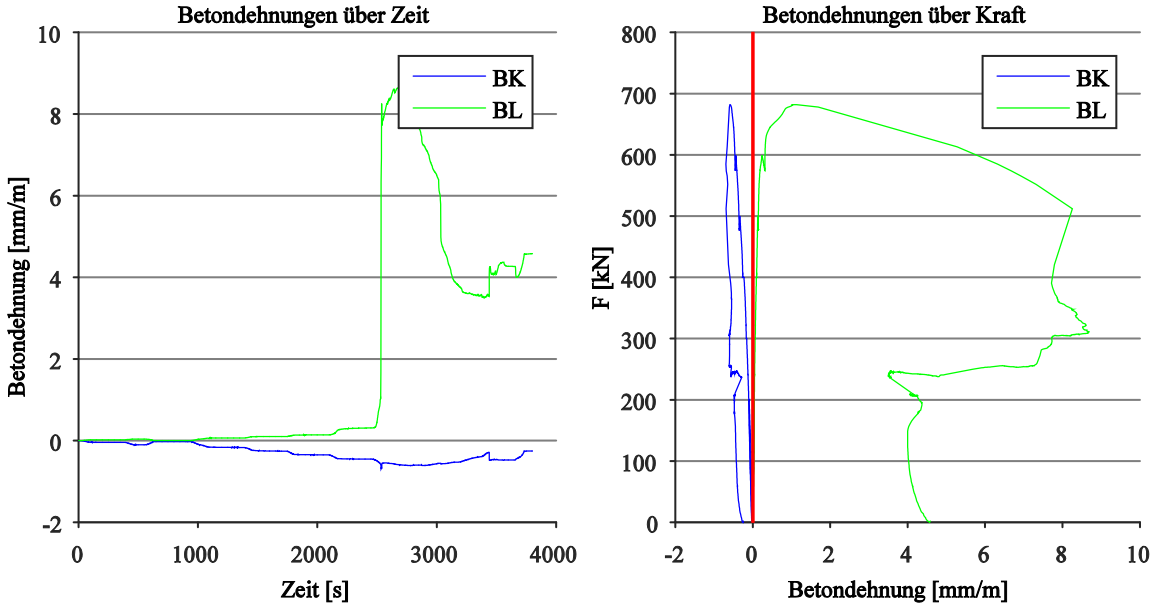


Bild 49: Betondehnungen im Bereich der Lasteinleitung Versuch P14

Wie bei Versuch P13 wurden die Betondehnungen im Bereich der Lasteinleitung gemessen. Bis zum Erreichen der Maximallast steigt die Betonstauchung rechtwinklig zum Hauptlastabtrag (BK) kontinuierlich an. Die Werte sind aber kleiner als bei P13, was darauf hindeutet, dass auch das Biegemoment in Querrichtung geringer ist. Ob die veränderte obere Bewehrung oder die veränderte untere Bewehrung hier einen Einfluss hat kann nicht abschließend geklärt werden. Das positive Biegemoment in Querrichtung im Bereich der Lasteinleitung steigt kontinuierlich nahezu linear mit zunehmender Last. In Richtung des Lastabtrags zeigen die Betondehnungen (BL) kleine Werte im positiven Bereich an. Es liegt also ein kleines negatives Biegemoment (Kragmoment) im Bereich vor der Lasteinleitung vor. Nach Überschreiten der Traglast erhöht sich die Betondehnung plötzlich um ein Vielfaches im positiven Bereich. Ob diese

schlagartige Änderung auf ein ruckartiges Versetzen des Dehnungsaufnehmers durch Erschütterungen beim Versagen der Platte oder durch Lastumlagerungen durch die Änderung des Systems beim Versagen zurückzuführen ist, lässt sich nicht abschließend klären. Ein Durchschlagen der Dehnungen wie bei P13 lässt sich nicht beobachten.

3.7.15 Versuch P15: $a_v = 1{,}0d - 5{,}0d$; Meterstreifen

Die Bruchlast der Platte P15-1d betrug F_u = 623,0 kN. Die Lasten wurden jeweils in 50kN-Schritten gesteigert. Nach Erreichen der Höchstlast fiel die Traglast schlagartig auf ca. 150 kN ab und ging unter geringer Zunahme der Verformungen auf ca. 40 kN zurück (Bild 50).

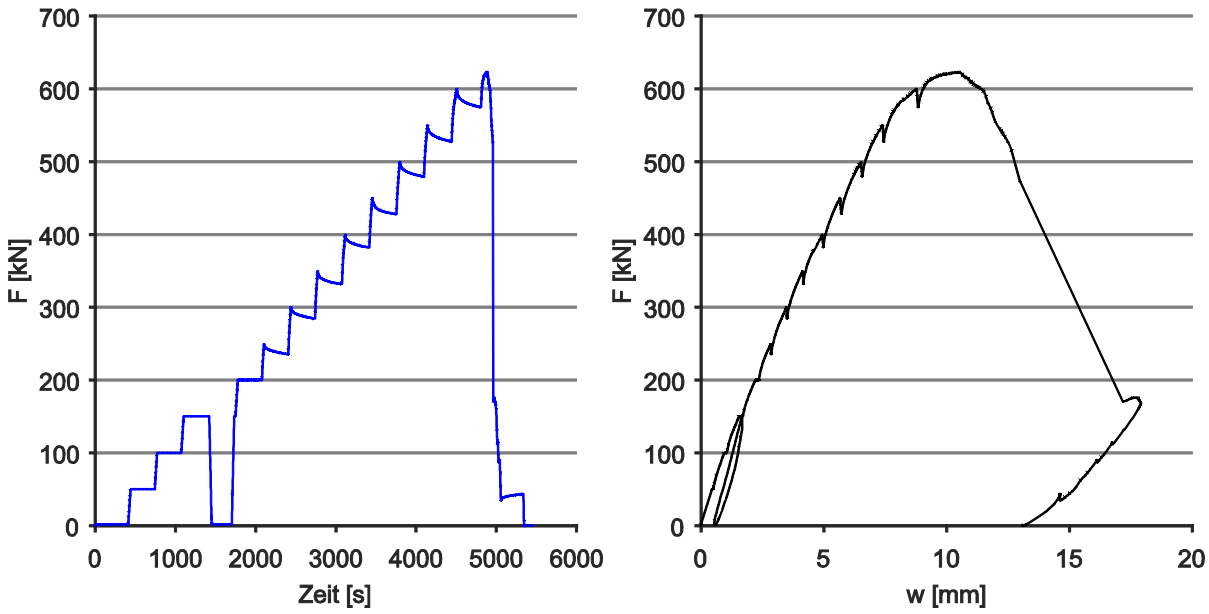


Bild 50: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P15-1d

Die Bruchlast der Platte P15-2d betrug F_u = 300,0 kN. Die Lasten wurden jeweils in 50kN-Schritten gesteigert. Nach Erreichen der Höchstlast fiel die Traglast schlagartig auf ca. 100 kN ab (Bild 51).

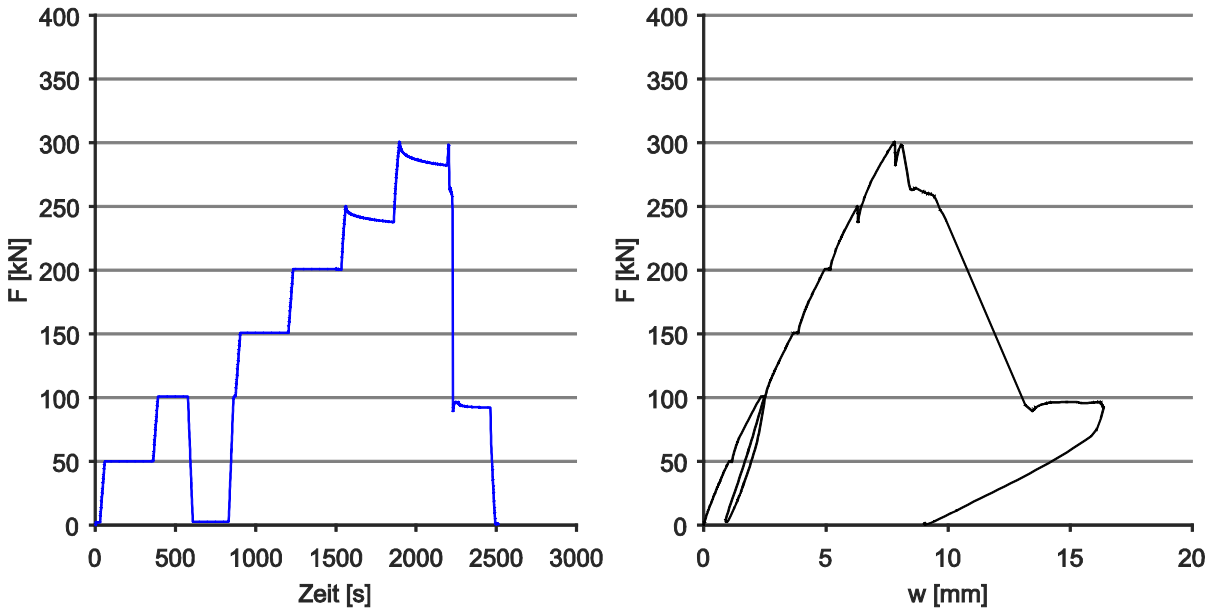


Bild 51: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P15-2d

Die Bruchlast der Platte P15-3d betrug F_u = 306,0 kN. Die Lasten wurden jeweils in 50kN-Schritten gesteigert. Nach Erreichen der Höchstlast fiel die Traglast schlagartig auf ca. 60 kN ab (Bild 52).

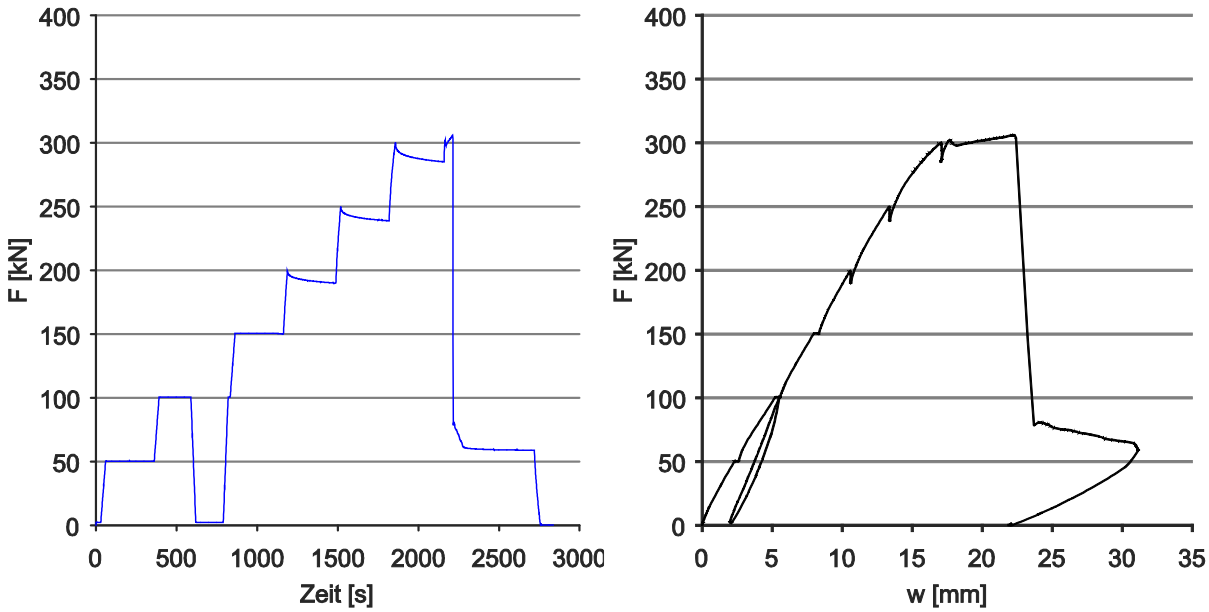


Bild 52: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P15-3d

Die Bruchlast der Platte P15-5d betrug F_u = 211,0 kN. Die Lasten wurden jeweils in 50 kN-Schritten gesteigert. Nach Erreichen der Höchstlast ging die Tragfähigkeit allmählich bis auf ca. 200 kN zurück (Bild 53).

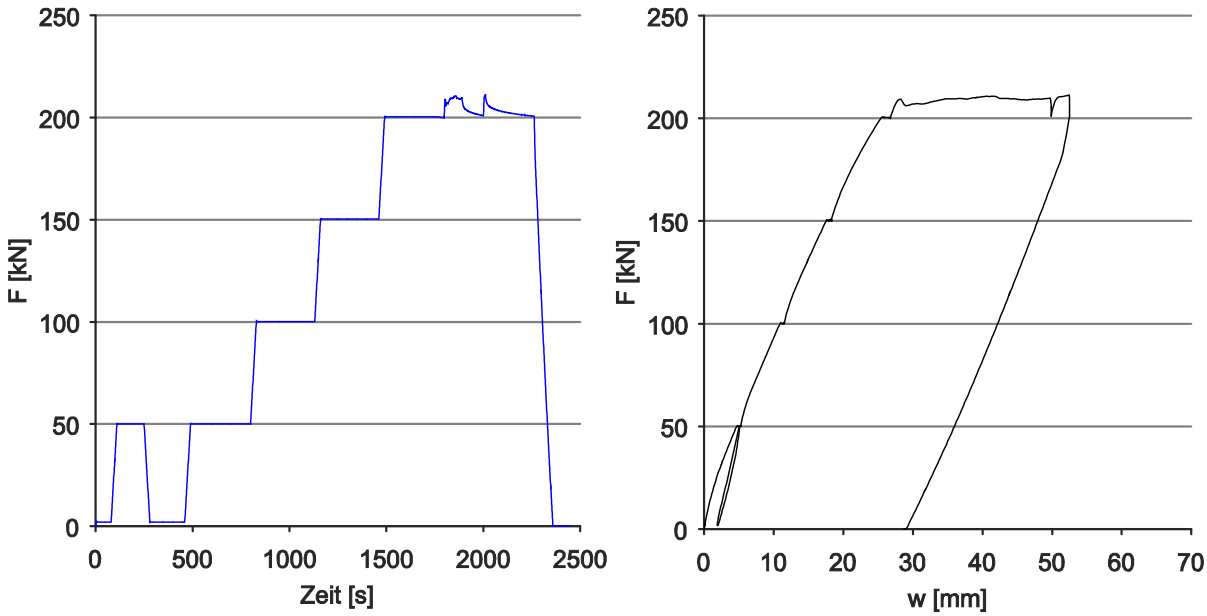


Bild 53: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P15-5d

Aus der Traglast der Platte konnte auf die Momententragfähigkeit zurückgeschlossen werden. Bei einem Lastabstand von $a_v = 5{,}0d = 5 \cdot 21{,}5$ cm = 107,5 cm ergibt sich ein maximales Biegemoment der Platte an der Einspannstelle, bezogen auf den Lastmittelpunkt, von

$M_{pl} = (0{,}2 \text{ m} + 1{,}075 \text{ m}) \cdot 211 \text{ kN} = 269 \text{ kNm}$.

Bei einer Querkrafttragfähigkeit von ca. 300 kN für die Laststellungen bei $a_v = 2{,}0d$ und $3{,}0d$ war abzusehen, dass die Laststellung bei $4d$ ebenfalls auf Biegung versagen würde. Die Laststellung $4d$ wurde daher nicht getestet.

Die Platte P15-5d wurde zum Abschluss der Versuchsreihe noch einmal mit der Lastplatte bei $a_v = 1d$ belastet (Bild 54). Die Bruchlast der Platte lag bei $F_u = 565$ kN. Auf eine stufenweise Belastung wurde im letzten Versuch verzichtet. Die Platte versagte dann unter Querkraft mit charakteristischem Schrägriss.

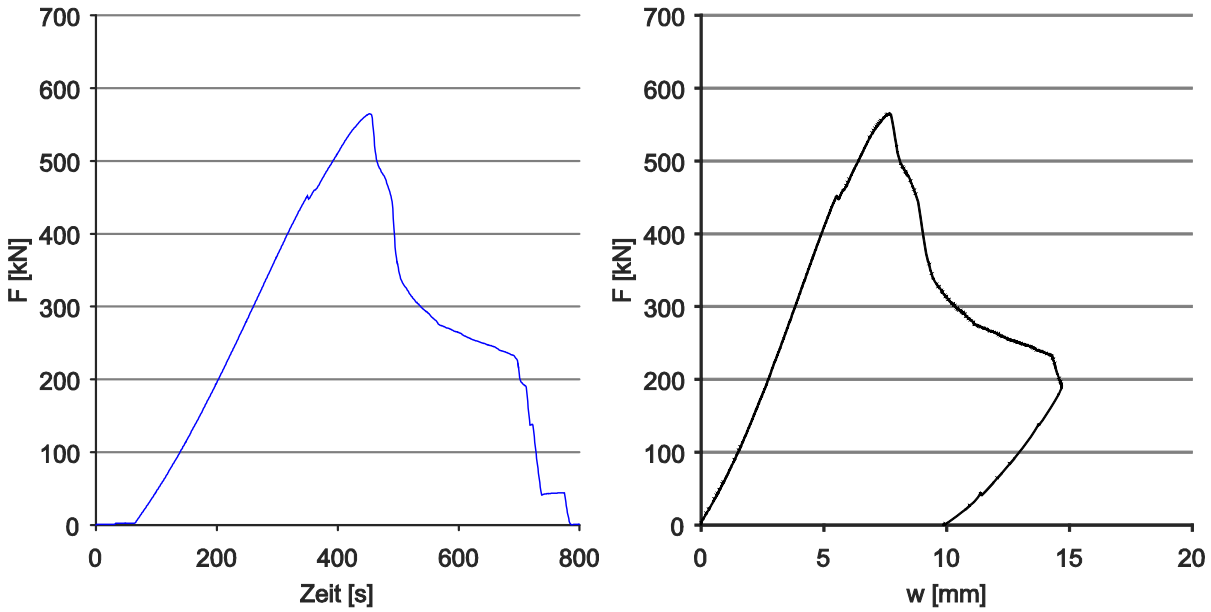


Bild 54: Kraft-Zeit-Kurve sowie Last-Verformungskurve bei Wiederbelastung von P15-5d bei $a_v = 1{,}0d$

3.8 Dokumentation der Rissbilder und Zerlegung der Versuchskörper

Die Rissbilder wurden nur nach Beendigung der Versuche angezeichnet und fotografiert. Eine Dokumentation der Rissverläufe während des Versuchs war aufgrund der beengten Platzverhältnisse im Versuchsstand durch die Messtechnik und aus Sicherheitsgründen nicht möglich.

Nach dem Anzeichnen und Aufnehmen der Risse wurden Sägeschnitte mithilfe eines Fugenschneiders hergestellt. Diese dienten zum einen der Dokumentation der Rissverläufe innerhalb der Platten, und zum anderen der Zerlegung der zerstörten Versuchskörper für den Abtransport.

Das Zersägen der Platten konnte nur außerhalb der Versuchshalle durchgeführt werden. Während des Schneidvorgangs entstehen größere Mengen an Staub und Schlamm, die in der Versuchshalle zu Verschmutzungen geführt hätten. Um die ca. 10,6 t schweren Platten aus der Versuchshalle zu transportieren, stand im Außenbereich kein Kran zur Verfügung. Es wurde daher ein Transportwagen gebaut, auf dem die Platten mittels Kettenzug vor die Halle gezogen werden konnten. Da die Versuchskörper mit 4,5 m Breite nach dem Schließen des Hallentors in den geneigten Bereich der Zufahrtsrampe der Halle hineinragten, wurde eine auskragende Bugkonstruktion wie in Bild 55 verwendet. Das Schneiden erfolgte dann ebenfalls auf dem Transportwagen. Nach dem Zerlegen, konnten die Einzelteile auf dem Wagen verbleiben und wurden zurück in die Halle gerollt.

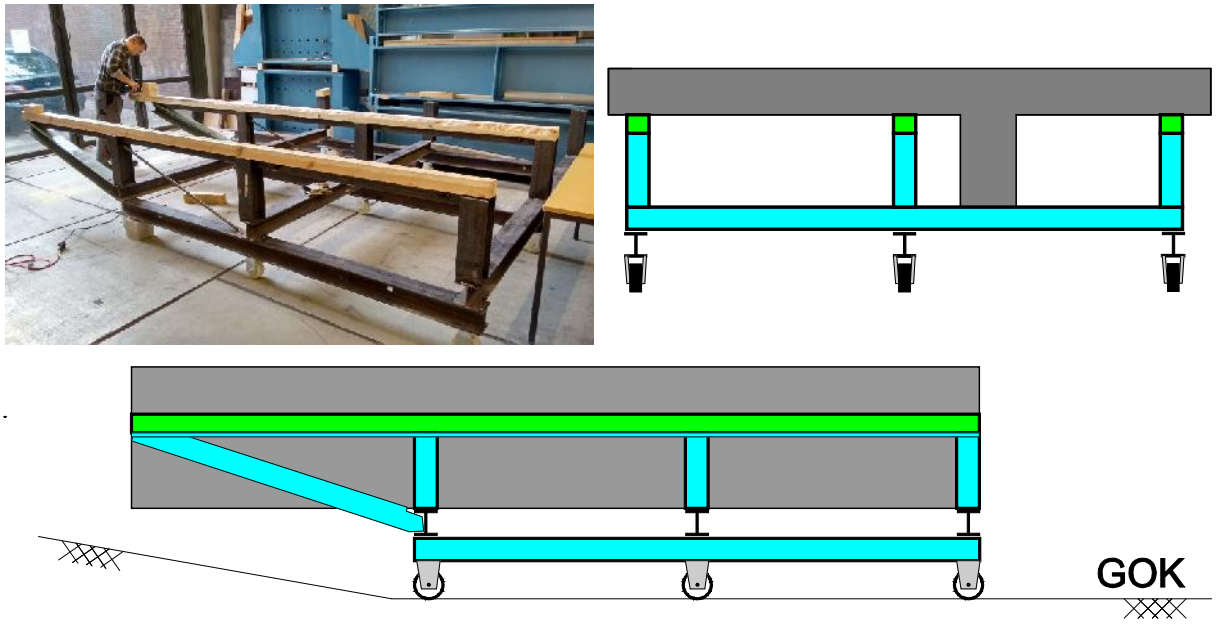


Bild 55: Transportwagen



Bild 56: Versuchskörper P1 nach dem Zerschneiden



Bild 57: Rissbild im Inneren von P1

Die Rissbilder und Sägeschnitte der einzelnen Versuche sind im Abschnitt 3.9.6 dokumentiert.

3.8.1 Reale statische Nutzhöhe der Versuchskörper

Beim Verlegen der Bewehrung wurde auf eine möglichst genaue Einhaltung der statischen Nutzhöhe der oberen Längsbewehrung geachtet. Diese ergibt sich rechnerisch gemäß der Biegeliste Bild 5 zu:

$$d_{soll} = c_{v,unten} + h_{Stecke} - d_{s,Stecker} + d_{s,Ø16}/2 = 25\ mm + 188\ mm - 10\ mm + 8\ mm = 215\ mm$$

Geringe Abweichungen von der Solllage sind aber nicht zu vermeiden. Anhand der Sägeschnitte wurde die reale Lage der oberen Hauptbewehrung ermittelt und dokumentiert.

Die Abweichung von der Solllage wurde an jeweils 4 Bewehrungsstäben im mittigen Bereich der Platten gemessen. Tabelle 3 zeigt die ermittelten Werte.

Tabelle 3: Messwerte für die statische Nutzhöhe *d*; jeweils vier Werte je Versuchskörper

Versuch	d_{soll} [mm]	d_1 *[mm]*	d_2 *[mm]*	d_3 *[mm]*	d_4 *[mm]*	Δd_{max} [mm]
P1-3d-1	215	218	215	217	217	3
P2-5d	215	215	214	214	215	1
P3-4d-1	215	213	212	211	212	4
P4-6d	215	218	218	217	215	3
P5-2d-1	215	219	219	218	218	4
P6-1d	215	214	216	215	216	1
P7-2d-2	213	214	212	212	213	3
P8-3d×2	211	212	213	212	213	4
P9-2d×2	213	212	213	212	213	3
P10-4d×2	212	212	212	211	213	4
P11-3d-2	213	212	211	211	212	4
P12-5d×2	215	214	214	213	214	2
P13-4d	211	212	212	212	213	4
P14-4d	212	212	212	213	213	3

Die maximalen Abweichungen vom Sollmaß d = 215 mm betrugen bei allen Versuchen weniger als ± 4 mm, was 1,8% des Sollwertes entspricht, und liegen damit im Bereich üblicher Toleranzen. Sie werden daher bei der Ermittlung der rechnerischen Tragfähigkeiten nicht weiter berücksichtigt.

3.9 Zusammenstellung der Ergebnisse

3.9.1 Versagenslasten und wichtige Parameter

Tabelle 4: Zusammenstellung der Versagenslasten und wichtigen Parameter

Versuch	$v_{Rdm,EC2}$[1] [kN/m]	d [mm]	a_v/d	f_{ck}[2] [MPa]	$f_{ct,sp}$ [MPa]	F_{Test} [kN]	*Versuchs-datum*
P1-3d	258,9	215	3,0	33,8	3,0	630,1	18.06.2015
P2-5d	279,3	215	5,0	42,4	3,1	699,2	22.07.2015
P3-4d	264,4	215	4,0	36,0	2,8	677,4	03.09.2015
P4-6d	271,6	215	6,0	39,0	3,1	655,5	24.02.2016
P5-2d	281,2	215	2,0	43,3	3,5	983,5	28.04.2016
P6-1d	272,5	215	1,0	39,4	3,4	1496,4	06.06.2016
P7-2d	298,0	215	2,0	51,5	3,9	896,5	20.06.2016
P8-3d×2	292,7	215	2×3,0	48,8	3,8	873,8	15.07.2016
P9-2d×2	301,9	215	2×2,0	53,6	3,8	992,5	10.11.2016
P10-4d×2	278,2	215	2×4,0	41,9	3,7	930,3	27.09.2016
P11-3d	285,9	215	3,0	45,5	3,8	679,6	30.11.2016
P12-5d×2	295,8	215	2×5,0	50,4	4,0	951,7	23.01.2017
P13-4d-2	238,4	215	4,0	43,1	3,9	725,5	10.02.2017
P14-4d-3	275,7	215	4,0	40,8	3,7	682,0	22.02.2017
P15-1, 5d	261,5	215	5,0	38,8	-	211,0	23.03.2017
P15-2, 3d	266,6	215	3,0	40,9	-	306,0	06.04.2017
P15-3, 2d	268,8	215	2,0	41,8	-	300,0	11.04.2017
P15-4, 1d	268,8	215	1,0	41,8	-	623,0	13.04.2017
P15-5, 1d	-	215	1,0	38,8	-	565,0	03.05.2017

[1] $v_{Rdm,EC2} = 1{,}8\ v_{Rd,EC2}$
[2] $f_{ck} = f_{cm} - 4$ N/mm² (Laborbedingungen); f_{cm} zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung

3.9.2 Auswertung der Versuche mit einer Einzellast

In diesem Abschnitt werden zunächst nur die Versuche mit einer Einzellast betrachtet. Bild 58 zeigt die zugehörigen Last-Verformungskurven. Die Verformung wurde jeweils mittig unter der Lastplatte gemessen.

Lastverformungskurven

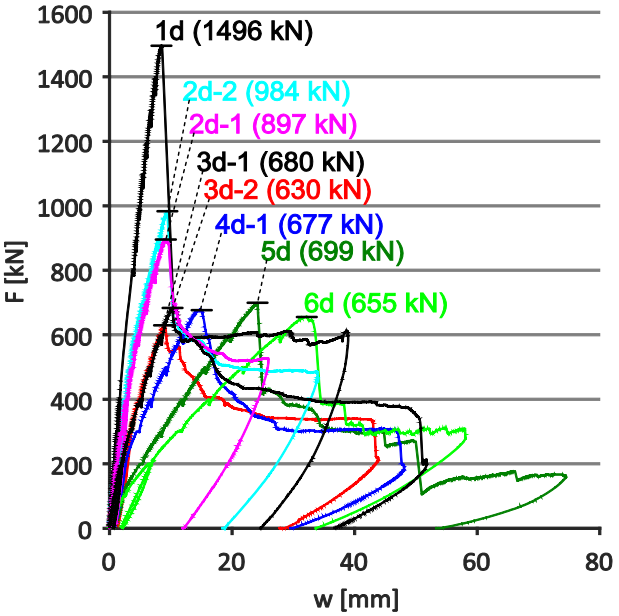


Bild 58: Last-Verformungskurven der Versuche mit einer Blocklast

Versagen

Beim Versagen können zwei Stufen im Versuchsverlauf benannt werden. Zunächst trat ein schräger Riss im Inneren der Platte im Lasteinleitungsbereich auf. Als zweite Stufe folgte eine weitere Laststeigerung nach Auftreten des Schrägrisses bis zur maximalen Traglast.

Der Rissverlauf konnte anhand der Sägeschnitte nach Durchführung der Versuche dokumentiert werden. Exemplarisch für die Ausbildung der schrägen Risse beim Versagen der Platte werden hier die Ergebnisse des Versuchs P4-6d und P6-1d genauer betrachtet.

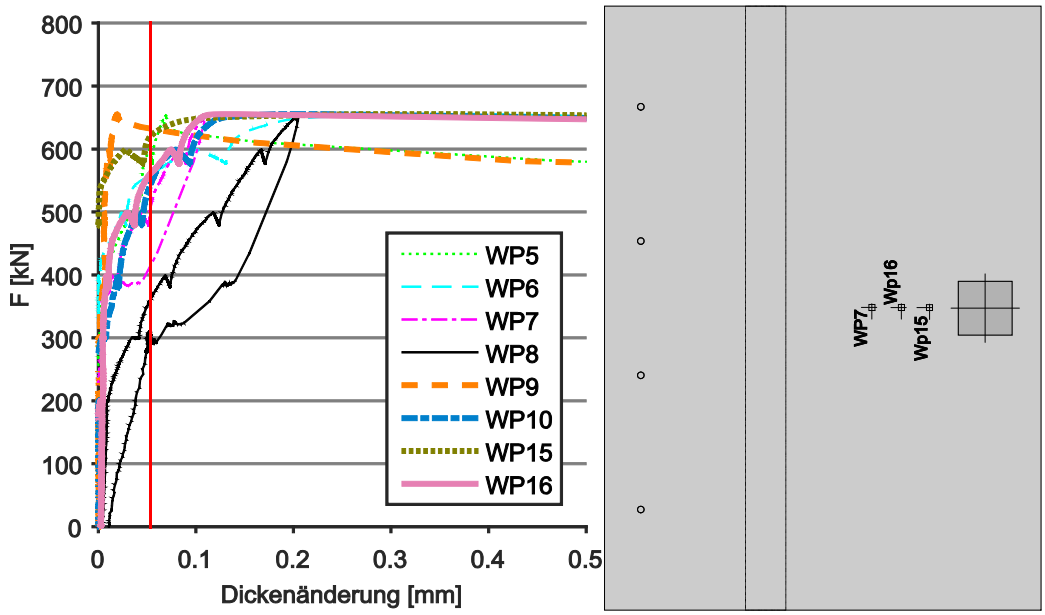


Bild 59: **Dickenänderungen der Platte P4-6d an ausgewählten Stellen während des Versuchs** (Messtechnik siehe auch Bild 95)

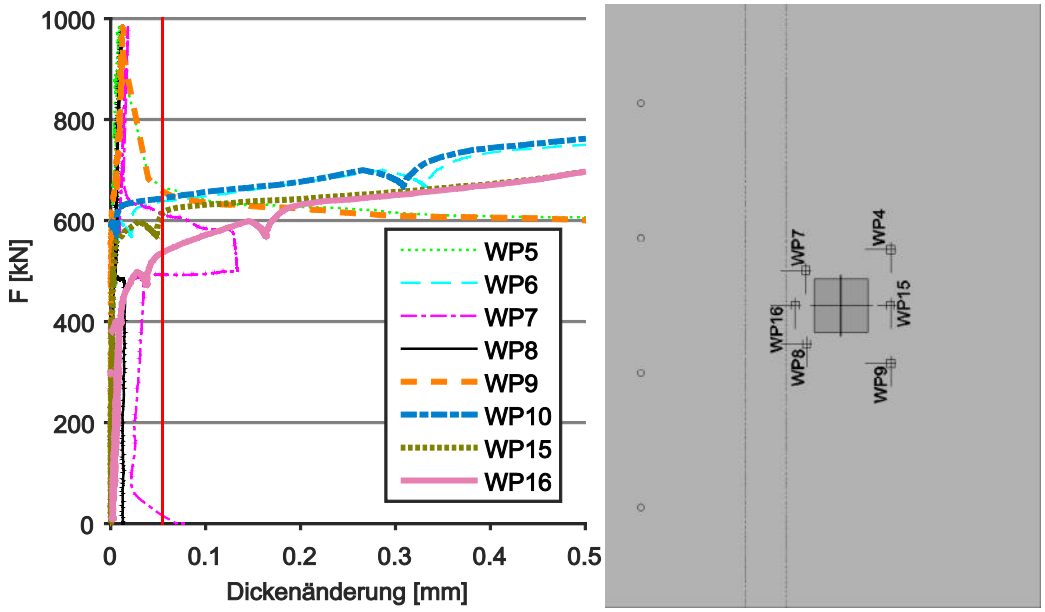


Bild 60: **Dickenänderungen an ausgewählten Stellen der Platte P6-1d während des Versuchs** (Messtechnik siehe auch Bild 97)

Es wird davon ausgegangen, dass der Schrägriss sich in der Platte ausgebildet hat, wenn sich Dickenänderungen in allen Messpunkten in der Achse des direkten Lastabtrags ergeben. Wertet man die Ergebnisse der Messung der Dickenänderungen in diesem Bereich aus, zeigt sich, dass der schräge Riss im Platteninneren in der Regel bei der Laststufe mit 500 kN unabhängig von der Laststellung entstand. Die abnehmende Steifigkeit der Platte führt dann zu Lastumlagerungen in weiter außen liegende Bereiche. Die Versuchslast kann anschließend weiter gesteigert werden. Auffällig ist, dass der Schrägriss auch bei den Versuchen mit auflagernaher Laststellung schon bei der Laststufe um 600 kN auftritt, auch wenn die endgültige Maximallast um ein Vielfaches höher liegt.

Tabelle 5: Laststufe zum Zeitpunkt des Auftretens des Schrägrisses im Platteninneren

Versuch	a_v/d	F_{Test} [kN]	*Auftreten Schrägriss* Laststufe[kN]
P1-3d-1	3	630	500
P2-5d	5	699	500
P3-4d-1	4	677	500
P4-6d	6	656	500
P5-2d-1	2	984	500
P6-1d	1	1496	600
P7-2d-2	2	897	600
P8-3d×2	2×3,0	874	700
P9-2d×2	2×3,0	993	800
P10-4d×2	2×4,0	930	800
P11-3d-2	3,0	680	600
P12-5d×2	2×5,0	952	800
P13-4d-2	4,0	726	500
P14-4d-3	4,0	682	500
P15-1d-1m	1,0	623	-
P15-2d-1m	20	300	200
P15-3d-1m	3,0	306	200
P15-5d-1m	5,0	211	-

Einfluss direkter Lastabtrag

Die Versuche mit $\boldsymbol{a_v}$ **= 3d bis 6d** lieferten alle ähnliche Traglasten (vgl. Bild 58). Der Mittelwert lag bei 665 kN. Vereinfachend wurden hierfür zunächst nur die direkt erzielten Traglasten gemittelt, ohne die abweichenden Betoneigenschaften der Platten zu berücksichtigen. Geht man von der Grundannahme aus, dass die Traglast ohne Einfluss eines direkten Lastabtrags der Einzellast bei alle Platten ähnlich ist, kann aus den Versuchen abgeleitet werden, dass der Einfluss einer Blocklast ab einem Lastabstandsverhältnis von a_v/d = 2,0 bis 3,0 vorhanden ist. Aus den Versuchsergebnissen mit einem höheren a_v/d-Verhältnis als 2,0 wird der Mittelwert gebildet und auf die Traglast der Versuche mit a_v/d < 2,0 bezogen. Es ergibt sich ein Erhöhungsfaktor der Traglast des Versuchs P5 bei 2,0d von 983/665 = 1,47. Es ist demnach ein eindeutiger Einfluss einer direkten Lastabstützung zu erkennen. Für Versuch P6 mit 1,0d ergibt sich ein Wert von 1496/665 = 2,24.

Um den Einfluss der unterschiedlichen Betoneigenschaften der verschiedenen Versuchskörper zu berücksichtigen, kann eine Normierung der Traglasten anhand des Einflusses der Betondruckfestigkeit nach EC2 vorgenommen werden.

Die Querkrafttragfähigkeit nach DIN EN 1992-1-1, Gl. 6.2a ermittelt sich zu:

$$V_{Rd,c} = \left[\frac{0{,}15}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck}\right)^{1/3} + 0{,}12 \cdot \sigma_{cd} \right] \cdot b_w \cdot d \qquad (4.1)$$

mit:

© Faktor zur Berücksichtigung des Maßstabseffekts: $k = 1 + (200/d)^{0,5} \leq 2{,}0$

$°_l$	Längsbewehrungsgrad $°_l = A_{sl}/(b_w \cdot d) \leq 0{,}02$
f_{ck}	charakteristische Betondruckfestigkeit [MPa]
$\pm_{cd}$	Bemessungswert der Betonlängsspannung in Höhe des Schwerpunktes des Querschnitts (Betonzugspannungen sind negativ einzusetzen)
b_w	kleinste Querschnittsbreite innerhalb der Zugzone des Querschnitts
d	statische Nutzhöhe der Biegezugbewehrung im betrachteten Querschnitt

Da die grundlegenden geometrischen Abmessungen und die verwendete Bewehrung bei allen Versuchen gleich sind, kann die Normierung über den Faktor $1/f_{ck}^{1/3}$ vorgenommen werden.

Tabelle 6: Versuchsergebnisse zum Einfluss des direkten Lastabtrags der Versuche mit Einzellast

Test	$v_{Rdm,EC2}$[1] [kN/m]	a_v/d	f_{ck}[2] [MPa]	F_{Test} [kN]	$f_{ck}^{1/3}$ [MPa]	$F_{Test}/f_{ck}^{1/3}$	Mittelwert	Erhöhungsfaktor	$1/\beta = 2d/a_v$
1d	273	1,0	39,4	1496	3,4	440		**2,23**	2
2d-1	281	2,0	43,3	984	3,5	280		**1,42**	1
2d-2	298	2,0	51,5	897	3,7	241		**1,21**	1
3d-1	259	3,0	33,8	630	3,2	195		0,99	1
3d-2	286	3,0	45,5	680	3,8	190		0,98	1
4d-1	264	4,0	36,0	677	3,3	205	197	1,04	1
5d	279	5,0	42,4	699	3,5	200		1,02	1
6d	271	6,0	39,0	656	3,4	193		0,98	1

[1] $v_{Rdm,EC2} = 1{,}8\ v_{Rd,EC2}$; gemäß (Latte, 2011)
[2] $f_{ck} = f_{cm} - 4$ N/mm² (Laborbedingungen); f_{cm} zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung

Auch nach der Normierung der Traglasten lässt sich ein Einfluss eines direkten Lastabtrags ableiten. Für Versuch P5 mit der Laststellung $a_v = 2d$ ergibt sich der normierte Lasterhöhungsfaktor zu 1,42. Für Versuch P6 mit $a_v = 1d$ ergibt sich ein Wert von 2,23.

Nach EC2, 6.2.2(6) wird der Einfluss des direkten Lastabtrags bei auflagernahen Einzellasten über den Abminderungsfaktor β erfasst. Für Lasten mit einem Abstand vom Auflager $a_v < 2d$ gilt:

$$\beta = a_v/(2d) \leq 1/4 \qquad (4.2)$$

mit: a_v Abstand der Vorderkante der Lastplatte zum Rand des Auflagers
d statische Nutzhöhe der Biegezugbewehrung im betrachteten Querschnitt

Im Bereich $a_v/d < 0{,}5$ darf nach EC2 demnach keine weitere Abminderung der Last vorgenommen werden.

Die Auswertung der Versuche **1d-6d** zeigt einen eindeutigen Einfluss des direkten Lastabtrags hinsichtlich der absoluten Traglast. Dieser ist für die bisher betrachteten Versuche größer als nach EC2 zu erwarten wäre. Es lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten.

1) Der Einflussbereich der direkten Abstützung bei Platten ist größer als a_v/d =2,0 (EC2). Die bisherigen Versuche zeigen einen Einfluss bis 3,0d (vgl. Bild 58, Bild 61), wobei zu berücksichtigen ist, dass bei der Versuchsreihe nur ganze vielfache der statischen Nutzhöhe untersucht wurden.

2) Erwartungsgemäß unterliegen die Traglasten beim Querkraftversagen einer größeren Streuung. Daher wurden die Versuche im Übergangsbereich in dem ein Einfluss eines direkten Lastabtrags zu erwarten war wiederholt. Die Anzahl von je zwei Versuchen für die Laststellungen $2d - 4d$ kann offensichtlich keine sichere statistische Größe eines Mittelwertes oder Erwartungswertes liefern, gibt aber dennoch Anhaltswerte zur Beurteilung der Ergebnisse. Bei den entsprechenden Versuchen ergaben sich Differenzen von ca. 10 % ohne eine Korrelation zur Druck- oder Zugfestigkeit des Betons zu zeigen. Dieses entspricht durchaus der üblichen Streuung der Ergebnisse von Versuchen zur Querkrafttragfähigkeit. Bei den Versuchen von Leonhardt (Leonhardt & Walther, 1962)[1] ergaben sich beispielsweise Abweichungen von bis zu 20 % an den Versuchsbalken bei gleichen Randbedingungen und gleichen Betoneigenschaften von der rechten zur linken Seite der Versuchskörper.

3) Der Verlauf der Funktion, der Lastabminderung zur Berücksichtigung des Anteils des direkten Lastabtrags, ist steiler als durch die Funktion über den Lastabstand a_v nach EC2 (Gl. 4.2) angenommen. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Bild 61 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Einfluss der direkten Lastabtragung der Einzellasten weiter reicht als bis $a_v = 2{,}0d$.

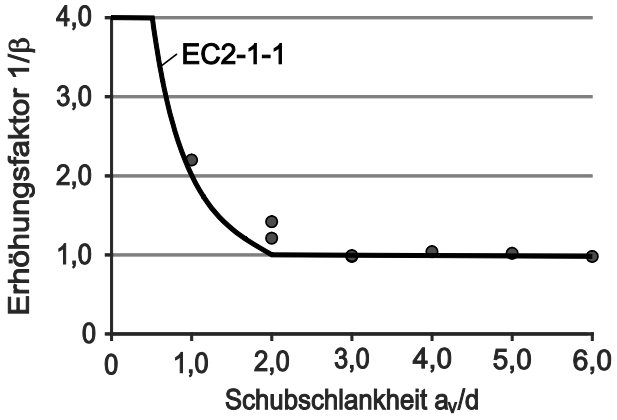


Bild 61: Vergleich des Erhöhungsfaktors 1/ zwischen EC2 und den Versuchen mit Einzellasten

4) Eine Einschränkung der für Laststellungen mit $a_v/d < 0{,}5$ erscheint nicht gerechtfertigt. Für entsprechend kleinere Abstände kann davon ausgegangen werden, dass die direkte Druckstrebe auch entsprechend größere Anteile der Blocklasten abtragen kann. Die vorherigen Erläuterungen unter 3) bestätigen dies.

5) Wie die Auswertung der Dickenmessungen zeigt, trat der Schrägriss in der Platte bei allen Versuchen unabhängig von der Laststellung in etwa bei gleichem Lastniveau um 600 kN auf. Es stellt sich die Frage, ab wann man in diesem Zusammenhang vom Versagen der Platte ausgehen kann. Wenn man das Auftreten des Schrägrisses in der Platte als Versagenskriterium ansetzt erscheint es nicht gerechtfertigt, den Einfluss des direkten Lastabtrags zu berücksichtigen. Wenn man weiterhin davon ausgeht, dass es sich bei der Einzellast um eine wandernde Last entsprechend einer Radlast im Brückenbau handelt, würde das Auftreten eines Schrägrisses im Laufe der Überfahrt der Einzellast

[1] (Leonhardt & Walther, 1962); S.20; Versuch 5

zum globalen Versagen der Platte führen. Die in den Versuchen erreichten Traglasten wären damit nicht erreichbar.

3.9.3 Einfluss der veränderten Bewehrungsanordnung

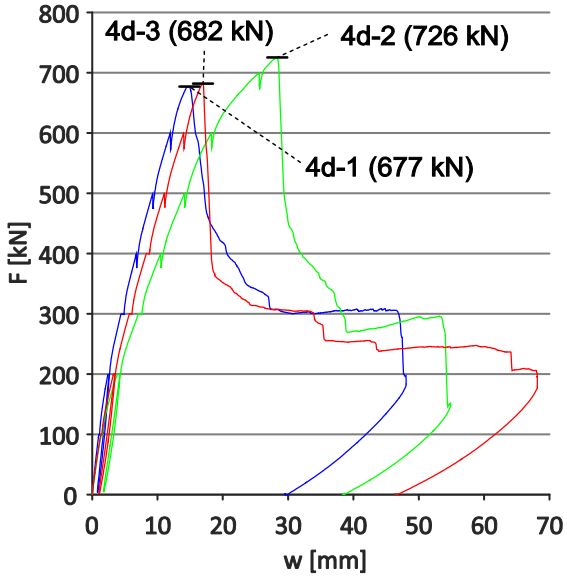


Bild 62: Lastverformungskurven der Versuche P3, P13 und P14 mit $a_v = 4{,}0d$

Nach der Bemessungsgleichung des EC2 (Gl. 4.1) hat der Bewehrungsgehalt $°_l$ der Biegebewehrung einen maßgebenden Einfluss auf die Querkrafttragfähigkeit. Um den Einfluss auf die Tragfähigkeit von auskragenden Plattentragwerken zu untersuchen, wurde die in Bild 5 dargestellte Bewehrung bei zwei Platten variiert. Bei Versuch P13/4d-2 wurde die obere Kragarmbewehrung von Ø16-8 (a_s = 25,13 cm²/m; ρ_l = 1,16 %) auf Ø14-10 (a_s = 15,39 cm²/m; ρ_l = 0,71 %) reduziert, was einer Abminderung um 40 % entspricht. Bei allen bisher durchgeführten Versuchen zu Querkrafttragfähigkeit von Platten wurde ein relativ hoher Bewehrungsgrade gewählt, um ein vorzeitiges Biegeversagen zu verhindern, bzw. ein Querkraftversagen zu erzwingen. Von daher liegt der Versuch P14/4d-2 in einem Bereich, der bisher nicht untersucht wurde. Es bestand daher ein gewisses Risiko, dass die Platte nicht auf Querkraft versagen könnte. Dieses bestätigte sich aber nicht. Es trat der für ein Querkraftversagen typische Schrägriss auf, auch wenn die Hauptbiegebewehrung an der Einspannstelle der Kragplatte bereits in Teilbereichen im plastischen Bereich war.

Die Verringerung der Bewehrung führt rechnerisch zu einer Reduzierung des Widerstands. Unter Berücksichtigung der experimentell bestimmten Materialparameter ergibt sich die rechnerische Abminderung zu:

238,4 kN/m / 264,4 kN/m = 0,90

Die Tragfähigkeit in Versuch 4d-2 sollte demnach 10 % unterhalb des Versuches 4d-1 mit $F_{test,4d\text{-}1}$ = 677,4 kN liegen. Die Traglast der Stahlbetonplatte mit verringerter Längsbewehrung liegt aber mit $F_{test,4d\text{-}2}$ = 725,5 kN um 7 % höher. Der Einfluss der Biegelängsbewehrung gemäß Gleichung (4.1) auf die Tragfähigkeit lässt sich demnach nicht nachweisen. Im Gegenteil es ergibt sich eher ein umgekehrter Zusammenhang.

Wie bereits bei der Erläuterung der Versuchsergebnisse, insbesondere der Rissbilder dargestellt, ergeben sich Ähnlichkeiten zu einem Durchstanzversagen der auskragenden Platten unter den konzentrierten Blocklasten. Beim Nachweis des Durchstanzens würde aber im Unterschied zum Nachweis des äquivalenten Plattenstreifens des Kragsystems, die Bewehrung auf der lastabgewandten Seite (also auf der Plattenunterseite) in Ansatz gebracht. Bei Versuch P14/4d-3 wurde daher die untere Flächenbewehrung der Platte von Ø12-10 (a_s = 11,31 cm²/m) auf Ø8-10 (a_s = 5,03 cm²/m) um 66 % verringert. Mit $F_{test,4d-3}$ = 682,0 kN lieferte der Versuch aber nahezu die gleiche Tragfähigkeit. Auch hinsichtlich der unteren Bewehrung kann demnach kein Einfluss auf die Tragfähigkeit beobachtet werden. Hinsichtlich des Durchstanzversagens ist zu beachten, dass es nach Kenntnis der Autoren keine Versuche zum Durchstanzversagen gibt, bei denen die Bewehrung auf der lastzugewandten Seite größer war als auf der lastabgewandten Seite, wobei dieses auch eher dem offensichtlichen Tragverhalten des klassischen Durchstanzmechanismus widersprechen würde.

Tabelle 7: Vergleich der Versuchsergebnisse mit verschiedenen Bewehrungsanordnungen

Test	ρ_l[3] [%]	$v_{Rdm,EC2}$[1] [kN/m]	a_v/d	f_{ck}[2] [MPa]	F_{Test} [kN]	$f_{ck}^{1/3}$ [MPa]	$F_{Test}/f_{ck}^{1/3}$	Erläuterung
4d-1	1,1	264	4,0	36,0	677	3,3	205	Bewehrung gem. Bild 5
4d-2	0,7	238	4,0	43,1	726	3,5	207	Abweichend Ø14-10 oben
4d-3	1,1	276	4,0	40,8	682	3,4	198	Abweichend #Ø8-10 unten

[1] $v_{Rdm,EC2} = 1{,}8\ v_{Rd,EC2}$; gemäß (Latte, 2011)
[2] $f_{ck} = f_{cm}$ - 4 N/mm² (Laborbedingungen); f_{cm} zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung
[3] Bezogen auf die Hauptbiegebewehrung für den Querkraftnachweis gem. Formel (2)

Bei den Wiederholungsversuchen der Laststellungen 2d und 3d ergaben sich wie oben beschrieben Abweichungen in der Traglast in der Größenordnung um 10 %. Die Abweichung um 7 % bei der Variation der oberen Biegebewehrung liegt innerhalb dieser Streubreite. Hiernach kann nur festgestellt werden, dass sich aus den Versuchen kein Einfluss der Biegebewehrung innerhalb der untersuchten Bandbreite auf die Querkrafttragfähigkeit ergibt.

3.9.4 Zusammenfassung der Versuche mit zwei Einzellasten

Es wurden insgesamt 4 Versuche mit zwei Blocklasten durchgeführt. Hierbei wurden die Laststellungen von $a_v = 2{,}0d$ bis $5{,}0d$ untersucht.

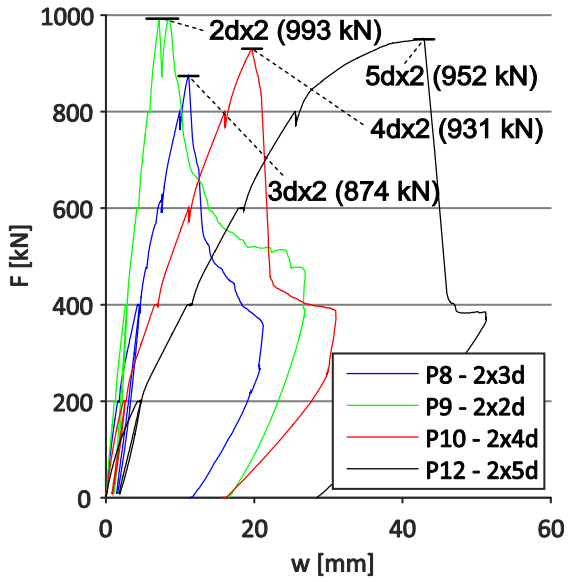


Bild 63: Lastverformungskurven der Versuche mit zwei Blocklasten

Tabelle 8: Auswertung der Versuchsergebnisse zum Einfluss des direkten Lastabtrags bei zwei Einzellasten

Test	$v_{Rdm,EC2}$[1] [kN/m]	a_v/d	f_{ck}[2] *[MPa]*	F_{Test} *[kN]*	$f_{ck}^{1/3}$ *[MPa]*	$F_{Test}/f_{ck}^{1/3}$	*Erhöhungsfaktor bez. auf Tabelle 6; 197 kN*	$1/\beta = d/2a_v$
2d×2	281	2x2,0	53,6	993	3,8	263	1,34	1
3d×2	286	2x3,0	48,8	874	3,7	239	1,21	1
4d×2	264	2x4,0	41,9	930	3,5	268	1,36	1
5d×2	296	2x 5,0	50,4	952	3,7	258	1,31	1

[1] $v_{Rdm,EC2} = 1{,}8\ v_{Rd,EC2}$; gemäß (Latte, 2011)
[2] $f_{ck} = f_{cm}$ - 4 N/mm² (Laborbedingungen); f_{cm} zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung

Anders als bei den Versuchen mit einer Einzellast, kann bei den Versuchen mit zwei Lasten zumindest im Bereich von $a_v = 2{,}0d$ bis $5{,}0d$ kein Einfluss einer direkten Abstützung aus den Ergebnissen abgeleitet werden. Die Tragfähigkeit der Platte ist bei der Laststellung mit $a_v = 2{,}0d$ gegenüber den anderen nur leicht erhöht. Es ist auffällig, dass die Tragfähigkeit hinsichtlich der absoluten Last (Summe der beiden Lasten) um etwa 30 % gegenüber den Versuchen mit Einzellast erhöht ist. Wie bei den Versuchen mit einer Einzellast ($3d \le a_v \le 6d$) liefern die Versuche mit zwei Lasten alle ähnliche Tragfähigkeiten unabhängig von der Lastposition. Es ist also auch hier davon auszugehen, dass es eine Lastausbreitung der Einzellasten im strengen Sinne nicht gibt.

Auch die Rissbilder betätigen, dass es sich bei den Versuchen mit Doppellast um ein lokales Versagen handelt. Die Auswertung der Sägeschnitte zeigt, dass der Versagensriss ebenfalls mit den Lasten nach außen wandert. Im Gegensatz zu den Versuchen mit Einzellasten, wo dieses ab einem Lastabstand von $a_v = 3{,}0d$ ersichtlich wird, ist dieses erst ab einem Lastabstand von $a_v > 4{,}0d$ zu erkennen. Neigung und Verlauf des Risses bleibt dabei unverändert, wie Bild 64

zeigt. Hier sind die Rissverläufe im Platteninneren der Versuche mit Laststellung bei 5,0*d* für Doppellast und Einzellast im Vergleich dargestellt.

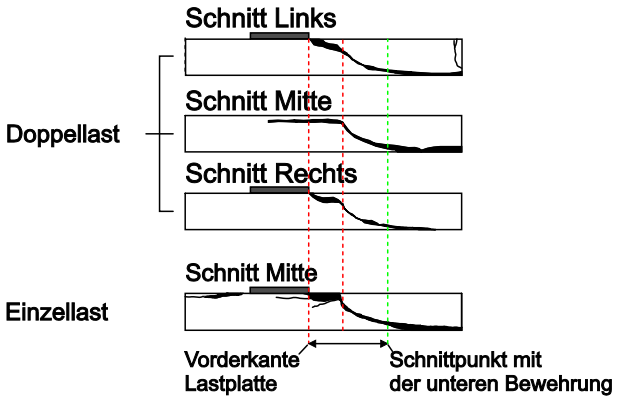


Bild 64: Vergleich der Rissverläufe der Versuche 5d und 5dò2

Aus den Versuchen mit Doppellast ergeben sich daher zwei Fragen, die es zu klären gilt.

1) Warum ist der Einfluss der direkten Abstützung nicht entsprechend den Versuchen mit einer Last, also bis ca. $a_v = 3d$?
2) Wie ist die um etwa 30% höhere Tragfähigkeit der Versuche mit Doppellast gegenüber denen mit Einzellast zu erklären?

Zu 1): Bei den Versuchen mit Doppellast ergibt sich eine deutliche Abweichung nach unten für die Traglast von 2d×2 gegenüber 2d-1 und 2d-2. Eine Traglast von 896·1,3 = 1164 kN wäre mindestens zu erwarten gewesen, wenn es sich mit dem Ergebnis des Versuchs 2d-2 (F_u = 898 kN) um den unteren Grenzwert handeln würde.

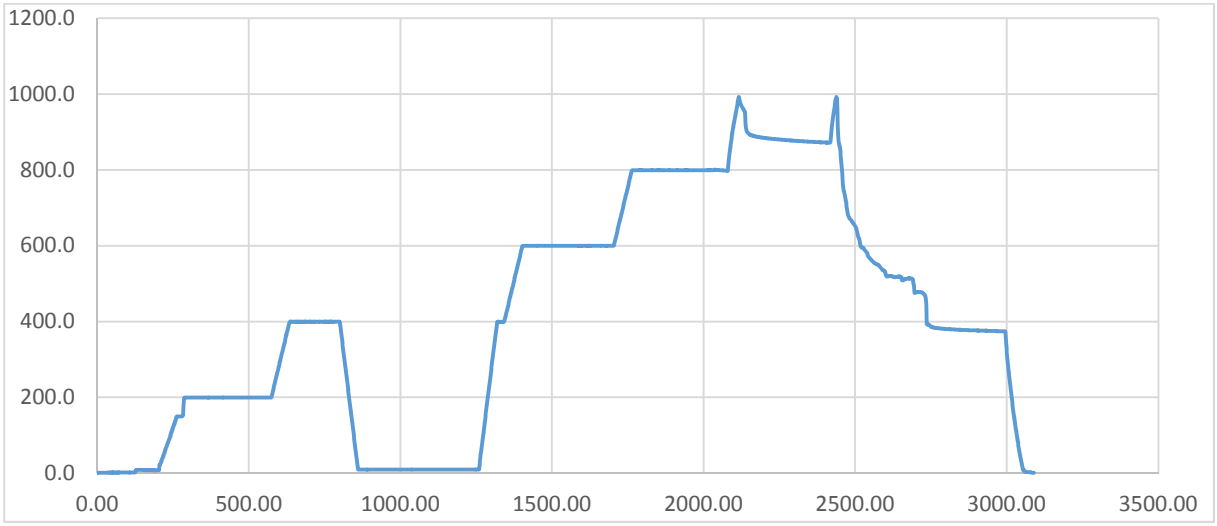


Bild 65: Last-Zeit-Kurve für Versuch 2dò2

Bei dem Versuch 2d×2 wurde die Laststufe von 1000 kN gerade noch erreicht. Es ergaben sich aber in der Summe der Lasten 992,5 kN, da die beiden zusätzlichen Pressen leicht abweichende Werte über die verwendeten Kraftmessdosen lieferten. Es ist auffällig, dass die Last zunächst

bis auf 992,5 kN als Summe der drei Pressenlasten ansteigt. Es folgt ein Abfall der Last auf ca. 871 kN. Im Anschluss konnte die Last wieder bis auf 992,5 kN gesteigert werden, bevor ein endgültiger Abfall bis auf ca. 500 kN auftrat. Angesteuert wurden die mittlere Presse mit 500 kN und die beiden zusätzlichen Pressen mit je 250 kN. Die Lastaufbringung erfolgte aber zu diesem Zeitpunkt weggesteuert, sodass sich das System durch Kriechen der eigentlichen Last entzog. Nach Ablauf der Ruhezeit in der Laststufe 1000 kN wurde die Last wieder über die Wegsteuerung aufgebracht. Die Platte versagte dann direkt bei der Laststufe 1000 kN. Es konnte im Folgenden keine größere Last mehr aufgebracht werden. Das Versagen war hinsichtlich der Geräuschentwicklung im Gegensatz zu allen anderen Versuchen kaum wahrzunehmen.

Um das Versagen des Versuchs P9/2d×2 genauer zu untersuchen wird zunächst die Kraftverteilung der drei verwendeten Pressen dargestellt (Bild 66 a). Eine ungleichmäßige Verteilung der Lasten ist hier nicht zu erkennen. Dieses hätte auf ein frühzeitiges Versagen der Platte im Bereich einer der beiden Lastplatten hindeuten können.

Es zeigt sich, dass die Dickenänderungen im Bereich der Lasteinleitung den Grenzwert von 0,05 mm in etwa bei einer Gesamtlast von 740 kN überschreiten (Bild 66b, 66c). Dieses entspricht in etwa dem 1,3-fachen der Last, bei der dieser Grenzwert in den Versuchen unter Einzellasten auftrat. Das Versagen entspricht dementsprechend dem der anderen Versuche mit Doppellast. Ein vorzeitiges Versagen einer der beiden Lasteinleitungen kann auch hier nicht abgeleitet werden.

Abschließend lässt sich nicht klären, warum der Versuch 2d×2 weniger als erwartet getragen hat.

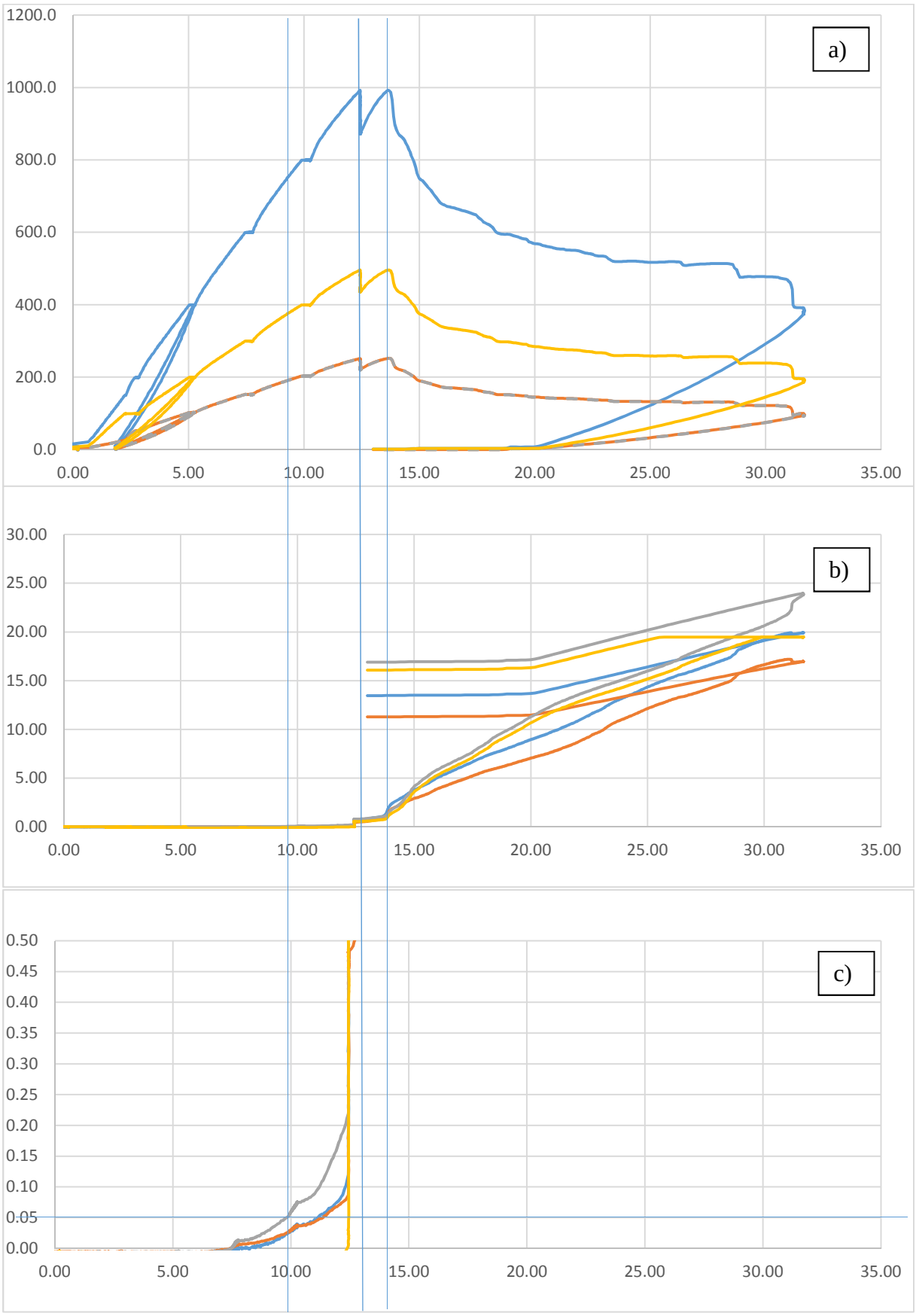


Bild 66: Versuch P9/2dò2; a) Pressenkräfte 1-3; b) Dickenänderungen im Bereich der Lasteinleitung; c) Detail der Dickenänderungen im Bereich der Lasteinleitung (Skalierung 0,00 bis 0,50 mm)

Zu 2.: Es ist eindeutig, dass die beiden Lasten sich gegenseitig beeinflussen. Aus den Versuchen mit einer Last konnte abgeleitet werden, dass das Versagen lokal im Bereich der Lasteinleitung ausgelöst wird. Würde es zu keiner Beeinflussung der beiden Lasten untereinander kommen, müsste die Tragfähigkeit der Platte bei 200% der Tragfähigkeit mit einer Last liegen. Dieses ist nicht der Fall. Der Vergleich der linear-elastischen Schnittgrößen kann einen ersten Anhaltspunkt für die Unterschiede zwischen Einzel- und Doppellast geben.

Tabelle 9: Maximale Querkraft für die Platten mit einer Blocklast und mit Doppellast im Schnitt 0,5*d* von der Lastvorderkante und am Anschnitt aus der FE-Berechnung für eine Einheitslast von 100 kN

Laststellung	Einzellast 1×100 kN		Doppellast 2×50 kN			Faktor
	0,5*d*	Anschnitt	0,5*d*	Anschnitt	Zwischen den Lasten	
1*d*	87	81	52	49	36	0,59
2*d*	76	63	49	42	39	0,64
3*d*	73	54	47	39	39	0,64
4*d*	71	48	45	38	38	0,63
5*d*	74	45	44	36	37	0,59
6*d*	70	42	45	37	36	0,64

Für die nachfolgende Darstellung wurden die linear-elastischen Schnittgrößen in verschiedenen Schnitten an einem FE-Modell der Versuchskörper ermittelt. Dargestellt sind die Schnittgrößenverläufe für zwei Systeme mit einer Laststellung bei $a_v = 4d$. Es wurde eine Einheitsblocklast von 100 kN mit den Abmessungen der Lastplatte von 40 cm × 40 cm aufgebracht. Für die Doppellastversuche ergeben sich damit zwei Lasten zu 50 kN je Lastfläche, als Gesamtlast 100 kN.

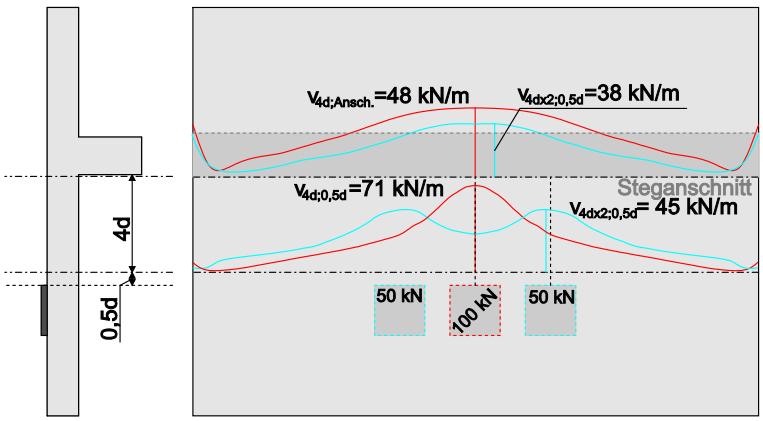


Bild 67: Querkraftverläufe aus einer Einheitsgesamtlast von 100 kN der Platten 4d und 4dò2 am Steganschnitt und im Abstand 0,5*d* von Vorderkante Lastplatte (linear elastische FE-Berechnung)

Für den Schnitt im Bereich der Lasteinleitung (Versagensbereich) ergibt sich eine mögliche Lasterhöhung der Versuche mit Doppellast von:

$$\Delta v_{4d;0,5d} = 1 - v_{4d\times2;0,5d} / v_{4d;0,5d} = 1 - 45/71 = 0,36 = 36\%$$

Die Auswertung der mit der Betondruckfestigkeit normierten Versuchsergebnisse zeigt für diese beiden Versuche:

$F_{Test,4dx2}/ F_{Test,4d1} = 268/205 = 1,31$

Tabelle 10: Auswertung der Tragfähigkeitserhöhung aus den Versuchen mit Doppellast im Schnitt 0,5*d* von der Lastvorderkante aus der FE-Berechnung und den normierten Versuchsergebnissen gem. Tabelle 6 und Tabelle 8 im Vergleich.

Ver-such	$F_{test,Einzellast}$		$F_{Test,Doppellast}$	Erhöhung		$v_{0,5d,FE}$ Einzellast [kN/m]	$v_{0,5d,FE}$ Doppellast [kN/m]	Δv [kN/m]
2d	280	241	263	0,94	1,09	75	49	35%
3d	195	190	239	1,23	1,26	73	47	35%
4d	205		268	1,31		71	45	36%
5d	201		258	1,29		72	44	39%

Bezieht man die Auswertung auf einen Schnitt 0,5*d* von der Lasteinleitung ergibt sich eine um 35 – 39 % niedrige Schnittkraft für die Doppellasten bei gleicher Gesamtlast für alle Laststellungen. Der über die Druckfestigkeit skalierte Mittelwert der Versuche mit Einzellasten ohne Einfluss der direkten Druckstrebe ergibt sich zu 197 kN. Der skalierte Mittelwert der Versuche mit Doppellast entsprechend zu 255 kN. Es ergibt sich somit eine etwa 30 %-ige Erhöhung (255/197 = 1,3). Die unterschiedlichen Traglasten der Versuche mit Einzel- und Doppellasten lassen sich somit von der Größenordnung erklären. Es ist zu beachten, dass dieses nur für einen Schnitt im Bereich der Lasteinleitung gilt. Für den üblichen Schnitt am Steg gelten die o.g. Zusammenhänge nicht. Da das Versagen nach bisherigen Erkenntnissen im Bereich der Lasteinleitung initiiert wird, sind die Schnittgrößen im Bereich der Blocklast eher maßgebend.

Für die auflagernahe Laststellung bei $a_v = 2d$ des Doppellastversuchs P9/2d×2 weichen die realen Versuchsergebnisse von denen der weiter entfernt positionierten Lasten ab. Die Tragfähigkeitszunahme stellt sich nicht wie bei den Einzellastversuchen ein. Wie zuvor beschrieben versagte 2d×2 bei einer geringeren Last als erwartet. Es ist zu vermuten, dass sich die Ausbildung der direkten Abstützung bei mehreren Lasten anders vollzieht als bei den Einzellasten. Eine Lastkonzentration im Bereich der direkten Druckstrebe scheint sich bei mehreren Lasten nicht so ausgeprägt auszubilden. Die Rissbilder der Versuch mit einer Laststellung bei 2*d* bestätigt diese Vermutung.

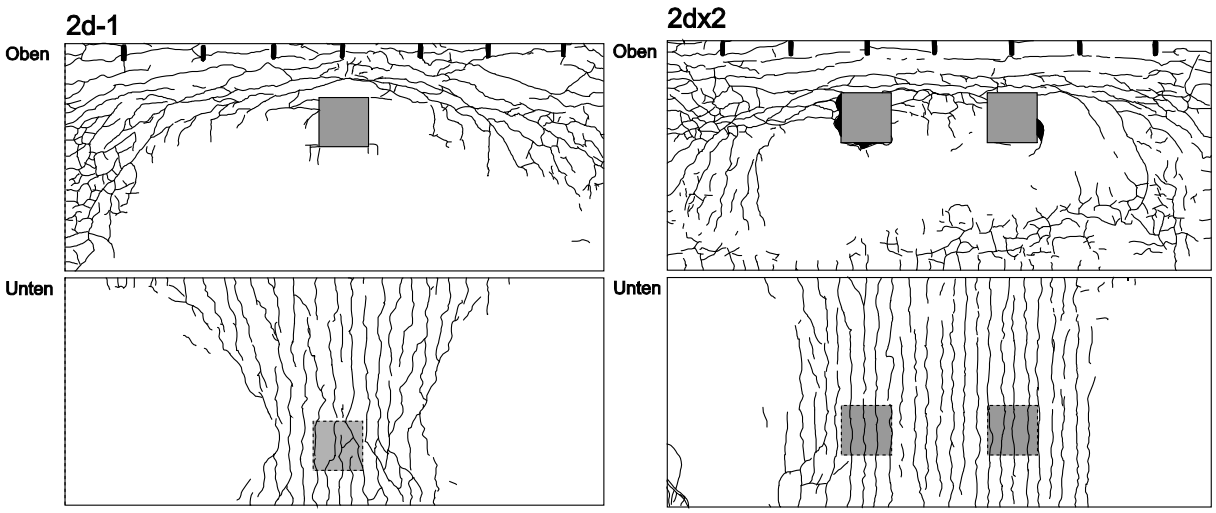


Bild 68: Rissbilder Versuche P5/2d-1 und P9/2dò2 im Vergleich

Das Rissbild auf der Plattenunterseite zeigt die Lastkonzentration für den Versuch unter Einzellast. Die Risse konzentrieren sich dabei auf den direkten Bereich der Lasteinleitung. Es ergibt sich ein trichterförmiger Rissverlauf mit der schmalsten Stelle an der Lasteinleitung. Bei den Doppellasten laufen die Risse hingegen parallel. Eine Konzentration ist hier nicht zu beobachten. Geht man davon aus, dass die Risse auf der Unter- und Oberseite maßgeblich von der Momentenverteilung beeinflusst werden, zeigt sich, dass die positiven Momente, in Querrichtung zum Lastabtrag, im Bereich der Lasteinleitung bei der Einzellast um die Lasteinleitung rotieren. Das gleiche gilt für die negativen Momente in Längsrichtung des Lastabtrags an der Einspannung. Während parallel zum Auflager am monolithisch angeschlossenen Steg die Druckspannungen auf der Plattenunterseite (negatives Kragmoment) in Richtung des Lastabtrags entstehen, treten im Bereich der Lasteinleitung (positives Moment in Querrichtung) die Querdruckspannungen an der Oberseite auf. Die Druckstrebe des direkten Lastabtrags läuft also von der Plattenoberseite der Lasteinleitung zur Plattenunterseite an der Einspannung. Zwischen den Rissen auf der Unterseite müssen sich jetzt die Druckstreben auf das Auflager stützen. Bei der Einzellast fächern sich die Druckstreben am Auflager auf. Es bildet sich somit ein stabiles Druckstrebengewölbe ähnlich einem Tippi-zelt bzw. einer 3-dimensionalen Bockkonstruktion, bei dem sich die Druckstreben an der Lasteinleitung aneinander abstützen. Bei den Doppellasten kann die dritte Raumrichtung in Querrichtung zwischen den Lasten nicht entsprechend ausgenutzt werden, da die Druckstreben nicht gegeneinander geneigt sind, sondern parallel verlaufen. In diesem Zusammenhang wäre ein Versuch unter Doppellast mit einer Laststellung bei 1*d* sehr interessant. Wie zuvor erwähnt, wurde dieser aber aufgrund der maximal möglichen Pressenlasten und der zu erwartenden höheren Traglasten nicht durchgeführt.

Ein weiterer möglicher Grund für die nicht den Erwartungen entsprechenden Traglasten beim Versuch mit der Doppelast bei 2*d* liegt in der Plattenbreite parallel zum Steg. Bei den Voruntersuchungen zu dieser Versuchsreihe wurde der Einfluss der Plattenbreite auf die zu erwartenden Traglasten mit Hilfe von nichtlinearen FE-Berechnungen bestimmt. Für die Versuche mit einer Last konnte festgestellt werden, dass ab einer Plattenbreite von ca. 4 m keine Steigerung der Traglast mehr zu erwarten war. Entsprechend wurde die Plattenbreite zu 4,5 m gewählt. Für die Doppelasten wurde diese Untersuchung nicht durchgeführt. Es ist zu vermuten, dass die

Breite, ab der die Quertragrichtung keinen größeren Einfluss auf die Traglast hat, um mindestens 1,2 m (Lastabstand parallel zum Steg) größer gewählt werden müsste. Dieses würde dann durch die steiferen Randbereiche und einen größeren Anteil der Tragrichtung quer zum Hauptlastabtrag zu einer Traglasterhöhung und zu einer größeren Auffächerung der Lasten am Auflager führen.

Die Auswertung der Dickenänderungen zeigt, dass sich der Schrägriss bei den Versuchen mit 2 Blocklasten ab einer Gesamtbelastung um 800 kN ausbildet.

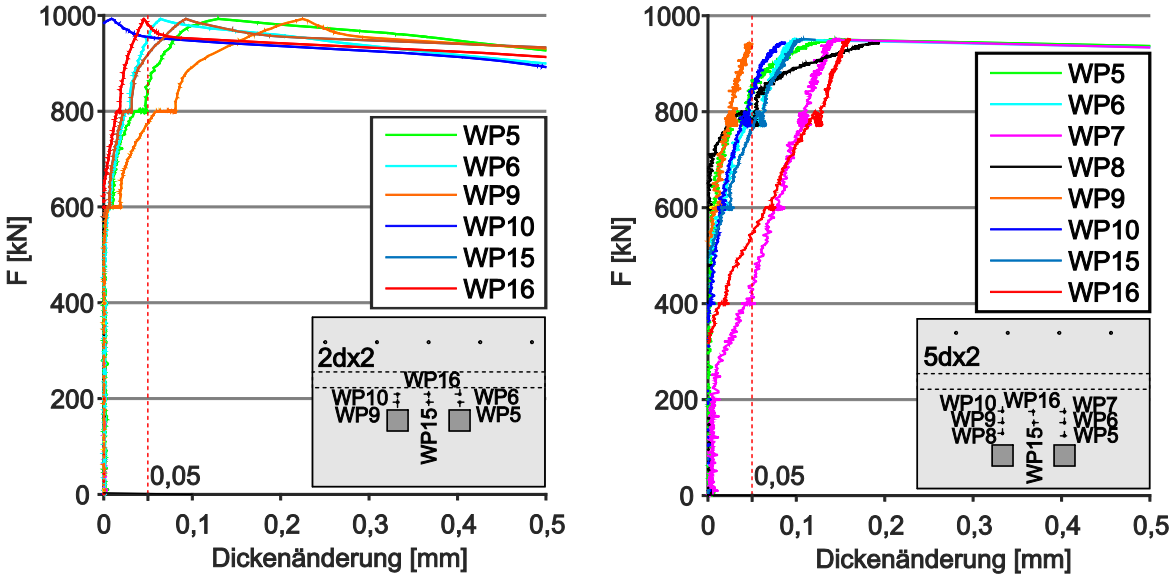


Bild 69: Dickenänderungen ausgewählter Punkte der Versuche mit Doppellast 2dò2 und 5dò2

Bei der Auswertung wird davon ausgegangen, dass sich der Schrägriss ausgebildet hat, wenn alle Messpunkte in der betrachteten Richtung des Lastabtrags den Wert von 0,05 mm überschreiten. Die frühe Änderung der Plattendicke bei Versuch 5d×2 bei WP7 und WP16 ist dabei mit großer Wahrscheinlichkeit auf einen Biegeriss im Bereich der Einspannung zurückzuführen, welcher direkt durch die beiden Messstellen lief.

3.9.5 Versuche an äquivalenten Plattenstreifen mit 1 m Breite

Bei der Bemessung von Plattentragwerken werden die Belastung sowie die Tragfähigkeit häufig an einem Systemausschnitt bzw. äquivalenten Meterstreifen ermittelt. Aufgrund des mehrachsigen Lastabtrags der Kragplatten und des zuvor beschriebenen Versagensmechanismus der auskragenden Platten, stellt sich die Frage, ob dieses Vorgehen dem Plattentragwerk gerecht wird.

Ergänzend zu den Großmodellversuchen wurden daher für $a_v = 1d - 3d$ sowie $5d$ die Versuche mit einer Einzellast an vier äquivalenten Plattenstreifen von 1 m Breite des Kragsystems durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 **Tabelle 11** zusammengefasst. Deutlich ist zu erkennen, dass die Traglasten bei weitem nicht das Niveau von F_{Test} der 4,50 m breiten Platten erreichten. Das Versagen unterscheidet sich ebenfalls signifikant. Die Meterstreifen verhalten sich dabei wie ein Balken. Der Lastabtrag ist eindimensional, da eine Lastausbreitung und Umlagerung der Einzellasten nicht wie bei den Platten aktiviert werden kann. So versagte der Plattenstreifen des Versuches P15 mit $a_v = 5d$ auf Biegung während die entsprechende große Platte P2 mit $5d$ auf Querkraft versagte. Durch die

Reduzierung des Lastabstandes und die entsprechend kleinere Momentenbeanspruchung versagten die Plattenstreifen mit $a_v = 1d$ bis $3d$ auf Querkraft, wobei die Tragfähigkeit der auflagerfernen Laststellungen mit $a_v = 2d$ (F_{Test} = 300 kN, $v_{Rd,EC2}$ = 268,8 kN/m) und mit $a_v = 3d$ (F_{Test} = 306 kN. $v_{Rd,EC2}$ = 266,6 kN) in etwa 46 % der mittleren Tragfähigkeit (665 kN) der großen Platten betrug.

Tabelle 11: Ergebnisse der Versuche an Plattenstreifen mit 1 m Breite

Versuch	$v_{Rdm,EC2}$[1] [kN/m]	a_v/d	f_{ck}[2] [MPa]	F_{Test} [kN]	$f_{ck}^{1/3}$ *[MPa]*	$F_{Test}/f_{ck}^{1/3}$	*Erläuterung*	$1/\beta = d/2a_v$
1d-1m	268,8	1	41,8	623	3,5	178		2
1d-1m-2	-	1	-	565	-	-	Wiederbelastung von 5d-1m	2
2d-1m	268,8	2	41,8	306	3,5	87		1
3d-1m	266,6	3	40,9	300	3,4	88		1
5d-1m	261,5	5	38,8	211	3,4	62	Biegeversagen	1

[1] $v_{Rdm,EC2} = 1{,}8\ v_{Rd,EC2}$
[2] $f_{ck} = f_{cm}$ - 4 N/mm² (Laborbedingungen); f_{cm} zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung

Der Versuch 1d-1m lieferte mit F_{Test} = 623 kN die doppelte Tragfähigkeit der weiter entfernt platzierten Lasten mit Querkraftversagen, und bestätigt den an Balken ermittelten Abminderungsfaktor β nach Gleichung (1).

Der Versuchskörper 5d-1m wurde zum Abschluss der Versuche noch einmal mit einer Einzellast bei $a_v = 1d$ belastet. Die obere Längsbewehrung war bereits im ersten Versuch mit $a_v = 5d$ deutlich im plastischen Bereich gewesen. Trotzdem konnte bei der erneuten Belastung bei $1d$ eine Maximallast von 564 kN erreicht werden also in etwa 90 % der Traglast des Versuchs 1d-1m ohne Vorbelastung.

3.9.6 Rissbilder

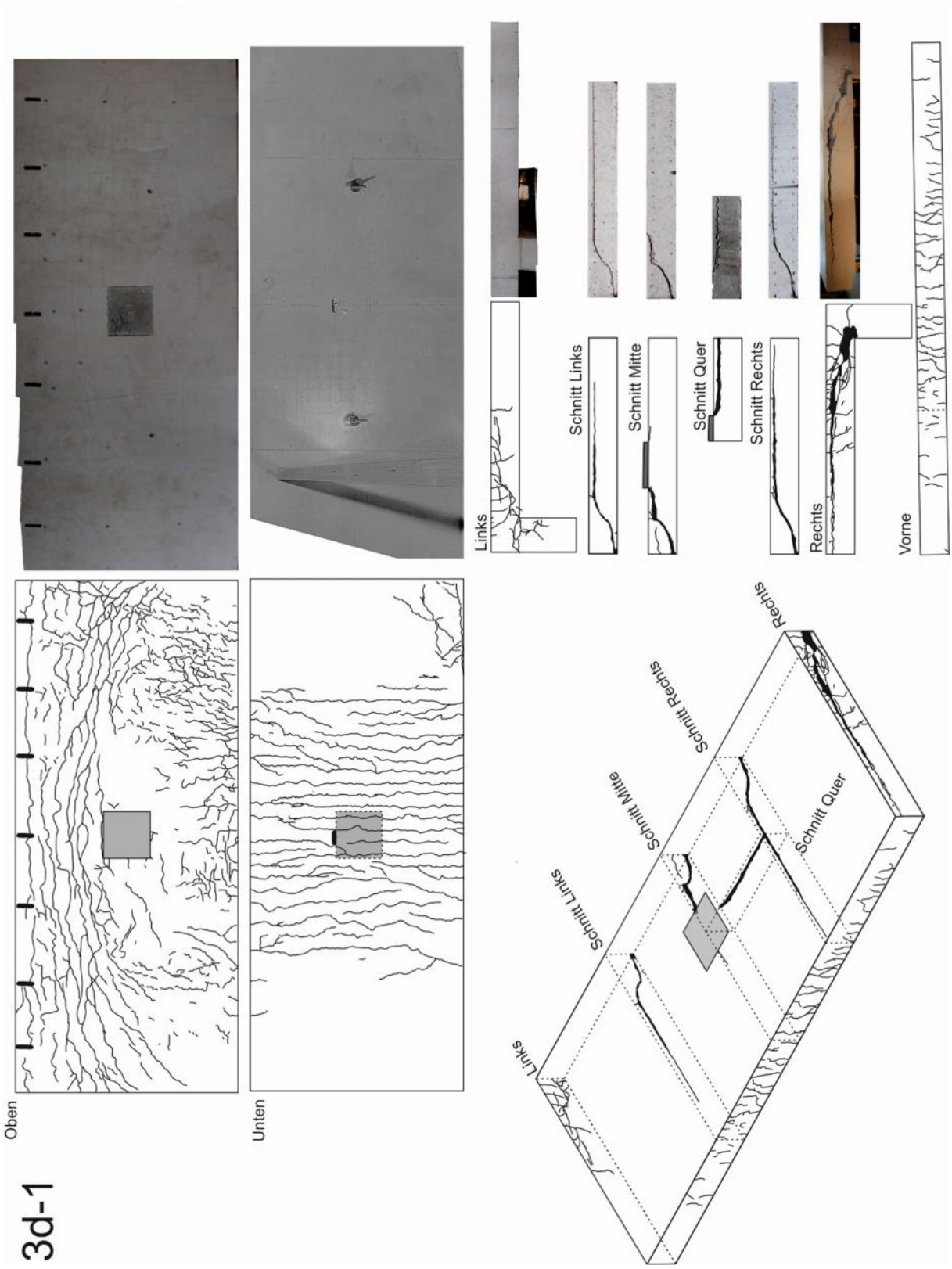


Bild 70: Versagensrisse Versuch P1, $a_v = 3d$

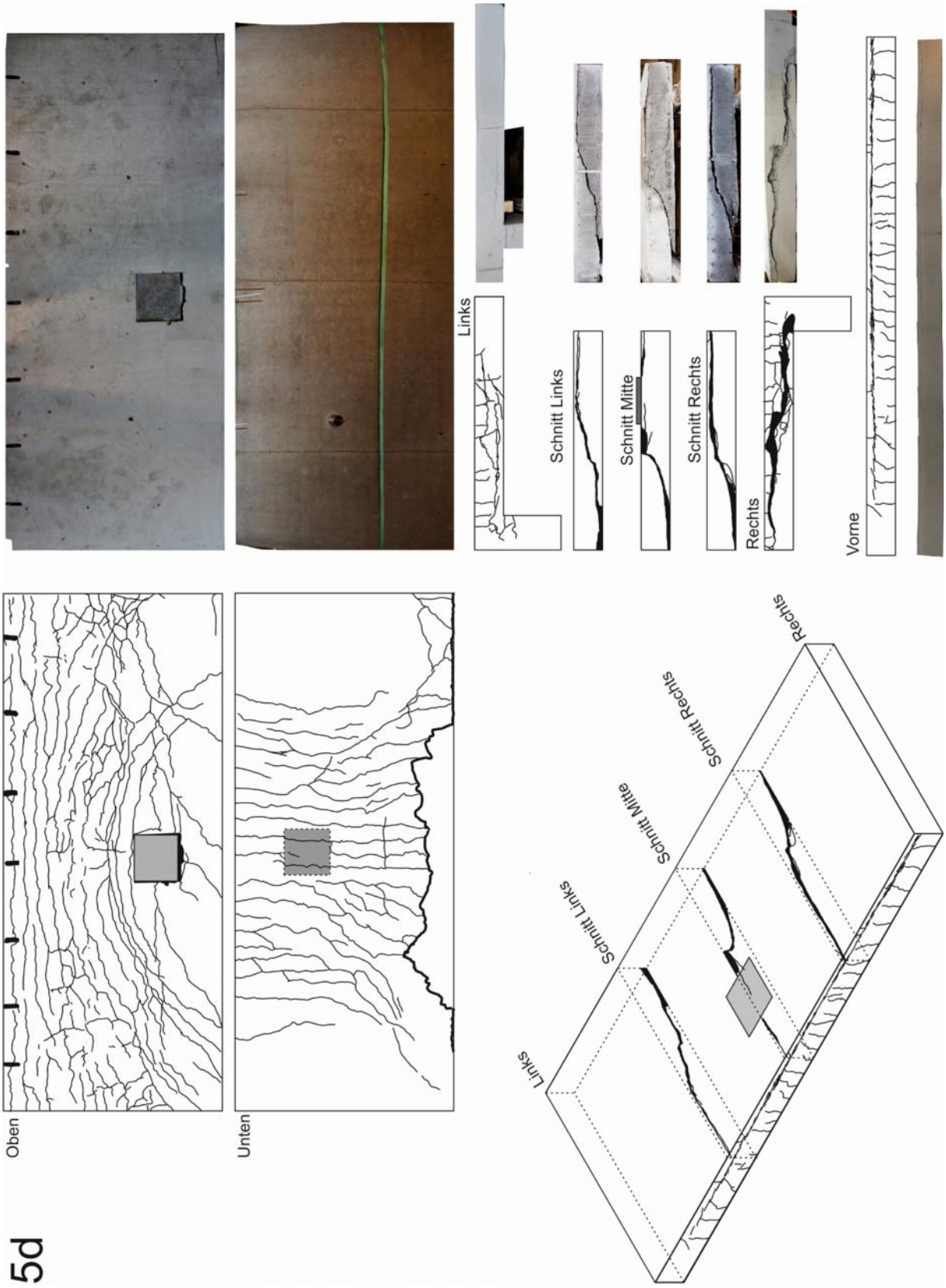


Bild 71: Versagensrisse Versuch P2*;* a_v = 5*d*

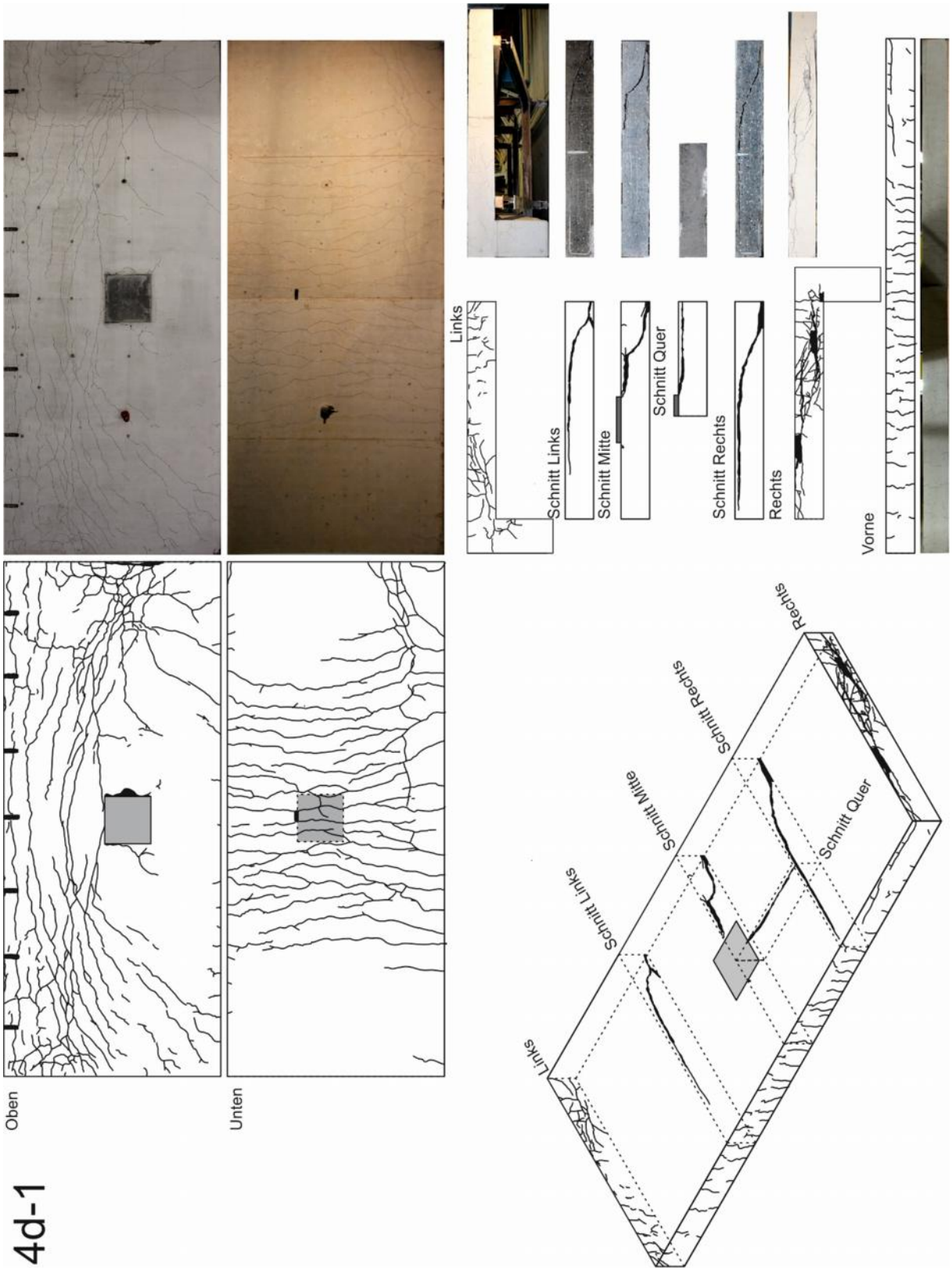


Bild 72: Versagensrisse Versuch P3; $a_v = 4d$

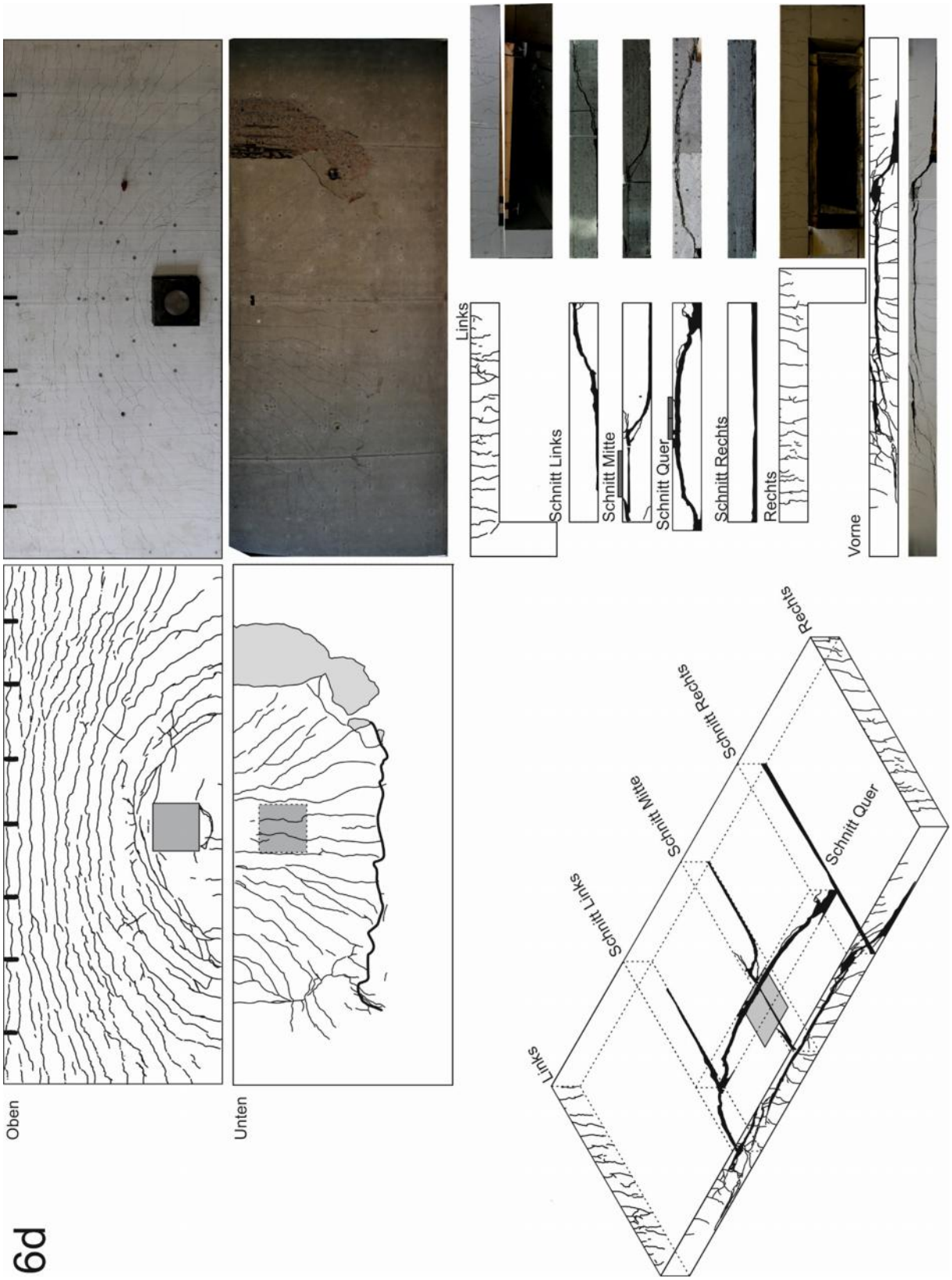


Bild 73: Versagensrisse Versuch P4; a_v = 6*d*

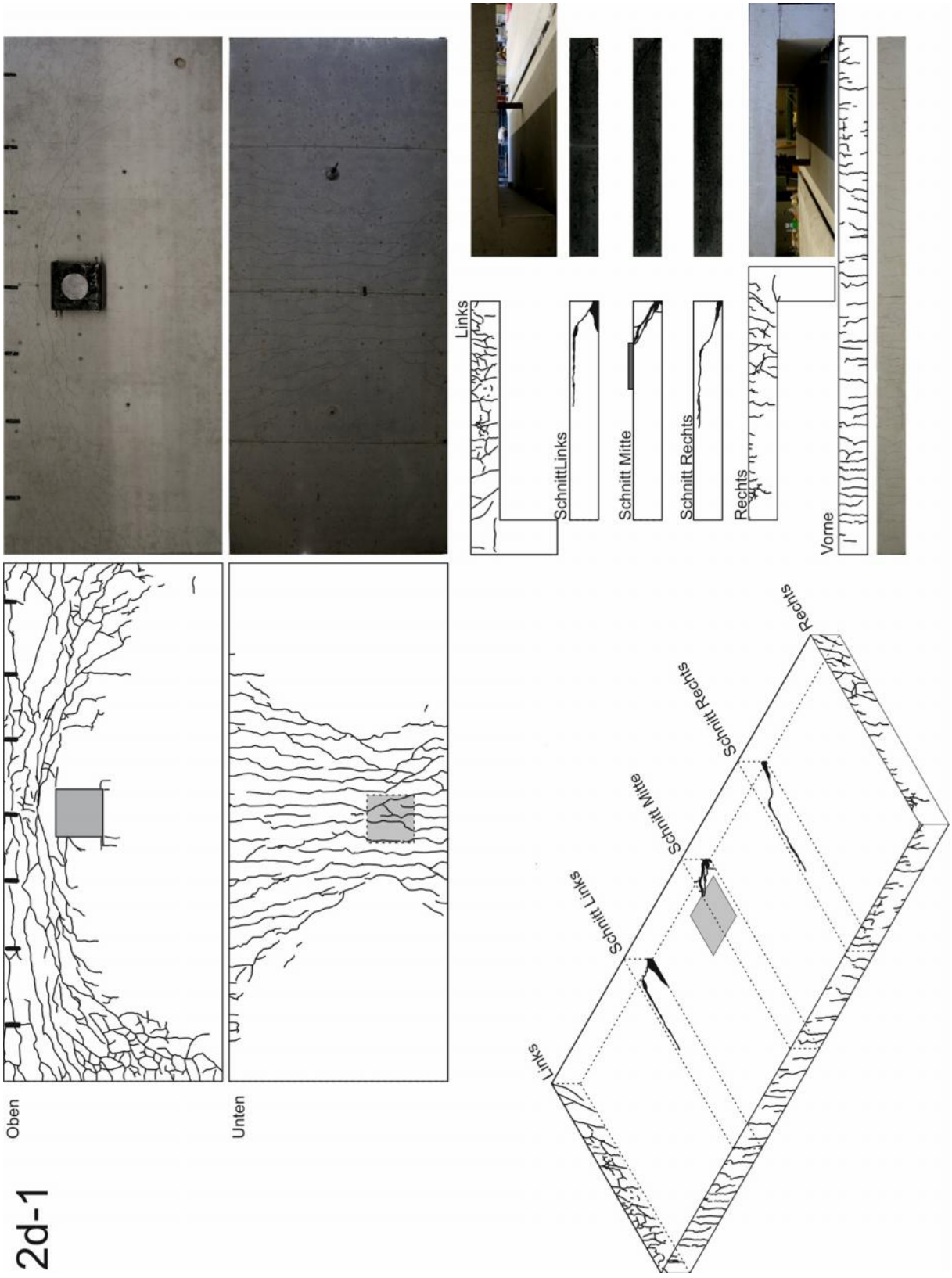


Bild 74: Versagensrisse Versuch P5; $a_v = 2d$

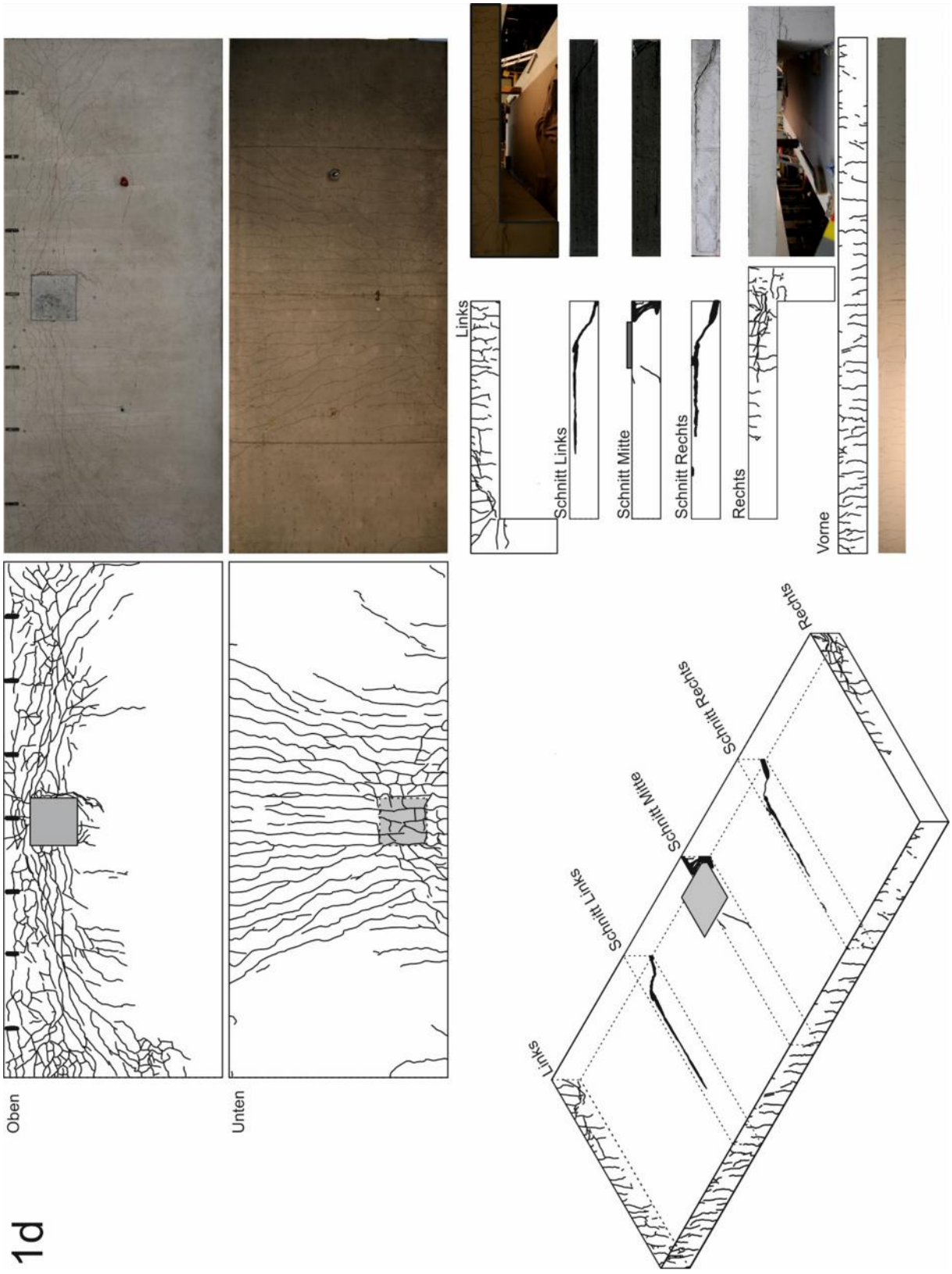


Bild 75: Versagensrisse Versuch P6; a_v = 1*d*

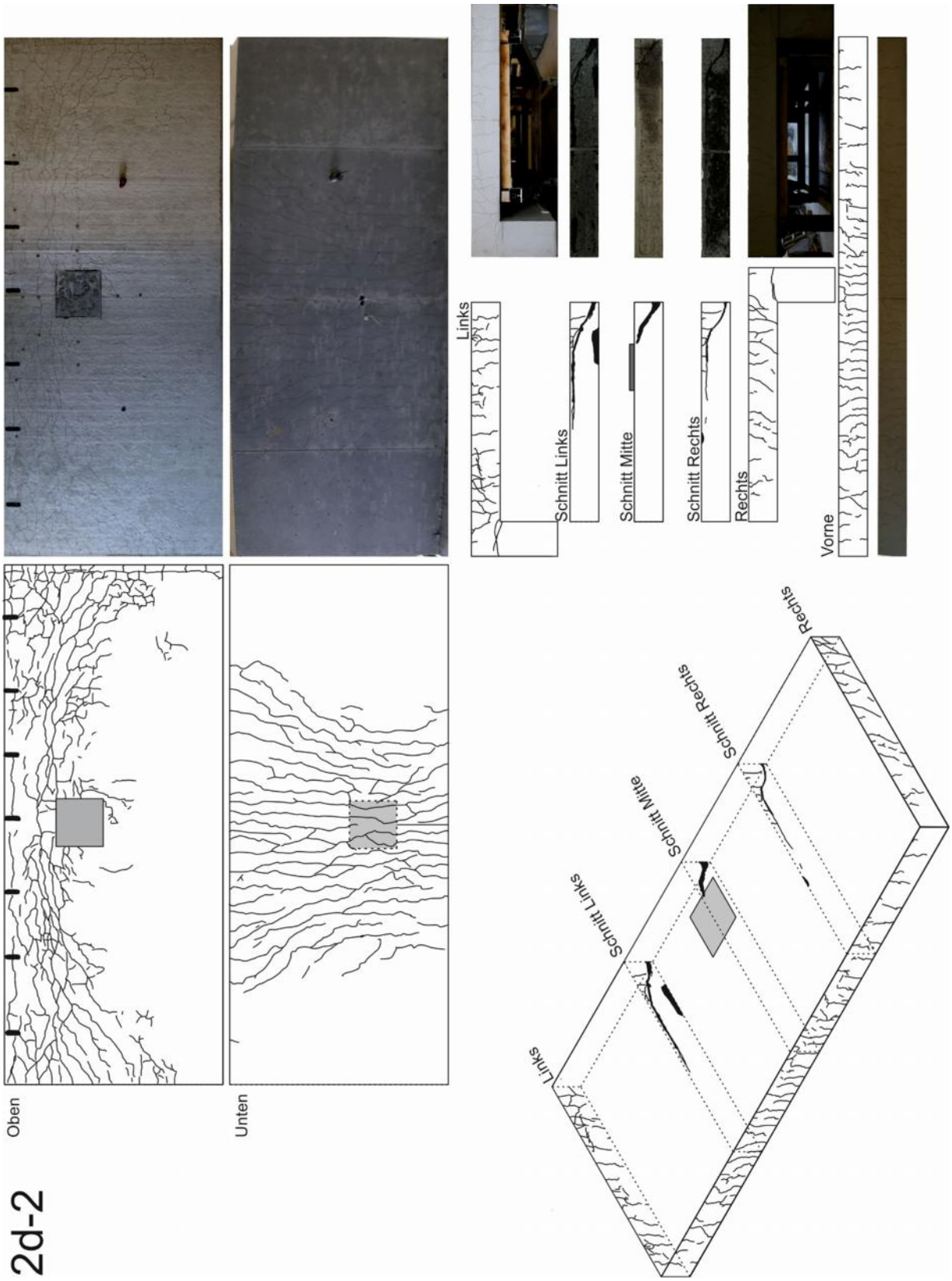


Bild 76: Versagensrisse Versuch P7; $a_v = 2d$

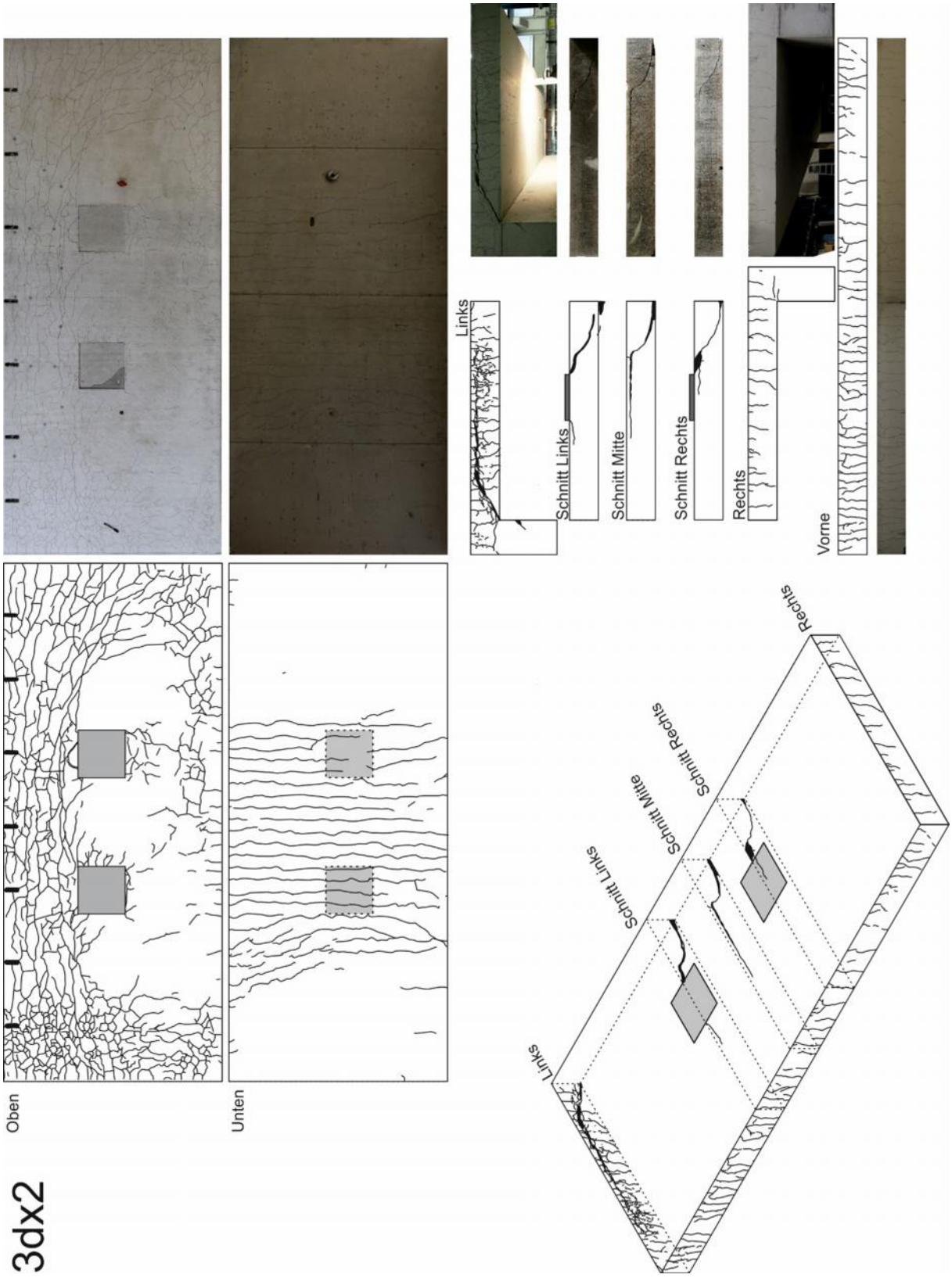


Bild 77: Versagensrisse Versuch P8; a_v = 3*d*ò2

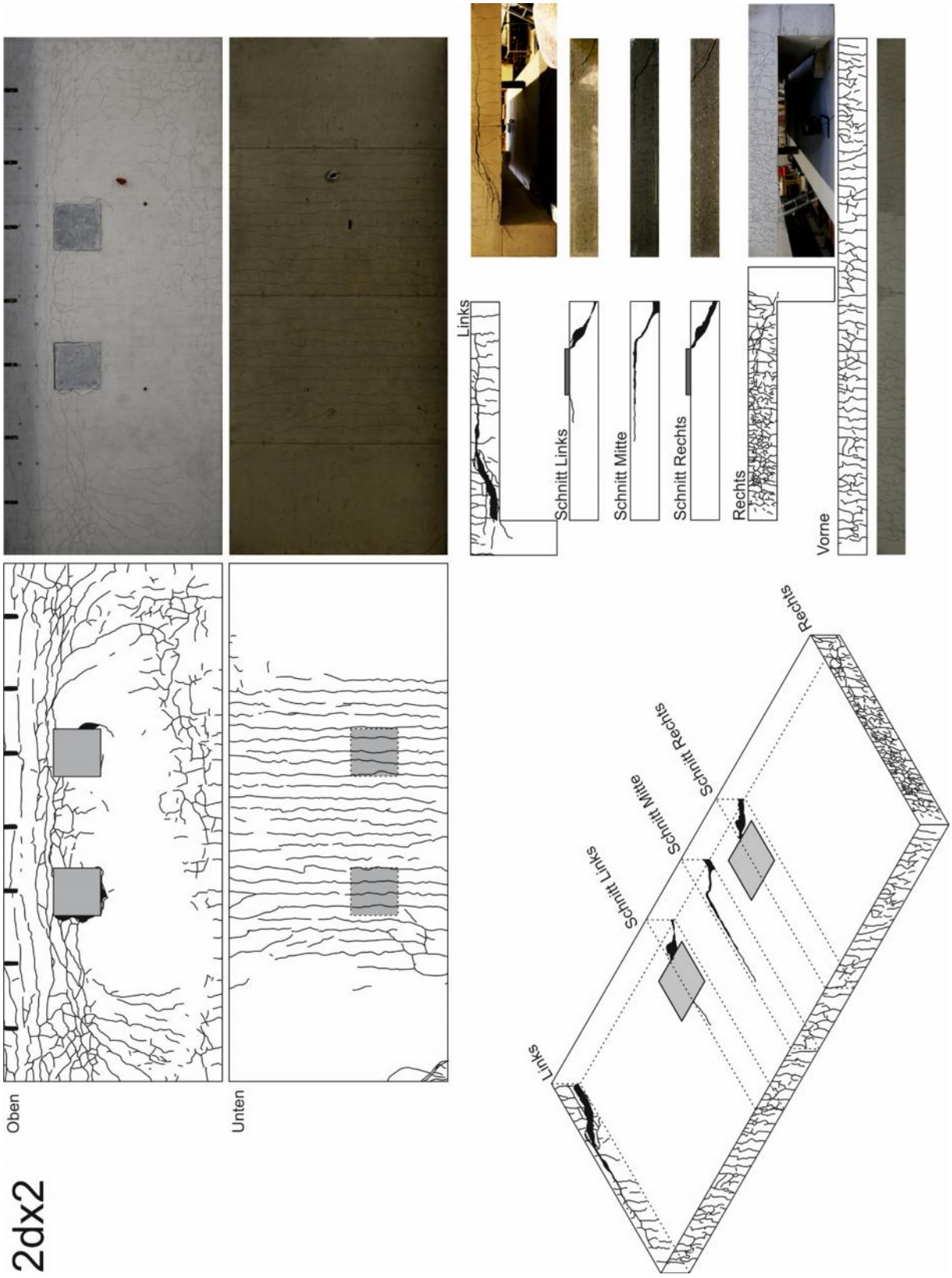


Bild 78: Versagensrisse Versuch P9; a_v = 2*d*ò2

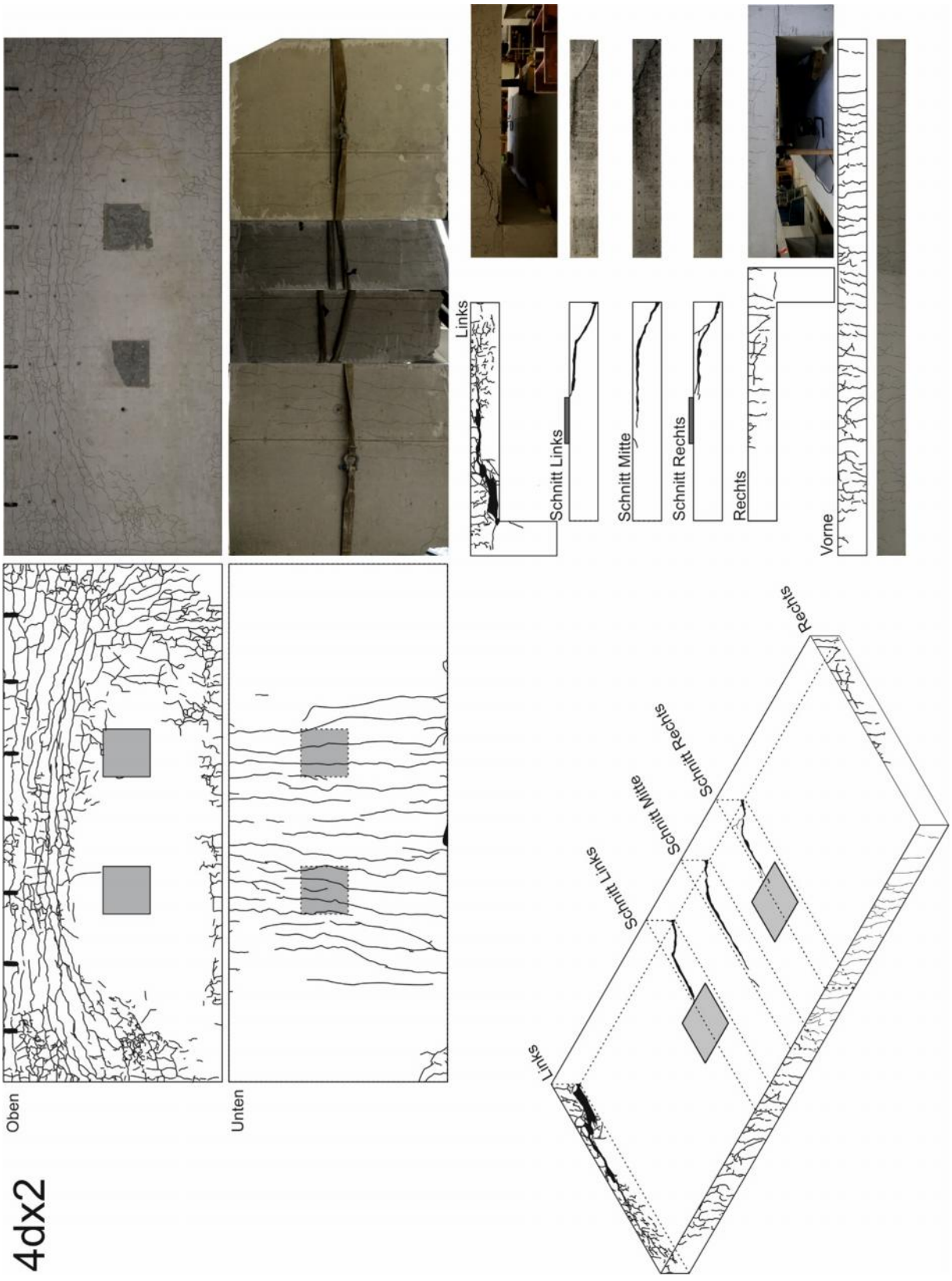


Bild 79: Versagensrisse Versuch P10; a_v = 4*d*ò2

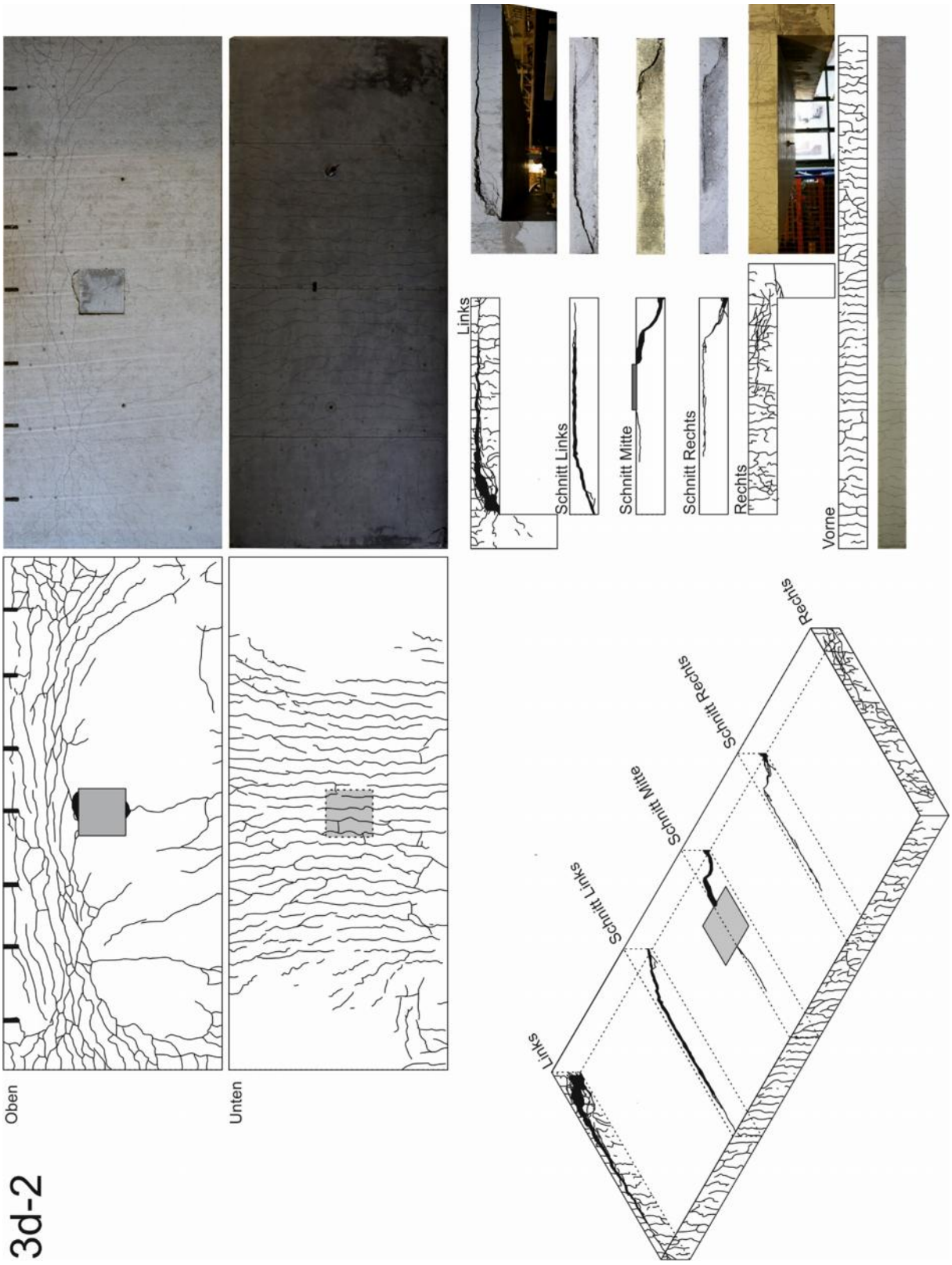


Bild 80: Versagensrisse Versuch P11; $a_v = 3d$

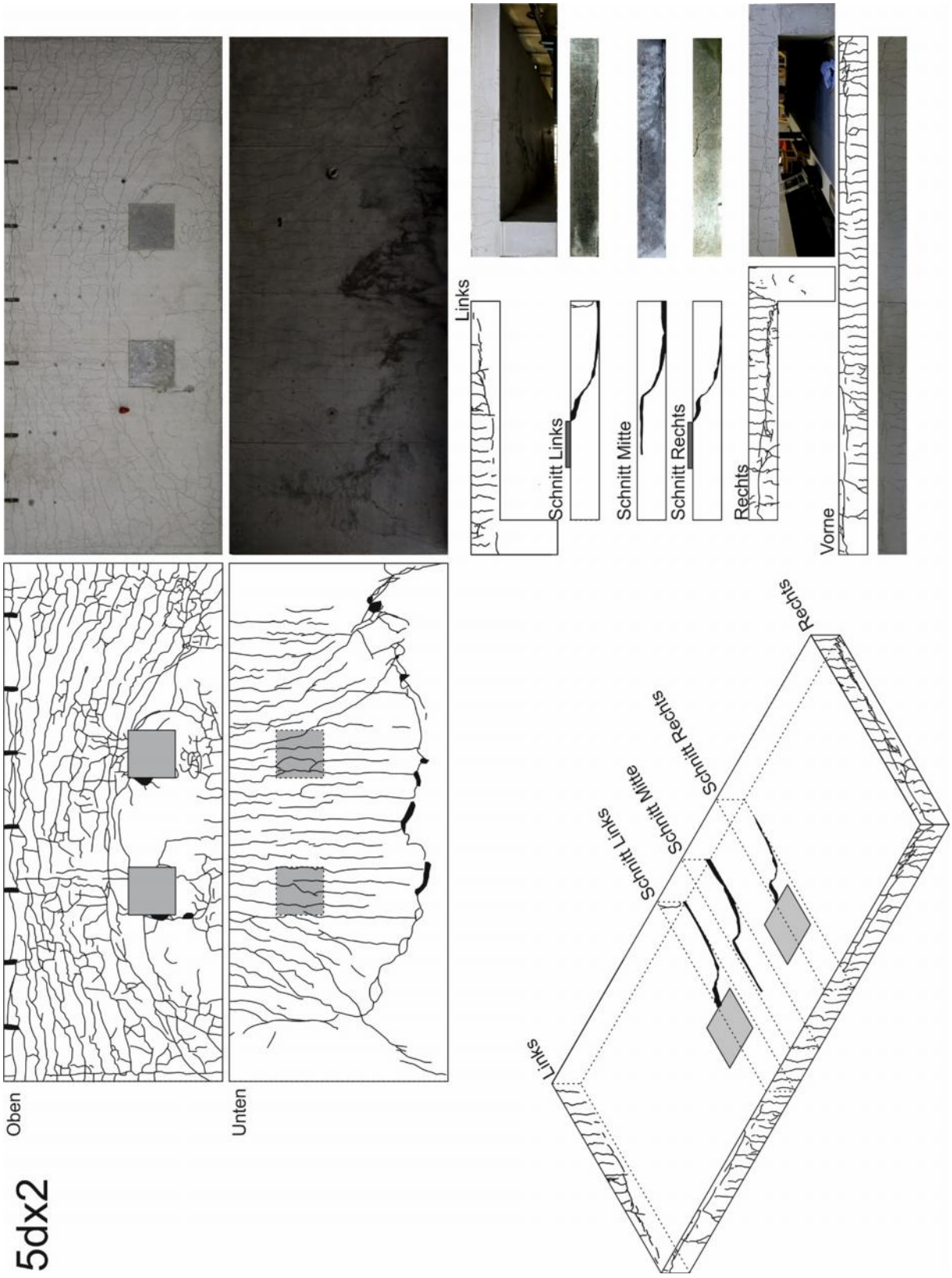


Bild 81: Versagensrisse Versuch P12; a_v = 5*d*ò2

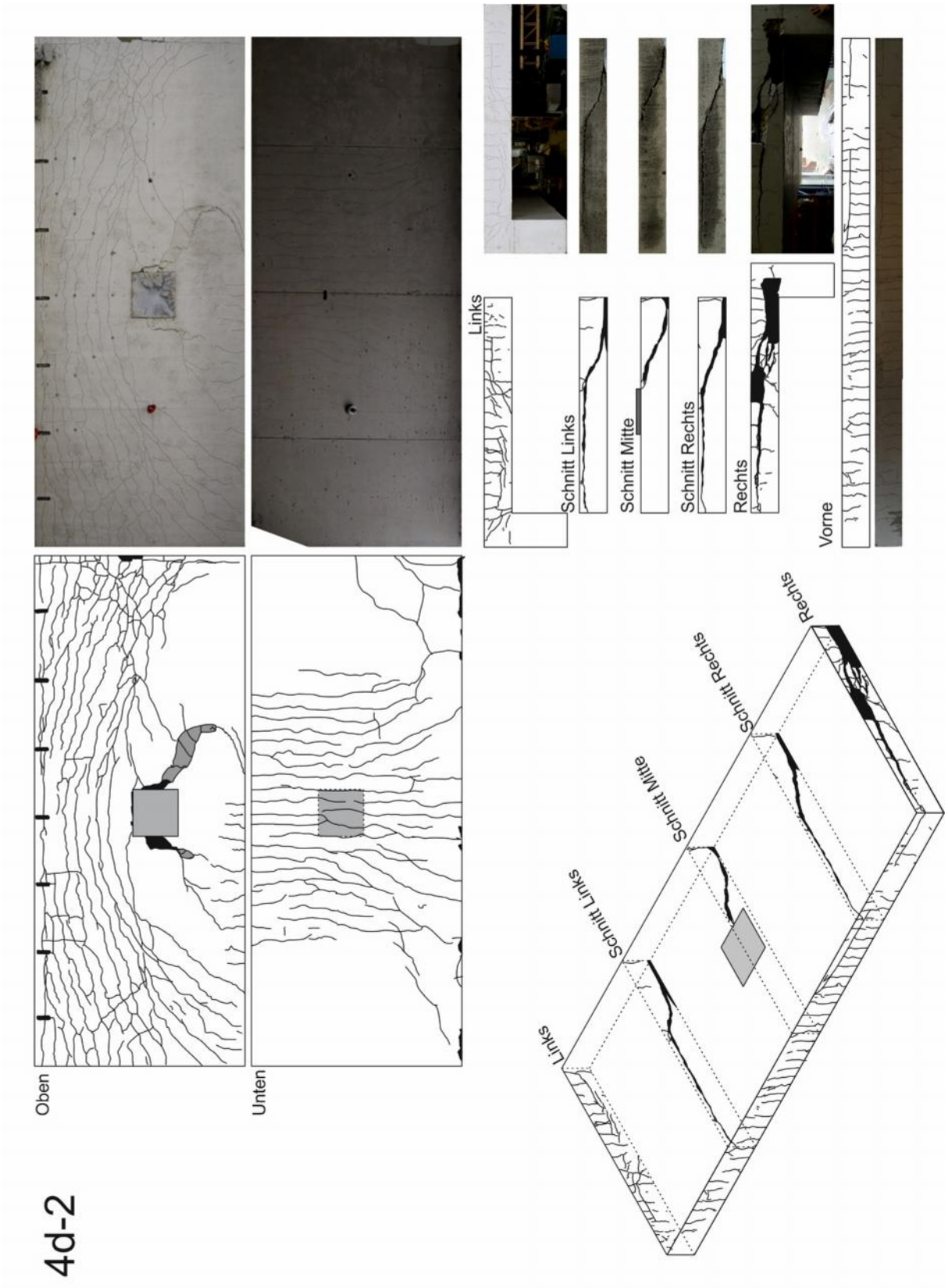


Bild 82: Versagensrisse P13; a_v = 4*d*

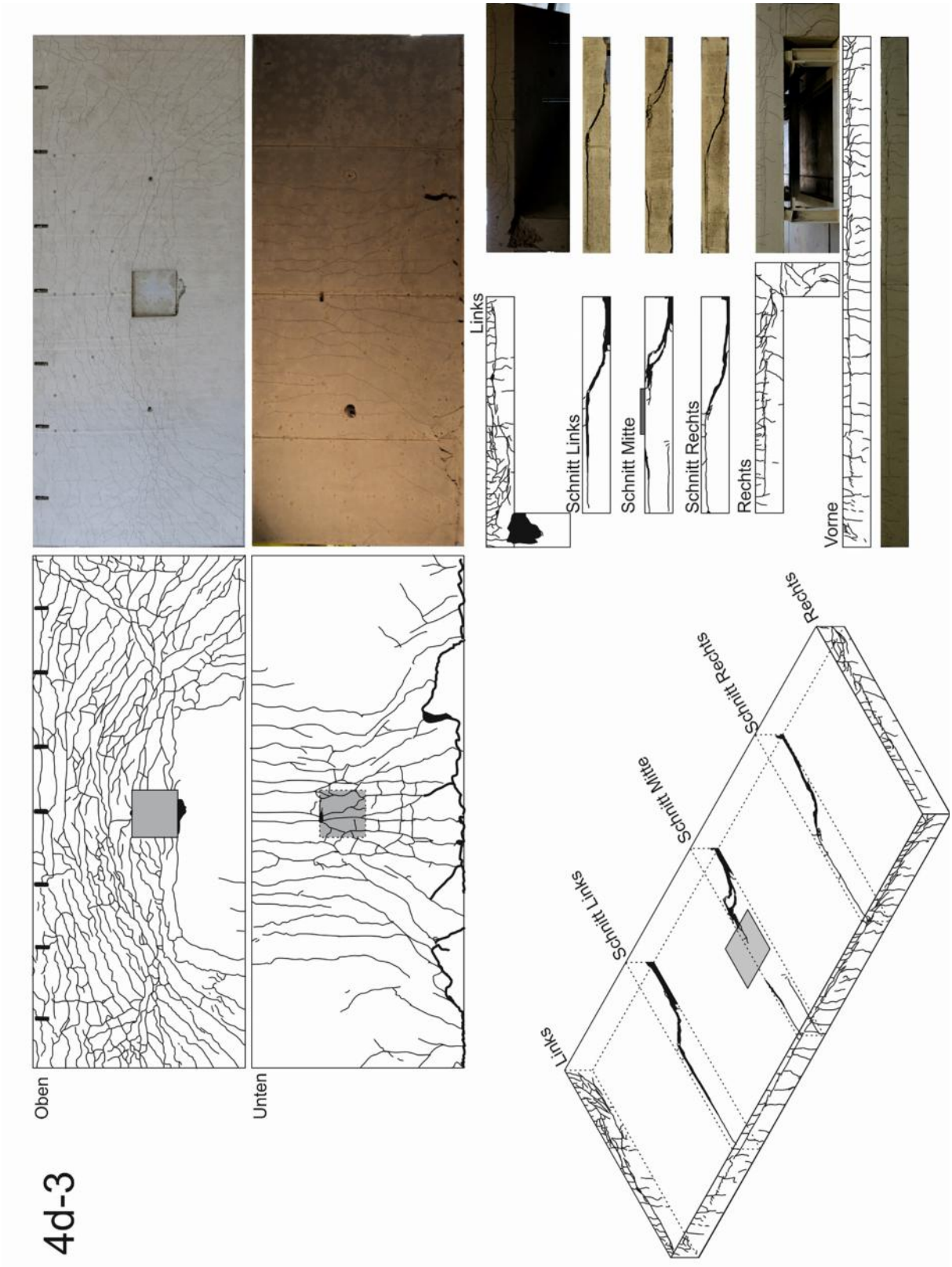


Bild 83: Versagensrisse Versuch P14; a_v = 4*d*; #Ą8-100 mm unten

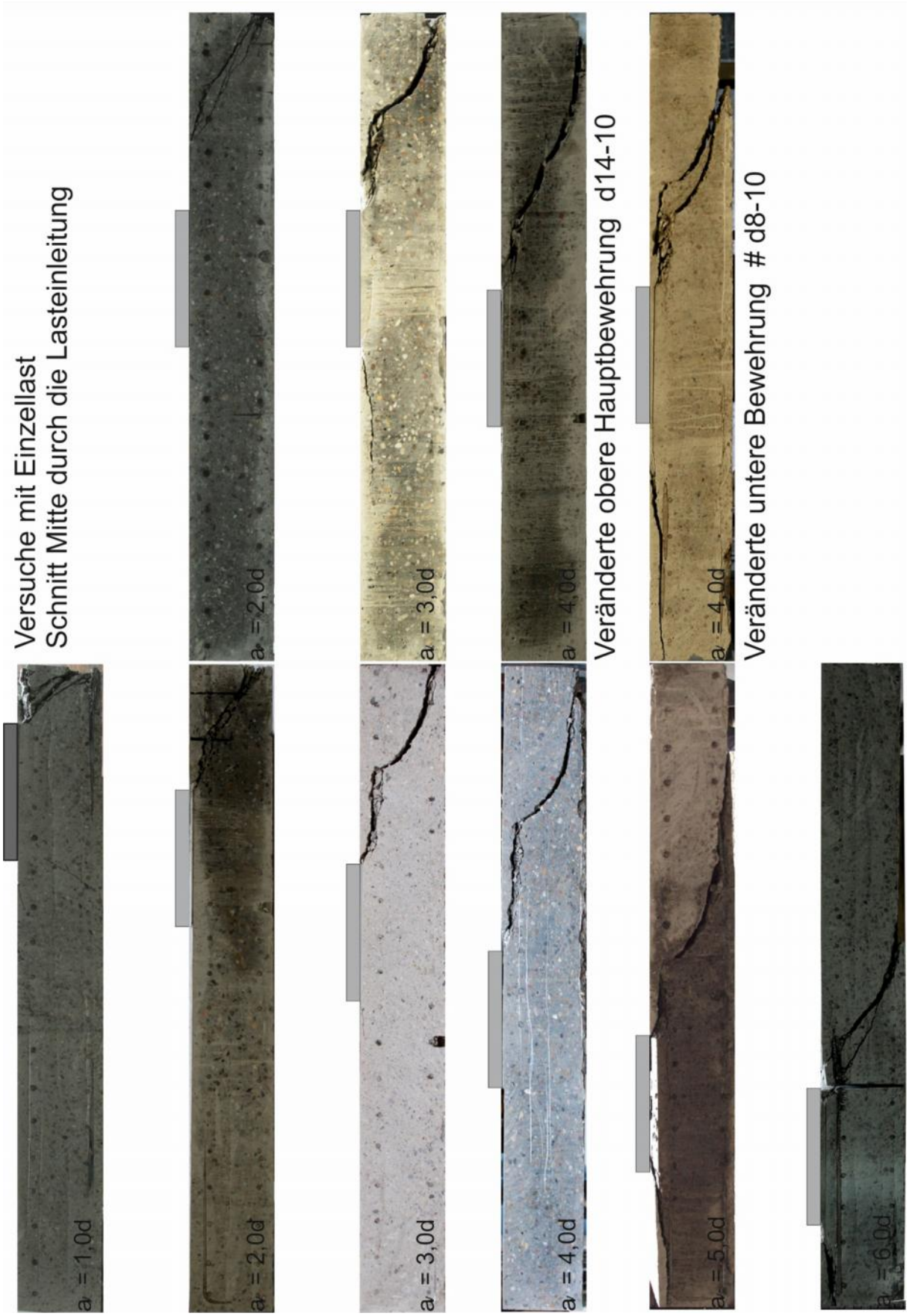


Bild 84: Versuche mit Einzellast - Schnitt Mitte

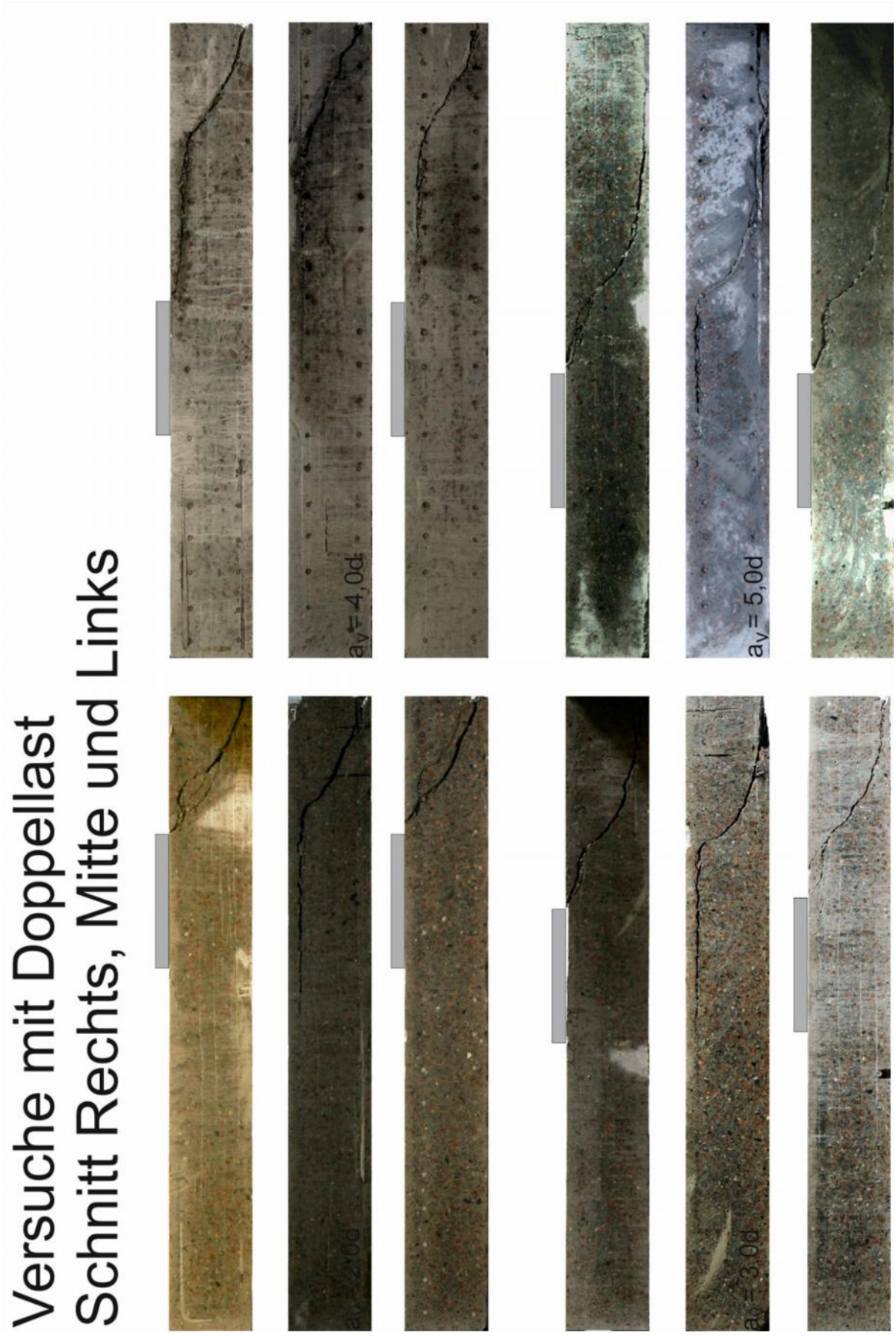


Bild 85: Versuche mit Doppellast - Vergleich der Versagensrisse im Platteninneren

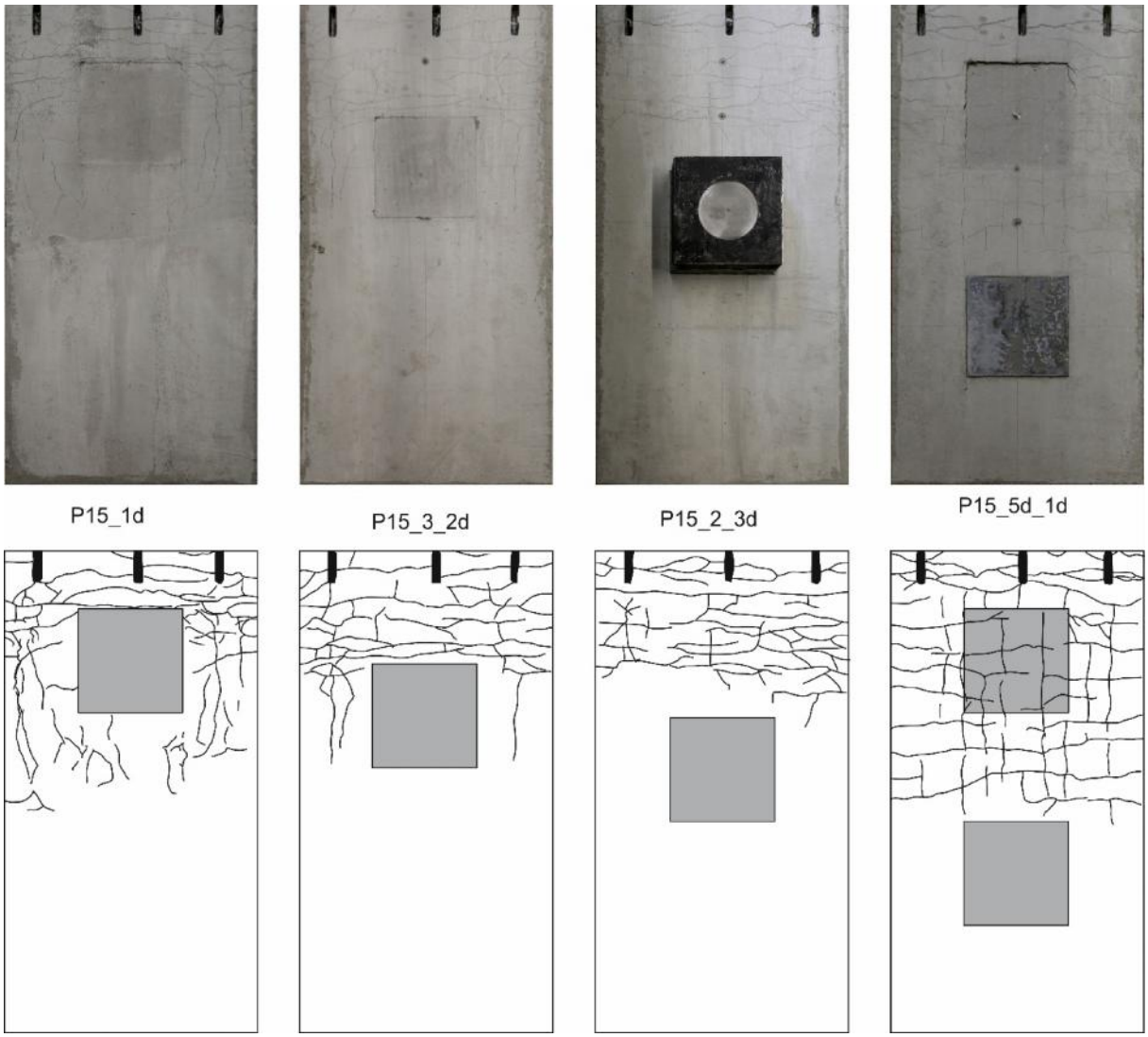


Bild 86: Versuch P15: Rissbilder von oben

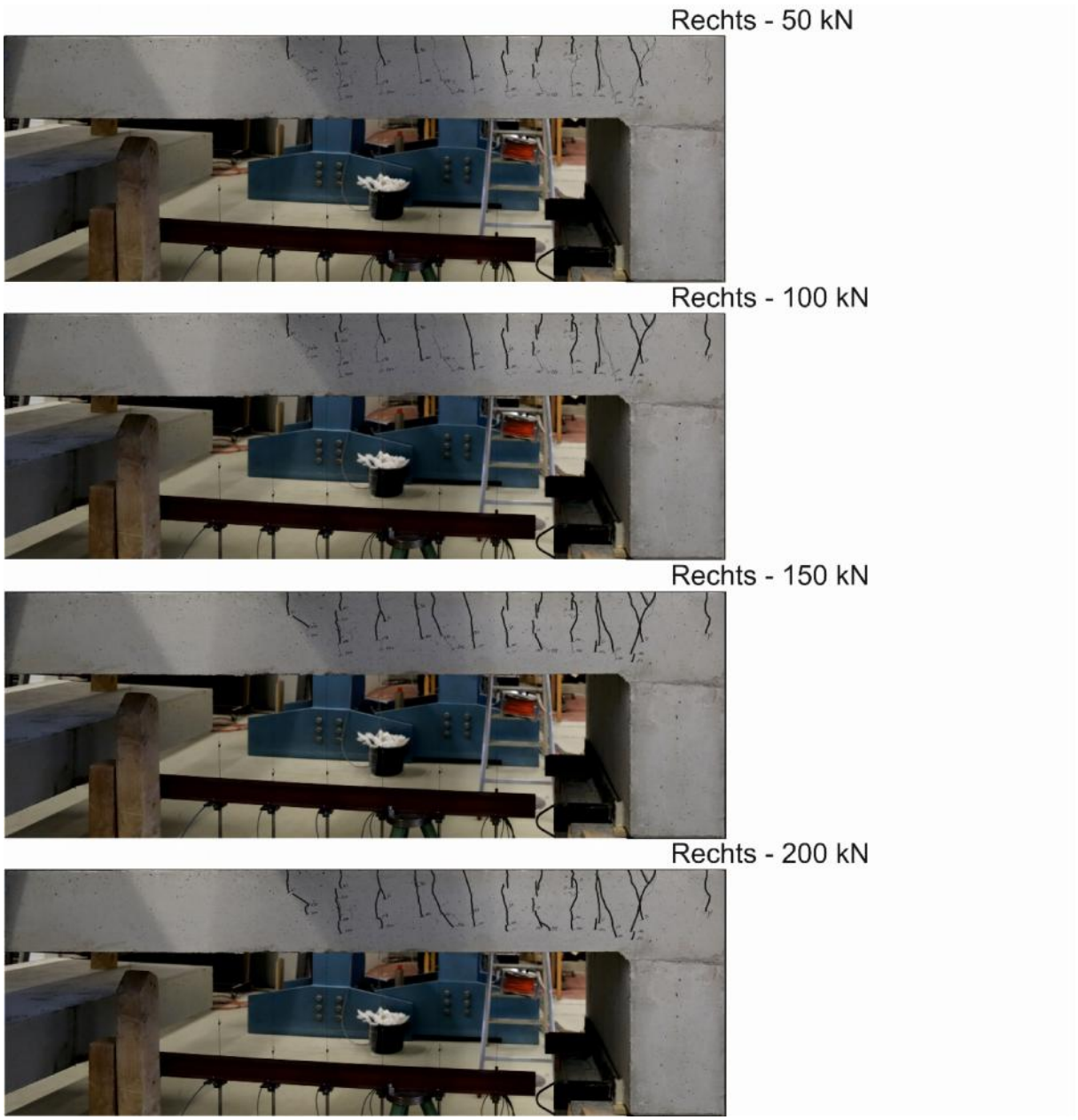


Bild 87: Versuch P15-5d; Rissbilder rechte Plattenseite

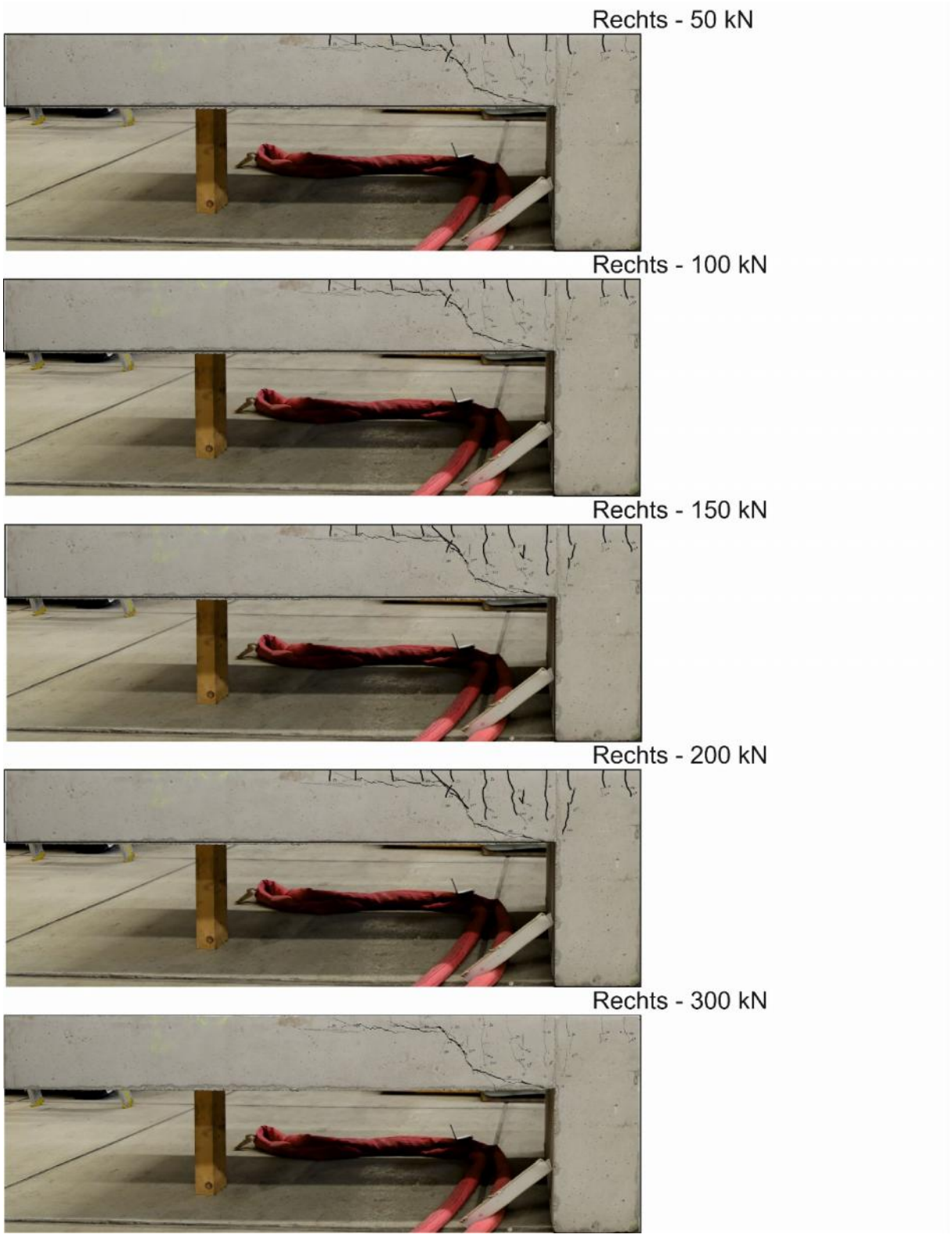


Bild 88: Versuch P15-3*d*; Rissbilder rechte Plattenseite

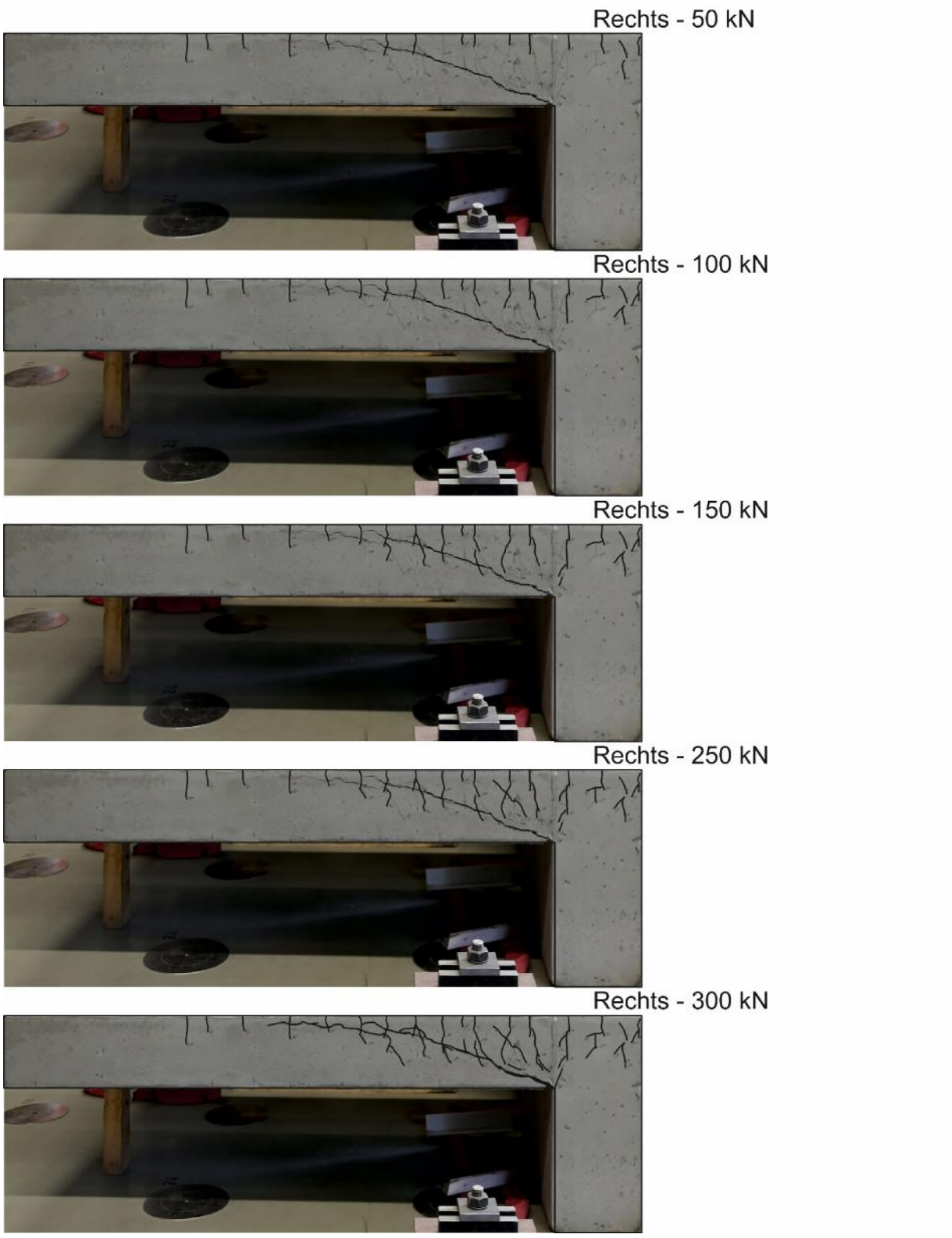


Bild 89: Versuch P15-2*d*; Rissbilder rechte Plattenseite

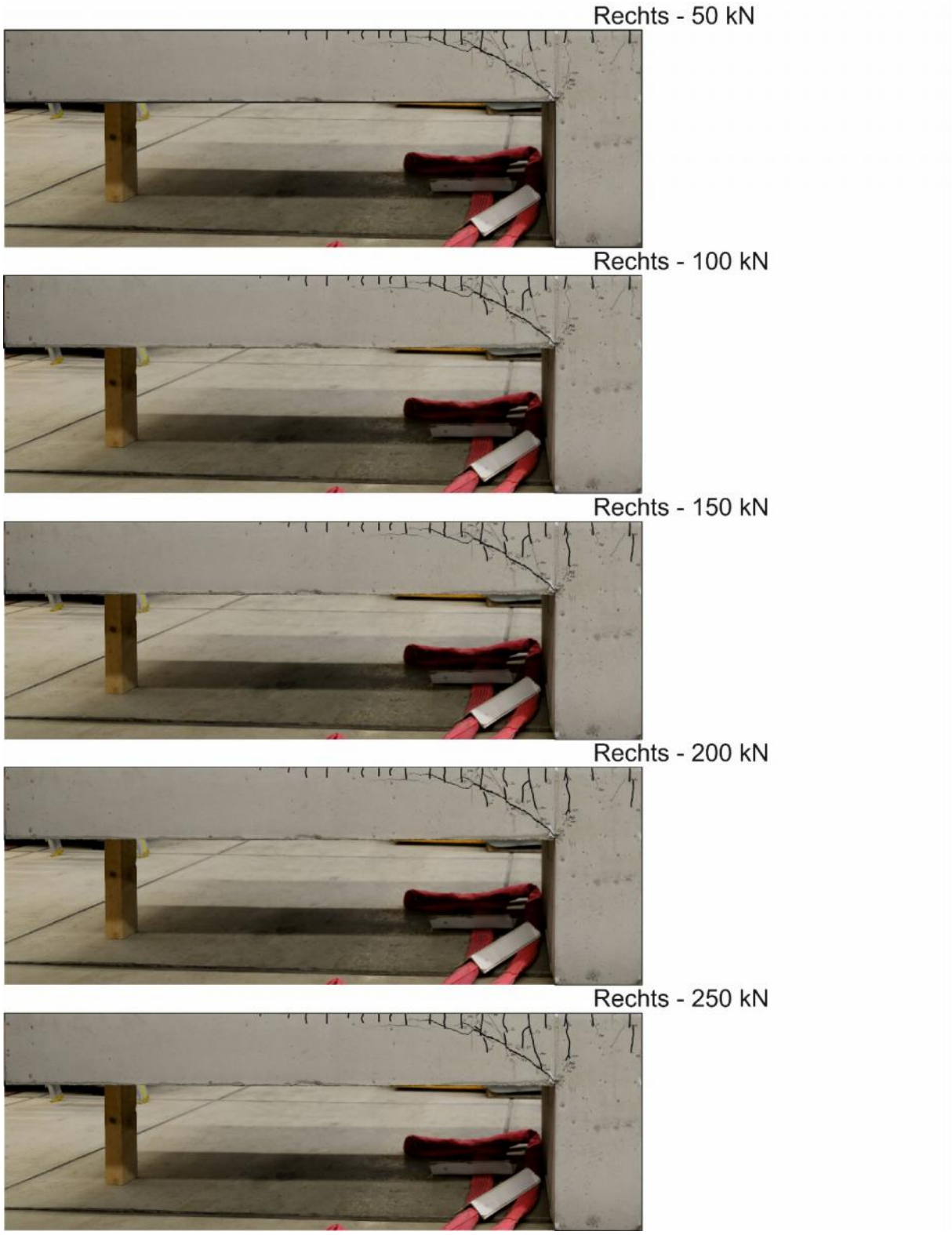


Bild 90: Versuch P15-1*d*; Rissbilder rechte Plattenseite

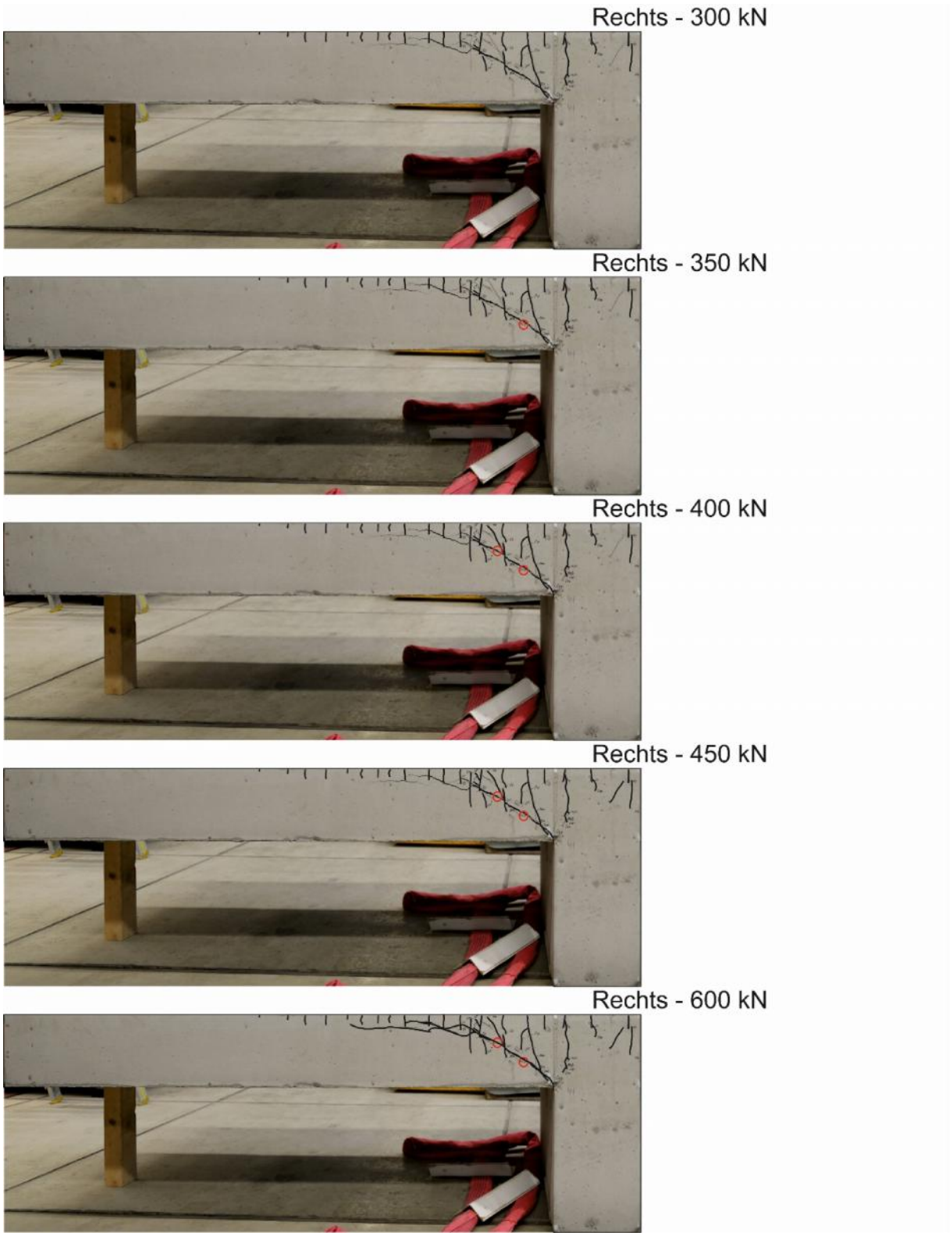


Bild 91: Versuch P15-1*d*; Rissbilder rechte Plattenseite

4 Literatur- und Abbildungsverzeichnis

4.1 Literaturverzeichnis

1992_1-1, D. E. (01 2011). Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1-1 Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, einschl. DIN EN 1992-1-1/NA:2011-01. *Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton und Spannbetonbauwerken*.

Kohl, M. (2014). *Tragverhalten von Stahlbetontragwerken ohne Querkraftbewehrung unter Ermüdungsbeanspruchung,Dissertation, Band 10, Schriftenreihe des Instituts für Massivbau der TUHH.* Aachen: Shaker Verlag.

Lantsoght, E., van der Veen, C., & Walraven, J. (März/April 2013). Shear in One-Way Slabs under Concentreted Load Close to Support. *ACI Structural Journal*, S. 275-284.

Latte, S. (2011). Zur Tragfähigeit von Stahlbeton-Fahrbahnplatten ohne Querkraftbewehrung. *Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Massivbau der TUHH, Heft 6*. Aachen: Shaker Verlag.

Leonhardt, F., & Walther, R. (1962). *DAfStb. Heft 151 - Schubversuche an einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung zur Ermittlung der Tragfähigkeit und der oberen Schubspannungsgrenze.* Berlin: Ernst und Sohn.

Reißen, K., & Hegger, J. (02 2013a). Experimentelle Untersuchung zur mitwirkenden Breite für Querkraft von einfeldrigen Fahrbahnplatten. *Beton- und Stahlbetonbau*, S. 96-103.

Rombach, G. A., Latte, S., & Steffens, R. (2009). *Querkrafttragfähigkeit von Fahrbahnplatten ohne Querkraftbewehrung.* Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr.

4.2Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Versuchsaufbau 7
Bild 2: Prüfzylinder a) Schleifen der Betonzylinder; b) Betonprobe nach der Druckfestigkeitsprüfung 9
Bild 3: Belastungszyklus zur Bestimmung des E-Moduls nach DIN EN 12390-13, Verfahren A 9
Bild 4: Festigkeitsentwicklung für ausgewählte Versuchsreihen im Vergleich zu Normwerten 11
Bild 5: Bewehrungsplan 12
Bild 6: Exemplarische Spannungsdehnungsbeziehungen des Bewehrungsstahls mit Erläuterung der im Anhang A dokumentierten Werte 13
Bild 7: Herstellung der Platten und der Prüfkörper 14
Bild 8: Messtechnik – Exemplarische Anordnung auf der Platte 15
Bild 9: Links: Stahlstift mit Schlauchummantelung vor der Betonage; Rechts: Messung der Plattendicke im Bereich der Lasteinleitung während des Versuchs P3 16
Bild 10: Dehnungsaufnehmer DD1 zur Bestimmung der Stahldehnung in eingebautem Zustand 16
Bild 11: Rissweitenmessung am Hauptbiegeriss im Bereich des Auflagers (Steg) der Platte - Draufsicht 17
Bild 12: Versuchsstand mit Messrahmen 18
Bild 13: Versuchsaufbau mit Messrahmen und Zusatzkonstruktion zur Messung der Auflagerverformungen 18
Bild 14: Detail Rückverankerung des Versuchskörpers 19
Bild 15: Erweiterung des Versuchsaufbaus für die Versuche mit auflagernaher Laststellung 20
Bild 16: Last-Zeit-Kurve für den Versuch P2 21
Bild 17: Pressenanordnung für die Versuche mit Doppellast 22
Bild 18: Rückspannung bei Versuch P12 und Weichenkonstruktion der Hydraulik zur Steuerung der beiden Pressen 22
Bild 19: Versuchsaufbau für die Laststellung bei a_v = 2,0*d* mit Doppellast, 2d×2 23
Bild 20: Schalung mit Unterteilung zur Herstellung der 1 m breiten Plattenstreifen 23
Bild 21: Versuchsaufbau für die 1 m breiten Plattenstreifen exemplarisch für P15-2d 24
Bild 22: Versuchsaufbau für die 1 m breiten Plattenstreifen mit Rückspannung exemplarisch P15-2d 24
Bild 23: a) Eingedrückte Lastplatte während des Versuchs;
b) Sägeschnitt durch den Bereich der Lasteinleitung 26
Bild 24: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P1, 3d-1 26
Bild 25: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P2, 5d 27
Bild 26: Ausschnitt aus dem Rissverlauf; Austreten des Schrägrisses auf der Unterseite der Platte 28
Bild 27: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P3, 4d-1 28
Bild 28: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P4, 6d 29
Bild 29: Schrägriss auf der Vorderseite des Kragarms 29
Bild 30: Versagensbild von unten 30
Bild 31: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P5; 2d-1 30
Bild 32: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P6, 1d 31
Bild 33: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P7, 2d-2 32
Bild 34: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P8, 3d×2 32
Bild 35: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P9, 2d×2 33
Bild 36: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P10, 4d×2 34

Bild 37: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P11, 3d×2 34
Bild 38: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P12, 5d× 2 35
Bild 39: Rissbild auf der Plattenunterseite mit dem gekennzeichneten Verlauf des Austritts des Schrägrisses 35
Bild 40: Rissbild auf den Seitenflächen P12 36
Bild 41: Eingedrückte Lastplatten mit Versagensriss auf der Oberseite analog zu Bild 44 .. 36
Bild 42: Rissverlauf linke Seite Versuch P12 36
Bild 43: Platte kurz vor Erreichen der maximalen Last 37
Bild 44: Platte nach Überschreiten der Maximallast, V2 gekennzeichnet 37
Bild 45: Verformungen gemessen durch die Wegaufnehmer V1 und V2 38
Bild 46: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P13, 4d-2 38
Bild 47: Betondehnungen im Bereich der Lasteinleitung für Versuch P13; 4d-2 39
Bild 48: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P14 40
Bild 49: Betondehnungen im Bereich der Lasteinleitung Versuch P13 40
Bild 50: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P15-1d 41
Bild 51: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P15-2d 42
Bild 52: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P15-3d 42
Bild 53: Kraft-Zeit - und Kraft-Weg Verlauf für Versuch P15-5d 43
Bild 54: Kraft-Zeit-Kurve sowie Last-Verformungskurve bei Wiederbelastung von P15-5d bei $a_v = 1{,}0d$ 44
Bild 55: Transportwagen 45
Bild 56: Versuchskörper P1 nach dem Zerschneiden 46
Bild 57: Rissbild im Inneren von P1 46
Bild 58: Last-Verformungskurven der Versuche mit einer Blocklast 49
Bild 59: Dickenänderungen der Platte P4-6d an ausgewählten Stellen während des Versuchs 50
Bild 60: Dickenänderungen an ausgewählten Stellen der Platte P6-1d während des Versuchs 50
Bild 61: Vergleich des Erhöhungsfaktors 1/β zwischen EC2 und den Versuchen mit Einzellasten 53
Bild 62: Lastverformungskurven der Versuche mit $a_v = 4{,}0d$ 54
Bild 63: Lastverformungskurven der Versuche mit zwei Blocklasten 56
Bild 64: Vergleich der Rissverläufe der Versuche 5d und 5d×2 57
Bild 65: Last-Zeit-Kurve für Versuch 2d×2 57
Bild 66: Auswertung Versuch 2d×2 hinsichtlich Rissöffnung und Pressenkräfte der 3 Pressen 59
Bild 67: Querkraftverläufe aus einer Einheitsgesamtlast von 100 kN der Platten 4d und 4d×2 am Steganschnitt und im Abstand 0,5d von Vorderkante Lastplatte (linear elastische FE-Berechnung) 60
Bild 68: Rissbilder Versuche 2d-1 und 2d×2 im Vergleich 61
Bild 69: Dickenänderungen ausgewählter Punkte der Versuche mit Doppellast 2d×2 und 5d×2 63
Bild 70: Versagensrisse Versuch P1 65
Bild 71: Versagensrisse Versuch P2 66
Bild 72: Versagensrisse Versuch P3 67
Bild 73: Versagensrisse VersuchP4 68
Bild 74: Versagensrisse Versuch P5 69
Bild 75: Versagensrisse Versuch P6 70
Bild 76: Versagensrisse Versuch P7 71
Bild 77: Versagensrisse Versuch P8 72

Bild 78: Versagensrisse Versuch P9 ... 73
Bild 79: Versagensrisse Versuch P10 ... 74
Bild 80: Versagensrisse Versuch P11 ... 75
Bild 81: Versagensrisse Versuch P12 ... 76
Bild 82: Versagensrisse P13 ... 77
Bild 83: Versagensrisse Versuch P14 ... 78
Bild 84: Versuche mit Einzellast - Schnitt Mitte ... 79
Bild 85: Versuche mit Doppellast - Vergleich der Versagensrisse im Platteninneren ... 80
Bild 86: P15 Rissbilder von oben ... 81
Bild 87: Versuch P15-5d; Rissbilder rechte Plattenseite ... 82
Bild 88: Versuch P15-3d; Rissbilder rechte Plattenseite ... 83
Bild 89: Versuch P15-2d; Rissbilder rechte Plattenseite ... 84
Bild 90: Versuch P15-1d; Rissbilder rechte Plattenseite ... 85
Bild 91: Versuch P15-1d; Rissbilder rechte Plattenseite ... 86

Bild 92: Anordnung der Messtechnik Versuch P1 ... B-1
Bild 93: Anordnung der Messtechnik Versuch P2 ... B-2
Bild 94: Anordnung der Messtechnik Versuch P3 ... B-3
Bild 95: Anordnung der Messtechnik Versuch P4 ... B-4
Bild 96: Anordnung der Messtechnik Versuch P5 ... B-5
Bild 97: Anordnung der Messtechnik Versuch P6 ... B-6
Bild 98: Anordnung der Messtechnik Versuch P7 ... B-7
Bild 99: Anordnung der Messtechnik Versuch P8 ... B-8
Bild 100: Anordnung der Messtechnik Versuch P9 ... B-9
Bild 101: Anordnung der Messtechnik Versuch P10 ... B-10
Bild 102: Anordnung der Messtechnik Versuch P11 ... B-11
Bild 103: Anordnung der Messtechnik Versuch P12 ... B-12
Bild 104: Anordnung der Messtechnik Versuch P13 ... B-13
Bild 105: Anordnung der Messtechnik Versuch P14 ... B-14
Bild 106: Anordnung der Messtechnik Versuch P15-1d ... B-15
Bild 107: Anordnung der Messtechnik Versuch P15-2d ... B-16
Bild 108: Anordnung der Messtechnik Versuch P15-3d ... B-17
Bild 109: Anordnung der Messtechnik Versuch P15-5d ... B-18
Bild 110: Anordnung der Messtechnik Versuch P15-1d vg ... B-19

Anhänge

Anhang A: Materialprüfungen
Anhang B: Anordnung der Messaufnehmer
Anhang C: Spezifikationen der Messtechnik
Anhang D: Versuchsergebnisse

Anhang A Materialprüfungen

Betoneigenschaften

Erläuterungen zu den dokumentierten Werten sind Kapitel 3.2.1 zu entnehmen.

Betonprüfungen zu Versuchskörper P1 (Herstellung am 03.03.2015)

Prüfung vom 19.03.2015, Alter 15 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.1.1: P1; Druckfestigkeit vor Ausschalen

Probe Nr.	Maße [mm]		F [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	h		
1	150,0	300,0	457	25,9

Prüfung vom 31.03.2015, Alter 28 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.1.2: P1; Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	h				
1	150,0	299,1	12,147	2298	533,9	30,2
2	150,0	299,4	12,164	2299	568,4	32,2
3	150,0	299,1	12,071	2284	553,6	31,3
Mittelwert:				2294		31,2

Prüfung vom 31.03.2015, Alter 28 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben 28 Tage Wasser, in Anlehnung an EC2

Tabelle A.1.3: P1; Masse (feucht), Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	F [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	h			
1	150,0	296,8	12,143	598,8	33,9
2	150,0	299,4	12,253	593	33,6
3	150,0	300,0	12,260	612,1	34,6
Mittelwert:					34,0

Prüfung vom 17.06.2015, Alter 106 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.1.4: P1; Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	*h*				
1	150,0	298,8	11,926	2259	667,3	37,8
2	150,0	299,0	11,962	2264	667,3	37,8
3	150,0	299,4	11,966	2262	670,2	37,9
Mittelwert:				2261		37,8

Prüfung vom 17.06.2015, Alter 106 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben 106 Tage Wasser

Tabelle A.1.5: P1; Masse (feucht), Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		*m* [kg]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	*h*			
1	150,0	300,0	12,330	878	49,7

Prüfung vom 17.06.2015, Alter 106 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.1.6: P1; Dichte, Spaltzugfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	$f_{ct,sp}$ [N/mm²]
	ø	*h*				
1	150,0	299,2	12,033	2276	211,3	3,00
2	150,0	299,6	12,080	2282	198,5	2,81
3	150,0	299,2	12,176	2303	216,0	3,06
Mittelwert:				2290	208,6	2,96

Prüfung vom 19.06.2015, Alter 108 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 17.06.2015

Tabelle A.1.7: P1; Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [N/mm²]	σ_b [N/mm²]	$\varepsilon_{a,0}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [N/mm²]
	ø	h							
1	150,0	299,3	12,103	2288	12,5	3,7	0,484	0,130	24.870
2	150,0	299,2	11,969	2264	12,5	3,7	0,464	0,119	25.500
3	150,0	298,9	11,974	2267	12,6	3,8	0,508	0,137	23.760
Mittelwert:				2273					24.710

Probe Nr.	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,3}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [N/mm²]	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [N/mm²]
1	0,494	0,188	28.780	221,0	65,5	648,2	36,7
2	0,473	0,163	28.480	221,4	65,6	693,2	39,2
3	0,518	0,200	27.690	222,5	66,8	667,1	37,8
Mittelwert:			28.317				37,9

Betonprüfungen zu Versuchskörper P2 (Herstellung am 21.04.2015)

Prüfung vom 19.05.2015, Alter 28 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.2.1: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_{ct} [N/mm²]
	ø	h				
1	150,0	298,5	12,061	2286	683,2	38,7
2	150,0	299,3	12,079	2284	685,9	38,8
3	150,0	299,2	12,093	2287	691,3	39,1
Mittelwert:				2286		38,9

Prüfung vom 19.05.2015, Alter 28 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben 28 Tage Wasser

Tabelle A.2.2: Masse (feucht), Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	F [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	h			
1	150,0	298,8	12,132	657,9	37,2
2	150,0	298,8	12,184	679,7	38,5
3	150,0	298,0	12,119	668,1	37,8
Mittelwert:					37,8

Prüfung vom 21.07.2015, Alter 91 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.2.3: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	h				
1	150,0	298,3	12,013	2279	812,5	46,0
2	150,0	298,3	11,942	2265	822	46,5
3	150,0	299,4	11,998	2268	823,9	46,6
Mittelwert:				2271		46,4

Prüfung vom 21.07.2015, Alter 91 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.2.4: Dichte, Spaltzugfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	$f_{ct,sp}$ [N/mm²]
	ø	h				
1	150,0	297,6	11,908	2264	233,8	3,33
2	150,0	298,7	12,006	2275	226,9	3,22
3	150,0	298,5	12,021	2279	201,5	2,86
Mittelwert:				2270	220,7	3,14

Prüfung vom 24.07.2015, Alter 94 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper
Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 17.06.2015

Tabelle A.2.5: Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	[kg] h	m [kg/m³]	ρ [N/mm²]	σ_a [N/mm²]	σ_b [mm/m]	$\varepsilon_{a,0}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [N/mm²]	$E_{c,0}$ [mm]
1	150,0	299,3	11,893	2249	12,6	3,8	0,417	0,094	27.240
2	150,0	298,1	11,994	2277	12,6	3,8	0,406	0,088	27.690
3	150,0	299,4	11,966	2262	12,6	3,8	0,416	0,103	28.100
Mittelwert:				2262					27.677

Probe Nr.	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,3}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [N/mm²]	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [N/mm²]
1	0,424	0,132	30.140	222,0	66,5	858,3	48,6
2	0,412	0,127	30.900	222,1	66,5	830,0	47,0
3	0,419	0,121	29.510	222,1	66,7	801,0	45,3
Mittelwert:			30.183				47,0

Prüfung vom 24.07.2015, Alter 94 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben 106 Tage Wasser

Tabelle A.2.6: Masse (feucht), Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	F [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	h			
1	150,0	298,9	12,209	896	50,7

Betonprüfungen zu Versuchskörper P3 (Herstellung am 21.07.2015)

Prüfung vom 18.08.2015, Alter 28 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.3.1: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	*h*				
1	150,0	299,0	12,159	2301	645,1	36,5
2	150,0	299,6	12,189	2302	618,6	35,0
3	150,0	298,9	12,203	2310	619,7	35,1
Mittelwert:				2305		35,5

Prüfung vom 18.08.2015, Alter 28 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben 28 Tage Wasser

Tabelle A.3.2: Masse (feucht), Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		*m* [kg]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	*h*			
1	150,0	298,9	12,201	637,3	36,1
2	150,0	298,5	12,314	635,7	36,0
3	150,0	298,7	12,170	628,5	35,6
Mittelwert:					35,9

Prüfung vom 03.09.2015, Alter 44 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.3.3: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	*h*				
1	150,0	299,0	12,168	2303	707,7	40,0
2	150,0	299,2	12,197	2307	713,1	40,4
3	150,0	298,8	12,084	2289	699,1	39,6
Mittelwert:				2299		40,0

Prüfung vom04.09.2015, Alter 45 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.3.4: Dichte, Spaltzugfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kN]	F [N/mm²]	f_{ct} N/mm²
	ø	h				
1	150,0	299,2	12,195	2306	213,8	3,03
2	150,0	299,3	12,059	2280	192,8	2,73
3	150,0	299,6	12,124	2290	181,3	2,57
Mittelwert:				2290	196,0	2,78

Prüfung vom 03.09.2015, Alter 44 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 17.06.2015

Tabelle A.3.5: Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [N/mm²]	σ_b [N/mm²]	$\varepsilon_{a,0}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [N/mm²]
	ø	h							
1	150,0	298,9	12,109	2293	13,3	4,0	0,437	0,121	29.530
2	150,0	299,4	12,089	2285	13,3	4,0	0,433	0,115	29.310
3	150,0	298,8	12,114	2294	13,3	4,0	0,428	0,119	30.140
Mittelwert:				2291					29.660

Probe Nr.	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,3}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [N/mm²]	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [N/mm²]
1	0,444	0,160	32.860	235,6	70,7	703	39,8
2	0,440	0,151	32.250	235,4	70,7	672,7	38,1
3	0,433	0,152	33.150	235,2	70,6	717,2	40,6
Mittelwert:			32.753				39,5

Prüfung vom 03.09.2015, Alter 44 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben 44 Tage Wasser

Tabelle A.3.6: Masse (feucht), Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	F [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	h			
1	150,0	299,1	12,218	725,6	41,1

Betonprüfungen zu Versuchskörper P4 (Herstellung am 22.12.2015)

Prüfung vom 19.01.2016, Alter 28 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.4.1: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	*h*				
1	150,0	299,4	12,098	2287	644	36,4
2	150,0	299,0	12,127	2295	676	38,3
3	150,0	299,5	12,117	2289	665	37,6
Mittelwert:				2290		37,4

Prüfung vom 19.01.2016, Alter 28 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben 28 Tage Wasser

Tabelle A.4.2: Masse (feucht), Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		*m* [kg]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	*h*			
1	150,0	299,5	12,337	677	38,3
2	150,0	289,9	12,399	697	39,4
3	150,0	299,8	12,358	682	38,6
Mittelwert:					38,8

Prüfung vom 23.02.2016, Alter 63 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.4.3: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	h				
1	150,0	299,2	12,088	2286	761	43,1
2	150,0	298,9	12,065	2284	748	42,3
3	150,0	299,4	12,185	2303	773	43,7
Mittelwert:				2291		43,0

Prüfung vom 23.02.2016, Alter 63 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben 63 Tage Wasser

Tabelle A.4.4: Masse (feucht), Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	F [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	h			
1	150,0	299,6	12,350	870	49,2

Prüfung vom23.02.2016, Alter 63 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.4.5: Dichte, Spaltzugfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_{ct} [N/mm²]
	ø	h				
1	150,0	298,8	12,067	2285	218,0	3,10
2	150,0	298,0	11,994	2278	219,0	3,20
3	150,0	299,0	12,068	2284	216,0	3,07
Mittelwert:				2280	217,7	3,09

Prüfung vom 23.02.2016, Alter 63 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper
Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 23.02.2016

Tabelle A.4.6: Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [N/mm²]	σ_b [N/mm²]	$\varepsilon_{a,0}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [N/mm²]
	ø	*h*							
1	150,0	298,9	12,131	2297	14,4	4,3	0,520	0,142	26.650
2	150,0	299,3	12,064	2281	14,4	4,3	0,552	0,154	25.310
3	150,0	299,0	12,086	2287	14,4	4,3	0,556	0,154	25.060
Mittelwert:				2288					25.673

Probe Nr.	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,3}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [N/mm²]	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [N/mm²]
1	0,535	0,207	30.710	254,0	76,0	768	43,5
2	0,563	0,222	29.540	254,0	76,0	738	41,8
3	0,566	0,223	29.370	254,0	76,0	747	42,3
Mittelwert:			29.873				42,5

Betonprüfungen zu Versuchskörper P5 (Herstellung am 26.01.2016)

Prüfung vom 23.02.2016, Alter 28 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.5.1: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	h				
1	150.0	298.8	12.116	2295	720	40,7
2	150.0	298.4	12.173	2308	710	40,2
3	150.0	298.6	12.161	2305	704	39,8
Mittelwert:				2303		40,3

Prüfung vom 23.02.2016, Alter 28 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben 28 Tage Wasser

Tabelle A.5.2: Masse (feucht), Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		*m* [kg]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	*h*			
1	150,0	299,3	12,330	688	38,9
2	150,0	298,7	12,387	714	40,4
3	150,0	298,5	12,416	703	39,8
Mittelwert:					39,7

Prüfung vom 25.04.2016, Alter 90 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.5.3: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	h				
1	150,0	299,7	12.212	2306	839	47,5
2	150,0	299,3	12.228	2312	831	47,0
3	150,0	297,7	12.090	2298	837	47,4
Mittelwert:				2305		47,3

Prüfung vom 25.04.2016, Alter 90 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben 90 Tage Wasser

Tabelle A.5.4: Masse (feucht), Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	F [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	h			
1	150,0	299,6	12,441	932	52,7

Prüfung vom26.04.2016, Alter 91 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.5.5: Dichte, Spaltzugfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_{ct} [N/mm²]
	ø	h				
1	150,0	298,9	12,174	2305	272,0	3,86
2	150,0	299,1	12,227	2313	234,0	3,32
3	150,0	299,2	12,183	2304	241,0	3,42
Mittelwert:				2310	249,0	3,53

Prüfung vom 25.04.2016, Alter 90 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper
Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 26.04.2016

Tabelle A.5.6: Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [N/mm²]	σ_b [N/mm²]	$\varepsilon_{a,0}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [N/mm²]
	ø	h							
1	150,0	299,2	12,217	2311	15,8	4,7	0,493	0,140	31.260
2	150,0	298,8	12,197	2310	15,8	4,7	0,489	0,138	31.440
3	150,0	298,6	12,142	2301	15,8	4,7	0,503	0,142	30.570
Mittelwert:				2307					31.090

Probe Nr.	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,3}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [N/mm²]	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [N/mm²]
1	0,502	0,183	34.590	278,5	83,5	870	49,2
2	0,496	0,179	34.810	278,5	83,5	850	48,1
3	0,511	0,186	33.950	278,5	83,5	830	47,0
Mittelwert:			34.450				48,1

Betonprüfungen zu Versuchskörper P6 (Herstellung am 18.02.2016)

Prüfung vom 17.03.2016, Alter 28 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.6.1: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	*h*				
1	150,0	298,6	11,965	2268	633	35,8
2	150,0	298,7	12,062	2285	641	36,3
3	150,0	298,7	12,059	2285	639	36,2
Mittelwert:				2279		36,1

Prüfung vom 17.03.2016, Alter 28 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben 28 Tage Wasser

Tabelle A.6.2: Masse (feucht), Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		*m* [kg]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	*h*			
1	150,0	298,8	12,171	683	38,6
2	150,0	298,3	12,176	682	38,6
3	150,0	297,8	12,176	683	38,6
Mittelwert:					38,6

Prüfung vom 07.06.2016, Alter 110 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.6.3: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	*h*				
1	150,0	298,1	11,812	2242	771	43,6
2	150,0	298,7	11,841	2243	730	41,3
3	150,0	298,7	12,001	2274	799	45,2
Mittelwert:				2253		43,4

Prüfung vom 07.06.2016, Alter 110 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben 110 Tage Wasser

Tabelle A.6.4: Masse (feucht), Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		*m* [kg]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	*h*			
1	150,0	298,5	12,182	915	51,8

Prüfung vom07.06.2016, Alter 110 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.6.5: Dichte, Spaltzugfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_{ct} [N/mm²]
	ø	h				
1	150,0	299,1	11,947	2260	241,0	3,42
2	150,0	298,8	12,040	2280	242,0	3,44
3	150,0	298,8	11,937	2261	229,0	3,25
Mittelwert:				2270	237,3	3,37

Prüfung vom 07.06.2016, Alter 110 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper
Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 07.06.2016

Tabelle A.6.6: Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		*m* [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [N/mm²]	σ_b [N/mm²]	$\varepsilon_{a,0}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [N/mm²]
	ø	*h*							
1	150,0	299,8	12,015	2268	14,5	4,3	0,513	0,143	27.420
2	150,0	299,0	11,927	2257	14,5	4,3	0,524	0,145	26.800
3	150,0	298,2	12,093	2295	14,4	4,3	0,495	0,137	28.290
Mittelwert:				2273					27.503

Probe Nr.	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,3}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [N/mm²]	F_a [kN]	F_b [kN]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
1	0,520	0,195	31.220	255,5	76,2	810	45,8
2	0,533	0,197	30.230	255,7	76,2	769	43,5
3	0,504	0,185	31.750	255,3	76,3	805	45,6
Mittelwert:			31.067				45,0

Betonprüfungen zu Versuchskörper P7 (Herstellung am 18.03.2016)

Prüfung vom 15.04.2016, Alter 28 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.7.1: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	h				
1	150,0	299,0	12,316	2331	749	42,4
2	150,0	298,5	12,308	2333	748	42,3
3	150,0	299,5	12,319	2328	725	41,0
Mittelwert:				2331		41,9

Prüfung vom 21.06.2016, Alter 95 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.7.2: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	F [kN]	f_c [N/mm²]	Probe Nr. ø
	ø	h				
1	150,0	298,6	12,454	2360	989	56,0
2	150,0	299,3	12,354	2336	985	55,7
3	150,0	299,5	12,311	2326	968	54,8
Mittelwert:				2341		55,5

Prüfung vom 21.06.2016, Alter 95 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.7.3: Dichte, Spaltzugfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_{ct} [N/mm²]
	ø	h				
1	150,0	299,0	12,343	2336	273,0	3,88
2	150,0	298,3	12,271	2328	273,0	3,88
3	150,0	299,4	12,387	2341	268,0	3,80
Mittelwert:				2340	271,3	3,85

Prüfung vom 21.06.2016, Alter 95 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 21.06.2016

Tabelle A.7.4: Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [N/mm²]	σ_b [N/mm²]	$\varepsilon_{a,0}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [N/mm²]
1	150,0	299,1	12,316	2330	18,4	5,5	0,547	0,155	32.940
2	150,0	298,8	12,291	2328	18,5	5,5	0,540	0,154	33.600
3	150,0	299,2	12,295	2325	18,5	5,5	0,559	0,161	32.590
Mittelwert:				2328					33.043

Probe Nr.	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,3}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [N/mm²]	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [N/mm²]
1	0,557	0,200	36.170	326,0	97,8	981	55,5
2	0,550	0,199	36.950	327,0	97,8	953	53,9
3	0,568	0,210	36.230	327,0	97,8	1005	56,9
Mittelwert:			36.450				55,4

Betonprüfungen zu Versuchskörper P8 (Herstellung am 28.04.2016)

Prüfung vom 26.05.2016, Alter 28 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.8.1: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
1	150,0	299,8	12,211	2305	758	42,9
2	150,0	298,3	12,236	2321	772	43,7
3	150,0	300,5	12,247	2306	781	44,2
Mittelwert:				2311		43,6

Prüfung vom 15.07.2016, Alter 78 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.8.2: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
1	150,0	300,4	12,225	2303	956	54,1
2	150,0	299,1	12,126	2294	955	54,0
3	150,0	298,0	12,037	2286	888	50,3
Mittelwert:				2294		52,8

Prüfung vom 15.07.2016, Alter 78 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.8.3: Dichte, Spaltzugfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	$f_{ct,sp}$ [N/mm²]
1	150,0	299,1	12,154	2299	260,0	3,69
2	150,0	299,2	12,221	2311	277,0	3,93
3	150,0	298,4	12,151	2304	270,0	3,84
Mittelwert:				2310	269,0	3,82

Prüfung vom 15.07.2016, Alter 78 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 15.07.2016

Tabelle A.8.4: Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [N/mm²]	σ_b [N/mm²]	$\varepsilon_{a,0}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [N/mm²]
1	150,0	299,3	12,054	2279	17,6	5,3	0,591	0,169	29.180
2	150,0	299,7	12,228	2309	17,6	5,3	0,564	0,162	30.570
3	150,0	299,4	12,076	2282	17,6	5,3	0,606	0,169	28.230
Mittelwert:				2290					29.327

Probe Nr.	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,3}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [N/mm²]	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [N/mm²]
1	0,602	0,228	32.920	311,0	93,4	885	50,1
2	0,571	0,210	34.050	310,4	93,2	942	53,3
3	0,617	0,234	32.210	311,1	93,1	864	48,9
Mittelwert:			33.060				50,8

Betonprüfungen zu Versuchskörper P9 (Herstellung am 30.05.2016)

Prüfung vom 27.06.2016, Alter 28 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.9.1: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	m [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
1	150,0	299,8	12,217	2306	710	40,2
2	150,0	299,2	12,123	2293	702	39,7
3	150,0	299,6	12,175	2300	741	41,9
Mittelwert:				2299		40,6

Prüfung vom 11.11.2016, Alter 165 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.9.2: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
1	150,0	300,4	12,160	2291	936	53,0
2	150,0	300,8	12,181	2292	943	53,4
3	150,0	299,5	12,113	2289	965	54,6
Mittelwert:				2290		53,6

Prüfung vom 11.11.2016, Alter 165 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.9.3: Dichte, Spaltzugfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	$f_{ct,sp}$ [N/mm²]
1	150,0	300,4	12,136	2286	262,0	3,70
2	150,0	299,5	12,085	2283	274,0	3,88
3	150,0	300,0	12,224	2306	265,0	3,75
Mittelwert:				2290	267,0	3,78

Prüfung vom 11.11.2016, Alter 165 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 11.11.2016

Tabelle A.9.4: Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [MPa]	σ_b [MPa]	$\varepsilon_{a,0}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [MPa]
1	150,0	299,4	11,990	2266	17,9	5,3	0,596	0,166	29.150
2	150,0	299,1	12,142	2297	17,9	5,4	0,569	0,161	30.650
3	150,0	299,1	12,093	2288	17,9	5,4	0,610	0,173	28.620
Mittelwert:				2284					29.473

Probe Nr.	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,3}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [MPa]	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [MPa]
1	0,608	0,226	32.810	316,0	94,5	862	48,8
2	0,578	0,211	34.080	316,0	95,0	966	54,7
3	0,619	0,234	32.480	316,0	95,0	925	52,3
Mittelwert:			33.123				51,9

Betonprüfungen zu Versuchskörper P10 (Herstellung am 14.07.2016)

Prüfung vom 11.08.2016, Alter 28 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.10.1: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
1	150,0	298,8	12,411	2350	701	39,7
2	150,0	298,1	12,331	2341	698	39,5
3	150,0	298,5	12,380	2347	684	38,7
Mittelwert:				2346		39,3

Prüfung vom 28.09.2016, Alter 76 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.10.2: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
1	150,0	299,1	12,418	2349	825	46,7
2	150,0	298,6	12,356	2342	778	44,0
3	150,0	298,8	12,453	2358	833	47,1
Mittelwert:				2350		45,9

Prüfung vom 28.09.2016, Alter 76 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.10.3: Dichte, Spaltzugfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	$f_{ct,sp}$ [N/mm²]
1	150,0	298,9	12,456	2358	246	3,49
2	150,0	299,1	12,454	2356	265	3,76
3	150,0	298,8	12,397	2348	271	3,85
Mittelwert:				2350	260,7	3,70

Prüfung vom 28.09.2016, Alter 76 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 28.09.2016

Tabelle A.10.4: Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	*h*	*m* [kg]	σ [kg/m³]	ε_a [N/mm²]	σ_b [N/mm²]	$\varepsilon_{a,0}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [N/mm²]
1	150,0	299,4	12,346	2333	15,3	4,6	0,504	0,144	29.830
2	150,0	299,4	12,458	2355	15,3	4,6	0,496	0,141	30.250
3	150,0	298,4	12,385	2349	15,3	4,6	0,476	0,134	31.400
Mittelwert:				2346					30.493

Probe Nr.	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,3}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [N/mm²]	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [N/mm²]
1	0,512	0,195	33.880	271,0	81,2	859	48,6
2	0,505	0,199	35.100	271,0	81,2	794	44,9
3	0,483	0,185	36.040	271,0	81,2	828	46,9
Mittelwert:			35.007				46,8

Betonprüfungen zu Versuchskörper P11 (Herstellung am 17.08.2016)

Prüfung vom 14.09.2016, Alter 28 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.11.1: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
1	150,0	299,6	12,213	2307	706	40,0
2	150,0	298,8	12,240	2318	741	41,9
3	150,0	299,3	12,201	2307	702	39,7
Mittelwert:				2311		40,5

Prüfung vom 01.12.2016, Alter 106 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.11.2: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
1	150,0	298,4	12,174	2309	879	49,7
2	150,0	297,7	12,100	2300	860	48,7
3	150,0	298,9	12,169	2304	885	50,1
Mittelwert:				2304		49,5

Prüfung vom 01.12.2016, Alter 106 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.11.3: Dichte, Spaltzugfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	$f_{ct,sp}$ [N/mm²]
1	150,0	297,8	12,025	2285	266	3,79
2	150,0	297,8	12,114	2302	268	3,82
3	150,0	298,7	12,130	2298	258	3,67
Mittelwert:				2290	264	3,76

Prüfung vom 01.12.2016, Alter 106 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 01.12.2016

Tabelle A.11.4: Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	σ [kg/m³]	ε_a [N/mm²]	σ_b [N/mm²]	$\varepsilon_{a,0}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [N/mm²]
1	150,0	297,3	12,030	2290	16,5	5,0	0,503	0,144	32.080
2	150,0	298,2	12,080	2292	16,5	5,0	0,532	0,153	30.380
3	150,0	297,9	12,026	2284	16,5	5,0	0,525	0,148	30.550
Mittelwert:				2289					31.003

Probe Nr.	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,3}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [N/mm²]	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [N/mm²]
1	0,510	0,183	35.220	291,0	87,5	881	49,9
2	0,541	0,201	33.870	291,0	87,5	851	48,2
3	0,535	0,194	33.770	291,0	87,5	815	46,1
Mittelwert:			34.287				48,0

Betonprüfungen zu Versuchskörper P12 (Herstellung am 30.09.2016)

Prüfung vom 28.10.2016, Alter 28 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.12.1: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
1	150,0	300,0	12,428	2344	750	42,4
2	150,0	299,6	12,455	2352	764	43,2
3	150,0	298,5	12,318	2335	724	41,0
Mittelwert:				2344		42,2

Prüfung vom 24.01.2017, Alter 116 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.12.2: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
1	150,0	298,7	12,285	2327	987	55,9
2	150,0	299,1	12,284	2324	941	53,2
3	150,0	299,2	12,314	2329	955	54,0
Mittelwert:				2327		54,4

Prüfung vom 24.01.2017, Alter 116 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.12.3: Dichte, Spaltzugfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	$f_{ct,sp}$ [N/mm²]
1	150,0	298,9	12,308	2330	293,0	4,16
2	150,0	299,1	12,388	2344	286,0	4,06
3	150,0	299,3	12,334	2332	269,0	3,81
Mittelwert:				2340	282,7	4,01

Prüfung vom 24.01.2017, Alter 116 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 24.01.2017

Tabelle A.12.4: Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [N/mm²]	σ_b [N/mm²]	$\varepsilon_{a,0}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [N/mm²]
1	150,0	298,8	12,233	2317	18,1	5,4	0,616	0,170	28.420
2	150,0	298,8	12,243	2319	18,1	5,4	0,620	0,175	28.480
3	150,0	298,6	12,188	2310	18,1	5,4	0,625	0,177	28.290
Mittelwert:				2315					28.397

Probe Nr.	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,3}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [N/mm²]	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [N/mm²]
1	0,628	0,241	32.750	320,0	96,0	916	51,8
2	0,631	0,245	32.840	320,0	96,0	921	52,1
3	0,638	0,250	32.670	320,0	96,0	917	51,9
Mittelwert:			32.753				51,9

Betonprüfungen zu Versuchskörper P13 (Herstellung am 18.11.2016)

Prüfung vom 16.12.2016, Alter 28 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.13.1: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	h				
1	150,0	299,4	11,959	2260	695,0	39,3
2	150,0	299,1	11,951	2261	704,0	39,8
3	150,0	298,6	11,944	2264	707,0	40,0
Mittelwert:				2262		39,7

Prüfung vom 13.02.2017, Alter 87 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.13.2: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_c [N/mm²]
	ø	h				
1	150,0	299,1	11,935	2258	852,0	48,2
2	150,0	299,7	11,946	2256	825,0	46,7
3	150,0	298,0	11,861	2252	818,0	46,3
Mittelwert:				2255		47,1

Prüfung vom 13.02.2017, Alter 87 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.13.4: Dichte, Spaltzugfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	$f_{ct,sp}$ [N/mm²]
	ø	h				
1	150,0	299,2	11,926	2256	255,0	3,62
2	150,0	298,1	11,897	2258	275,0	3,92
3	150,0	299,8	11,984	2262	286,0	4,05
Mittelwert:				2260	272,0	3,86

Prüfung vom 13.02.2017, Alter 87 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 13.02.2017

Tabelle A.13.5: Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [N/mm²]	σ_b [N/mm²]	$\varepsilon_{a,0}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [N/mm²]
1	150,0	299,5	11,977	2263	15,6	4,7	0,576	0,161	26.320
2	150,0	299,8	11,991	2263	15,7	4,7	0,570	0,162	26.910
3	150,0	299,6	11,960	2259	15,7	4,7	0,565	0,158	26.970
Mittelwert:				2262					26.733

Probe Nr.	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,3}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [N/mm²]	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [N/mm²]
1	0,588	0,224	30.000	276,0	83,0	859,0	48,6
2	0,581	0,223	30.670	277,0	83,0	851,0	48,2
3	0,575	0,218	30.750	277,0	83,0	858,0	48,6
Mittelwert:			30.473				48,4

Betonprüfungen zu Versuchskörper P14 (Herstellung am 07.12.2016)

Prüfung vom 04.01.2017, Alter 28 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.14.1: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
1	150,0	299,1	12,143	2297	682,0	38,6
2	150,0	298,6	12,167	2306	664,0	37,6
3	150,0	298,4	12,119	2298	676,0	38,3
Mittelwert:				2300		38,1

Prüfung vom 23.02.2017, Alter 83 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.14.2: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
1	150,0	298,8	12,140	2299	807,0	45,7
2	150,0	297,8	12,126	2304	799,0	45,2
3	150,0	298,8	12,045	2281	769,0	43,5
Mittelwert:				2295		44,8

Prüfung vom 23.02.2017, Alter 83 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.14.4: Dichte, Spaltzugfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	$f_{ct,sp}$ [N/mm²]
1	150,0	298,6	12,092	2292	270,0	3,84
2	150,0	298,8	12,087	2289	249,0	3,54
3	150,0	299,0	12,146	2299	262,0	3,72
Mittelwert:				2290	260,3	3,70

Prüfung vom 23.02.2017, Alter 83 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 23.03.2017

Tabelle A.14.5: Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	*h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [MPa	σ_b [MPa]	$\varepsilon_{a,0}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [MPa]
1	150,0	299,0	12,120	2294	14,9	4,5	0,541	0,151	26.840
2	150,0	298,9	12,090	2289	14,9	4,5	0,521	0,143	27.700
3	150,0	298,4	12,129	2300	14,9	4,5	0,491	0,133	29.240
Mittelwert:				2294					27.927

Probe Nr.	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,3}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [MPa]	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [MPa]
1	0,553	0,213	30.790	264,0	79,0	789,0	44,6
2	0,531	0,196	31.250	264,0	79,0	789,0	44,6
3	0,500	0,182	32.920	264,0	79,0	789,0	44,6
Mittelwert:			31.653				44,6

Betonprüfungen zu Versuchskörper P15 (Herstellung am 02.02.2017)

Prüfung vom 02.03.2017, Alter 28 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.15.1: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
1	150,0	298,7	12,051	2283	700	39,6
2	150,0	299,9	12,132	2289	672	38,0
3	150,0	297,6	11,949	2272	690	39,0
Mittelwert:				2281		38,9

P15, Laststellung 5*d*
Prüfung vom 24.03.2017, Alter 62 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.15.2: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
1	150,0	298,4	12,070	2289	757	42,8
2	150,0	298,9	12,082	2287	746	42,2
3	150,0	298,8	12,074	2287	766	43,3
Mittelwert:				2288		42,8

P15, Laststellung 3*d*
Prüfung vom 06.04.2017, Alter 73 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.15.3: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
1	150,0	298,6	11,972	2269	795	45,0
2	150,0	298,9	12,098	2290	781	44,2
3	150,0	298,5	12,016	2278	805	45,6
Mittelwert:				2279		44,9

P15, Laststellung 2*d* und 1*d*

Prüfung vom 12.04.2017, Alter 79 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Tabelle A.15.4: Dichte, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] *h*	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
1	150,0	299,2	12,064	2282	811	45,9
2	150,0	298,8	12,053	2283	799	45,2
3	150,0	298,6	12,102	2293	817	46,2
Mittelwert:				2286		45,8

Prüfung vom 12.04.2017, Alter 79 Tage

Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 12.04.2017

Tabelle A.15.5: Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	*m* [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [N/mm²]	σ_b [N/mm²]	$\varepsilon_{a,0}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [N/mm²]
1	150,0	299,0	12,055	2282	14,9	4,5	0,538	0,150	26.840
2	150,0	299,6	12,016	2270	14,9	4,5	0,555	0,155	26.030
3	150,0	298,6	12,110	2295	14,9	4,5	0,529	0,148	27.330
Mittelwert:				2282					26.733

Probe Nr.	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,3}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [N/mm²]	F_a [kN]	F_b [kN]	*F* [kN]	f_c [N/mm²]
1	0,546	0,207	30.710	263,0	79,0	777	44,0
2	0,567	0,216	29.660	263,0	79,0	783	44,3
3	0,539	0,200	30.710	263,0	79,0	824	46,6
Mittelwert:			30.360				45,0

Datenblätter C20/25

Auftraggeber :
Baustelle :

BETONZUSAMMENSETZUNG UND ERSTPRÜFUNG — B2

Betonsorte : 1413731K

1. ANFORDERUNGEN

Expositionsklasse(n) : **XC2**
Festigkeitskl. / Konsist. : **C 20/25 / F 3**
Besond. Eigenschaften :

Eignung : **Beton für Innenbauteile / Gründung**

w/(z+0,40f)-Wert: **0,62**

Art der Verwendung : **Stahlbeton**
Sieblinniennummer : **01G-492031K**
Sieblinienbereich / K-Wert : **BC 16 / 3,66**
Festigkeitsentwicklung : **langsam**
Überwachungsklasse : **1**
Festigkeitsnachweis nach : **28 Tagen**
Pumpfähigkeit: **J**
Feuchtigkeitsklasse : **WF**

2. AUSGANGSSTOFFE UND ZUSAMMENSETZUNG

Zement	CEM III/A 42,5N				**270** [kg]
Zusatzstoff	EFA	Holcim Deuschland A		1,00	**60** [kg]
Zusatzmittel	1BV N9	MC - Bauchemie	0,70 [%]	1,89 [kg]	**1,64** [dm³]
Gesamtwasser					**182** [dm³]
Gesteinsk. FGK 0/2			EI-O-EI-OF		**871** [kg]
Kies 2/8		Mühlberg	EI		**364** [kg]
Glensanda 8/16		FY HH- Midgard	EI		**562** [kg]
					Ges.Gesteins. **1 797** [kg]

3. ERGEBNISSE DER ERSTPRÜFUNG VOM 06.06.2013

FRISCHBETONWERTE i.M.

Ausbreitmaß 0 min	mm	Ausbreitmaß a F 0 min	mm	Rohdichte	**2 354** [kg/m³
Ausbreitmaß 10 min	**485** mm	Ausbreitmaß a F 30 min	mm	W/Z-Wert	**0,61**
Ausbreitmaß 45 min	**475** mm	Verdichtungsmaß		Luftporengehalt	**1,5** [%]

FESTBETONWERTE i.M.

Prüfalter	**2** Tage	Rohdichte ρ_m	**2 354** [kg/m³]	Druckfestigkeit f_{cm}	**9,0** [N/mm²]
Prüfalter	**28** Tage	Rohdichte ρ_m	**2 345** [kg/m³]	Druckfestigkeit f_{cm}	**32,0** [N/mm²]
Prüfalter	**56** Tage				

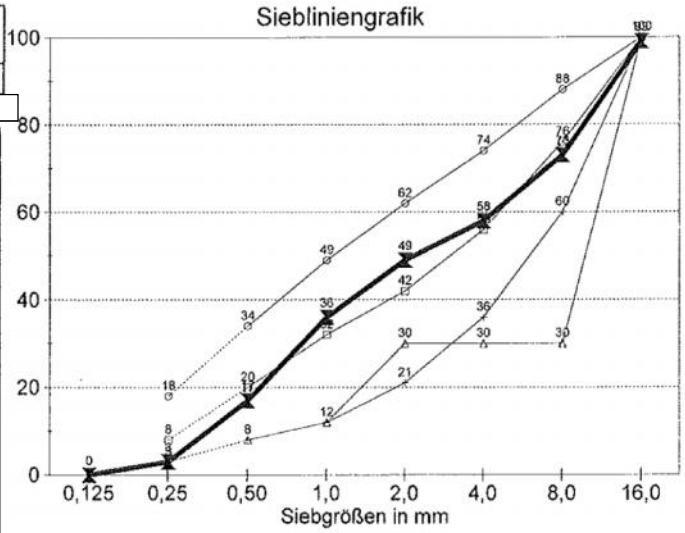
Hamburg, den 04.03.2015

Sieblinie 01G-492031K

Sieblinienbereich BC 16 | **S1**

Werk :

Art und Herkunft
FGK 0/2 EI-O-EI-OF
Kies 2/8 Mühlberg EI
Glensanda 8/16 FY HH- Midgard EI



1. ZUSAMMENSETZUNG DER KORNGRUPPEN

Korn-gruppe		Durchgänge in % durch die Siebe in mm								
		0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	31,5
0/2		0,5	6,0	35,0	72,0	96,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2/8		0,1	0,1	0,1	1,0	6,0	39,0	98,0	100,0	100,0
8/16		0,7	0,7	0,7	0,8	1,0	3,0	13,0	96,0	100,0

2. BERECHNUNG DER SIEBLINIE

Korn-gruppe	Anteil in %	Durchgänge in % durch die Siebe in mm								
		0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	31,5
0/2	49	0,2	2,9	17,2	35,3	47,0	49,0	49,0	49,0	49,0
2/8	20	0,0	0,0	0,0	0,2	1,2	7,8	19,6	20,0	20,0
8/16	31	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,9	4,0	29,8	31,0
Summe	100	0,4	3,1	17,4	35,7	48,5	57,7	72,6	98,8	100,0
Rückstand %		99,6	96,9	82,6	64,3	51,5	42,3	27,4	1,2	0,0

3. IST-SIEBLINIE (gerundete Werte)

	0	3	17	36	49	58	73	99	100

Kennwert nach Rundung 3,66

DSumme 534

Hamburg, den 04.03.2015

Datenblätter C25/30

Auftraggeber :
Baustelle :

BETONZUSAMMENSETZUNG — B1

Betonsorte : 1533731KW

1. ANFORDERUNGEN

Expositionsklasse(n) : XC4 XF1 XA1 WU
Festigkeitskl. / Konsist. : C 25/30 / F 3
Besond. Eigenschaften : Widerstand gegen schwachen chemischen Angriff
Eignung : Beton für Außenbauteile

w/(z+0,40f)-Wert : 0,55

Art der Verwendung : Stahlbeton
Sieblinniennummer : 01G-492031K
Sieblinienbereich / K-Wert : BC 16 / 3,66
Festigkeitsentwicklung : mittel
Überwachungsklasse : 2
Festigkeitsnachweis nach : 28 Tagen
Pumpfähigkeit : J
Feuchtigkeitsklasse : WF

2. AUSGANGSSTOFFE UND ZUSAMMENSETZUNG

Ausgangsstoffe	Bezeichnung		Anteil %	Stoffraum dm³	Dichte kg/m³	Menge kg trocken	Oberfl.feucht. %	Oberfl.feucht. l	Menge kg f.
Zement	CEM III/A 42,5N			97	3,00	**290**			
Zusatzstoff	EFA	Holcim Deuschland A	1,00	28	2,17	**60**			
Zusatzmittel	1BV N9	MC - Bauchemie	0,80	2,02	1,15	**2,32**			
Wasser				173	1,00	**173**			
Restwasser									
Porenraum				15					
Summen				314		**525**			
Restraum für Gesteinskörnung				686					
FGK 0/2	EI-O-EI-OF		49,0	336	2,60	**874**	4,0	35	909
Kies 2/8	Mühlberg EI		20,0	137	2,64	**362**	1,5	5	367
Glensanda 8/16	FY HH- Midgard EI		31,0	213	2,64	**561**	1,0	6	567
Summen			100	686		**1797**		46	1843

3. KENNWERTE

Gesamtwasser ..... **173** Liter
Zugabewasser ..... **127** Liter

Mehlkorngehalt ..... . **358** kg
Mehlkorn +Feinstsand .. **407** kg

mit Kies 2/8 mm

Gesteinsk.menge trocken ..... **1797** kg
Eigenfeuchte ..... **46** kg
Gesteinsk.menge feucht ..... **1843** kg
Mörtelgehalt ..... **647** dm³/m³
Frischbetonrohdichte ..... **2322** kg/m³

Hamburg, den 17.04.2015

Auftraggeber :
Baustelle :

BETONZUSAMMENSETZUNG UND ERSTPRÜFUNG — B2

Betonsorte : 1533731KW

1. ANFORDERUNGEN

Expositionsklasse(n) :	XC4 XF1 XA1 WU	Art der Verwendung :	Stahlbeton
Festigkeitskl. / Konsist. :	C 25/30 / F 3	Sieblinniennummer :	01G-492031K
Besond. Eigenschaften :	Widerstand gegen schwachen chemischen Angriff	Sieblinienbereich / K-Wert :	BC 16 / 3,66
		Festigkeitsentwicklung :	mittel
Eignung :	Beton für Außenbauteile	Überwachungsklasse :	2
		Festigkeitsnachweis nach :	28 Tagen
w/(z+0,40f)-Wert:	0,55	Pumpfähigkeit:	J
		Feuchtigkeitsklasse :	WF

2. AUSGANGSSTOFFE UND ZUSAMMENSETZUNG

Zement	CEM III/A 42,5N				290 [kg]
Zusatzstoff	EFA	Holcim Deuschland A		1,00	60 [kg]
Zusatzmittel	1BV N9	MC - Bauchemie	0,80 [%]	2,32 [kg]	2,02 [dm³]
Gesamtwasser					173 [dm³]
Gesteinsk. FGK 0/2			EI-O-EI-OF		874 [kg]
Kies 2/8		Mühlberg	EI		362 [kg]
Glensanda 8/16		FY HH- Midgard	EI		561 [kg]
					Ges.Gesteins. 1 797 [kg]

3. ERGEBNISSE DER ERSTPRÜFUNG VOM 10.02.2015

FRISCHBETONWERTE i.M.

Ausbreitmaß 0 min	mm	Ausbreitmaß a F 0 mi	mm	Rohdichte	2 361 [kg/m³
Ausbreitmaß 10 min	490 mm	Ausbreitmaß a F 30 m	mm	W/Z-Wert	0,54
Ausbreitmaß 45 min	475 mm	Verdichtungsmaß		Luftporengehalt	1,5 [%]

FESTBETONWERTE i.M.

Prüfalter	2Tage	Rohdichte ρm	2 361 [kg/m³]	Druckfestigkeit fcm	14,2 [N/mm²]
Prüfalter	28Tage	Rohdichte ρm	2 350 [kg/m³]	Druckfestigkeit fcm	37,0 [N/mm²]
Prüfalter	56Tage				

Max. Eindringtiefe.. 14 [mm]

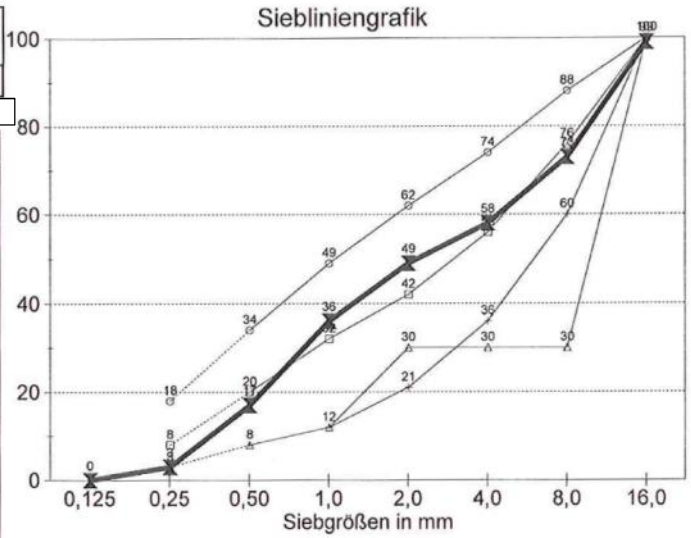
Hamburg, den 17.04.2015

Sieblinie **01G-492031K**

Sieblinienbereich BC 16 | **S1**

Werk :

Art und Herkunft
FGK 0/2 EI-O-EI-OF
Kies 2/8 Mühlberg EI
Glensanda 8/16 FY HH- Midgard EI



1. ZUSAMMENSETZUNG DER KORNGRUPPEN

Korn-gruppe		Durchgänge in % durch die Siebe in mm								
		0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	31,5
0/2		0,5	6,0	35,0	72,0	96,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2/8		0,1	0,1	0,1	1,0	6,0	39,0	98,0	100,0	100,0
8/16		0,7	0,7	0,7	0,8	1,0	3,0	13,0	96,0	100,0

2. BERECHNUNG DER SIEBLINIE

Korn-gruppe	Anteil in %	Durchgänge in % durch die Siebe in mm								
		0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	31,5
0/2	49	0,2	2,9	17,2	35,3	47,0	49,0	49,0	49,0	49,0
2/8	20	0,0	0,0	0,0	0,2	1,2	7,8	19,6	20,0	20,0
8/16	31	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,9	4,0	29,8	31,0
Summe	100	0,4	3,1	17,4	35,7	48,5	57,7	72,6	98,8	100,0
Rückstand %		99,6	96,9	82,6	64,3	51,5	42,3	27,4	1,2	0,0

3. IST-SIEBLINIE (gerundete Werte)

	0	3	17	36	49	58	73	99	100

Kennwert nach Rundung 3,66

DSumme 534

Hamburg, den 17.04.2015

Stahleigenschaften

Stahlzugfestigkeit:

Für die Versuche **P1-P3** wurden insgesamt 4 Stahlproben $\phi = 16$ mm und 3 Stahlproben $\phi = 12$ mm nach DIN EN 6892-1 getestet. Die Bestellung der Stäbe stammte für P1-P3 aus einer Charge je Durchmesser. Die Erläuterung der dokumentierten Werte sind Abschnitt 3.2.2zu entnehmen.

Tabelle A.S.1: Stahlzugfestigkeit P1-P3 der Bewehrungsstahlproben $\phi = 16$ mm

Probe Nr.	ø [mm]	l [mm]	G [g]	d_s [mm]	A_s [cm²]	Bruch-stelle	F_m [kN]	E [MPa] (gerundet)	R_{eH} [MPa] (≥ 500)	R_{eL} [MPa] (≥ 500)	R_m [MPa] (≥ 550)	R_m/R_{eH} (≥ 1,08)
1601	16	430,3	678,2	16	2,01	Einsp.	125,5	199.000	542	522	624	1,15
1602		430,8	677,4	16	2,01	Mitte	125,1	197.000	540	518	622	1,15
1603		430,8	680,4	16	2,01	Mitte	126,1	199.000	546	521	627	1,15
1604		430,8	678,7	16	2,01	Mitte	125,9	198.000	546	526	626	1,15
Mittelwert:				16	2,01			198.000	544	522	625	1,15

Tabelle A.S.2: Stahlzugfestigkeit P1-P3 der Bewehrungsstahlproben $\phi = 12$ mm

Probe Nr.	ø [mm]	l [mm]	G [g]	d_s [mm]	A_s [cm²]	Bruch-stelle	F_m [kN]	E [MPa] (gerundet)	R_{eH} [MPa] (≥ 500)	R_{eL} [MPa] (≥ 500)	R_m [MPa] (≥ 550)	R_m/R_{eH} (≥ 1,08)
1201	12	430,5	383,0	12	1,13	Mitte	78,7	200.000	635	608	696	1,10
1202		430,9	383,4	12	1,13	Mitte	78,2	200.000	630	602	692	1,10
1203		431,0	383,3	12	1,13	Mitte	78,3	200.000	630	599	692	1,10
Mittelwert:				12	1,13			200.000	632	603	693	1,10

Für die Versuche **P4-P6** wurden insgesamt 3 Stahlproben $\phi = 16$ mm und 3 Stahlproben $\phi = 12$ mm nach DIN EN 6892-1 getestet. Die Bestellung der Stäbe stammte aus einer Charge je Durchmesser. Die Bestellung erfolgte im Dezember 2015.

Tabelle A.S.3: Stahlzugfestigkeit P4-P6 der Bewehrungsstahlproben $\phi = 16$ mm

Probe Nr.	ø [mm]	l [mm]	G [g]	d_s [mm]	A_s [cm²]	Bruch-stelle	F_m [kN]	E [MPa] (gerundet)	R_{eH} [MPa] (≥ 500)	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa] (≥ 550)	R_m/R_{eH} (≥ 1,08)
1605		428,8	667,6	16	2,01	Mitte.	133,3	191.292	593	570	663	1,12
1606	16	429,0	667,0	16	2,01	Mitte	132,5	192.346	588	568	659	1,12
1607		429,1	667,4	16	2,01	Mitte	133,1	192.990	592	566	662	1,12
Mittelwert:				16	2,01			192.209	591	568	661	1,12

Tabelle A.S.4: Stahlzugfestigkeit P4-P6 der Bewehrungsstahlproben $\phi = 12$ mm

Probe Nr.	ø [mm]	l [mm]	G [g]	d_s [mm]	A_s [cm²]	Bruch-stelle	F_m [kN]	E [MPa] (gerundet)	$R_{0,2}$ [MPa]	R_m [MPa] (≥ 550)
1204		429,2	380,9	12	1,13	Mitte	63,5	195.595	387	562
1205	12	429,2	380,4	12	1,13	Mitte	65,0	194.360	385	575
1206		429,0	379,3	12	1,13	Mitte	63,8	195.882	386	565
Mittelwert:				12	1,13			195.279	386	567

Für die Versuche **P7-P14** wurden insgesamt 3 Stahlproben ϕ = 16 mm und 3 Stahlproben ϕ = 12 mm nach DIN EN 6892-1 getestet. Die Bestellung der Stäbe stammte aus einer Charge je Durchmesser. Die Bestellung erfolgte im Februar 2016.

Tabelle A.S.5: Stahlzugfestigkeit P7-P14 der Bewehrungsstahlproben ϕ = 16 mm

Probe Nr.	ø [mm]	l [mm]	G [g]	d_s [mm]	A_s [cm²]	Bruch-stelle	F_m [kN]	E [MPa] (gerundet)	R_{eH} [MPa] (≥ 500)	R_{eL}	R_m [MPa] (≥ 550)	R_m/R_{eH} (≥ 1,08)
1608		430,4	663,6	16	2,01	Mitte.	126,7	192.857	564	539	630	1,11
1609	16	430,0	664,5	16	2,01	Mitte	125,5	191.280	566	540	624	1,10
1610		429,9	663,4	16	2,01	Mitte	126,4	192.950	566	539	628	1,11
Mittelwert:				16	2,01			192.362	565	539	628	1,11

Tabelle A.S.6: Stahlzugfestigkeit P7-P14 der Bewehrungsstahlproben ϕ = 12 mm

Probe Nr.	ø [mm]	l [mm]	G [g]	d_s [mm]	A_s [cm²]	Bruch-stelle	F_m [kN]	E [MPa] (gerundet)	R_{eH} [MPa] (≥ 500)	R_{eL}	R_m [MPa] (≥ 550)	R_m/R_{eH} (≥ 1,08)
1207		430,6	382,6	12	1,13	Mitte	77,0	201.202	610	586	681	1,12
1208	12	430,4	382,0	12	1,13	Mitte	76,4	200.913	606	581	676	1,12
1209		430,1	381,8	12	1,13	Mitte	75,4	198.991	596	566	667	1,12
Mittelwert:				12		1,13		200.368	604	578	675	1,12

Für den Versuche **P13 mit veränderter Längsbewehrung** wurden insgesamt 3 Stahlproben d_s = 14 mm nach DIN EN 6892-1 getestet. Die Bestellung der Stäbe stammte aus einer Charge je Durchmesser. Die Bestellung erfolgte im November 2016

Tabelle A.S.7: Stahlzugfestigkeit P13 der Bewehrungsstahlproben ϕ = 14 mm

Probe Nr.	ø [mm]	l [mm]	G [g]	d_s [mm]	A_s [cm²]	Bruch-stelle	F_m [kN]	E [MPa] (gerundet)	R_{eH} [MPa] (≥ 500)	R_{eL}	R_m [MPa] (≥ 550)	R_m/R_{eH} (≥ 1,08)
1401		452,0	542,9	14	1,53	Mitte	104,7	194.166	587	562	680	1,16
1402	14	451,8	542,7	14	1,53	Mitte	104,5	197.033	581	556	679	1,17
1403		452,0	543,0	14	1,53	Mitte	105,8	193.936	587	559	687	1,17
Mittelwert:				14	1,53			195.045	585	559	682	1,17

Anhang B Anordnung der Messaufnehmer

Anordnung der Messaufnehmer Versuch P1

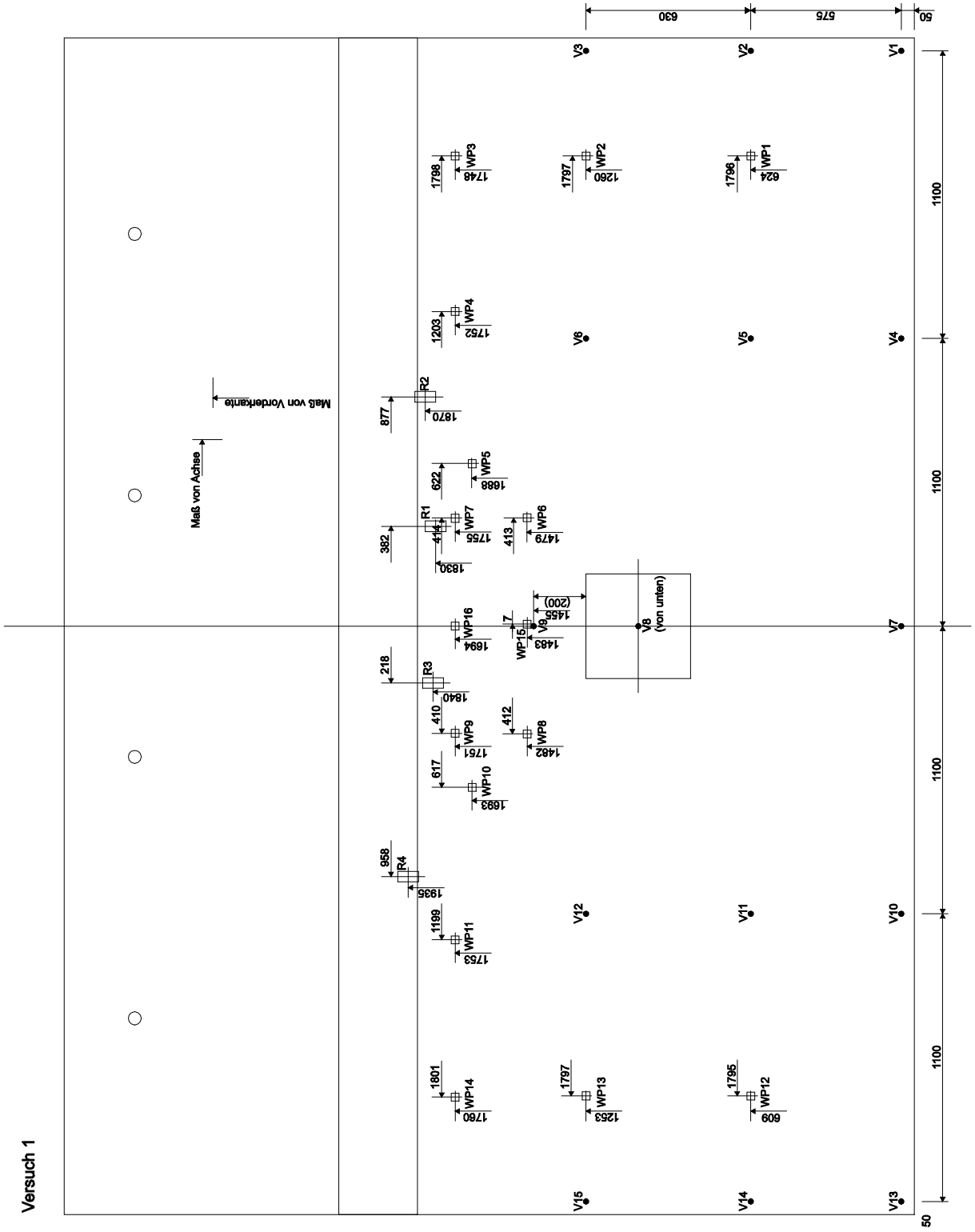


Bild 92: Anordnung der Messtechnik Versuch P1

Anordnung der Messaufnehmer Versuch P2

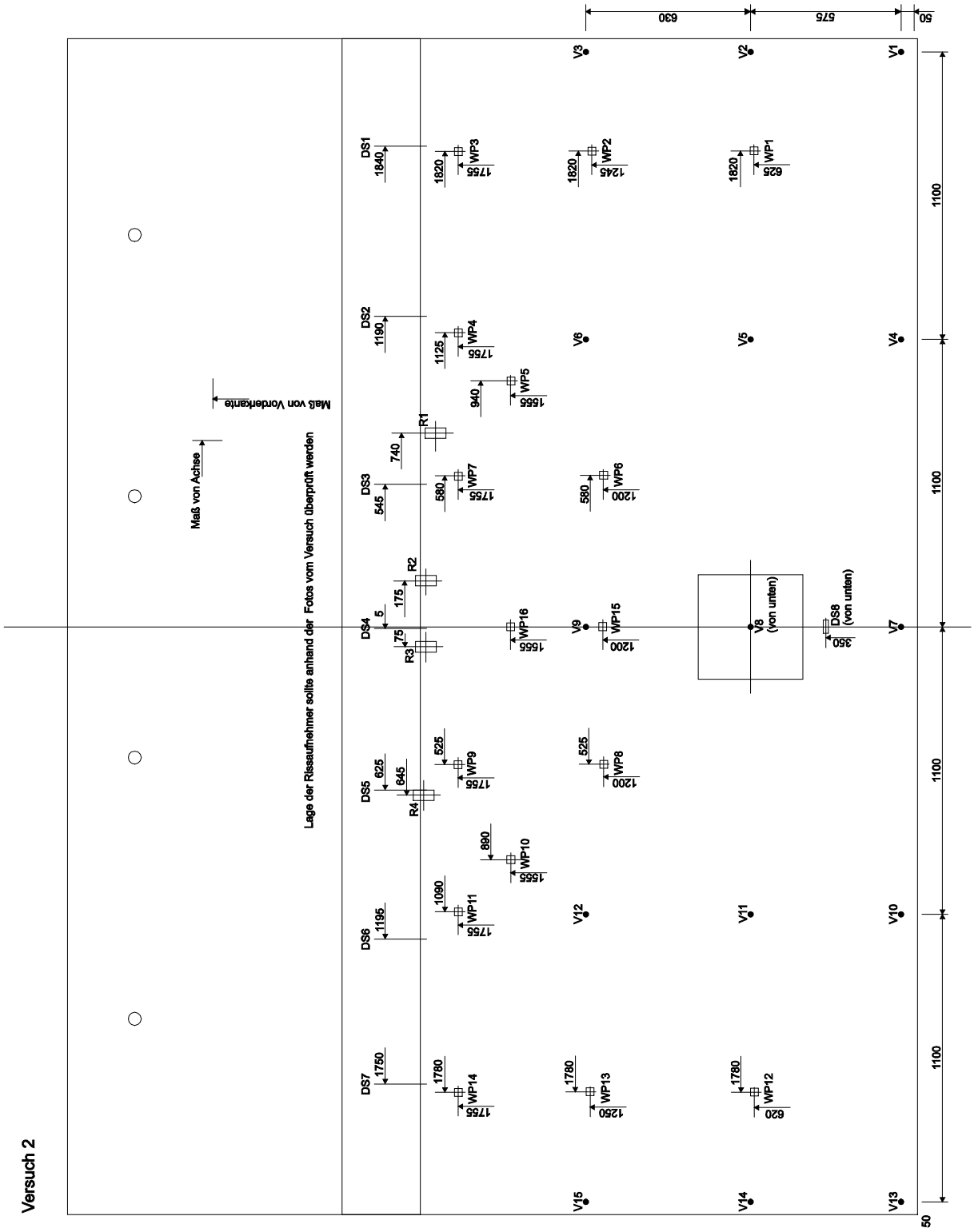


Bild 93: Anordnung der Messtechnik Versuch P2

Anordnung der Messaufnehmer Versuch P3

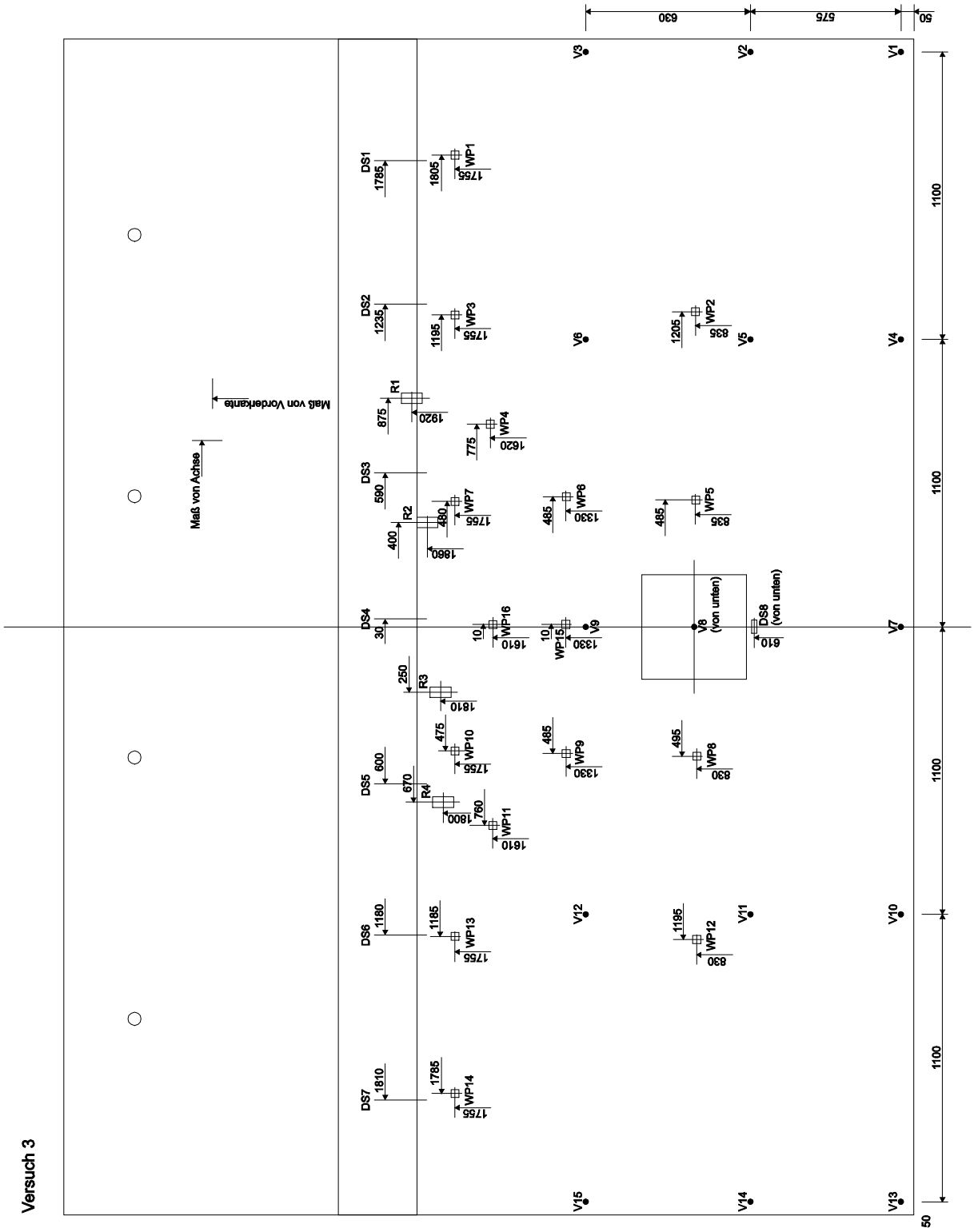


Bild 94: Anordnung der Messtechnik Versuch P3

Anordnung der Messaufnehmer Versuch P4

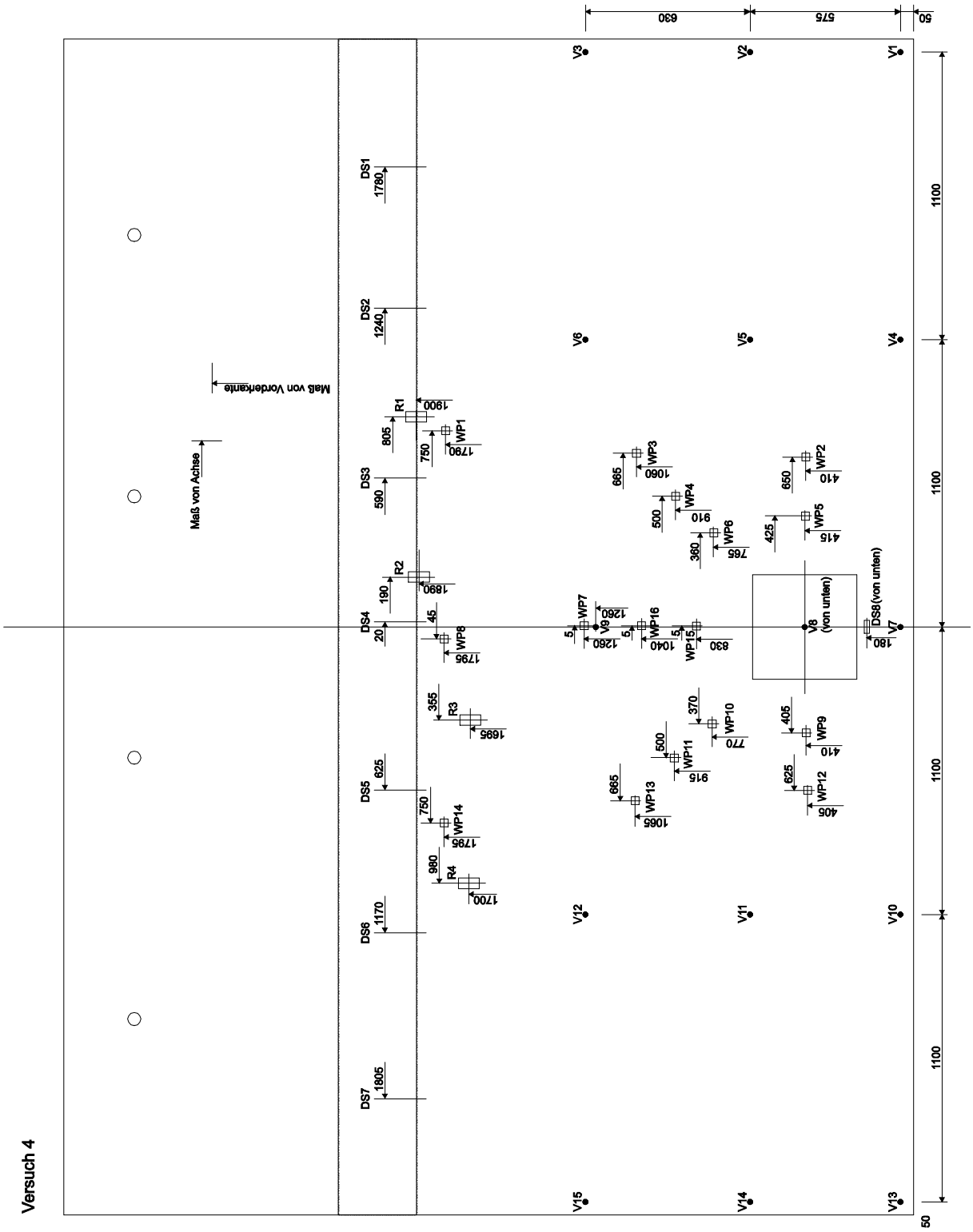


Bild 95: Anordnung der Messtechnik Versuch P4

Anordnung der Messaufnehmer Versuch P5

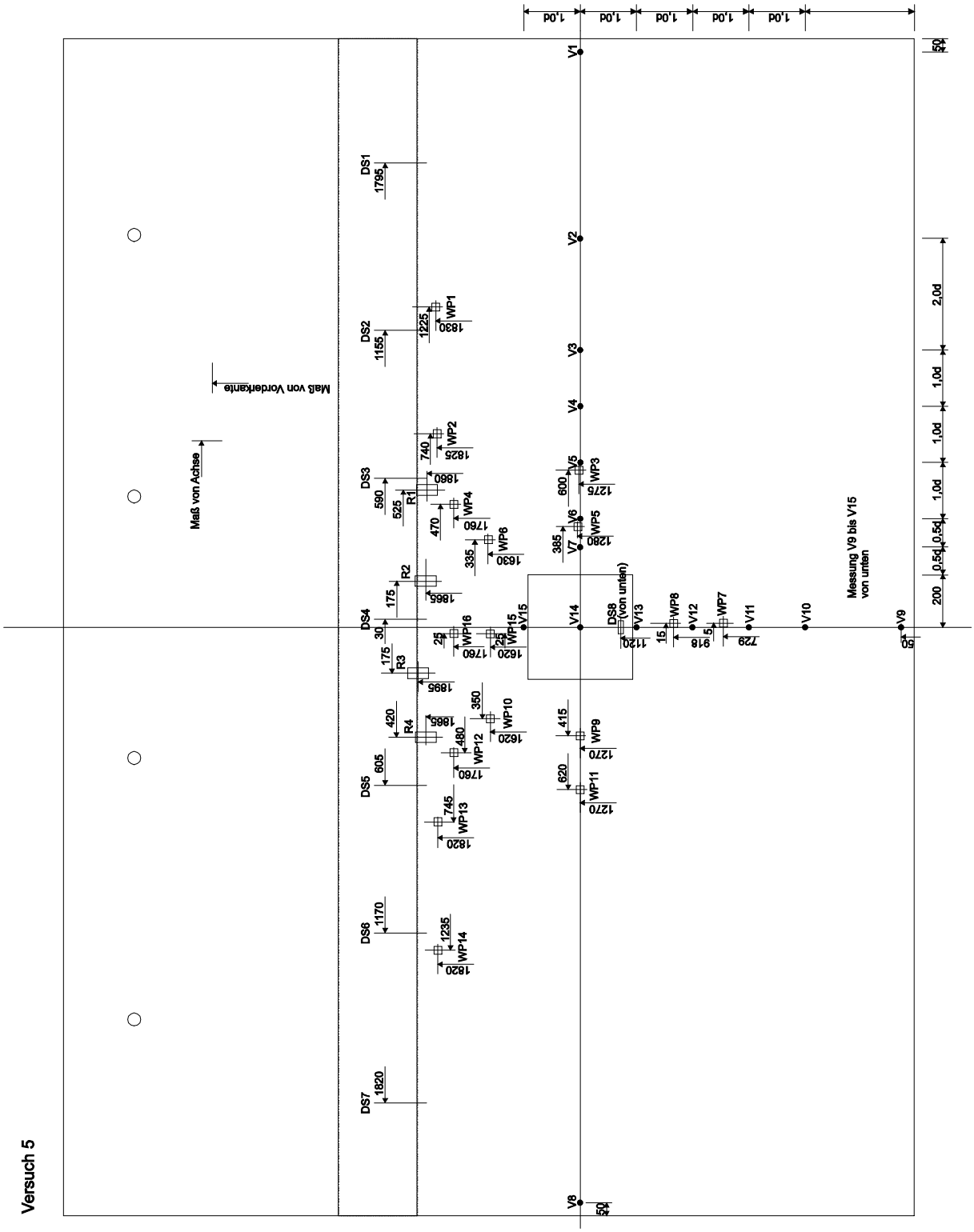


Bild 96: Anordnung der Messtechnik Versuch P5

Anordnung der Messaufnehmer Versuch P6

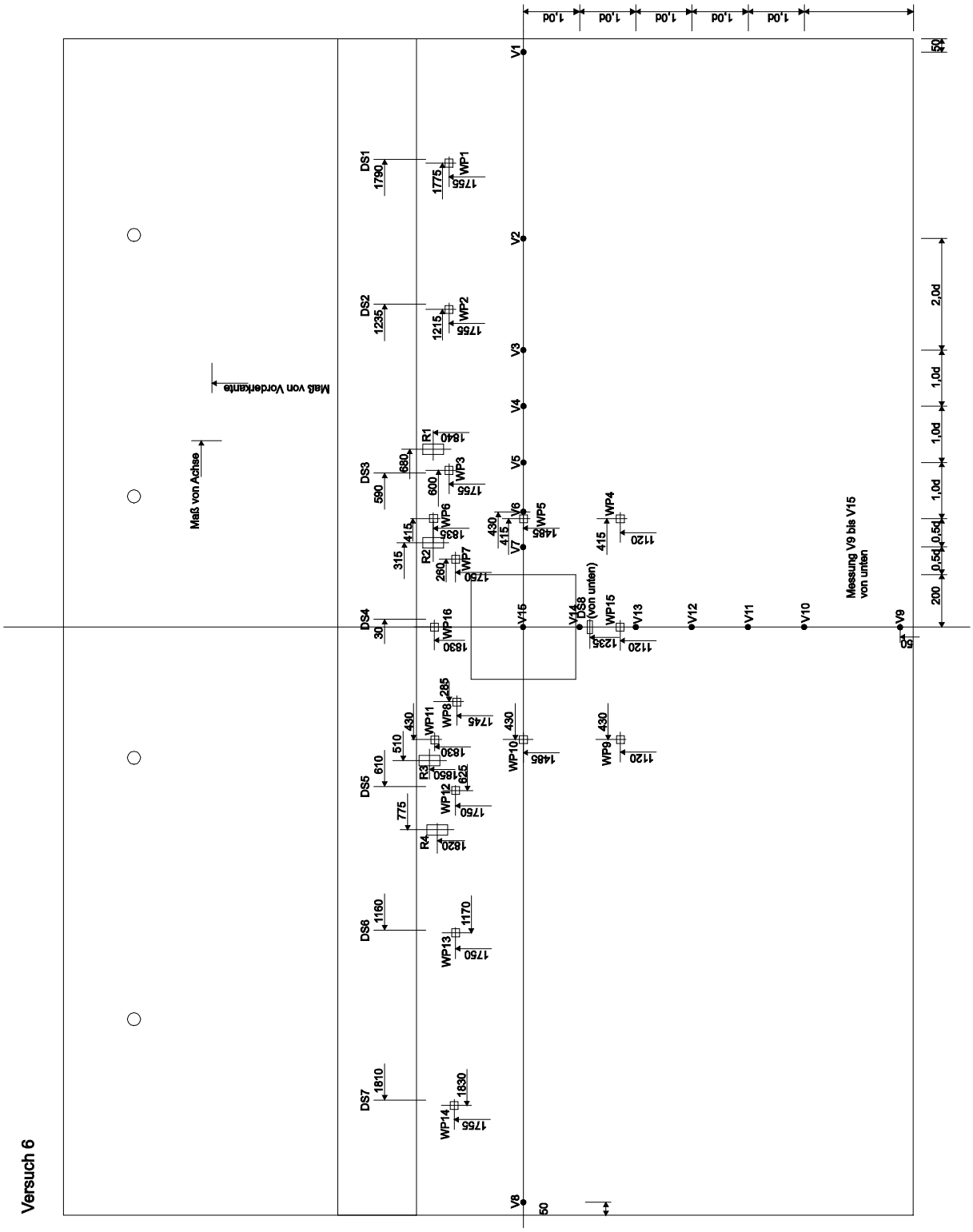


Bild 97: Anordnung der Messtechnik Versuch P6

Anordnung der Messaufnehmer Versuch P7

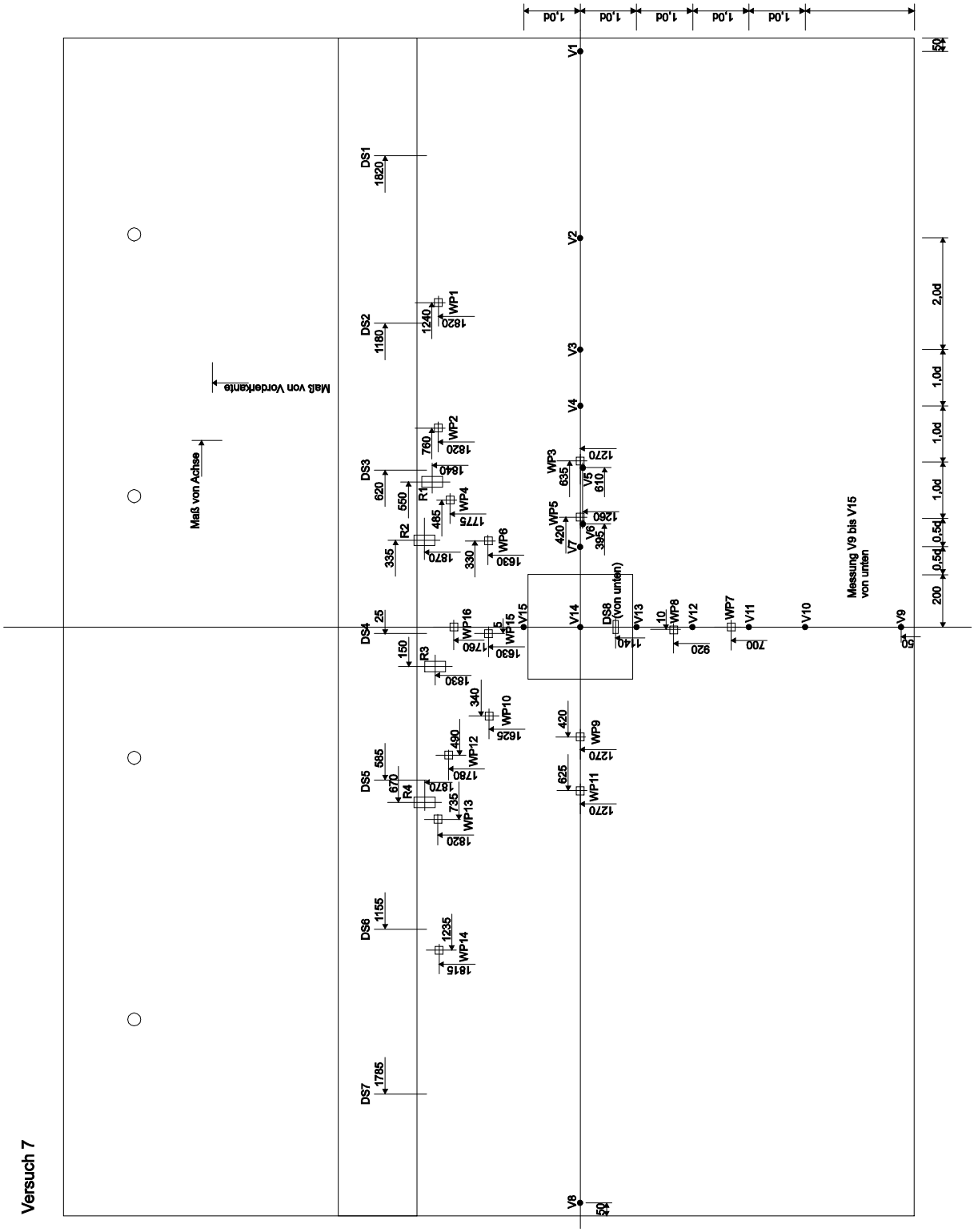


Bild 98: Anordnung der Messtechnik Versuch P7

Anordnung der Messaufnehmer Versuch P8

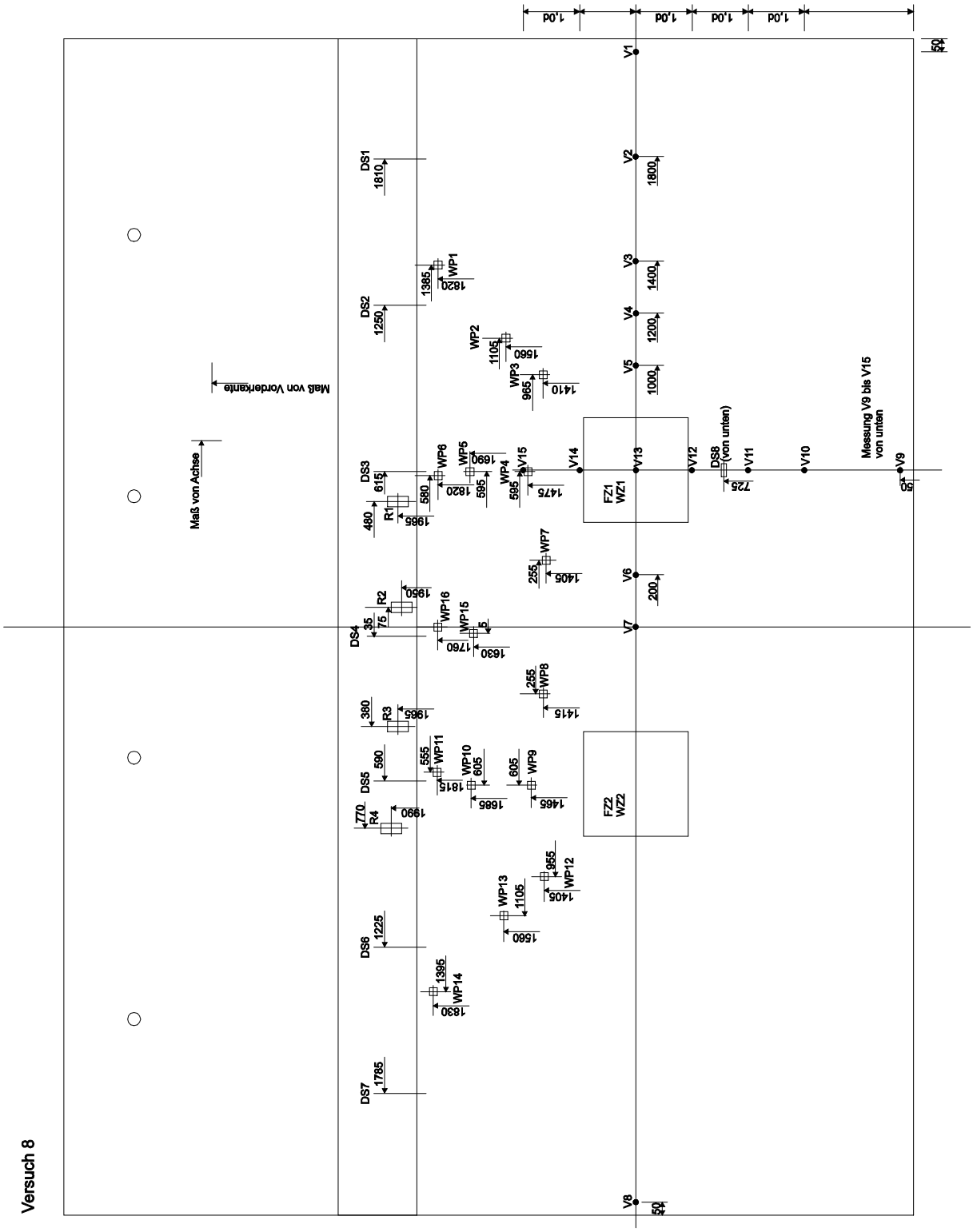


Bild 99: Anordnung der Messtechnik Versuch P8

Anordnung der Messaufnehmer Versuch P9

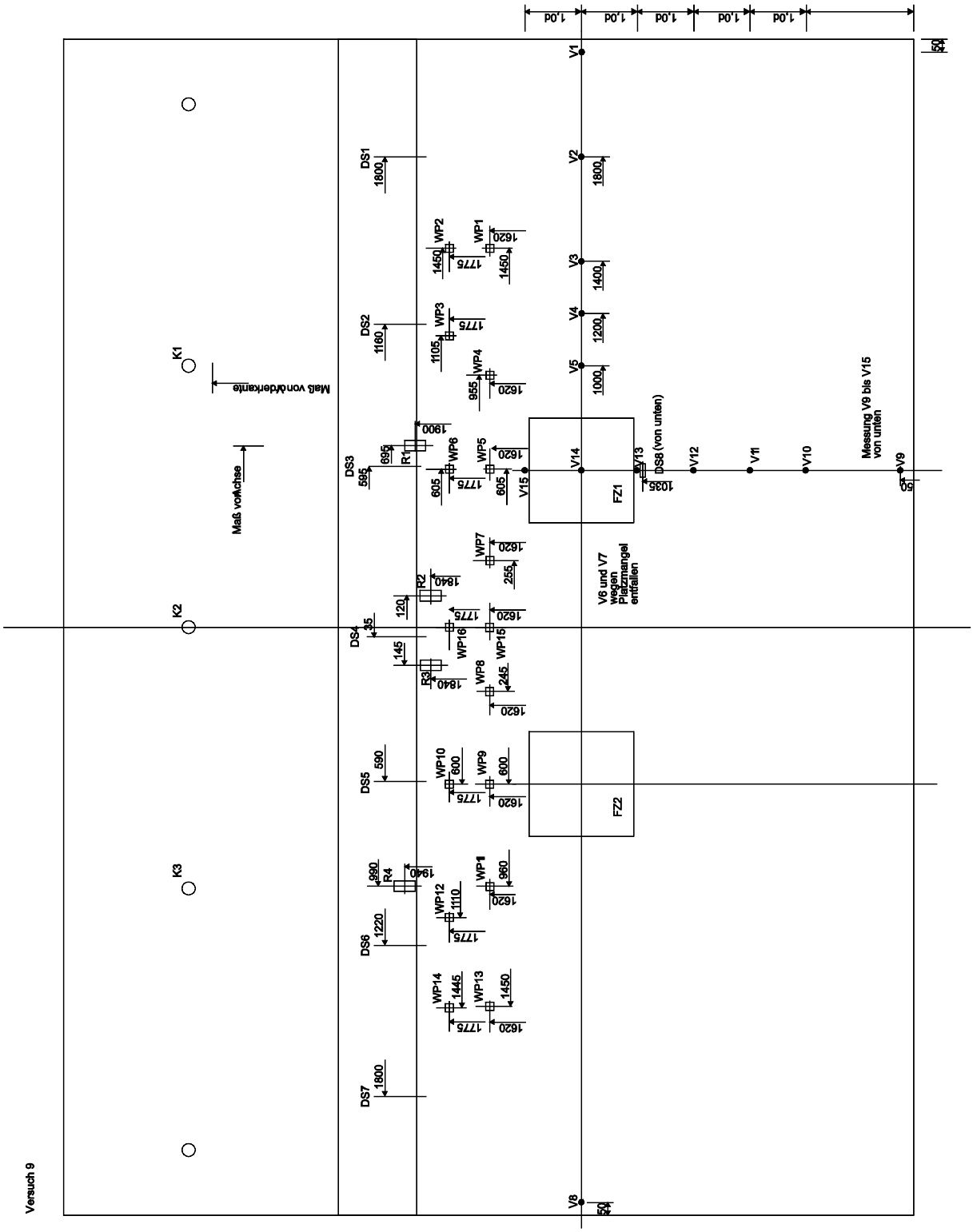


Bild 100: Anordnung der Messtechnik Versuch P9

Anordnung der Messaufnehmer Versuch P10

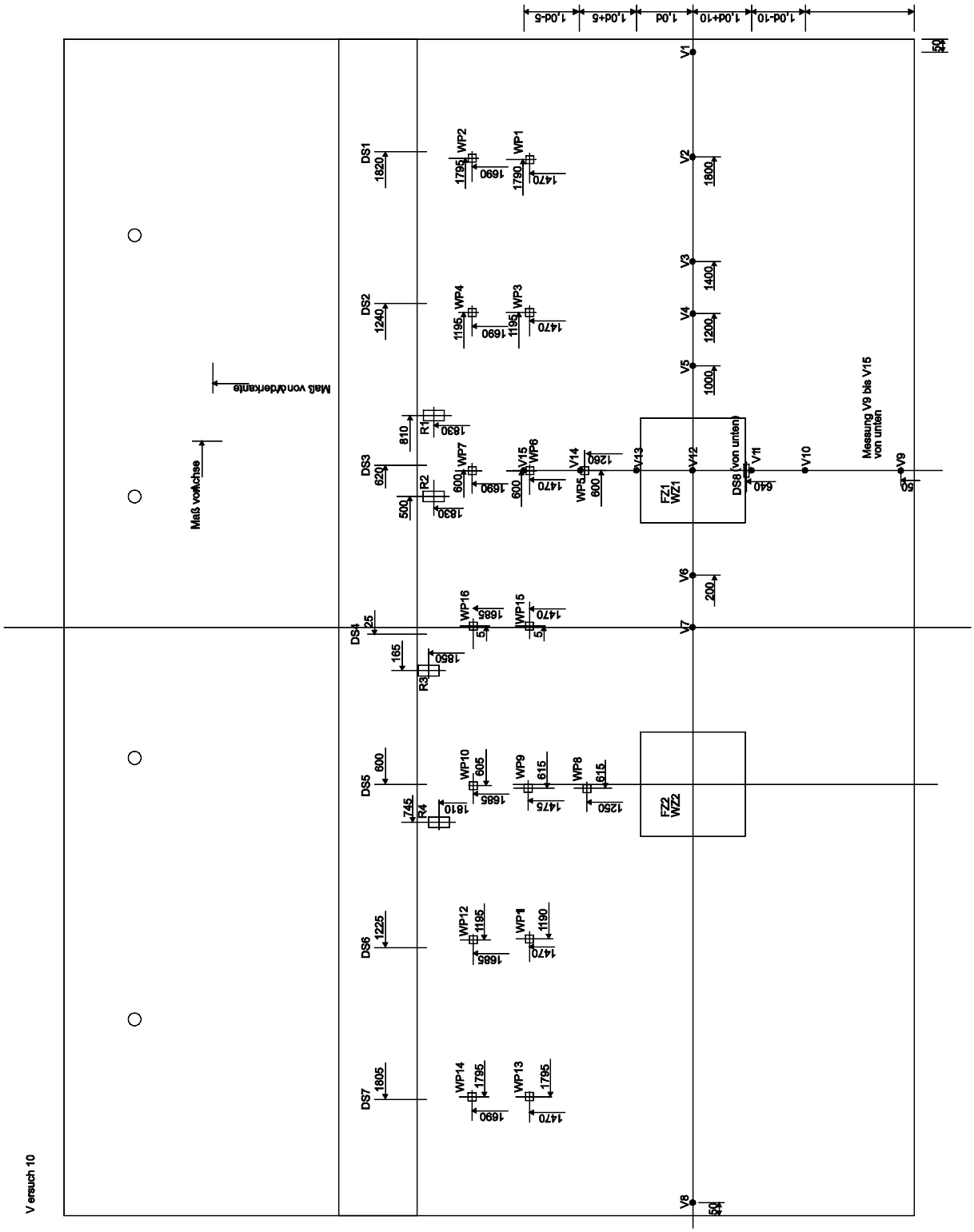


Bild 101: Anordnung der Messtechnik Versuch P10

Anordnung der Messaufnehmer Versuch P11

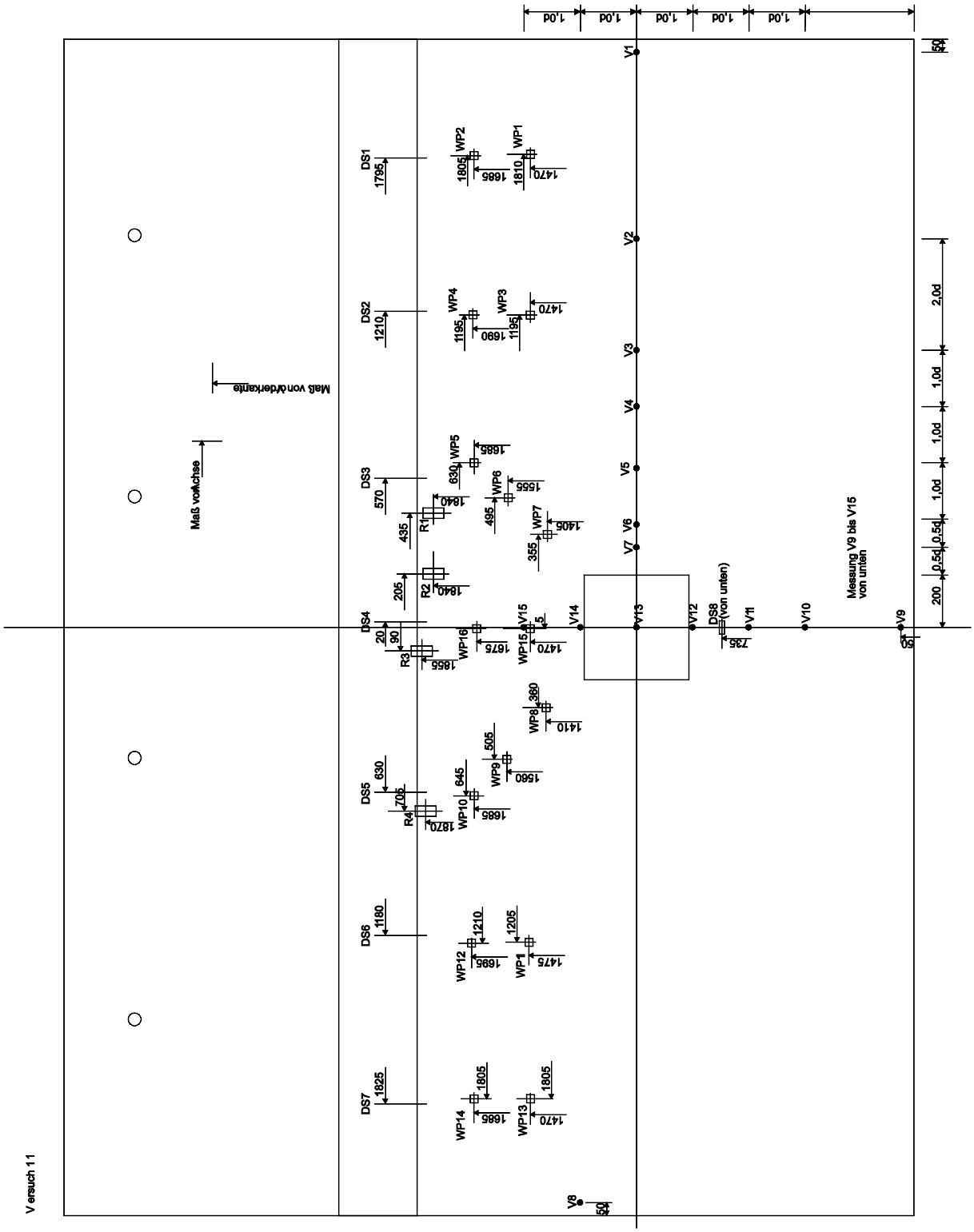


Bild 102: Anordnung der Messtechnik Versuch P11

Anordnung der Messaufnehmer Versuch P12

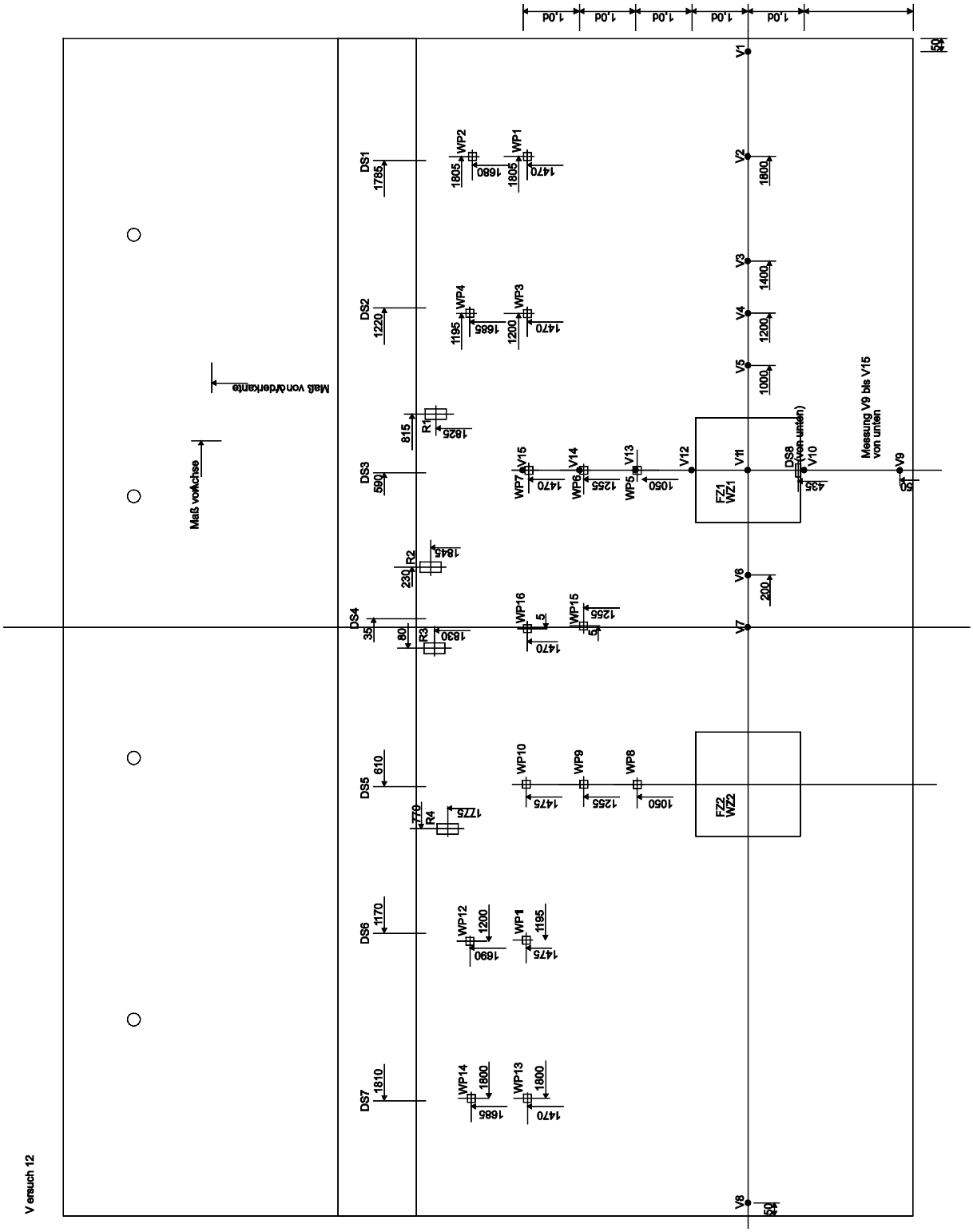


Bild 103: Anordnung der Messtechnik Versuch P12

Anordnung der Messaufnehmer Versuch P13

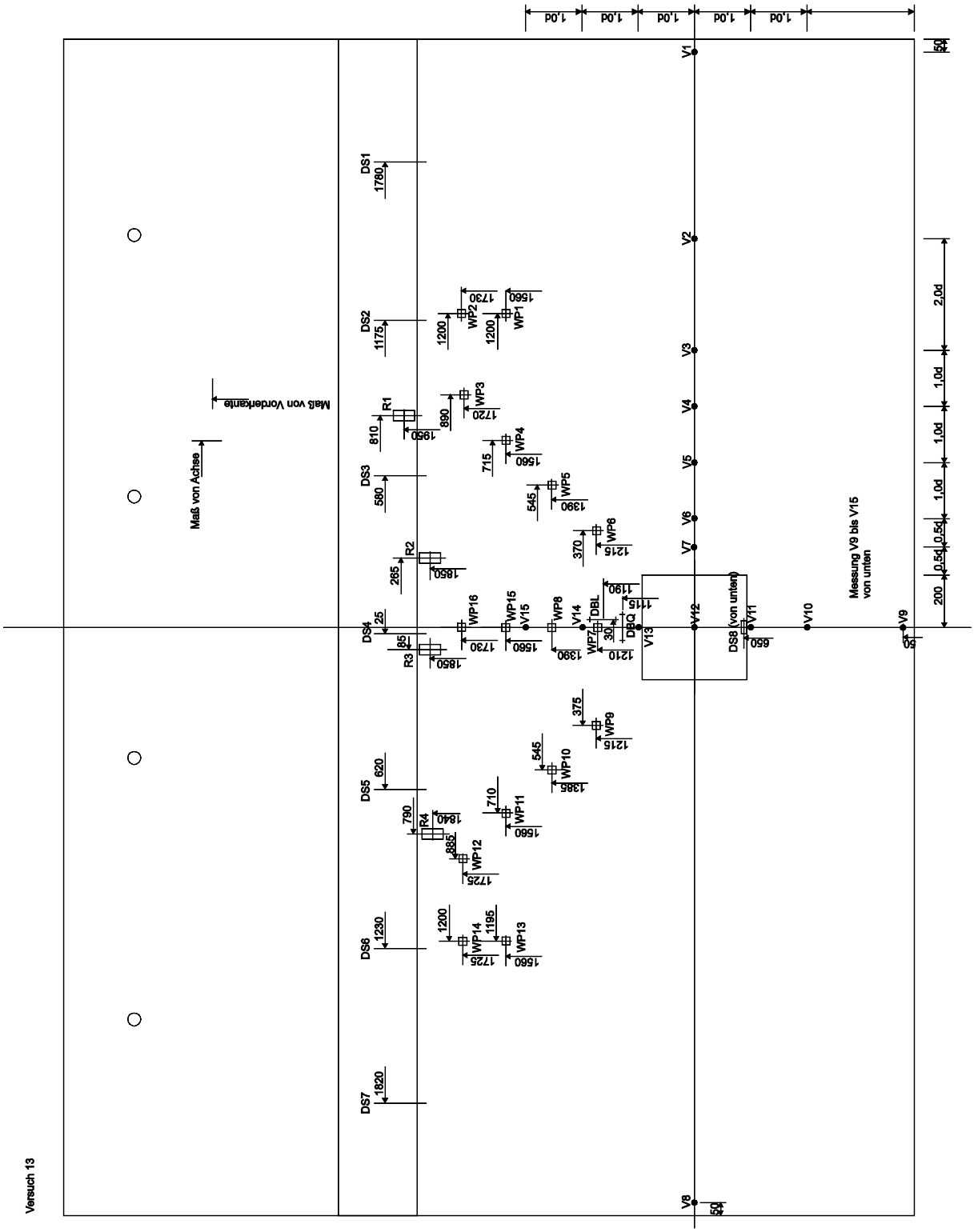


Bild 104:Anordnung der Messtechnik Versuch P13

Anordnung der Messaufnehmer Versuch P14

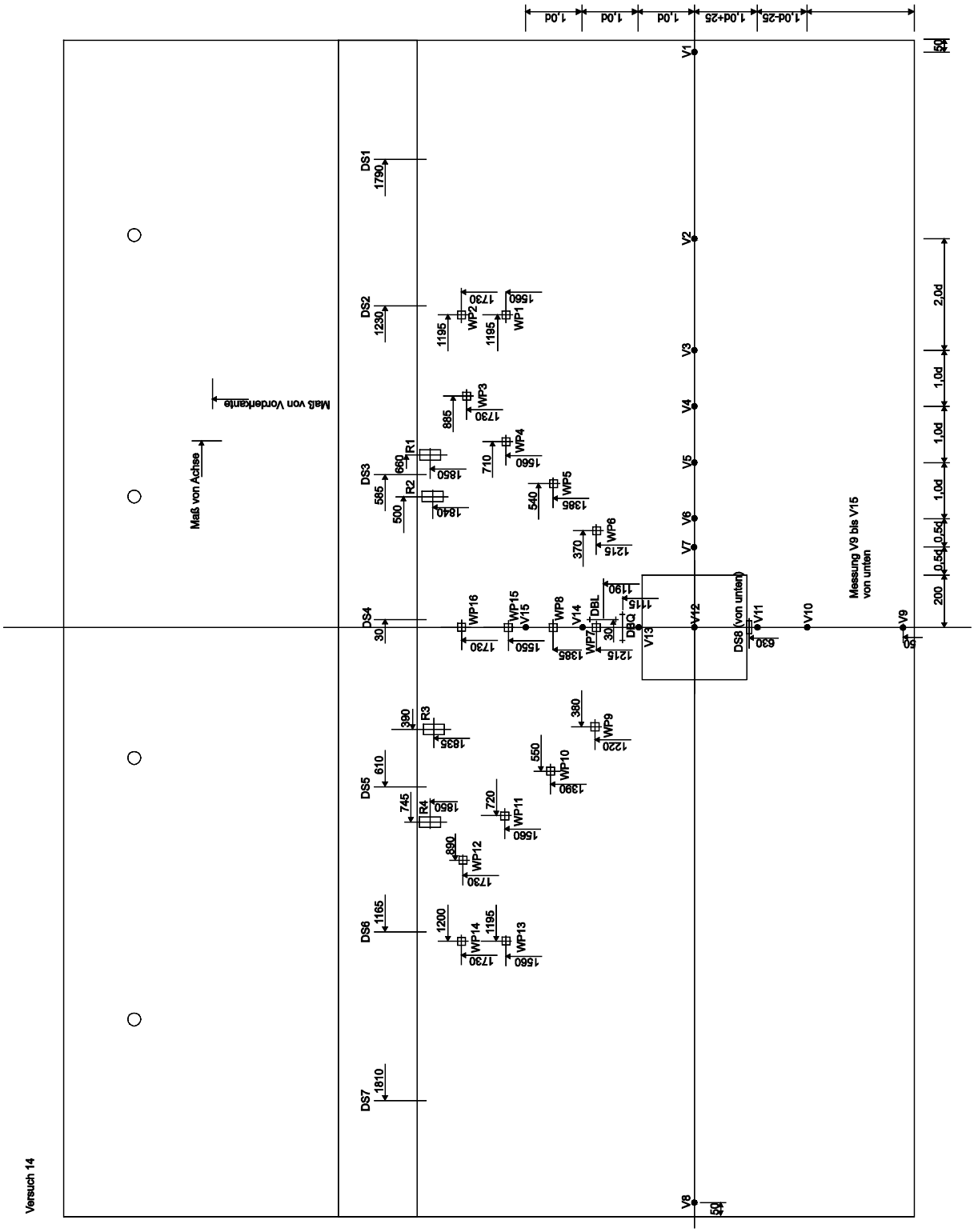


Bild 105: Anordnung der Messtechnik Versuch P14

Anordnung der Messaufnehmer Versuch P15-1d

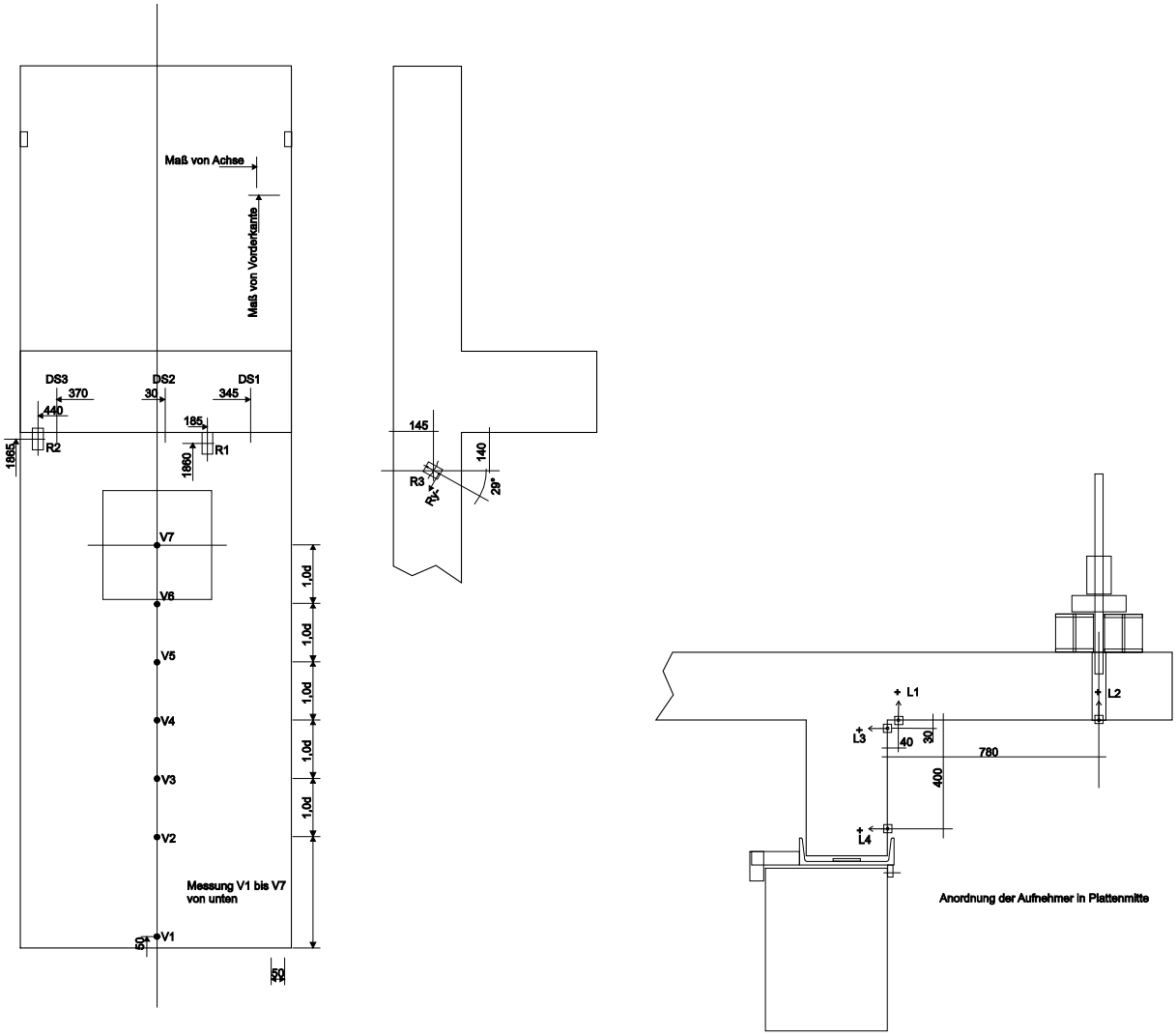


Bild 106: Anordnung der Messtechnik Versuch P15-1d

Anordnung der Messaufnehmer Versuch P15-2d

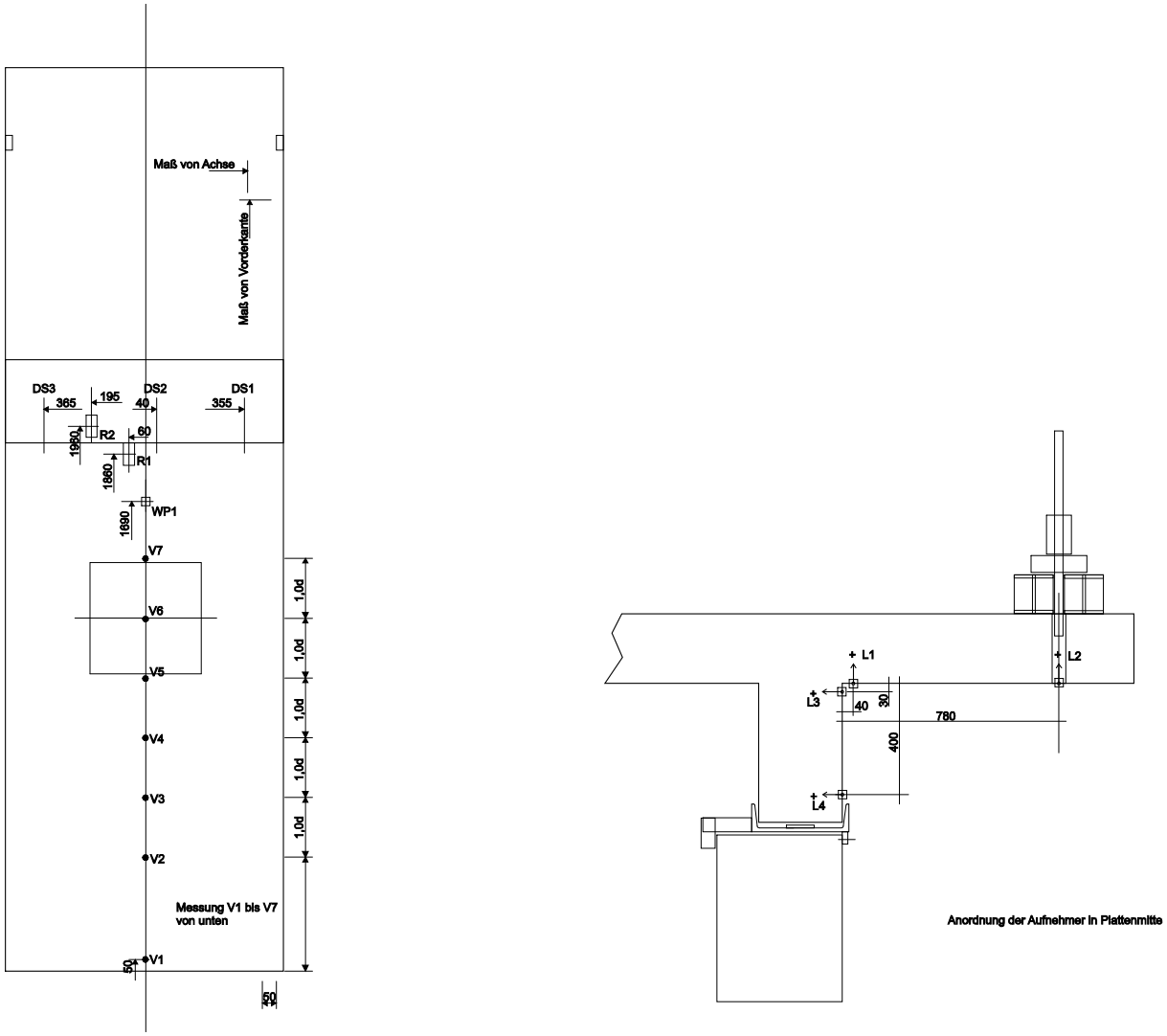


Bild 107: Anordnung der Messtechnik Versuch P15-2d

Anordnung der Messaufnehmer Versuch P15-3d

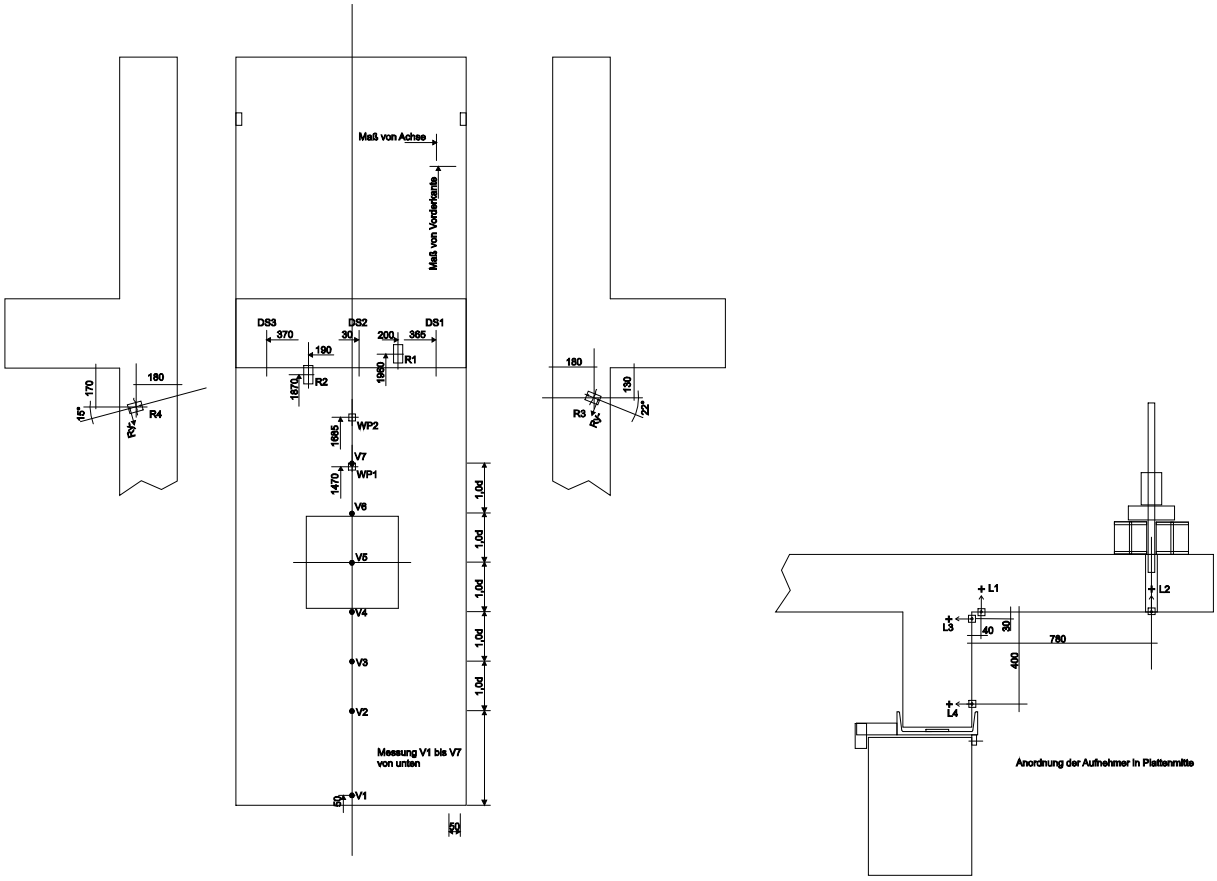


Bild 108: Anordnung der Messtechnik Versuch P15-3d

Anordnung der Messaufnehmer Versuch P15-5d

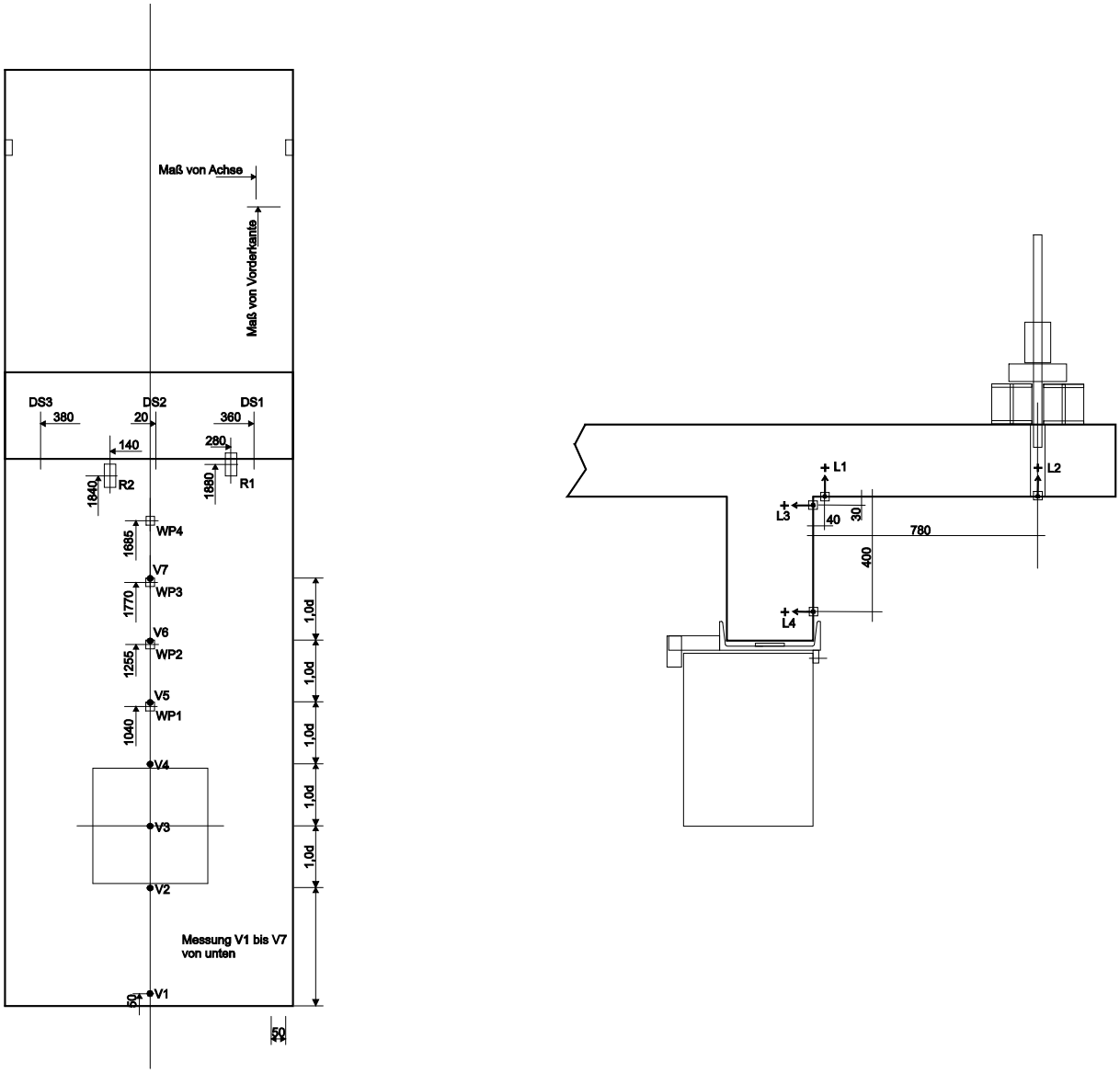


Bild 109: Anordnung der Messtechnik Versuch P15-5d

Anordnung der Messaufnehmer Versuch P15-1d vg (vorgeschädigt)

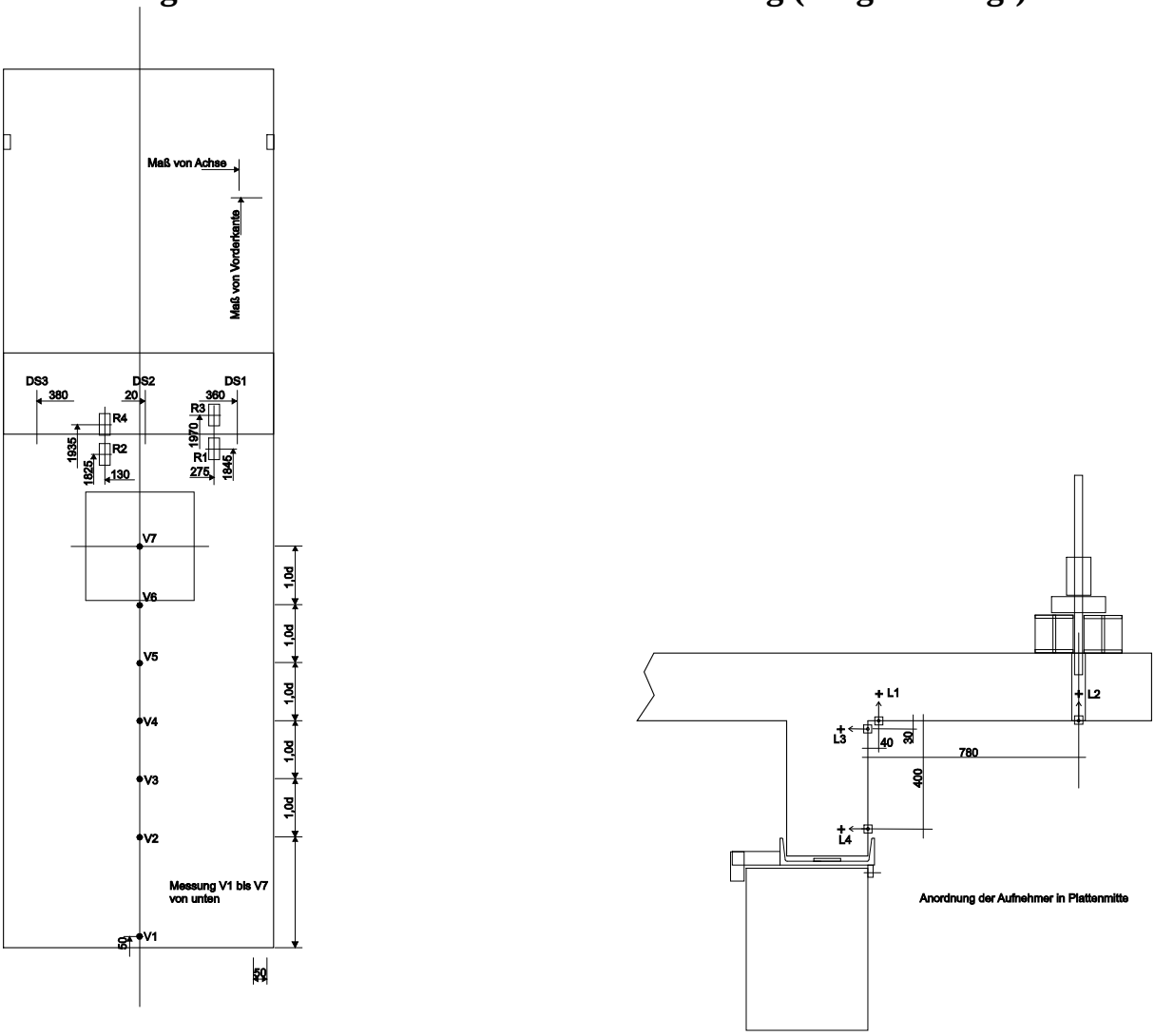


Bild 110: Anordnung der Messtechnik Versuch P15-1d vg

Anhang C Spezifikation der Messtechnik

Kennwerte der Aufnehmer und Prüfmaschine

Messung	**Aufnehmer**		**Messbereich**
Werte der Prüfmaschine			
F	Instron		1000 kN
Weg	Instron		±200 mm

Verformungen (Wegaufnehmer), Messkette linearisiert < 0,2%			
V13	HBM W100	34756	±100 mm
V14	HBM W50	2170	±50 mm
V15	HBM W50	2167	±50 mm
V4	HBM W100	34755	±100 mm
V5	HBM W50	36105	±50 mm
V6	HBM W50	36103	±50 mm
V7	HBM W100	2173	±100 mm
V8	HBM W50	14313	±50 mm
V9	HBM W50	14314	±50 mm
V10	HBM W100	2172	±100 mm
V11	HBM W50	14315	±50 mm
V12	HBM W50	14316	±50 mm
V13	Pe WLG100	141004	±100 mm /78,6mV/V
V14	Pe WLG50	32937	±50 mm /79,8mV/V
V15	Pel WLG50	32936	±50 mm /79,3mV/V

Plattendicke, Messkette linearisiert < 0,2%			
WP1-16	HBM		±10 mm, bzw. ±20 mm

Stahldehnungen			
DS1-DS8	HBM DD1/ 100mm		±2,5 mm

Rissaufnehmer			
R1- R4	TML KG-B		

Kraft Vorspannung			
K1-K3	HBM C6/500		500 kN
K4, K5	HBM C6/200		200 kN

Auflagerverformungen Messtraverse - Prüfkörper			
L1-L8	TML KG-A2 (DMS)		±2 mm

Dehnungsmessung Bewehrungsstahl DS1-7

Datenblatt

DD1

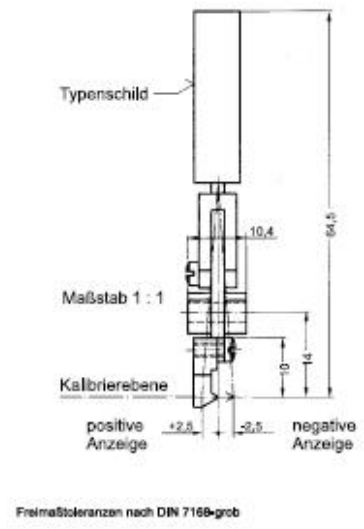
Dehnungsaufnehmer

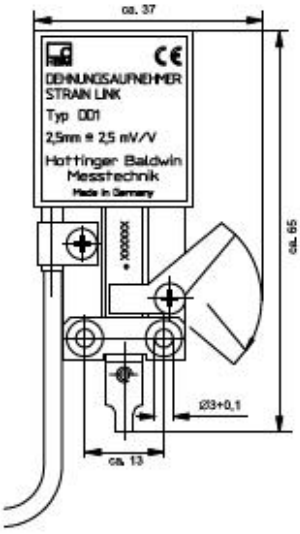


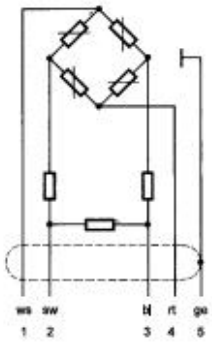
Charakteristische Merkmale

- **Vielseitiger Dehnungsaufnehmer mit DMS-Messsystem**
- **Hohe Genauigkeit**
- **Kompakter Aufbau**
- **Umfangreiches Zubehör**

Abmessungen (in mm)







Freimaßtoleranzen nach DIN 7168-grob

Technische Daten

Typ		DD1
Genauigkeitsklasse		0,1
Nennlängenänderung	mm	±2,5
Nennkennwert (Nennausgangssignal bei Nennlängenänderung)	mV/V	±2,5
Kennwerttoleranz (Abweichung des Kennwertes vom Nennkennwert)	%	±0,5
Temperatureinfluss		
auf den Kennwert pro 10K	%	< ±0,03
auf das Nullsignal pro 10 K	%	< ±0,05
Linearitätsabweichung bezogen auf den Nennkennwert	%	< ±0,05
Elektrisches Messprinzip		DMS-Vollbrücke
Eingangswiderstand bei Referenztemperatur	Ω	350 ±3
Nennbereich der Speisespannung bei Referenztemperatur	V	1 ... 6
Gebrauchsbereich der Speisespannung	V	1 ... 10
Federrate (Rückstellkraft der Messzunge)	N/mm	ca. 0,23
Referenztemperatur	°C	23
Nenntemperaturbereich	°C	-10 ... +60
Gebrauchstemperaturbereich	°C	-20 ... +70
Lagerungstemperaturbereich	°C	-50 ... +70
Kabellänge	m	1,5
Gewicht des Aufnehmers (ohne Kabel)	g	20

Zubehör:

Für Anwendung als Anklemm-Dehnungsaufnehmer bestehend aus:
DD1/ZA
DD1/ZV11

Für Anwendung als Anklemm-Dehnungsaufnehmer mit Schnellspannvorrichtung bestehend aus:
DD1 (1 Stück zusätzlich, benötigt werden 2 Stück)
DD1/ZV11 (1 Stück zusätzlich, benötigt werden 2 Stück)
DD1/ZA (1 Stück zusätzlich, benötigt werden 2 Stück)
DD1/ZE (1 Stück)

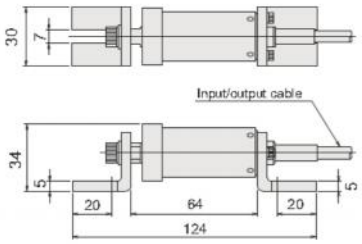
Verformungsmessung Auflager L1-8 und Messung der Rissweiten R1-4

KG-A Crack Displacement Transducer



The KG-A crack displacement transducer is set across a crack on the surface of concrete or across a joint between two concrete layers to measure the displacement of openings. The waterproof feature allows this transducer to make accurate and stable measurement outdoors over a long period of time. It is mounted using an anchor bolt (KGF-11) or a mounting metal piece (KGF-31).

Protection rating: IP 65 equivalent



Specifications

Type	KG-2A	KG-5A
Capacity	2 mm	5 mm
Rated output	1.5 mV/V (3000 x 10^{-6} strain)	2 mV/V (4000 x 10^{-6} strain)
Sensitivity	approx. 1500 x 10^{-6} strain/mm	approx. 800 x 10^{-6} strain/mm
Non linearity	1% RO	
Spring force	15 N	
Temperature range	-20 ~ +60°C (no icing)	
Input/output resistance	350 Ω	
Recommended exciting voltage	Less than 2 V	
Allowable exciting voltage	5 V	
Weight	180 g	

Input/output cable: dia. 6 mm 0.35 mm² 4-core shielded chloroprene cable 2 m

Accessory

Anchor Bolt KGF-11

This bolt is used to mount the KG-A transducer. After the bolt is placed on to concrete surface the KG-A is mounted. (2 pcs/set)
Thread M6

Fixing Jig KGF-31

This jig is screw-mounted to the collar of the transducer, and bonded on to concrete surface. (2 pcs/set)

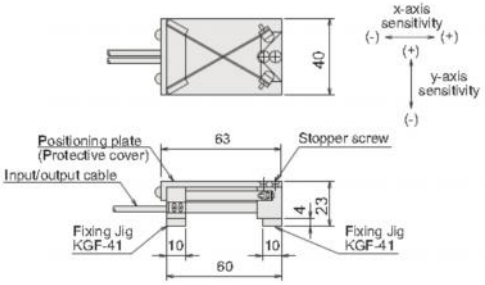
Protective Cover KGF-21

This cover protects the transducer installed on to concrete surface from mechanical damage.

KG-B Crack Displacement Transducer



The KG-B crack displacement transducer is used to measure the displacement in two directions simultaneously: the displacement of openings, such as concrete cracks or joints, and the horizontal shear displacement. It is glued to a mounting plate, which is then mounted on a structure. Because the mounting plate is detachable, the transducer can be demounted and set on a different structure. This allows this transducer to be used repeatedly on different structures. In addition, the small-size feature makes this transducer suitable for indoor measurement.



Specifications

Type	KG-3B
Capacity	x-direction +4 mm -2mm
	y-direction ±3 mm
Rated output	x-direction approx. +2 mV/V, -1 mV/V (+4000 x 10^{-6} strain, -2000 x 10^{-6} strain)
	y-direction approx. 1.5 mV/V (3000 x 10^{-6} strain)
Sensitivity	approx. 1000 x 10^{-6} strain/mm
Non linearity	1% RO
Temperature range	0 ~ +40°C
Input/output resistance	350 Ω
Cross sensitivity	x-direction 1.5% y-direction 2%
Recommended exciting voltage	Less than 2 V
Allowable exciting voltage	5 V
Weight	90 g

Input/output cable: dia. 3 mm 0.05 mm² 4-core shielded chloroprene cable 2 m x 2 pcs.

Accessory

Fixing Jig KGF-41

This jig is bonded onto concrete surface to mount the transducer. (2 pcs/set)

Dummy plate KGF-61

This plate is temporarily mounted to maintain proper gauge length for instal lation of the transducer with KGF-41 jig.

Messung der Plattendicke WP1-16





Bewährter induktiver Wegaufnehmer in Halbbrückenschaltung

- 12 mm Standardgehäuse,
- kalibriert auf 80 mV/V Nennsignal
- geeignet für alle industriellen Anwendungen in Produktion und Test.

Technische Daten

		WLG 10	WLG 20	WLG 40	WLG 50	WLG 100	WLG 150	WLG 160	WLG 200	WLG 250	WLG 300	WLG 400	WLG 500
Nennmessweg	mm	±5	±10	±20	±25	±50	±75	±80	±100	±125	±150	±200	±250
Arbeitsspanne ***)	mm	±10	±15	±30	±30	±60	±90	±90	±110	±135	±160	±210	±258
Maß A	mm	40	40	45	50	100	130	130	150	180	200	250	300
Maß B	mm	80	100	145	145	245	355	375	455	565	675	875	1065
Aufnehmergewicht (ca.)	g	40	60	85	85	120	150	160	200	230	280	350	440
Tauchankergewicht (ca.)	g	6	8	9	9	12	15	16	20	25	30	40	50
Nennausgangssignal *)	mV/V	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Empfindlichkeit	mV/V/mm	16	8	4	3,2	1,6	1,07	1,0	0,8	0,64	0,53	0,4	0,32
Speisespannung	V eff	bis 5											
Trägerfrequenz	kHz	5 ... 10											
Linearitätsfehler **)		±0,25% des Gesamtmessweges Option: 0,1%											
Temperaturfehler des Nullpunktes		±0,02% / 10K											
Temperaturfehler der Empfindlichkeit		±0,05% / 10K											
Betriebstemperatur **)		-50°C ... +80°C											
Schutzart nach Din 40050		IP 64											

*) Toleranz der Kalibrierung: typisch ±1 mV/V, max. ±3 mV/V **) Option bei Bestellung angeben

***) Arbeitsspanne: Nutzung des Wegaufnehmers möglich, technische Daten sind über den Nennmessweg hinaus nicht garantiert; nicht in der inneren Endlage bei axialem Kabelanschluß

Versionsübersicht

Bestellcode: WLG nnn N n,n % /Option1 /Option2 ...

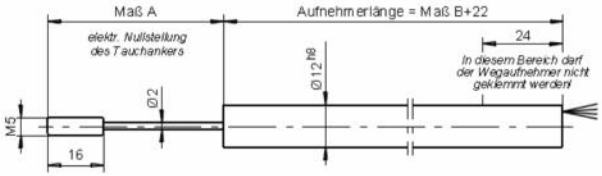
Reihe	Messweg	Anschlussvariante					Linearitätsklasse (FS)			Optionen		
WLG	10 ... 500	Litze	Kabel axial	Kabel radial	Stecker radial	Lemo-Stecker radial	0,5%	0,25%	0,1%	erhöhte Betriebs-temperatur 1)	Teflonkabel 2) anstatt PE-Kabel	kundenspezi-fisches Maß A
		o.	K	Q	R	LR				/120°C	/TF	/A xx
X	10 ... 500	X	X	X	X	X	X	X	X	O	O	O

X = verfügbare Variante O = verfügbare Option -- = nicht verfügbar
1) umfasst Teflonkabel bei Versionen K und Q 2) nur bei Versionen K und Q

Maßzeichnungen / Anschlussvarianten

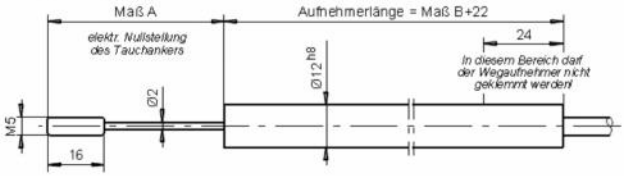
Litzenanschluss ( )

Kernkanal durchgängig



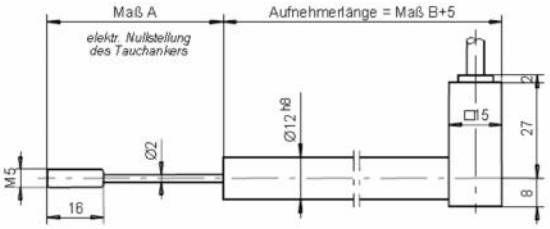
Kabelanschluss axial (K)

Kernkanal nicht durchgängig



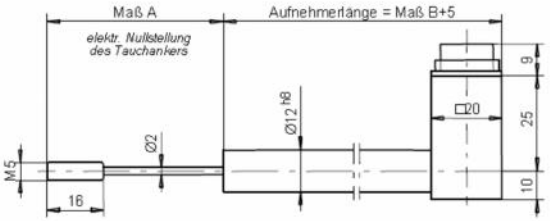
Kabelanschluss radial (Q)

Kernkanal durchgängig



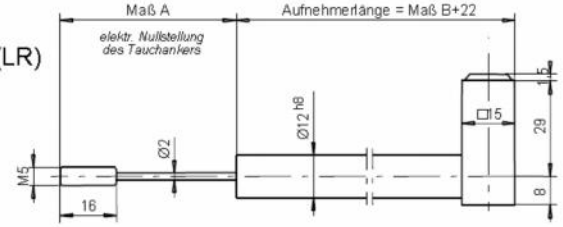
Steckeranschluss radial (R)

Kernkanal durchgängig

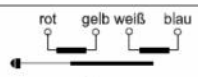
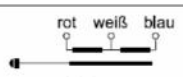


Steckeranschluss Lemo radial (LR)

Kernkanal durchgängig



Elektrischer Anschluss

	Litze	K / Q	R	LR
Anschlusstyp	Teflonlitze 250 mm lang	PE-Kabel 2,5 m lang Option: Teflon-Kabel	Amphenol C 091 Stecker (Gegenstecker wird mitgeliefert)	LEMO ERA.1S.303.CLL (Gegenstecker wird mitgeliefert)
Belegung				
Speisung +	Blau	Blau	2	3
Speisung –	Rot	Rot	3	2
Messsignal +	Weiß+Gelb	Weiß	1	1
Messsignal -	-	-	-	-
Gegenstecker	-	-	Amphenol C 091 Kabeldose	LEMO FFA.1S.303CLA.57

Kraftmessung Rückverankerung K1-4

C6A

Kraftaufnehmer

Datenblatt

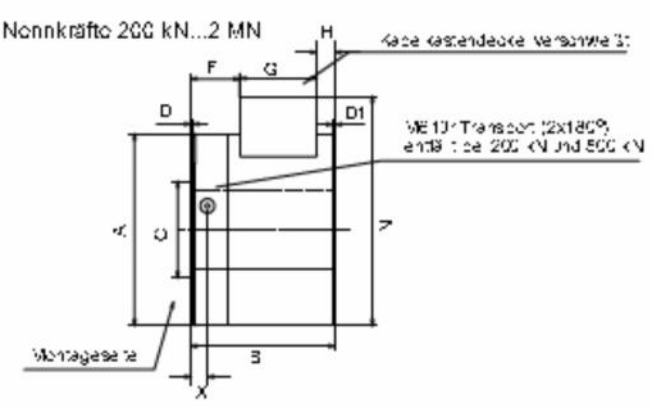


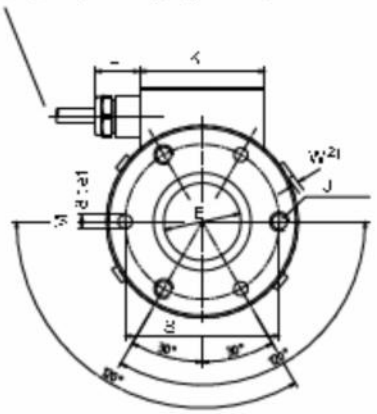
Charakteristische Merkmale

- Druckkraftaufnehmer
- Nennkräfte 200 kN ... 5 MN
- Durchgehende Innenbohrung bei Nennkräften 200 kN...2 MN
- Nichtrostende Ausführung der Nennkräfte 200 kN und 500 kN
- Umfangreiche Einbauhilfen

Abmessungen (in mm)

C6A[1], Nennkräfte 200 kN...2 MN





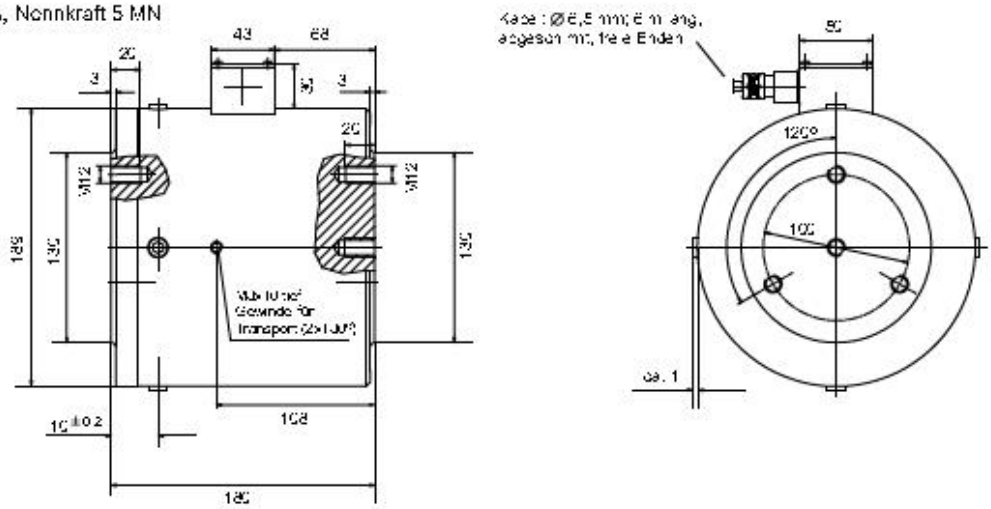
1) Kraftaufnehmer mit Nennkräften ≤ 500 kN aus nichtrostendem Material

2) Nur für 1 MN und 2 MN

Nennkräfte	A	B	C ±0,1	D	D1	E −0,1	F	G	H	J	K	L	M 4H	N	S ±0,1	W	X
200 kN	80	60	40,8	1	1	32	19,5	32,5	8	M8-8g e1	53	18,5	6	97,5	64	-	-
500 kN	80	60	52	1	1	32	19,5	32,5	8	M8-8g e1	53	18,5	6	97,5	64	-	-
1 MN	160	100	88	2	3	68	29	43	28	M12-15g e1	80	35	8	200	130	1	10
2 MN	160	100	106	2	3	68	29	43	28	M12-15g e1	80	35	8	200	130	1	10

Abmessungen Fortsetzung (in mm)

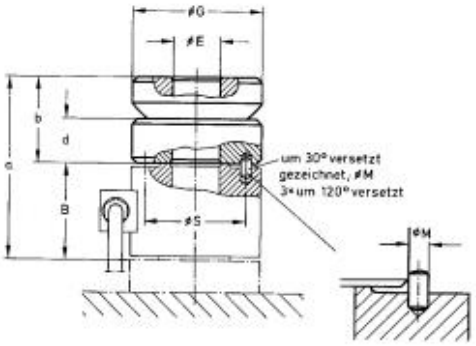
C6A, Nennkraft 5 MN



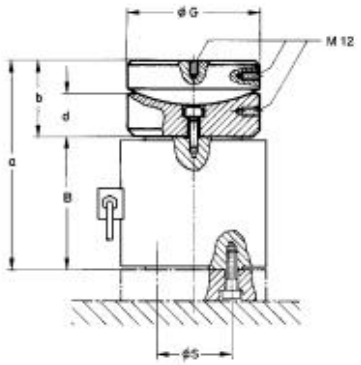
Einbauhilfen

Kugelkalotte ZK (Ausgleich von schiefer Lasteinleitung)

für Nennkräfte 200 kN... 2 MN



für Nennkräfte 5 MN

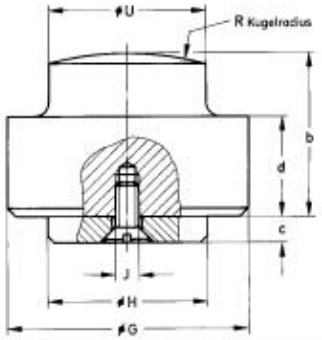


Nennkräfte	ZK Bestell-Nr.	Gewicht in kg	B	E$^{-0,1}$	G	M_{H11}	S	a	b	d
200...600 kN	1-CE/6CT/ZK	1,7	60	32	82 $_{0,2}$	6	64 ±0,1	112	52	28
1 MN	1-CE/10CT/ZK	3,8	100	68	121,5 $_{0,2}$	8	130 ±0,1	175	74,5	40
2 MN	1-CE/20CT/ZK	11,6	100	68	159 $_{0,2}$	8	130 ±0,1	195	95	50
5 MN	1-CE/50CT/ZK	20,6	180	-	178 $_{0,3}$	-	100	284	103	61

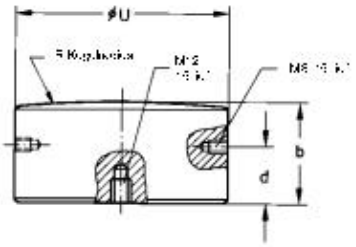
Einbauhilfen Fortsetzung

Lastknopf ZL (für hochgenaue Messungen)

für Nennkräfte 200 kN...2 MN

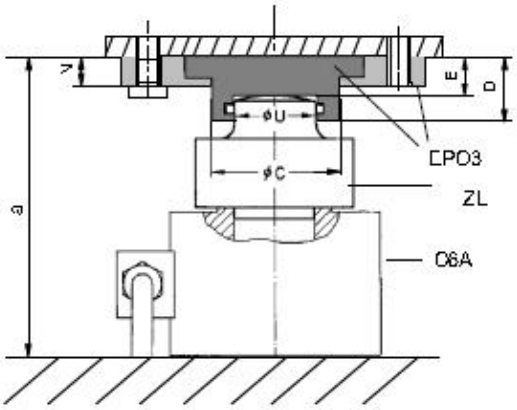


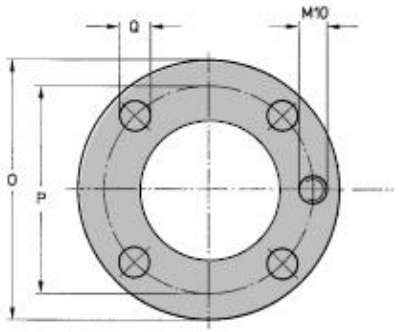
für Nennkräfte
5 MN



Nennkräfte	ZL Bestell-Nr.	Gewicht in kg	G	H_{o1}	J	R	U_{o2}	b	c	d
200 kN	1-QE/2CT/Z_	0,8	80	31,5	M5	300	32	45	5	30
500 kN	1-QE/5CT/Z_	0,8	80	31,5	M5	300	44	45	5	30
1 MN	1-QE/10CT/Z_	0,8	120	67,5	M8	600	64	80	8	60
2 MN	1-QE/20CT/Z_	0,8	120	67,5	M8	600	85	80	8	60
5 MN	1-QE/50CT/Z_	0,5	-	-	-	-	129,8 $_{0.05}$	60	-	35

Druckstück EPO3





* Darstellung mit Lastknöpfen ZL 0,2MN...2MN

Nennkräfte	EPO3 Bestell-Nr.	Gewicht in kg	C	D	E	N	O	P	Q	U_{o2}	a
200 kN	1-EPO3/R2CT	1,2	47,5	27,5	20	14	114	90	13	32	125
500 kN	1-EPO3/5CT	3,4	81,5	50	35,5	20	148	120	17	44	144,5
1 MN	1-EPO3/10CT	3,2	81,5	50	35,5	20	148	120	17	64	219,5
2 MN	1-EPO3/25CT	13,0	139,5	80	67,5	25	225	190	22	85	247,5
5 MN	1-EPO3/50CT	27,0	169,8	100	90	33	270	220	26	130	250

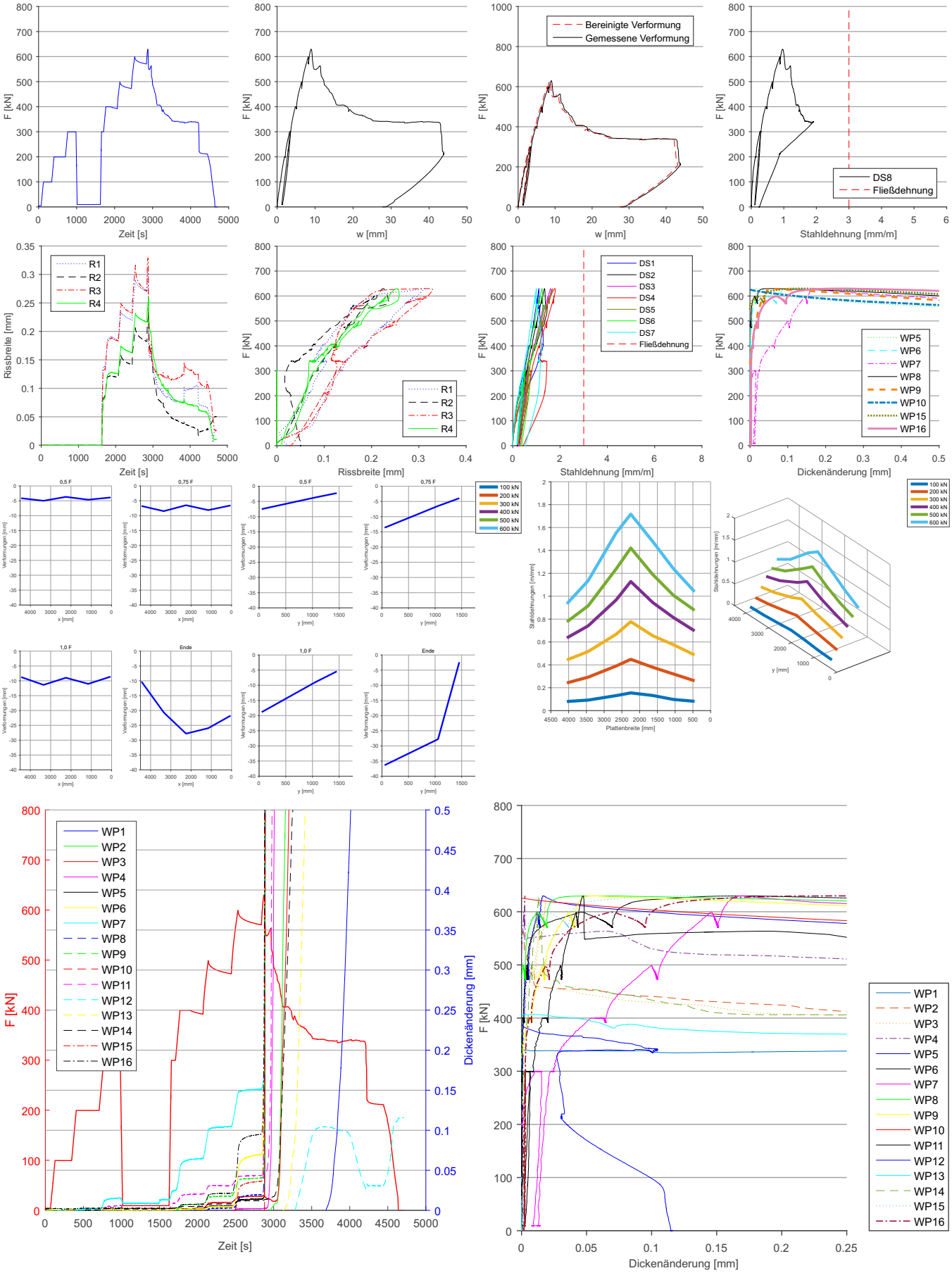
Technische Daten (Angaben gemäß VDI 2638)

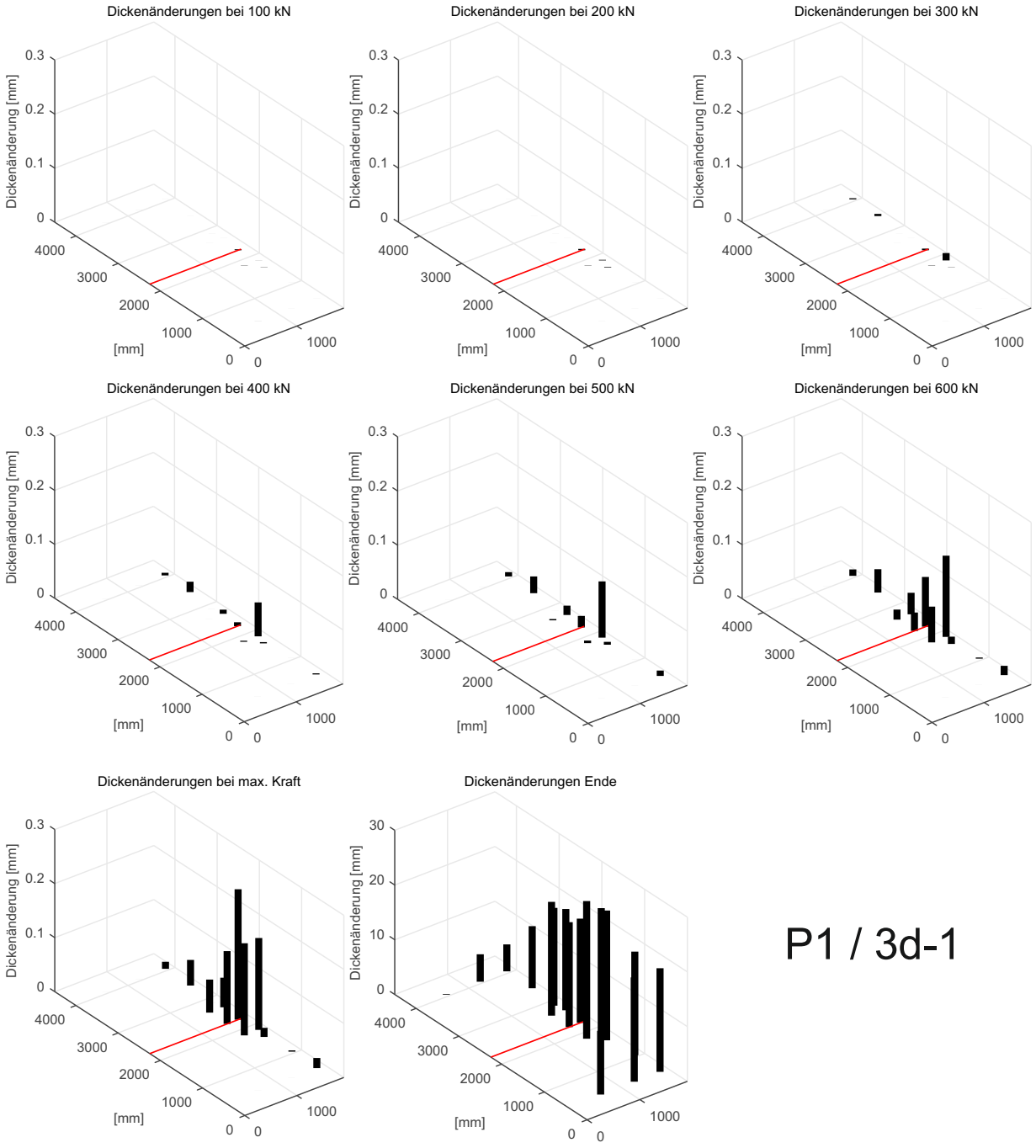
Typ			**C6A**				
Genauigkeitsklasse			0,5				
Nennkraft	F_{nom}	MN	200 kN	500 kN	1 MN	2 MN	5 MN
Nennkennwert	C_{nom}	mV/V	2				
Relative Kennwertabweichung[2]	d_c						
bei Verwendung mit gehärteten Druckplatten		%	< ±2,5				
bei Verwendung mit Lastknopf ZL und Pendelstütze EPO3		%	< ±0,5				
bei Verwendung mit Kugelkalotte ZK		%		< ±2,5		< ±4	
Relative Nullsignalabweichung	$d_{s,o}$	%	< 1				
Relative Umkehrspanne ($0,5F_{nom}$)	u	%	< ±0,8				
Linearitätsabweichung[2]	d_{lin}						
bei Verwendung mit gehärteten Druckplatten		%	< ±1				
bei Verwendung mit Lastknopf ZL und Pendelstütze EPO3		%	< ±0,5				
bei Verwendung mit Kugelkalotte ZK		%	< ±1				
Temperatureinfluss auf den Kennwert/10K bezogen auf den Nennkennwert	TK_c	%	< ±0,1				
Temperatureinfluss auf das Nullsignal/10K bezogen auf den Nennkennwert	TK_0	%	< ±0,05				
Relatives Kriechen über 30min, im Nenntemperaturbereich[1]	d_{crF+E}	%	< ±0,06				
Eingangswiderstand bei Referenztemperatur	R_e	Ω	> 345				
Ausgangswiderstand bei Referenztemperatur	R_a	Ω	356 ± 1,5				
Isolationswiderstand bei Prüfspannung 100 V	R_{is}	GΩ	$>5 \times 10^9$				
Referenzspeisespannung	U_{ref}	V	5				
Gebrauchsbereich der Speisespannung	$B_{U,GT}$	V	0,5...12				
Referenztemperatur	t_{ref}	°C	+23				
Nenntemperaturbereich	$B_{t,nom}$	°C	-10...+70				
Gebrauchstemperaturbereich	$B_{t,G}$	°C	-30...+85				
Lagertemperaturbereich	$B_{t,S}$	°C	-50...+100				
Maximale Gebrauchskraft[1]	F_G	%	150				
Grenzkraft[1]	F_L	%	150				
Bruchkraft[1]	F_B						
bei Verwendung mit gehärteten Druckplatten		%	> 300				
bei Verwendung mit Lastknopf ZL und Pendelstütze EPO3		%		> 300			> 200
bei Verwendung mit Kugelkalotte ZK		%		> 200			> 200
Statische Grenzquerkraft[1]	F_Q						
bei Verwendung mit gehärteten Druckplatten		%	20				
bei Verwendung mit Lastknopf ZL und Pendelstütze EPO3		%	20				10
bei Verwendung mit Kugelkalotte ZK		%	10				
Relative zulässige Schwingbreite[1] nach DIN 50 100	F_{rb}	%	70				
Nennmeßweg ohne Einbauteile (±15%)	S_{nom}	mm	0,07	0,08	0,09	0,11	0,26
Eigenfrequenz ohne angekoppelte Masse und ohne Einbauteile	f_G	kHz	4,5	8	6	7,5	4,3
Gewicht, ohne Kabel		kg	1,4	1,7	10,8	12,2	33
Schutzart nach DIN EN 60 529			IP 67				
Kabellänge, 6-Leitertechnik		m	6				

[1] Bezogen auf die Nennkraft
[2] Die unterschiedlichen Toleranzen beim Verwenden verschiedener Einbauhilfen sind auf die geringe Bauhöhe des Aufnehmers zurückzuführen.

Anhang D Versuchsergebnisse

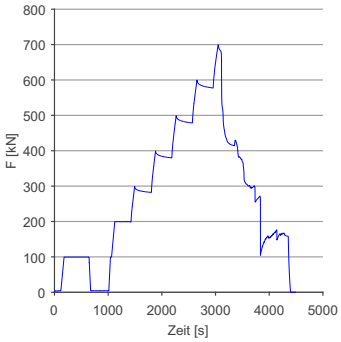
P1 / 3d-1

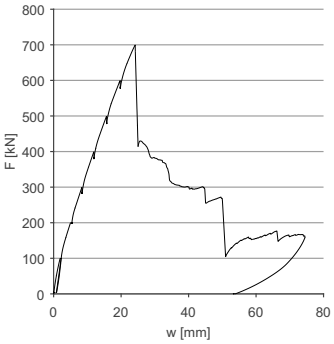

F [kN]
Zeit [s]
w [mm]
Bereinigte Verformung
Gemessene Verformung
DS8
Fließdehnung
Stahldehnung [mm/m]
Rissbreite [mm]
R1
R2
R3
R4
DS1
DS2
DS3
DS4
DS5
DS6
DS7
WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP15
WP16
Dickenänderung [mm]
100 kN
200 kN
300 kN
400 kN
500 kN
600 kN
Plattenbreite [mm]
WP1
WP2
WP3
WP4
WP11
WP12
WP13
WP14

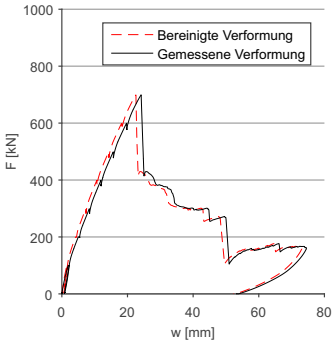

Dickenänderungen bei 100 kN
Dickenänderungen bei 200 kN
Dickenänderungen bei 300 kN
Dickenänderungen bei 400 kN
Dickenänderungen bei 500 kN
Dickenänderungen bei 600 kN
Dickenänderungen bei max. Kraft
Dickenänderungen Ende
Dickenänderung [mm]
[mm]

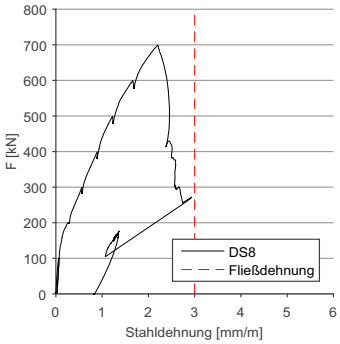
P1 / 3d-1

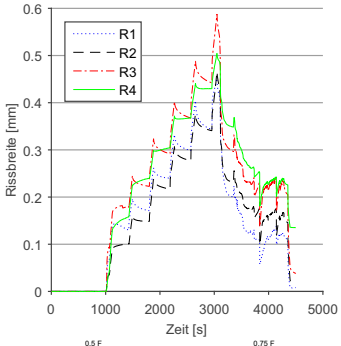
P2 / 5d

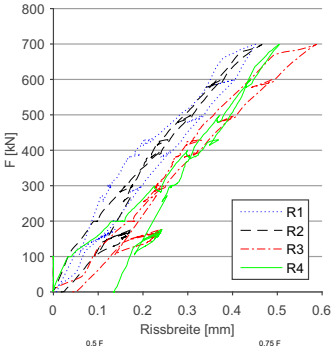

F [kN]
Zeit [s]

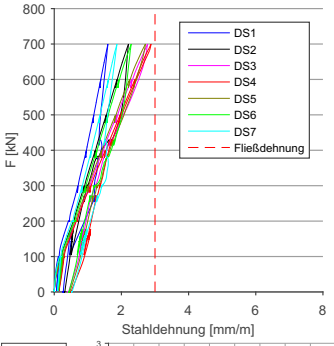

F [kN]
w [mm]

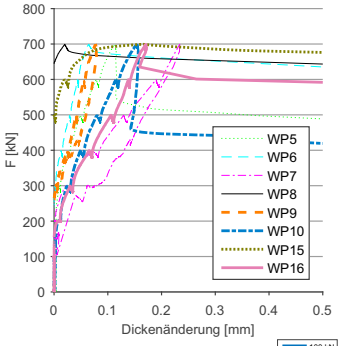

Bereinigte Verformung
Gemessene Verformung
F [kN]
w [mm]

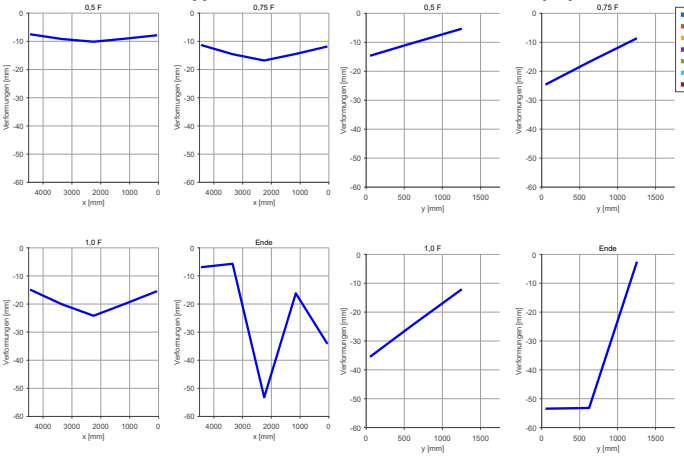

DS8
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

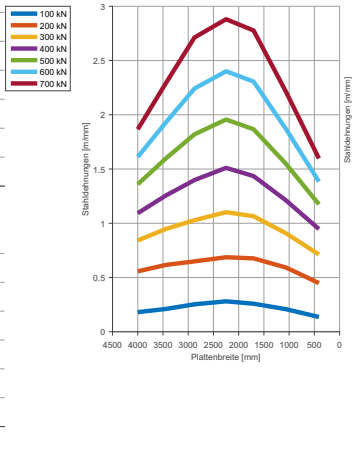

R1
R2
R3
R4
Rissbreite [mm]
Zeit [s]

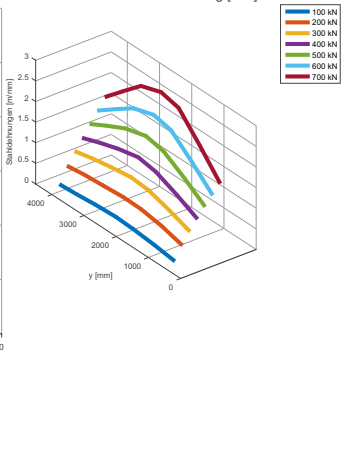

R1
R2
R3
R4
F [kN]
Rissbreite [mm]

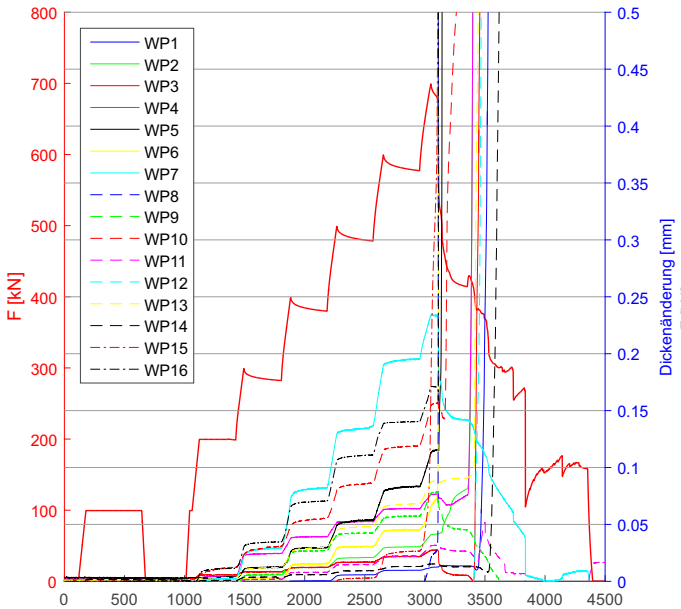

DS1
DS2
DS3
DS4
DS5
DS6
DS7
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

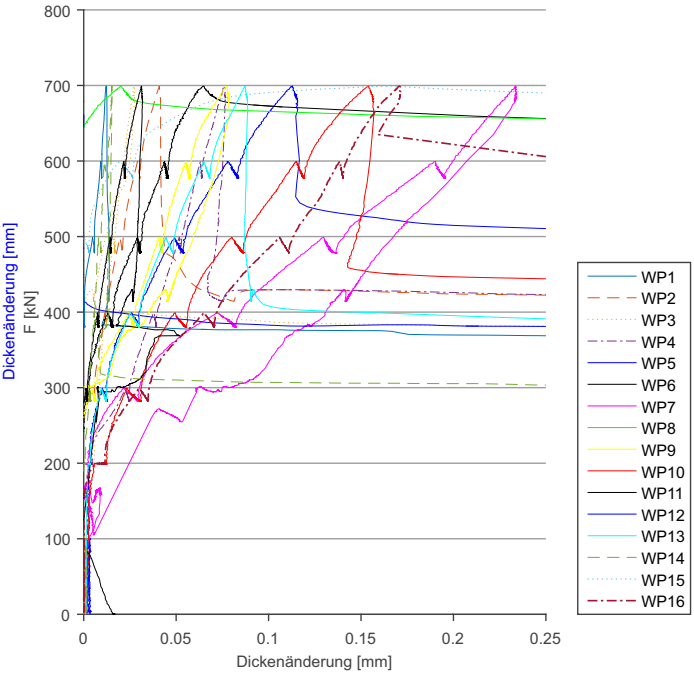

WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]

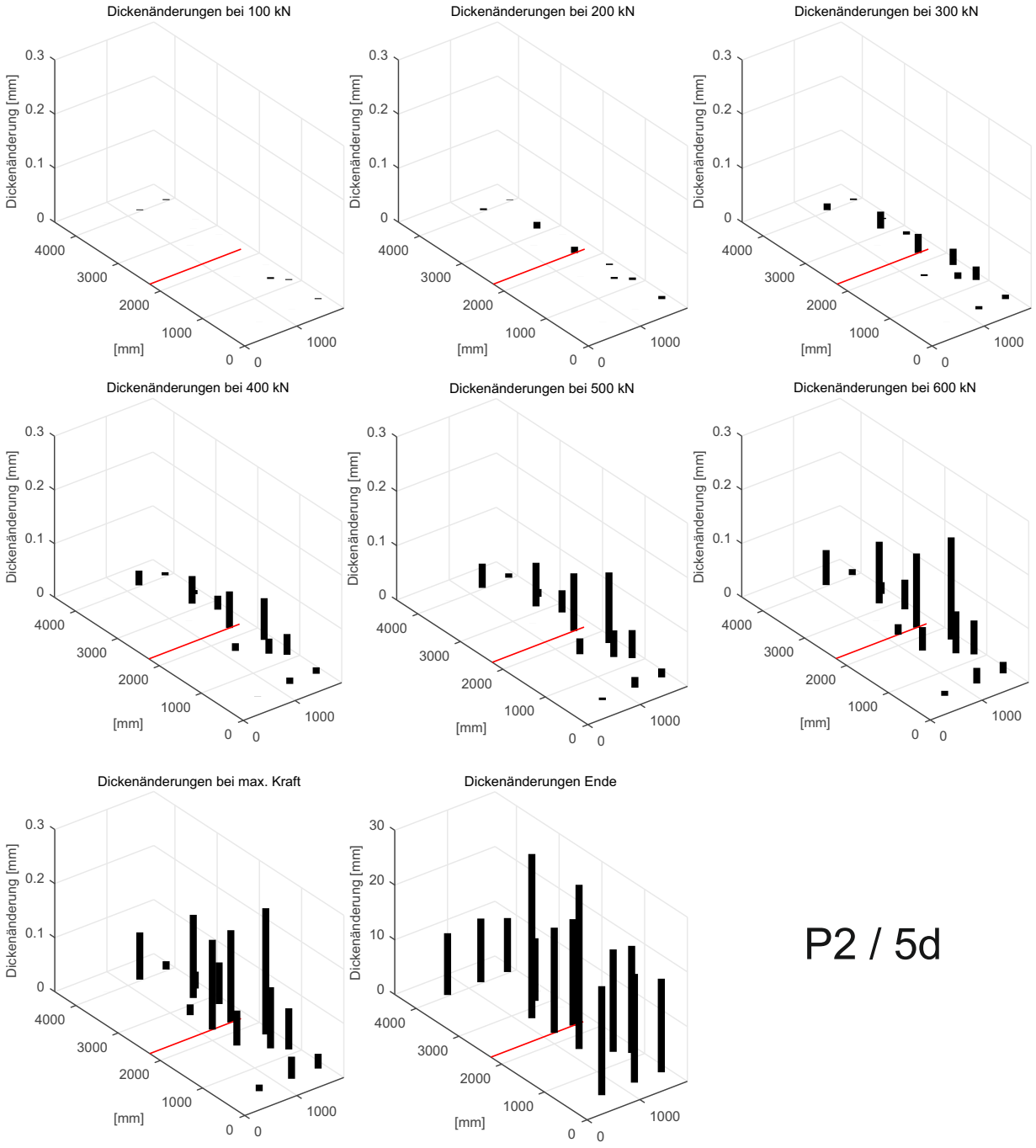

0,5 F
0,75 F
1,0 F
Ende
Verformungen [mm]
x [mm]
y [mm]


100 kN
200 kN
300 kN
400 kN
500 kN
600 kN
700 kN
Stahldehnungen [m/mm]
Plattenbreite [mm]


100 kN
200 kN
300 kN
400 kN
500 kN
600 kN
700 kN
Stahldehnungen [m/mm]
y [mm]

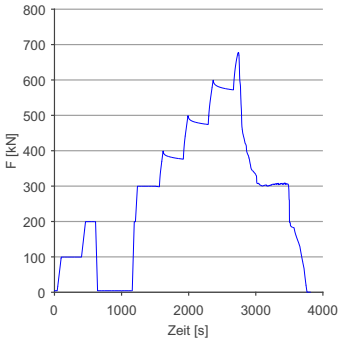

WP1
WP2
WP3
WP4
WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP11
WP12
WP13
WP14
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]
Zeit [s]

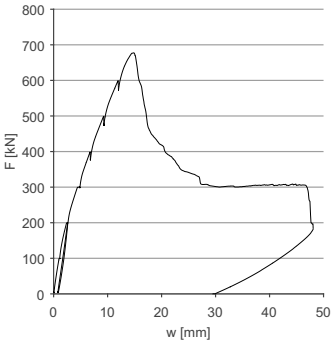

WP1
WP2
WP3
WP4
WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP11
WP12
WP13
WP14
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]

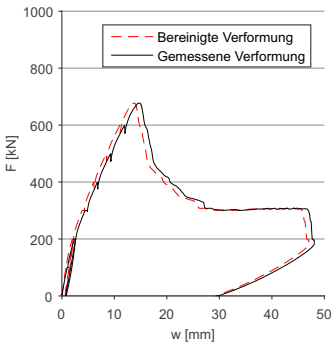

Dickenänderungen bei 100 kN
Dickenänderungen bei 200 kN
Dickenänderungen bei 300 kN
Dickenänderungen bei 400 kN
Dickenänderungen bei 500 kN
Dickenänderungen bei 600 kN
Dickenänderungen bei max. Kraft
Dickenänderungen Ende
Dickenänderung [mm]
[mm]

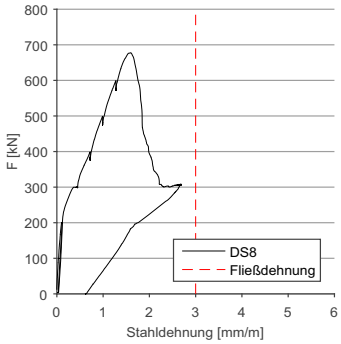
P2 / 5d

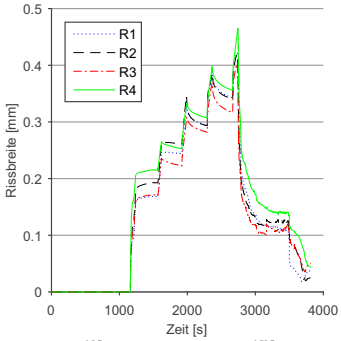
P3 / 4d-1

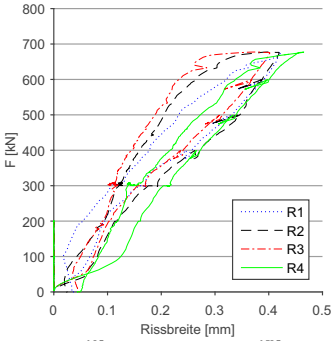

F [kN]
Zeit [s]

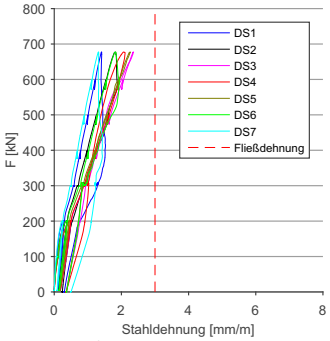

F [kN]
w [mm]

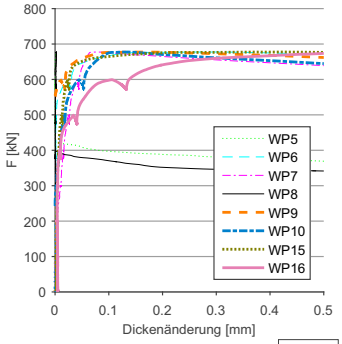

Bereinigte Verformung
Gemessene Verformung
F [kN]
w [mm]

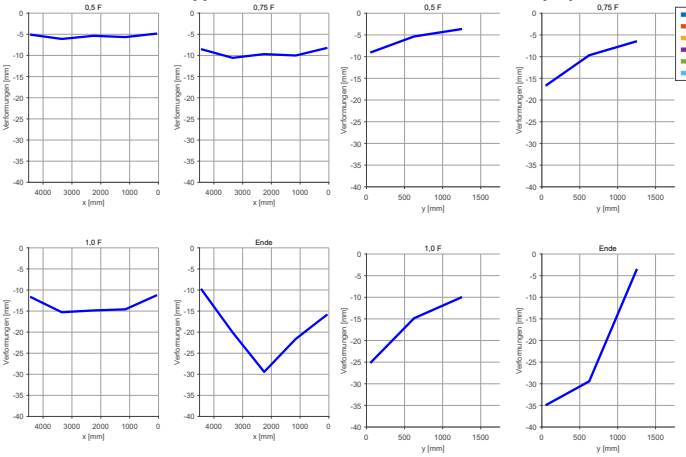

DS8
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

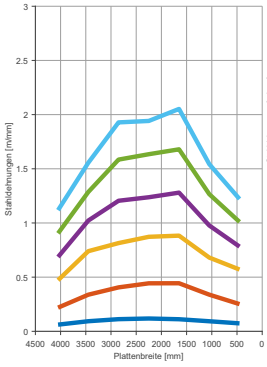

R1
R2
R3
R4
Rissbreite [mm]
Zeit [s]

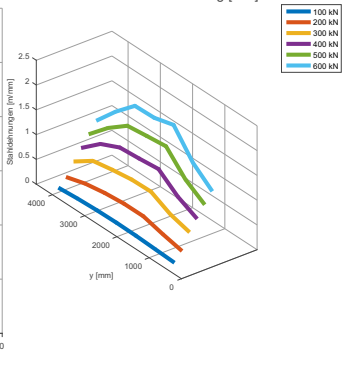

R1
R2
R3
R4
F [kN]
Rissbreite [mm]

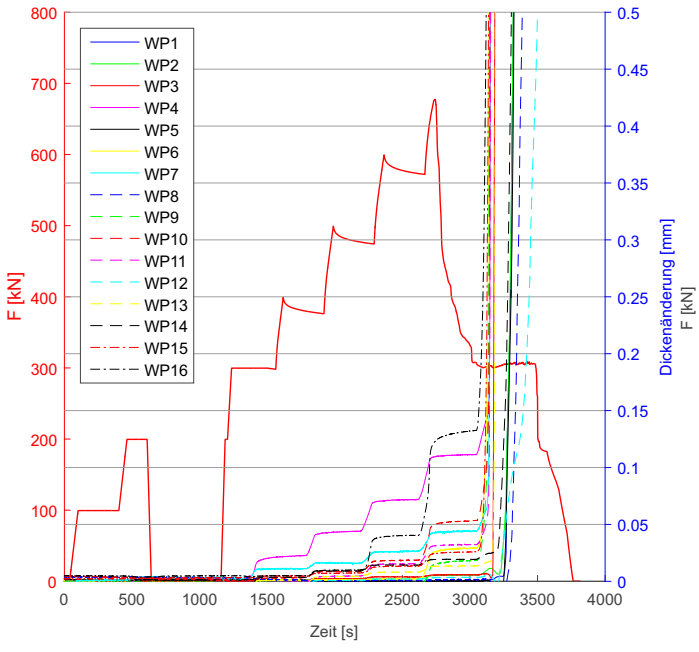

DS1
DS2
DS3
DS4
DS5
DS6
DS7
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

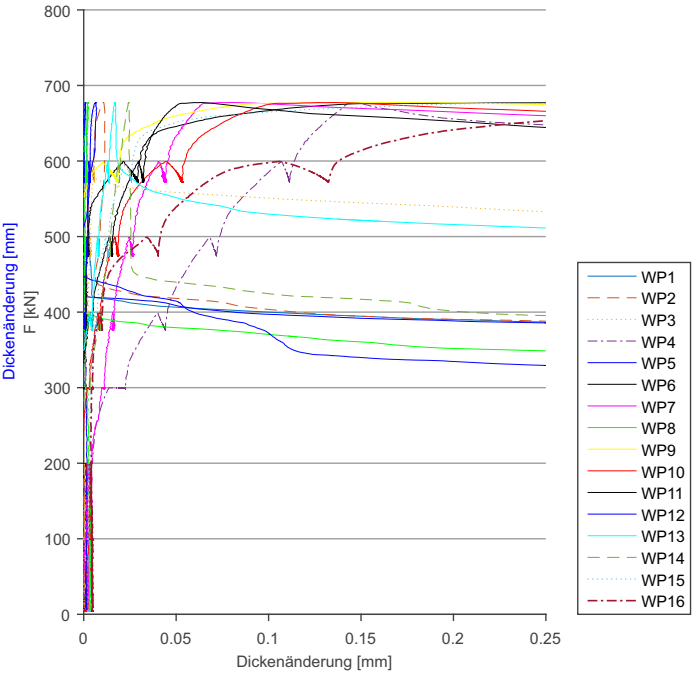

WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]

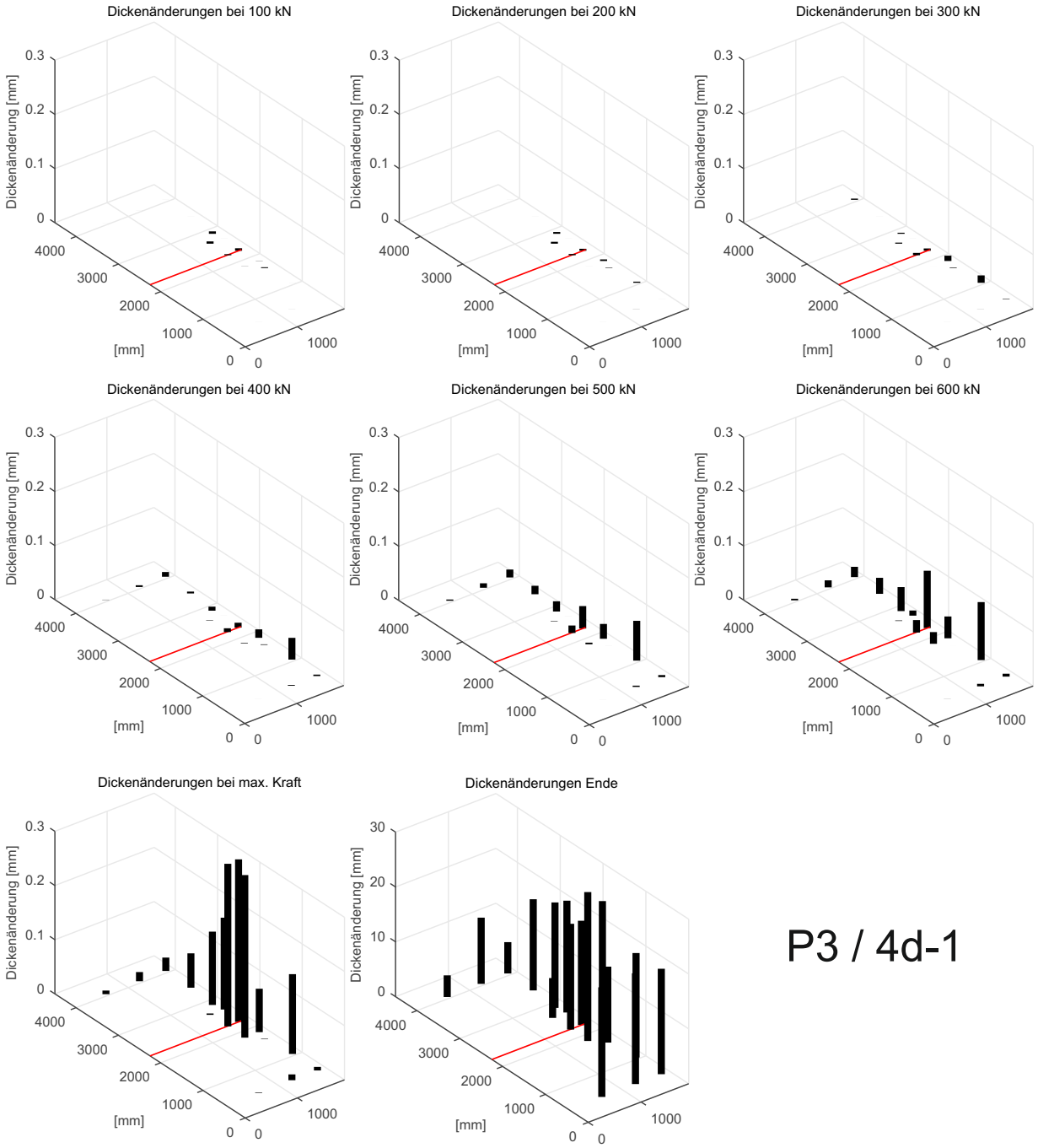

0,5 F
0,75 F
1,0 F
Ende
100 kN
200 kN
300 kN
400 kN
500 kN
600 kN


Stahldehnungen [mm/m]
Plattenbreite [mm]


Stahldehnungen [m/m]
y [mm]

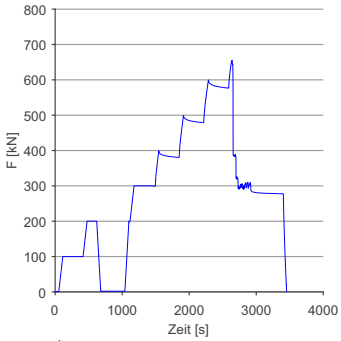

WP1
WP2
WP3
WP4
WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP11
WP12
WP13
WP14
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]
Zeit [s]

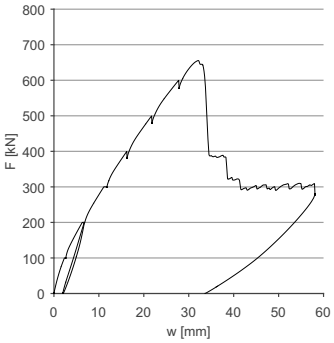

WP1
WP2
WP3
WP4
WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP11
WP12
WP13
WP14
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]

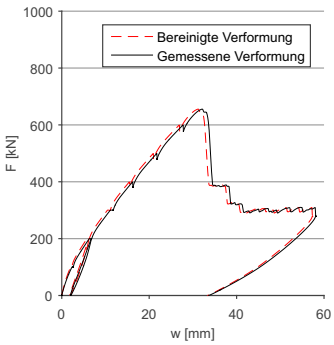

Dickenänderungen bei 100 kN
Dickenänderungen bei 200 kN
Dickenänderungen bei 300 kN
Dickenänderungen bei 400 kN
Dickenänderungen bei 500 kN
Dickenänderungen bei 600 kN
Dickenänderungen bei max. Kraft
Dickenänderungen Ende
Dickenänderung [mm]
[mm]

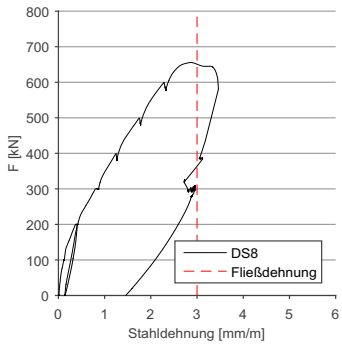
P3 / 4d-1

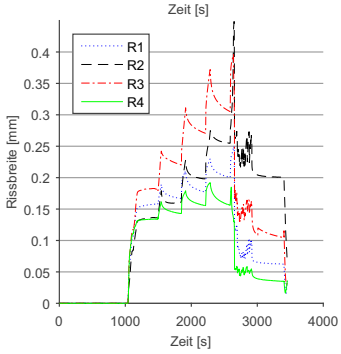
P4 / 6d

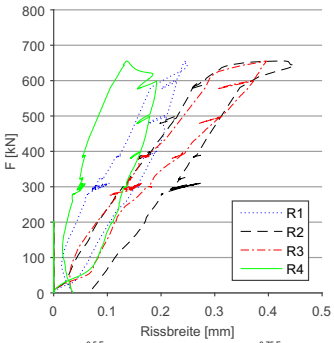

F [kN]
Zeit [s]

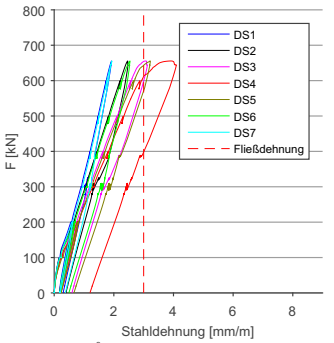

F [kN]
w [mm]

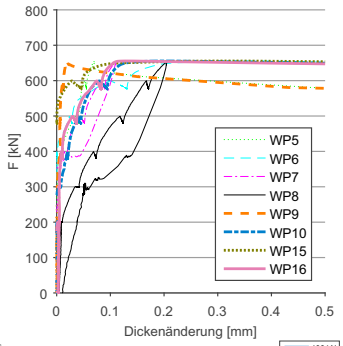

Bereinigte Verformung
Gemessene Verformung
F [kN]
w [mm]

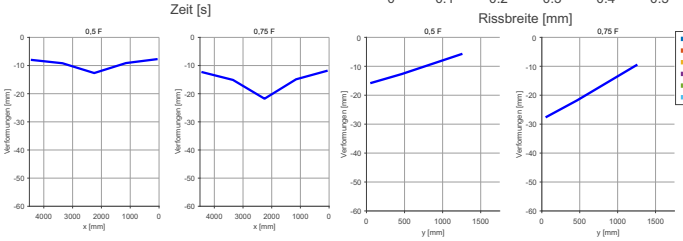

DS8
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

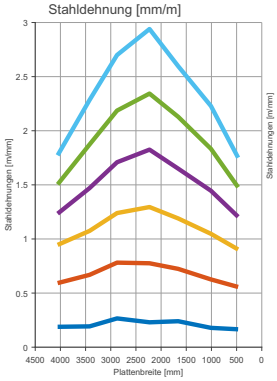

R1
R2
R3
R4
Rissbreite [mm]
Zeit [s]

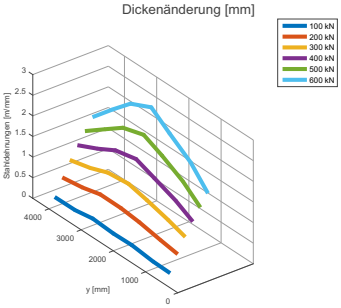

R1
R2
R3
R4
F [kN]
Rissbreite [mm]

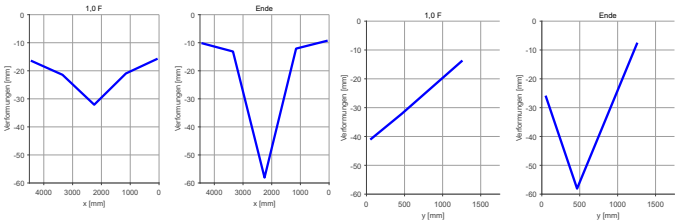

DS1
DS2
DS3
DS4
DS5
DS6
DS7
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

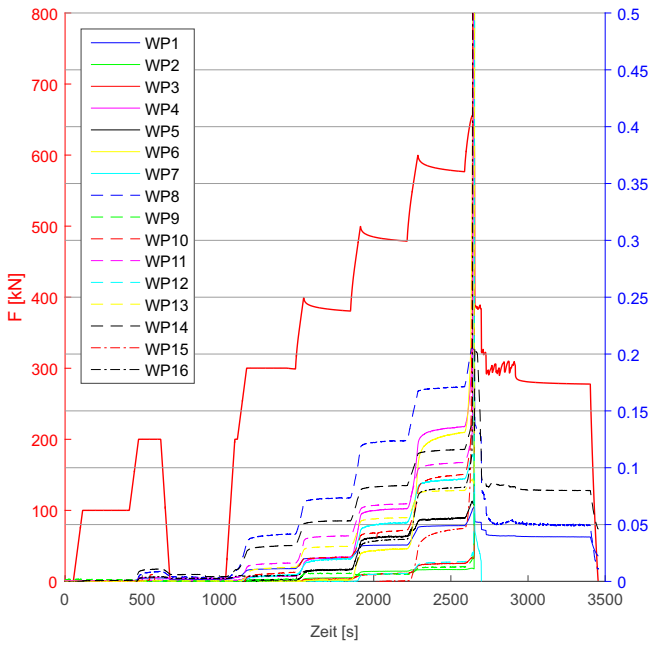

WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]

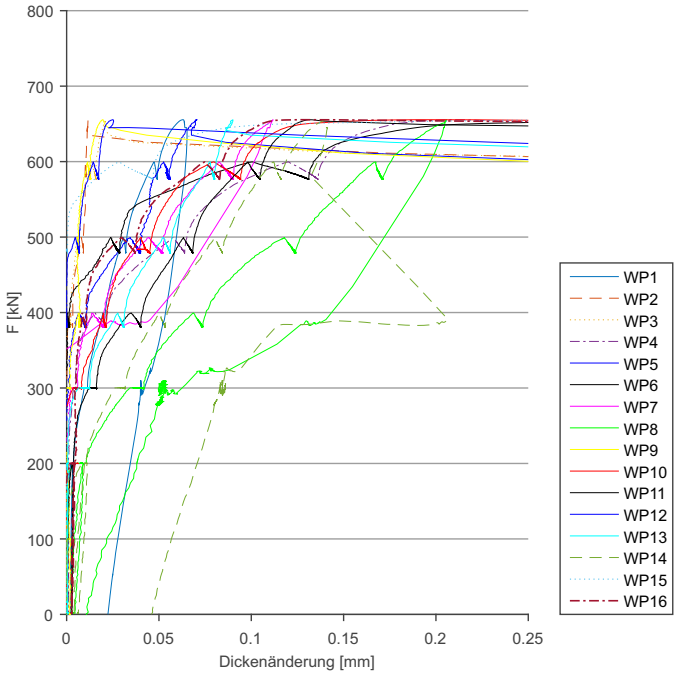

0,5 F
0,75 F
100 kN
200 kN
300 kN
400 kN
500 kN
600 kN

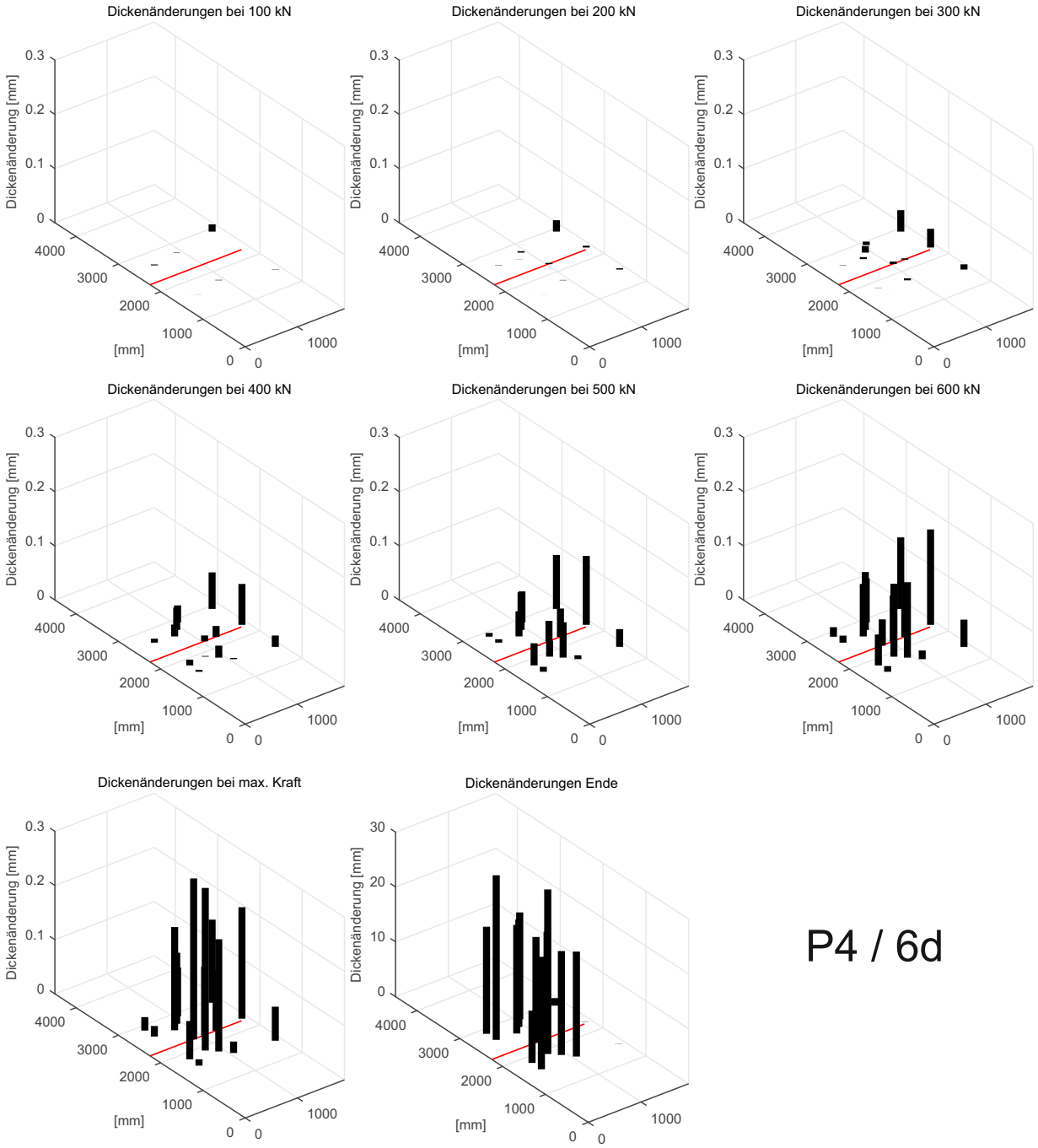

Stahldehnungen [mm/m]
Plattenbreite [mm]


Stahldehnungen [m/mm]
y [mm]


1,0 F
Ende

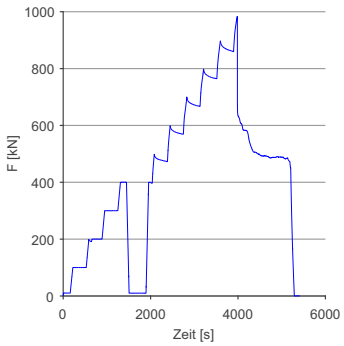

WP1
WP2
WP3
WP4
WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP11
WP12
WP13
WP14
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]
Zeit [s]

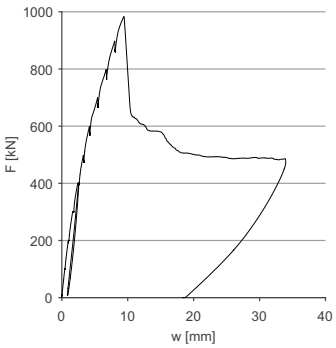

WP1
WP2
WP3
WP4
WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP11
WP12
WP13
WP14
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]

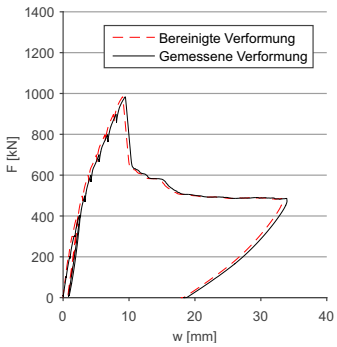

Dickenänderungen bei 100 kN
Dickenänderungen bei 200 kN
Dickenänderungen bei 300 kN
Dickenänderungen bei 400 kN
Dickenänderungen bei 500 kN
Dickenänderungen bei 600 kN
Dickenänderungen bei max. Kraft
Dickenänderungen Ende
Dickenänderung [mm]
[mm]

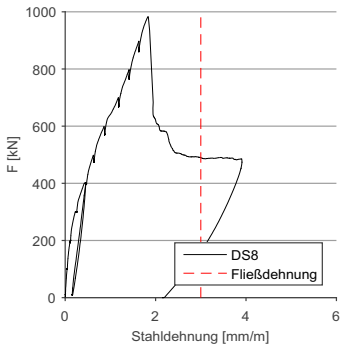
P4 / 6d

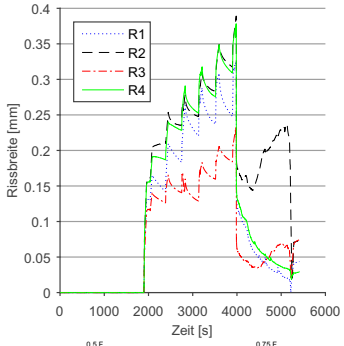
P5 / 2d-1

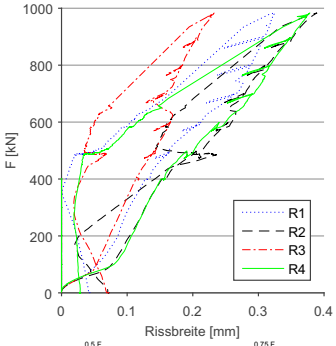

F [kN]
Zeit [s]

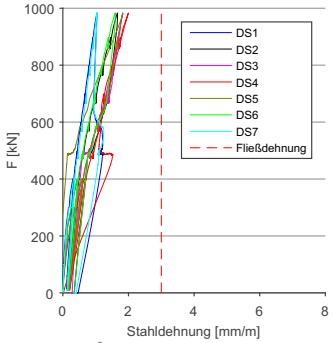

F [kN]
w [mm]

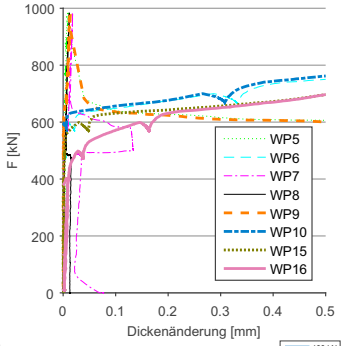

Bereinigte Verformung
Gemessene Verformung
F [kN]
w [mm]

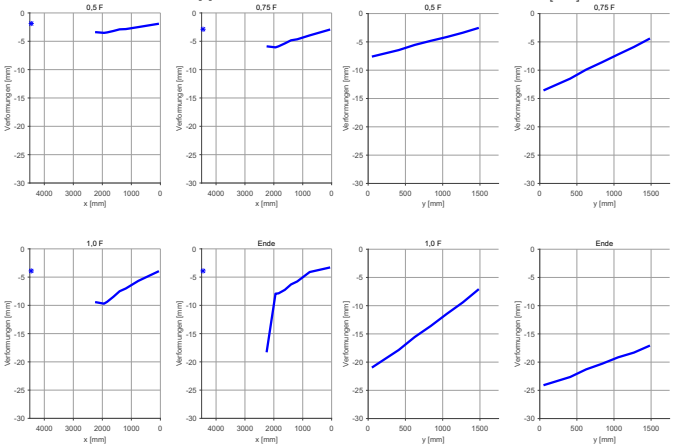

DS8
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]


R1
R2
R3
R4
Rissbreite [mm]
Zeit [s]

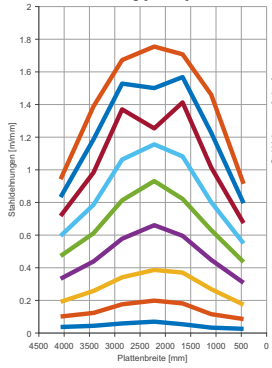

R1
R2
R3
R4
F [kN]
Rissbreite [mm]

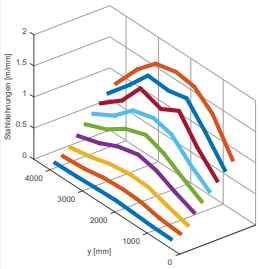

DS1
DS2
DS3
DS4
DS5
DS6
DS7
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]


WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]

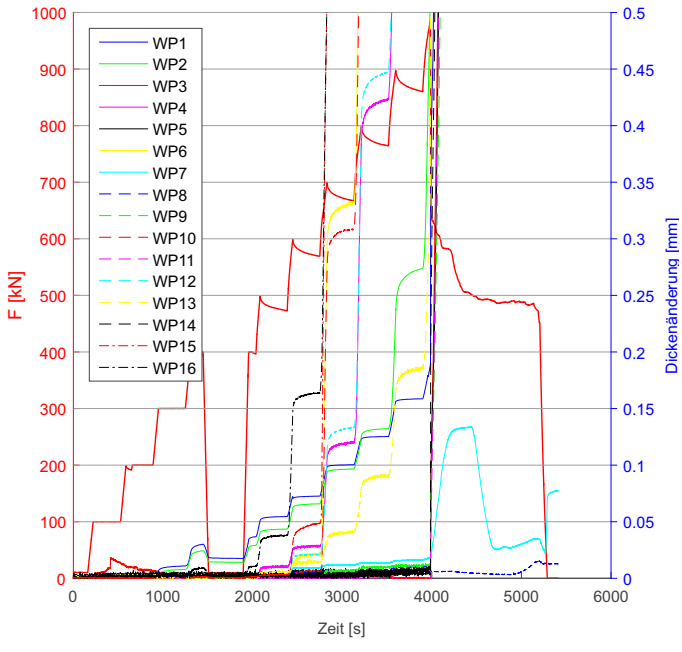

0,5 F
0,75 F
1,0 F
Ende
Verformungen [mm]
x [mm]
y [mm]

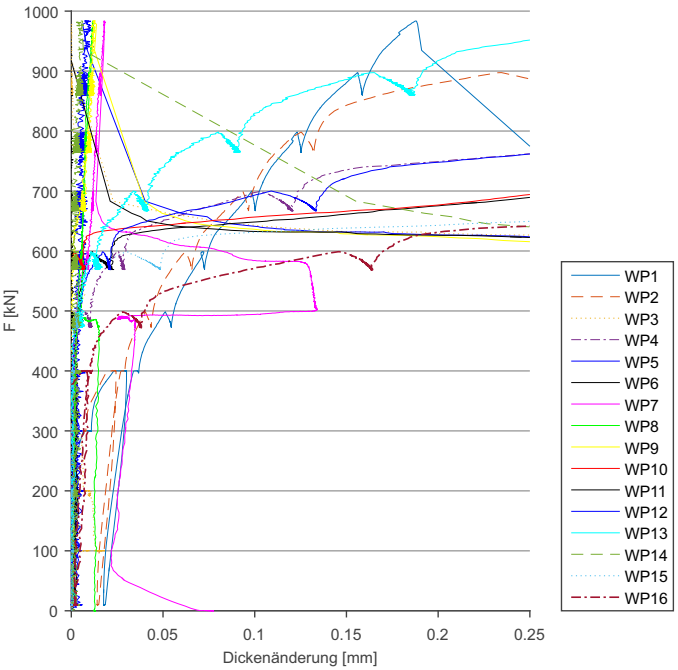

100 kN
200 kN
300 kN
400 kN
500 kN
600 kN
700 kN
800 kN
900 kN

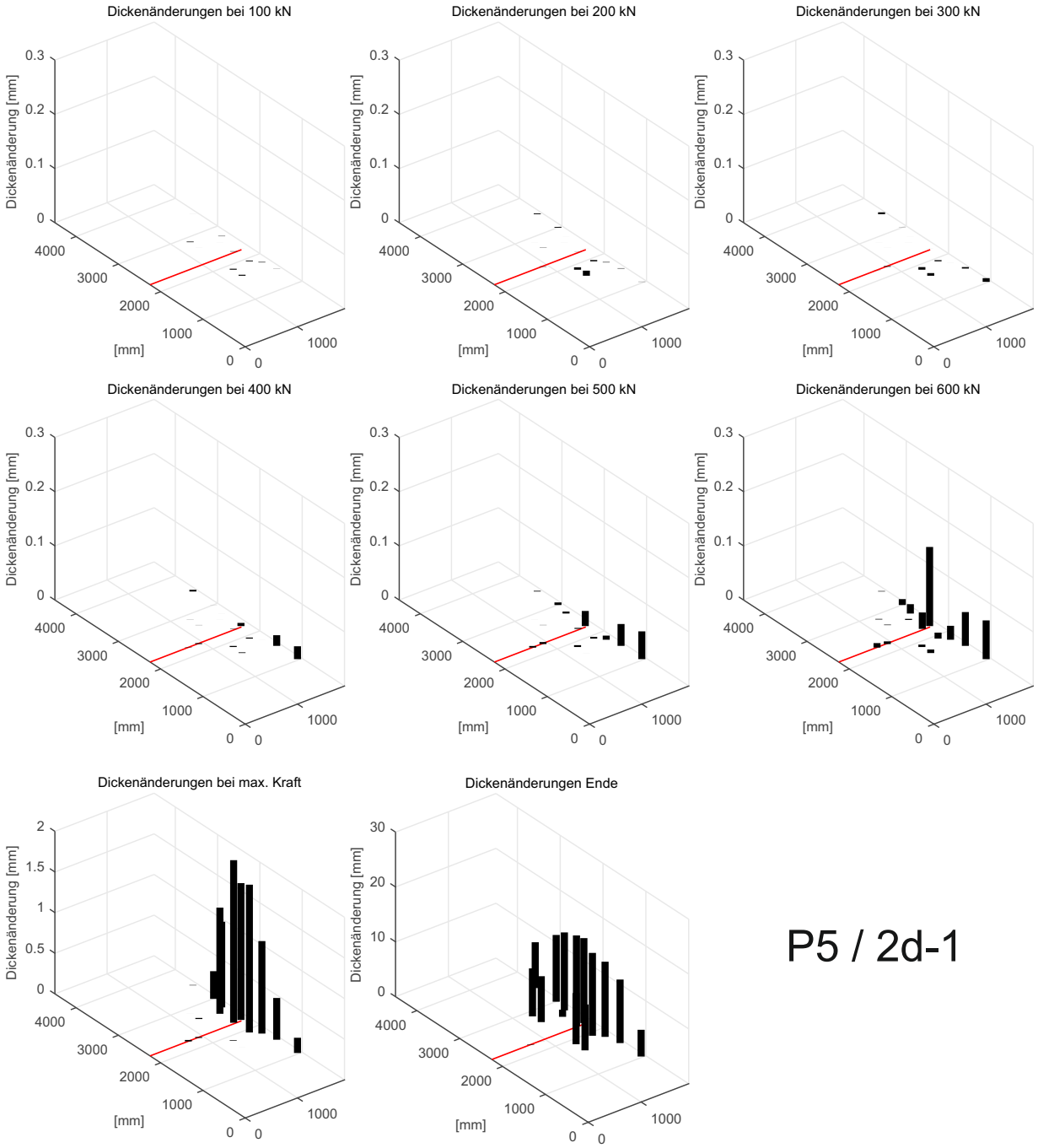

Stahldehnungen [mm/m]
Plattenbreite [mm]


Stahldehnungen [mm/m]
y [mm]


100 kN
200 kN
300 kN
400 kN
500 kN
600 kN
700 kN
800 kN
900 kN

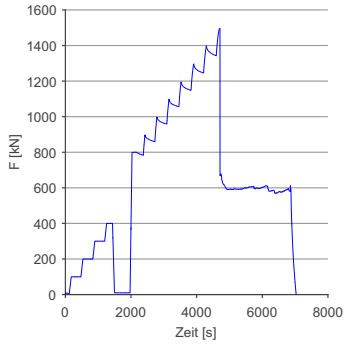

WP1
WP2
WP3
WP4
WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP11
WP12
WP13
WP14
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]
Zeit [s]

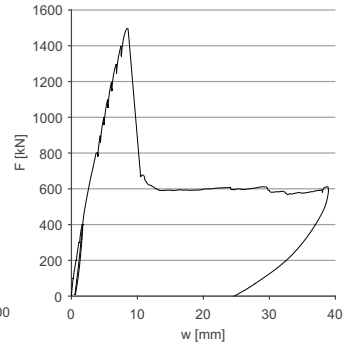

WP1
WP2
WP3
WP4
WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP11
WP12
WP13
WP14
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]

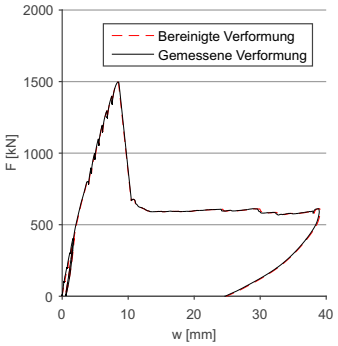

Dickenänderungen bei 100 kN
Dickenänderungen bei 200 kN
Dickenänderungen bei 300 kN
Dickenänderungen bei 400 kN
Dickenänderungen bei 500 kN
Dickenänderungen bei 600 kN
Dickenänderungen bei max. Kraft
Dickenänderungen Ende
Dickenänderung [mm]
[mm]

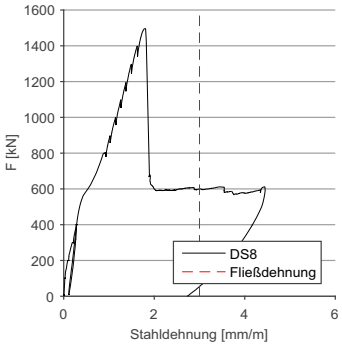
P5 / 2d-1

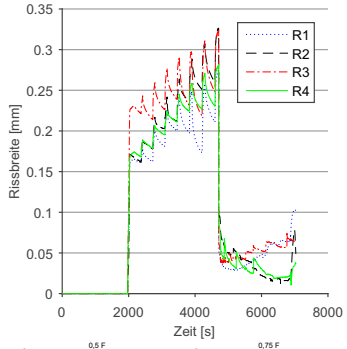
P6 / 1d

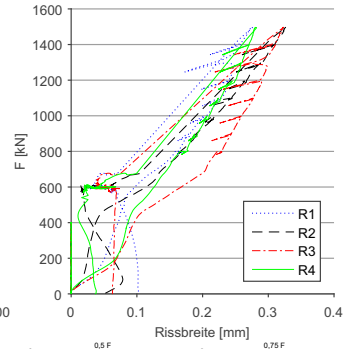

F [kN]
Zeit [s]

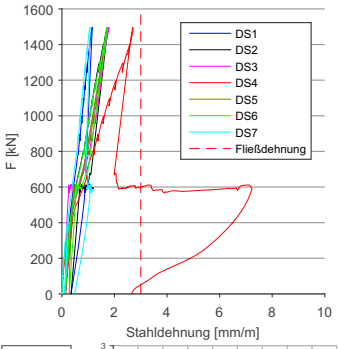

F [kN]
w [mm]

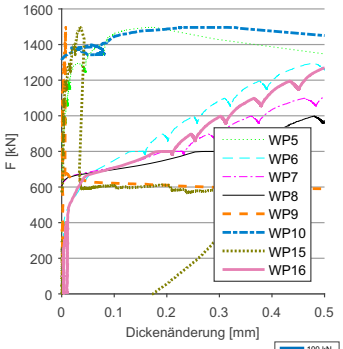

Bereinigte Verformung
Gemessene Verformung
F [kN]
w [mm]

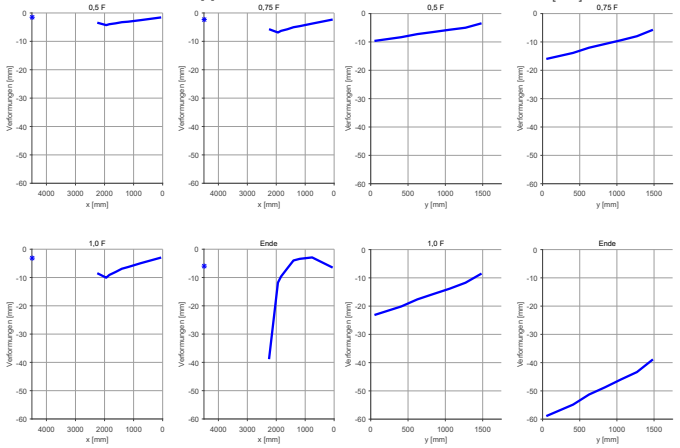

DS8
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

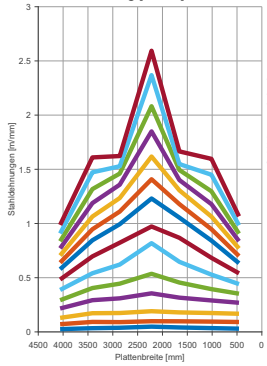

R1
R2
R3
R4
Rissbreite [mm]
Zeit [s]

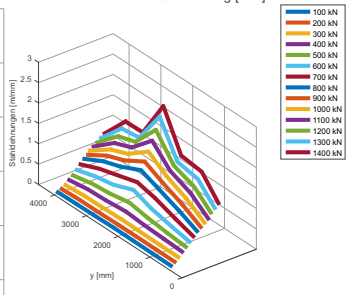

R1
R2
R3
R4
F [kN]
Rissbreite [mm]

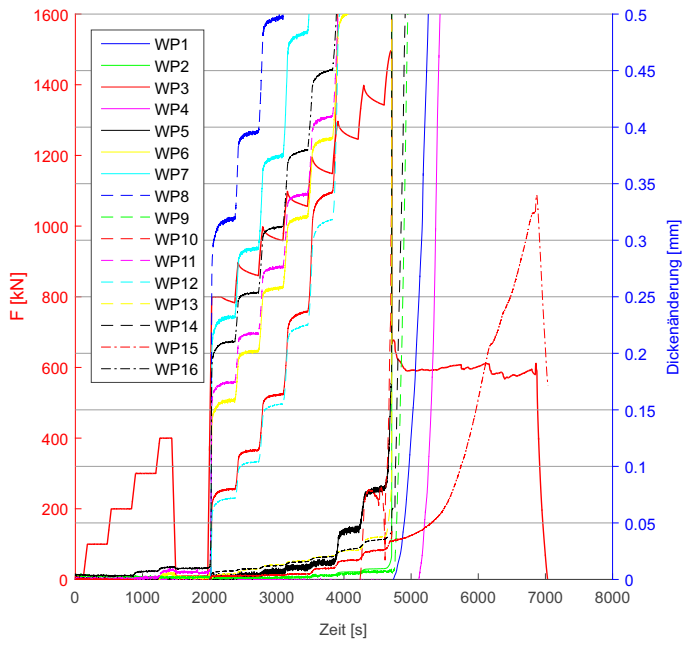

DS1
DS2
DS3
DS4
DS5
DS6
DS7
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

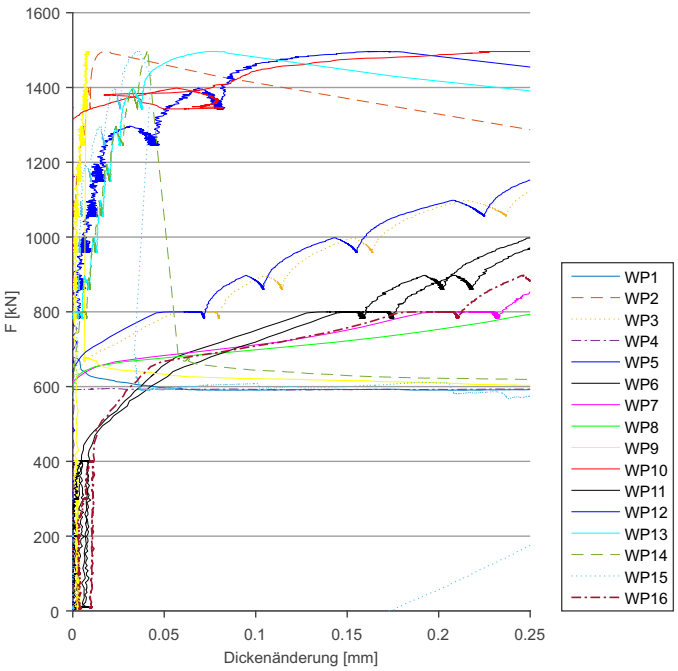

WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]

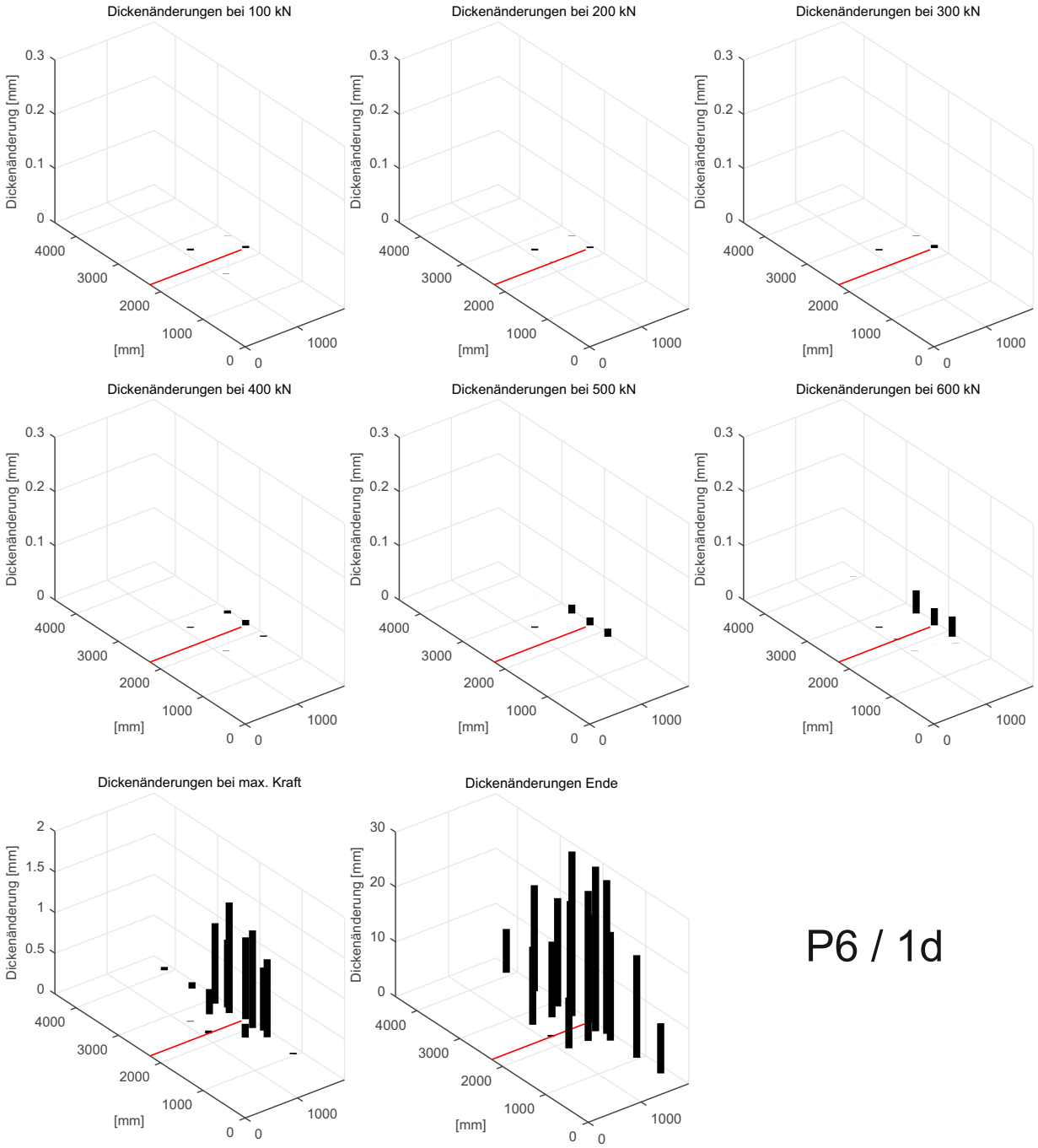



Stahldehnungen [mm/m]
Plattenbreite [mm]


Stahldehnungen [mm/m]
y [mm]

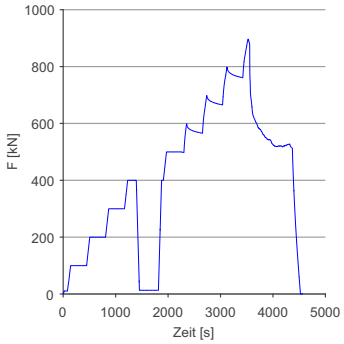

WP1
WP2
WP3
WP4
WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP11
WP12
WP13
WP14
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]
Zeit [s]

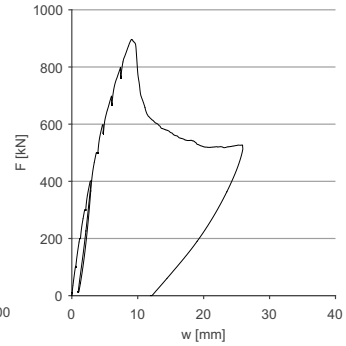

F [kN]
Dickenänderung [mm]

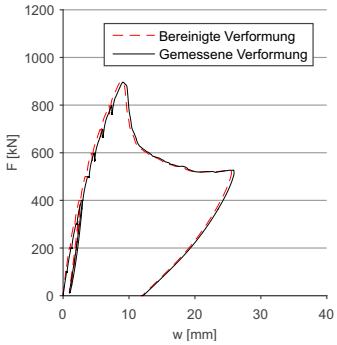

Dickenänderungen bei 100 kN
Dickenänderungen bei 200 kN
Dickenänderungen bei 300 kN
Dickenänderungen bei 400 kN
Dickenänderungen bei 500 kN
Dickenänderungen bei 600 kN
Dickenänderungen bei max. Kraft
Dickenänderungen Ende
Dickenänderung [mm]
[mm]

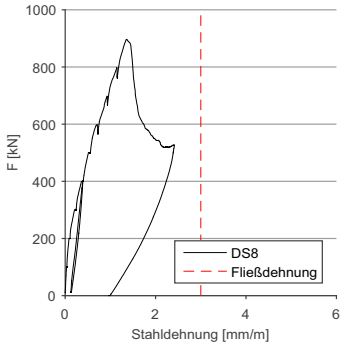
P6 / 1d

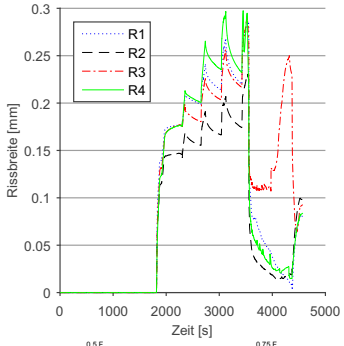
P7 / 2d-2

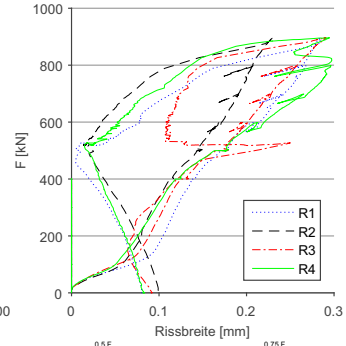

F [kN]
Zeit [s]

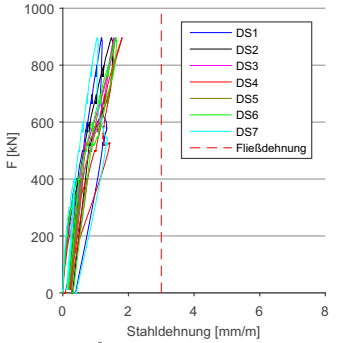

F [kN]
w [mm]

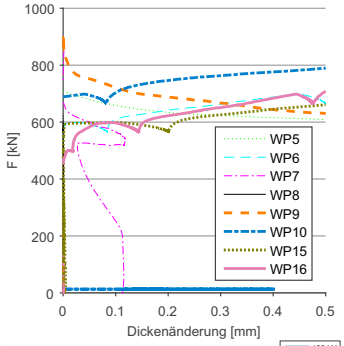

Bereinigte Verformung
Gemessene Verformung
F [kN]
w [mm]

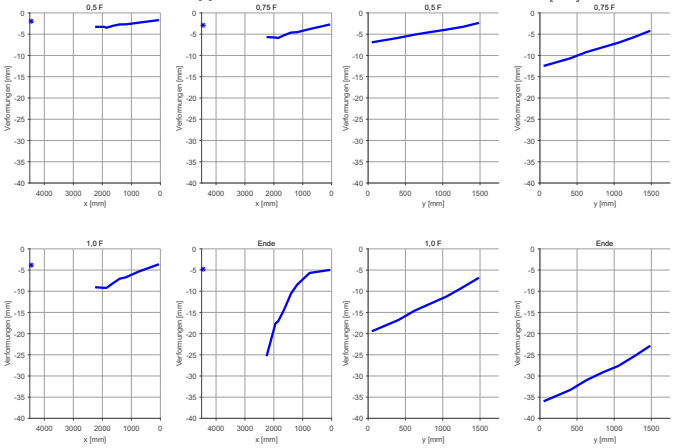

DS8
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

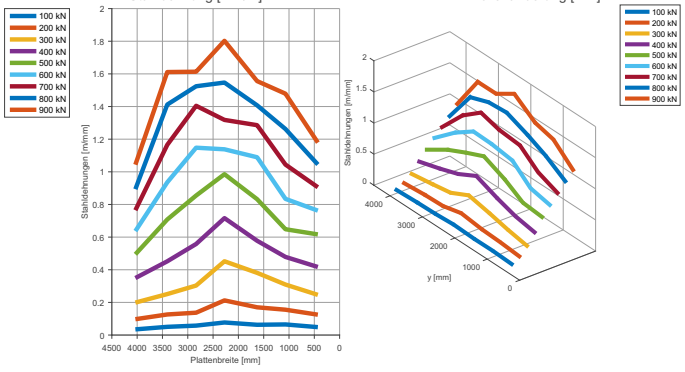

R1
R2
R3
R4
Rissbreite [mm]
Zeit [s]

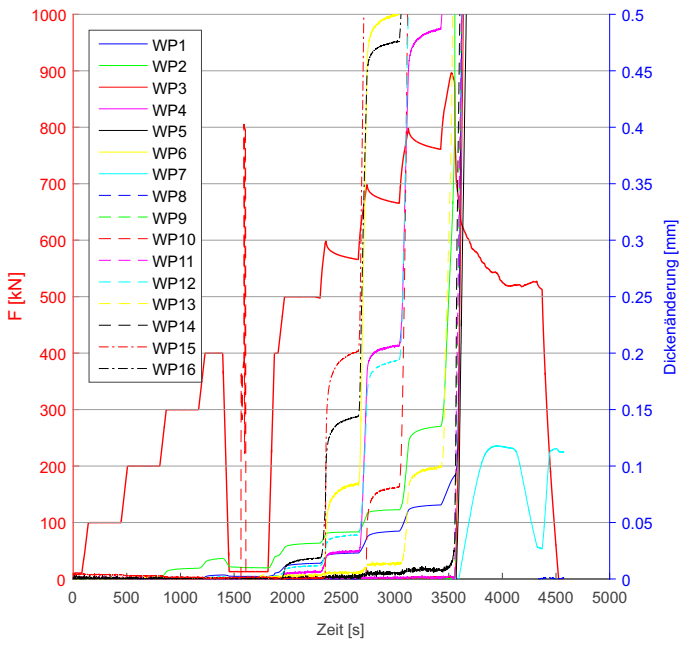

R1
R2
R3
R4
F [kN]
Rissbreite [mm]

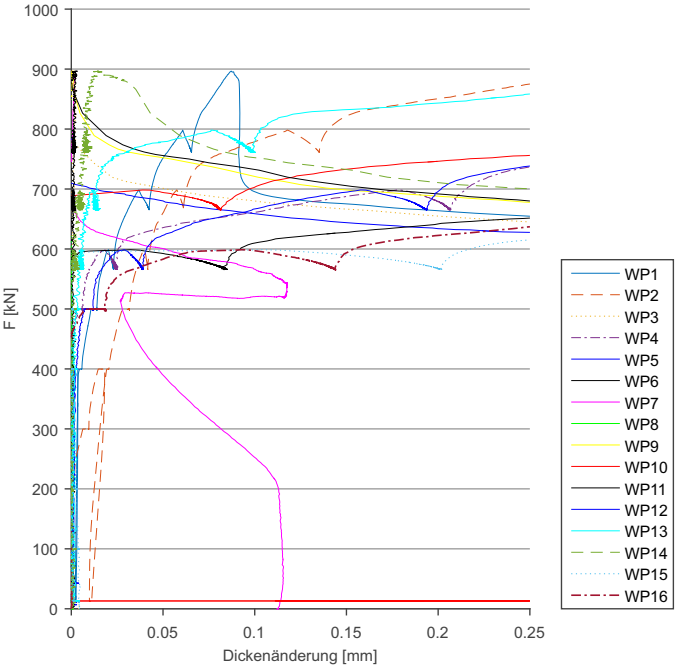

DS1
DS2
DS3
DS4
DS5
DS6
DS7
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

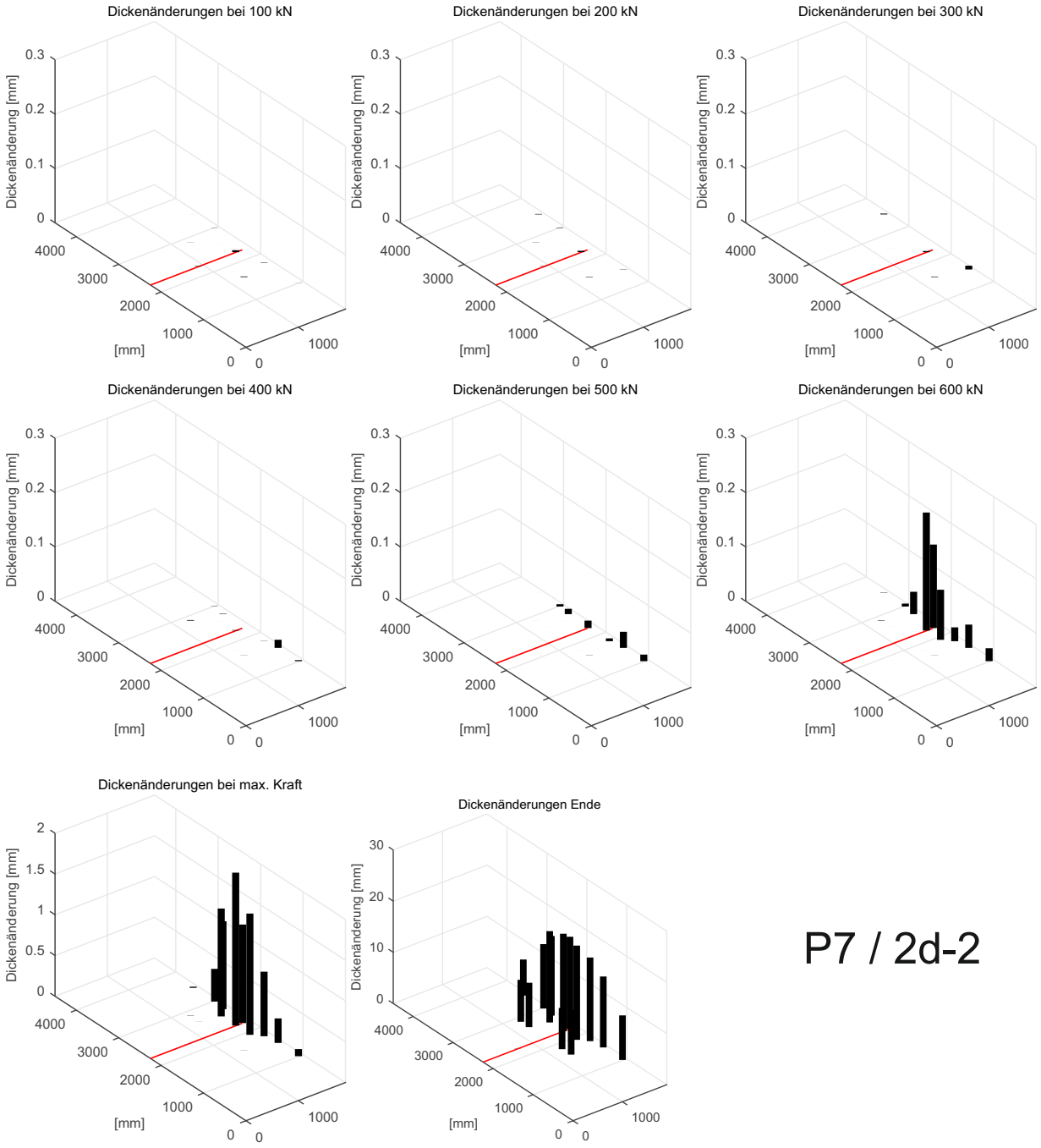

WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]


0,5 F
0,75 F
0,5 F
0,75 F
1,0 F
Ende
1,0 F
Ende
Verformungen [mm]
x [mm]
y [mm]


100 kN
200 kN
300 kN
400 kN
500 kN
600 kN
700 kN
800 kN
900 kN
Stahldehnungen [mm/m]
Plattenbreite [mm]
Stahldehnungen [mm/m]
y [mm]

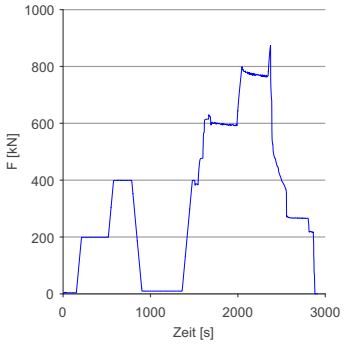

WP1
WP2
WP3
WP4
WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP11
WP12
WP13
WP14
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]
Zeit [s]

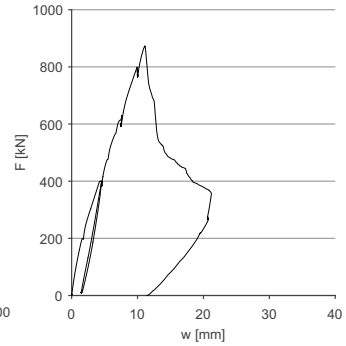

F [kN]
Dickenänderung [mm]

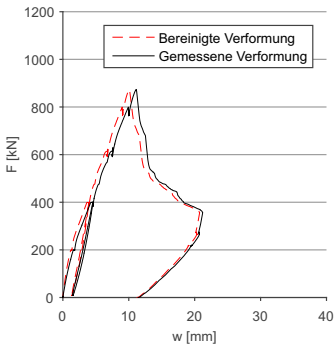

Dickenänderungen bei 100 kN
Dickenänderungen bei 200 kN
Dickenänderungen bei 300 kN
Dickenänderungen bei 400 kN
Dickenänderungen bei 500 kN
Dickenänderungen bei 600 kN
Dickenänderungen bei max. Kraft
Dickenänderungen Ende
Dickenänderung [mm]
[mm]

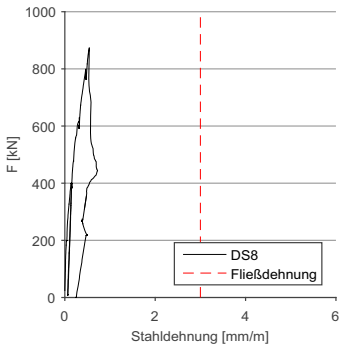
P7 / 2d-2

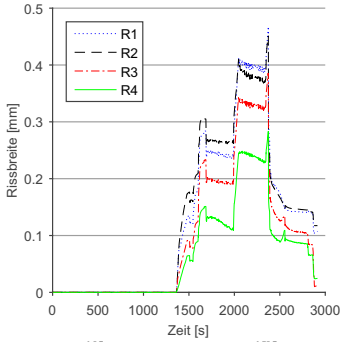
P8 / 2x3d

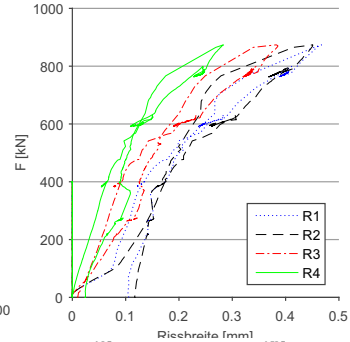

F [kN]
Zeit [s]

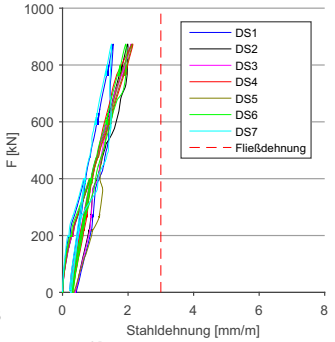

F [kN]
w [mm]

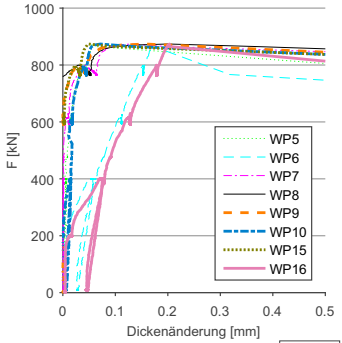

Bereinigte Verformung
Gemessene Verformung
F [kN]
w [mm]

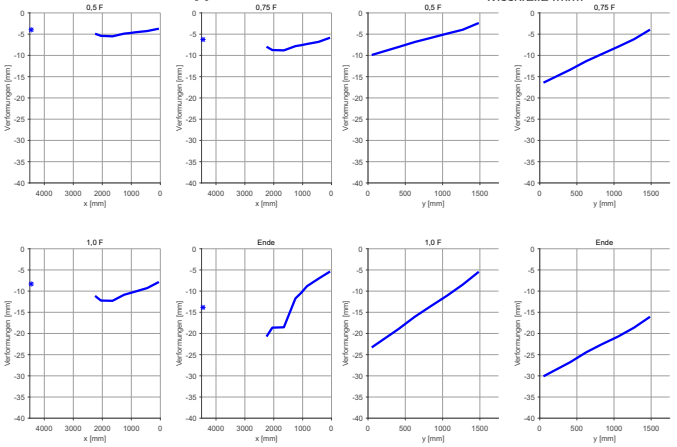

DS8
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

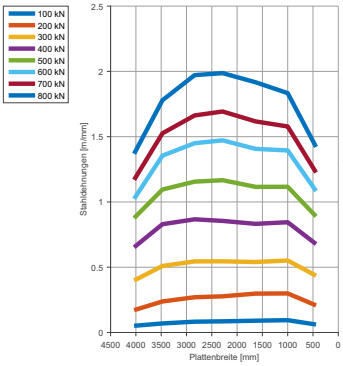

R1
R2
R3
R4
Rissbreite [mm]
Zeit [s]

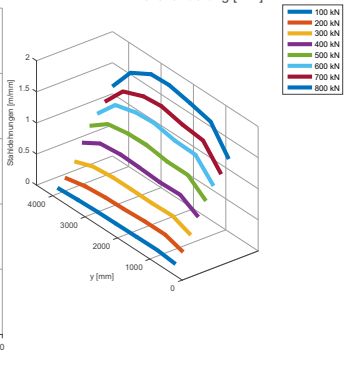

R1
R2
R3
R4
F [kN]

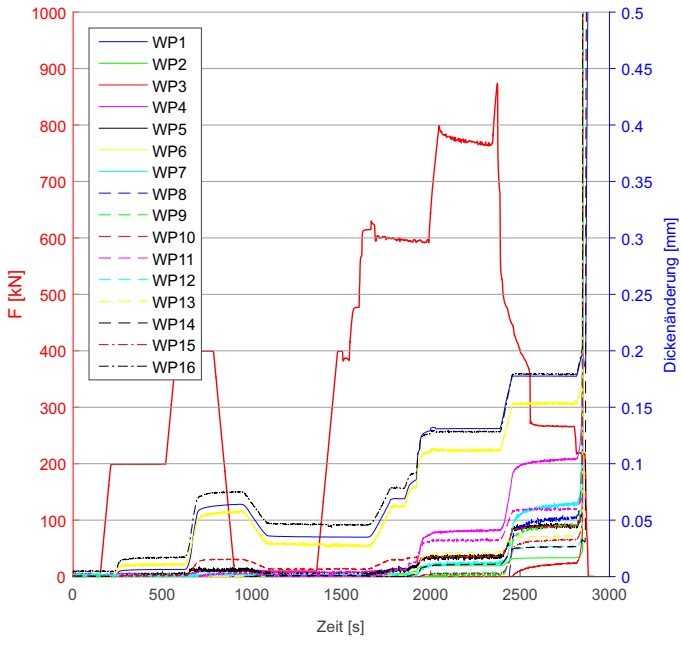

DS1
DS2
DS3
DS4
DS5
DS6
DS7
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

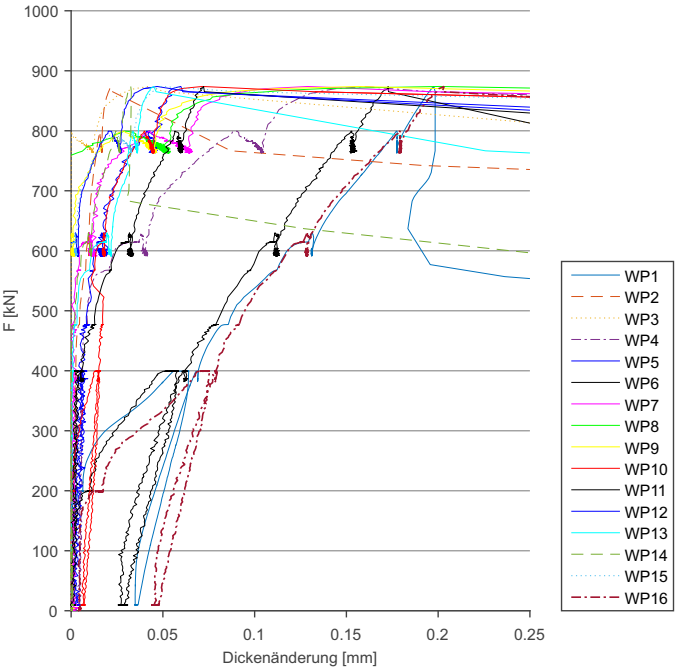

WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]

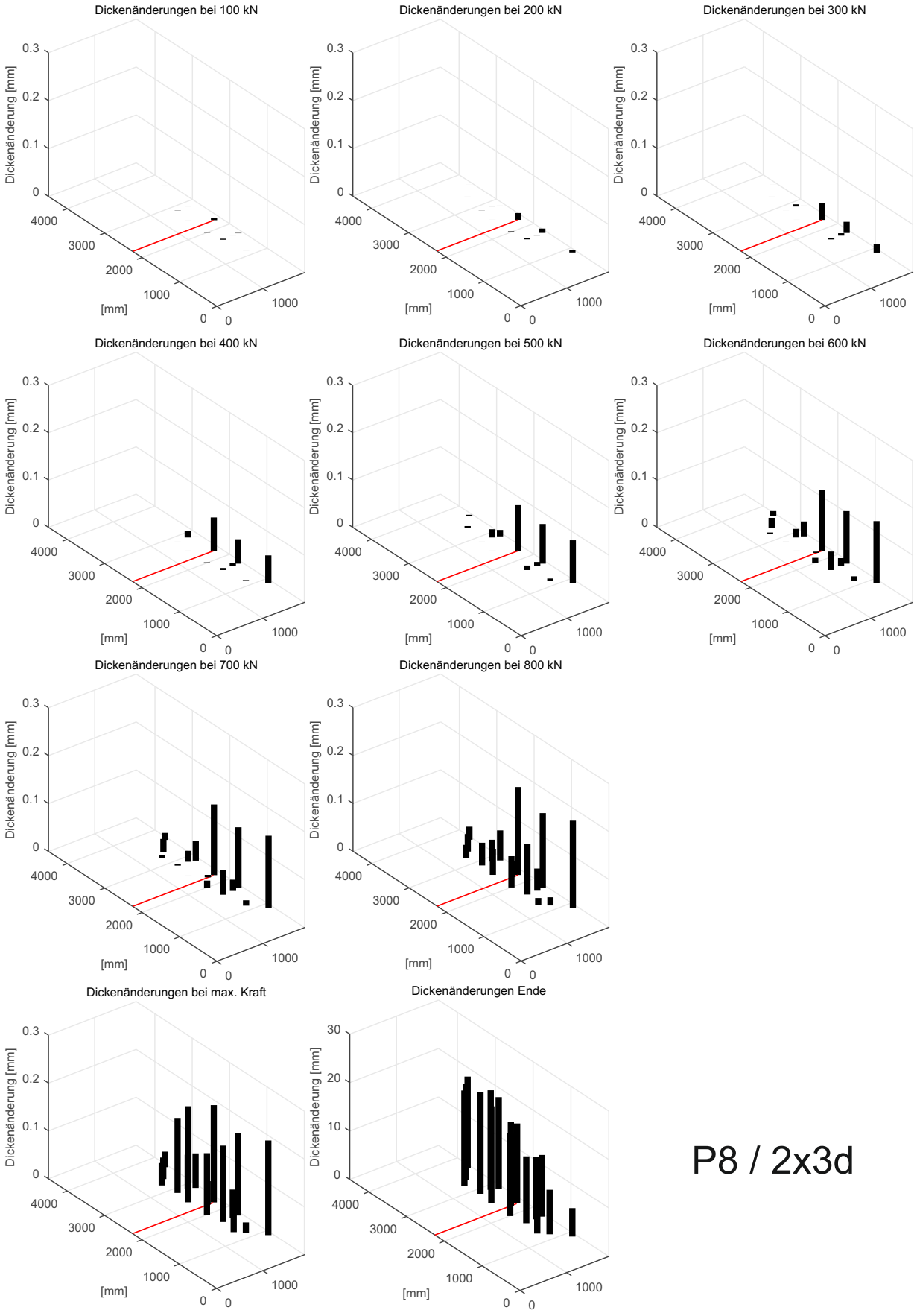

0,5 F
0,75 F
1,0 F
Ende
Verformungen [mm]


100 kN
200 kN
300 kN
400 kN
500 kN
600 kN
700 kN
800 kN
Stahldehnungen [m/mm]
Plattenbreite [mm]


100 kN
200 kN
300 kN
400 kN
500 kN
600 kN
700 kN
800 kN
Stahldehnungen [m/mm]
y [mm]

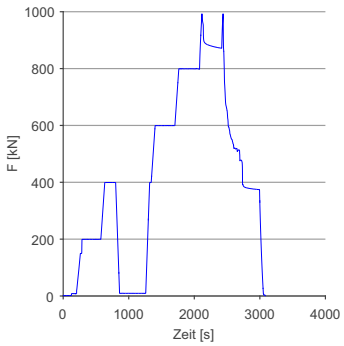

WP1
WP2
WP3
WP4
WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP11
WP12
WP13
WP14
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]
Zeit [s]

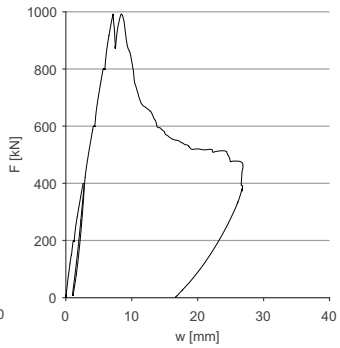

WP1
WP2
WP3
WP4
WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP11
WP12
WP13
WP14
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]

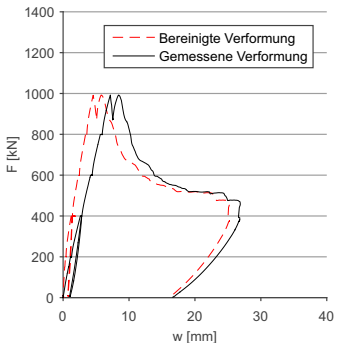

Dickenänderungen bei 100 kN
Dickenänderungen bei 200 kN
Dickenänderungen bei 300 kN
Dickenänderungen bei 400 kN
Dickenänderungen bei 500 kN
Dickenänderungen bei 600 kN
Dickenänderungen bei 700 kN
Dickenänderungen bei 800 kN
Dickenänderungen bei max. Kraft
Dickenänderungen Ende
Dickenänderung [mm]
[mm]

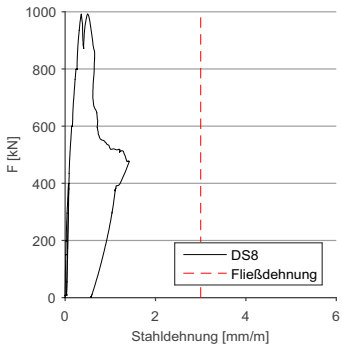
P8 / 2x3d

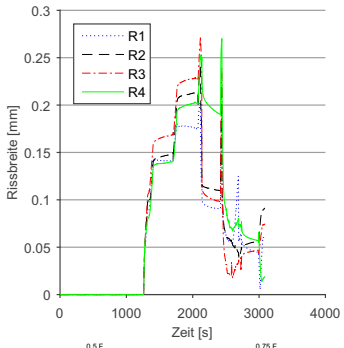
P9 / 2x2d

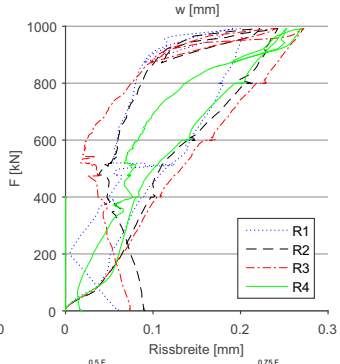

F [kN]
Zeit [s]

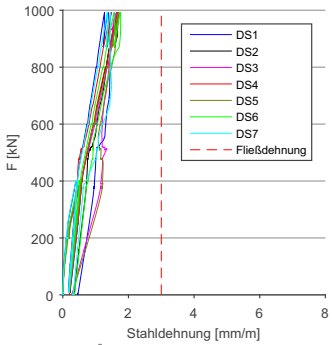

F [kN]
w [mm]

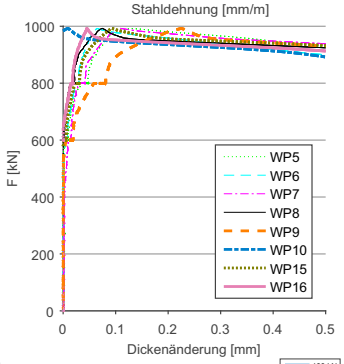

Bereinigte Verformung
Gemessene Verformung
F [kN]
w [mm]

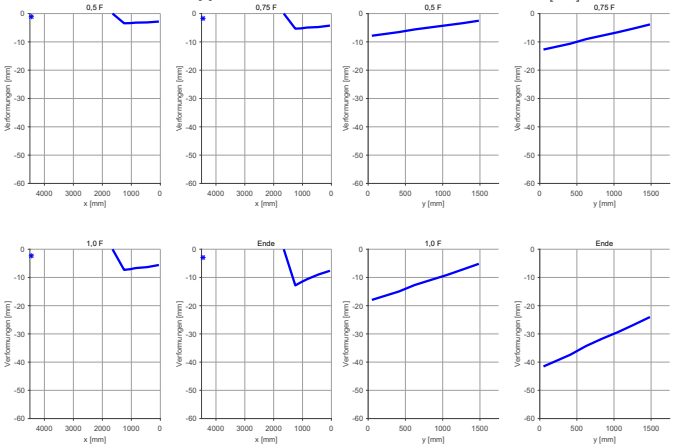

DS8
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

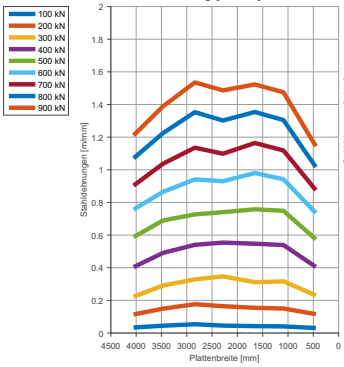

R1
R2
R3
R4
Rissbreite [mm]
Zeit [s]

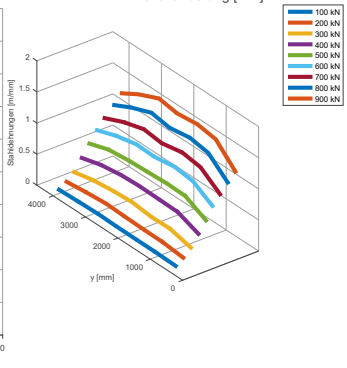

R1
R2
R3
R4
F [kN]
Rissbreite [mm]

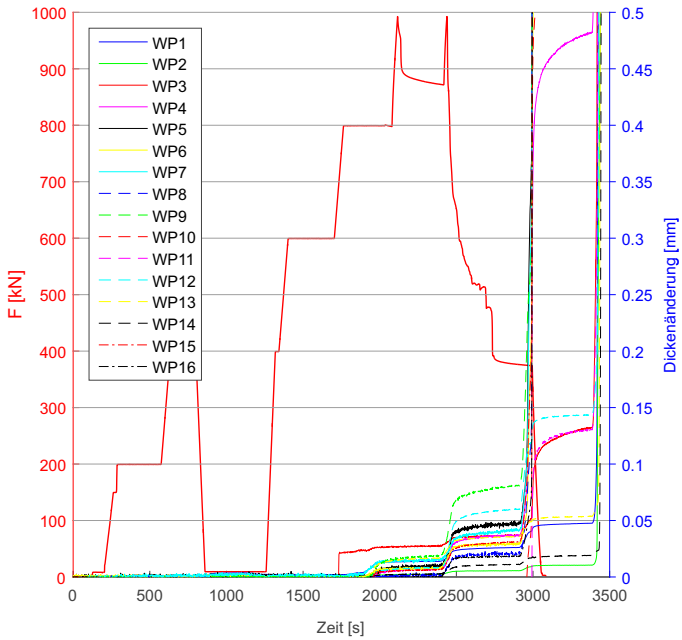

DS1
DS2
DS3
DS4
DS5
DS6
DS7
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

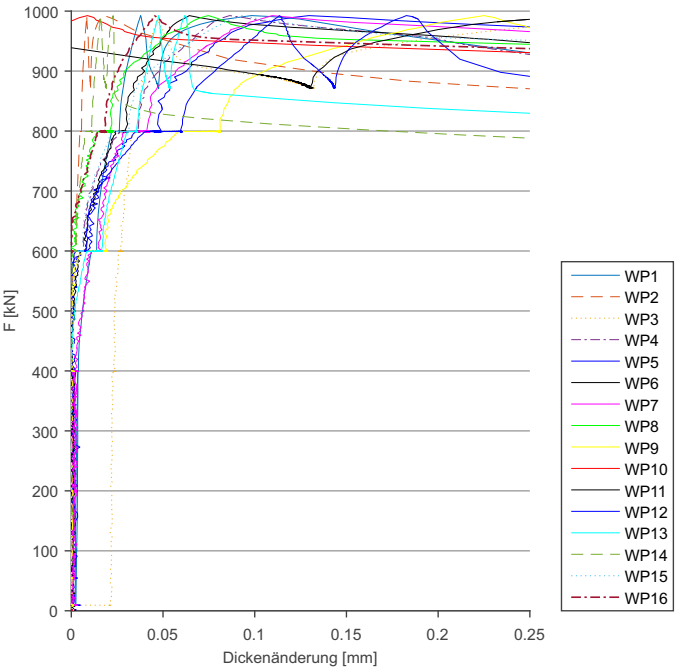

WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]

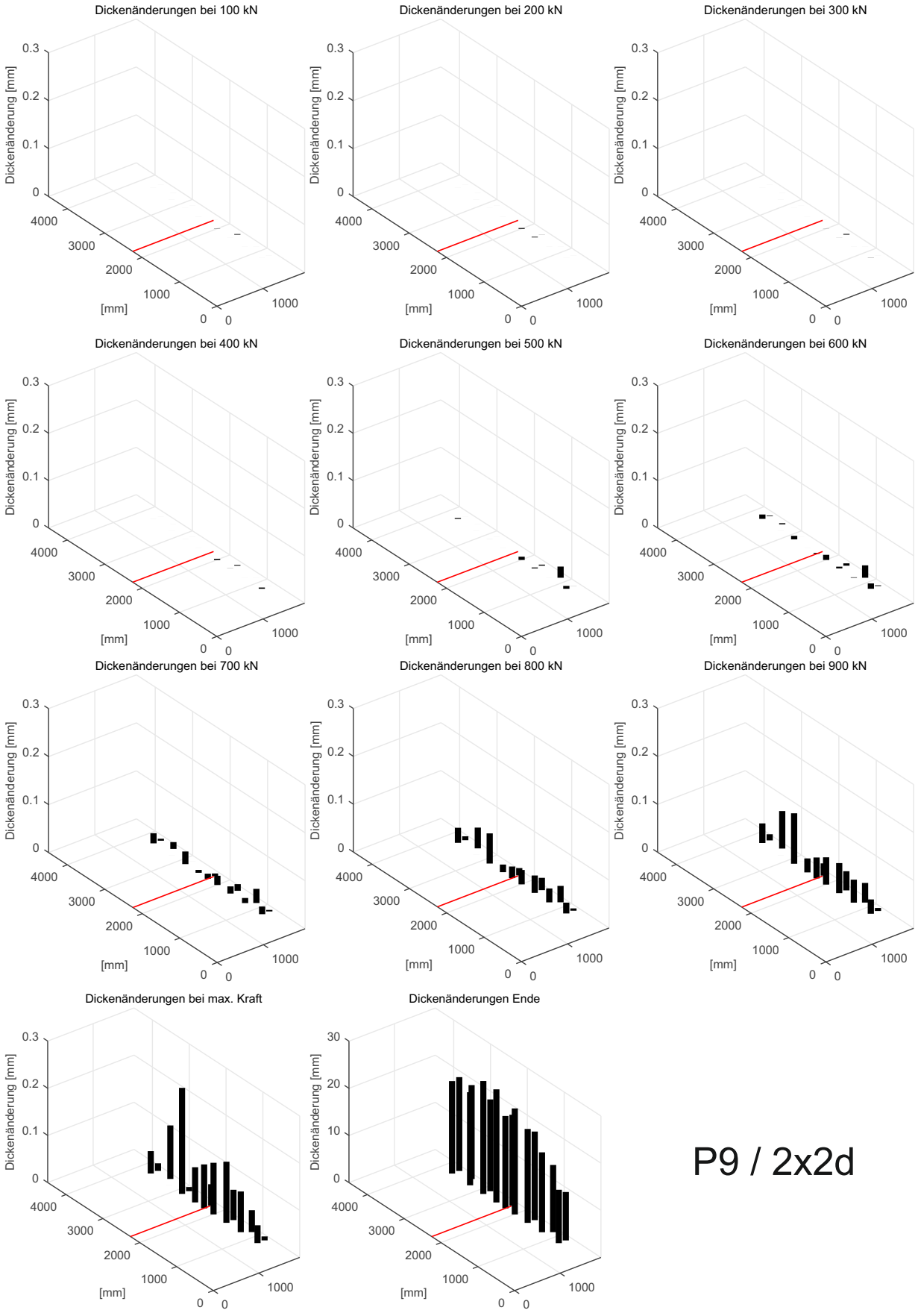

0,5 F
0,75 F
1,0 F
Ende
Verformungen [mm]
x [mm]
y [mm]


100 kN
200 kN
300 kN
400 kN
500 kN
600 kN
700 kN
800 kN
900 kN
Stahldehnungen [mm/m]
Plattenbreite [mm]


100 kN
200 kN
300 kN
400 kN
500 kN
600 kN
700 kN
800 kN
900 kN
Stahldehnungen [mm/m]
y [mm]

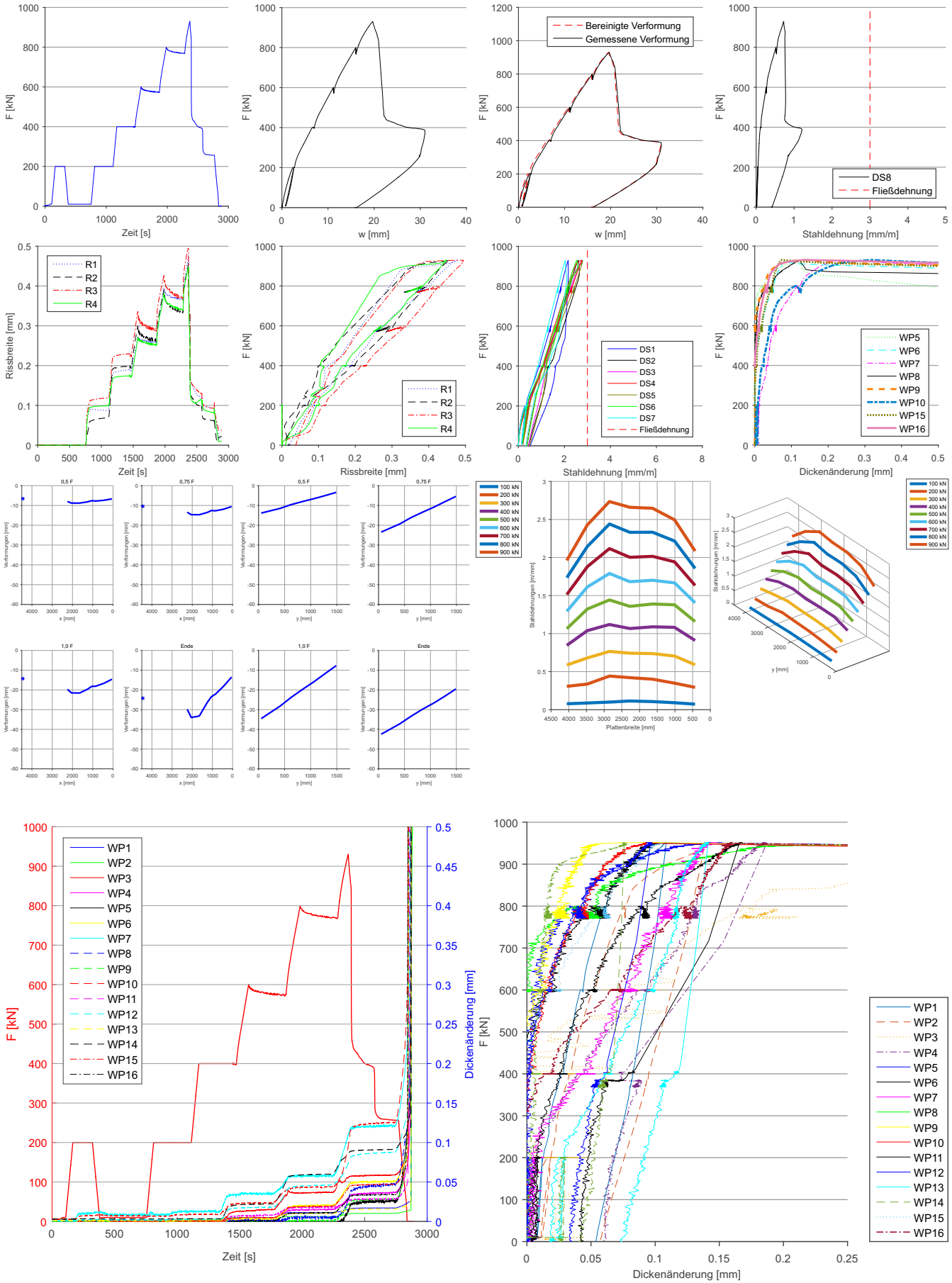

WP1
WP2
WP3
WP4
WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP11
WP12
WP13
WP14
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]
Zeit [s]

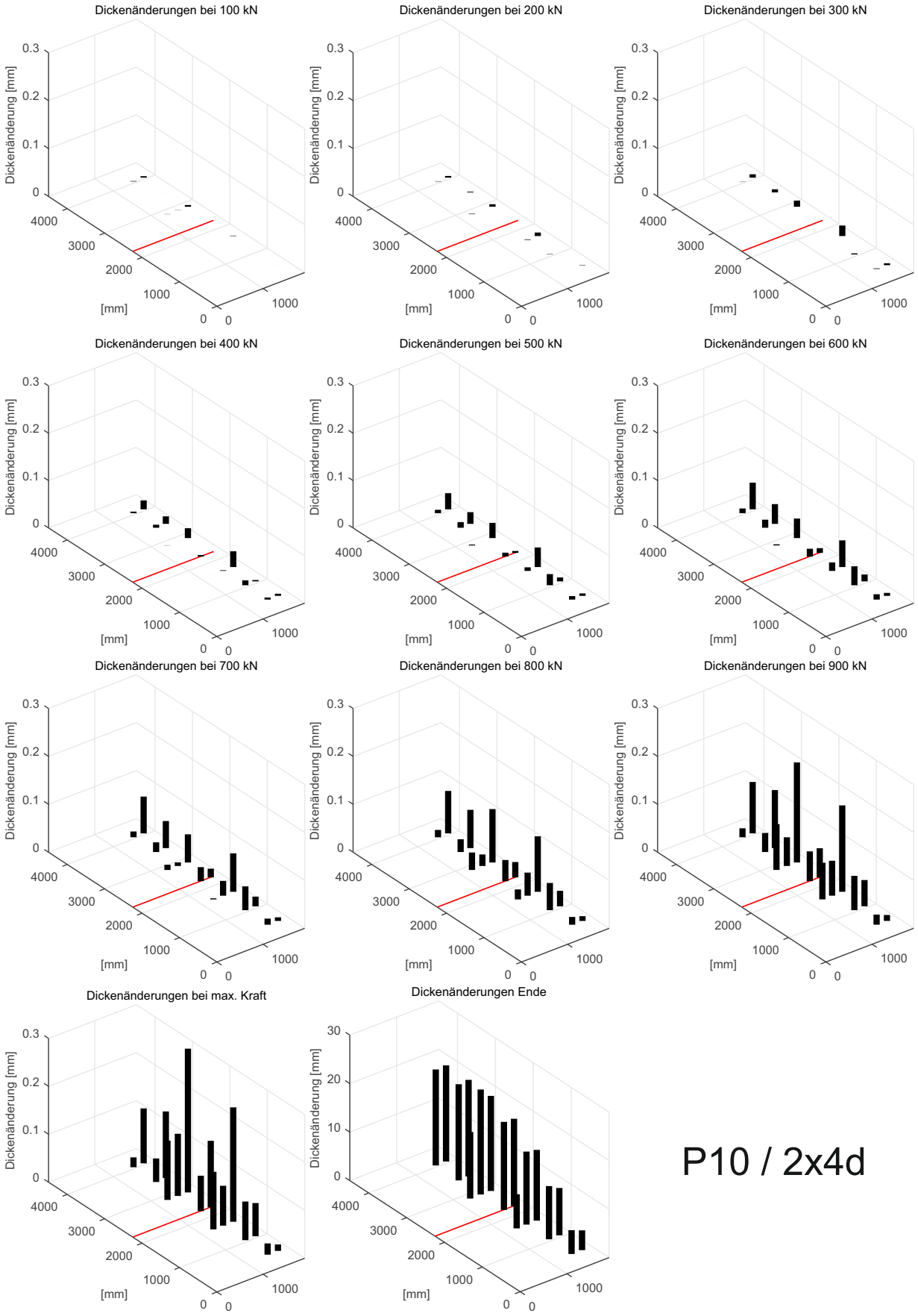

WP1
WP2
WP3
WP4
WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP11
WP12
WP13
WP14
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]


Dickenänderungen bei 100 kN
Dickenänderungen bei 200 kN
Dickenänderungen bei 300 kN
Dickenänderungen bei 400 kN
Dickenänderungen bei 500 kN
Dickenänderungen bei 600 kN
Dickenänderungen bei 700 kN
Dickenänderungen bei 800 kN
Dickenänderungen bei 900 kN
Dickenänderungen bei max. Kraft
Dickenänderungen Ende
Dickenänderung [mm]
[mm]

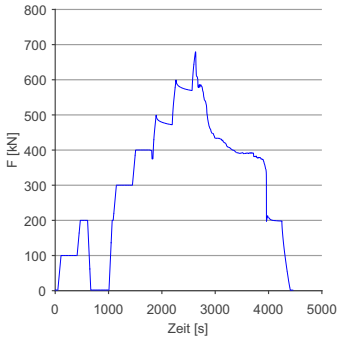
P9 / 2x2d

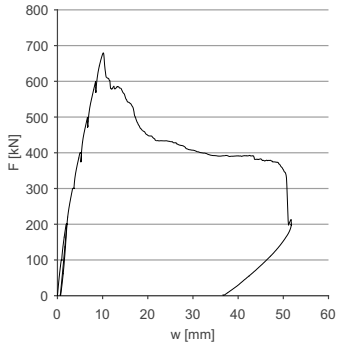
P10 / 2x4d

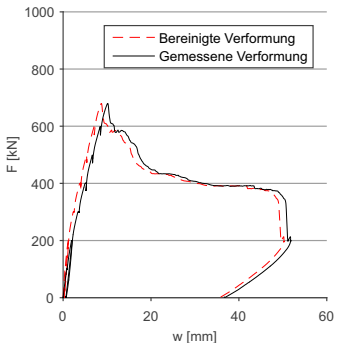

F [kN]
Zeit [s]
w [mm]
Bereinigte Verformung
Gemessene Verformung
DS8
Fließdehnung
Stahldehnung [mm/m]
Rissbreite [mm]
R1
R2
R3
R4
DS1
DS2
DS3
DS4
DS5
DS6
DS7
WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP15
WP16
Dickenänderung [mm]
100 kN
200 kN
300 kN
400 kN
500 kN
600 kN
700 kN
800 kN
900 kN
Plattenbreite [mm]
WP1
WP2
WP3
WP4
WP11
WP12
WP13
WP14

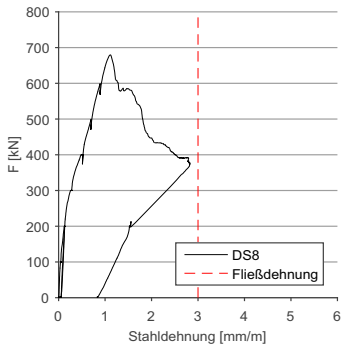

Dickenänderungen bei 100 kN
Dickenänderungen bei 200 kN
Dickenänderungen bei 300 kN
Dickenänderungen bei 400 kN
Dickenänderungen bei 500 kN
Dickenänderungen bei 600 kN
Dickenänderungen bei 700 kN
Dickenänderungen bei 800 kN
Dickenänderungen bei 900 kN
Dickenänderungen bei max. Kraft
Dickenänderungen Ende
Dickenänderung [mm]
[mm]
P10 / 2x4d

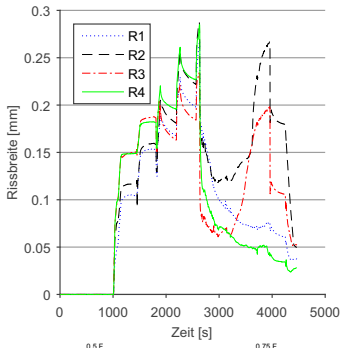
P11 / 3d-2

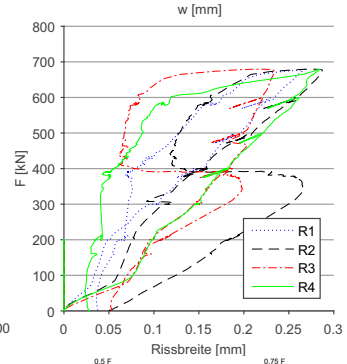

F [kN]
Zeit [s]

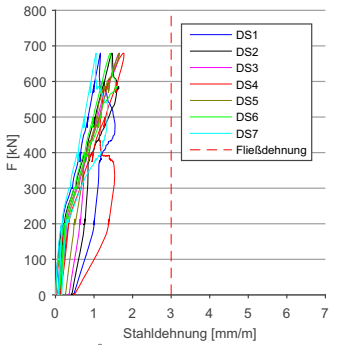

F [kN]
w [mm]

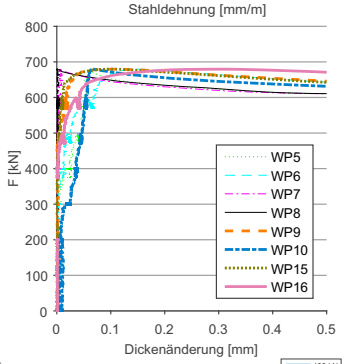

Bereinigte Verformung
Gemessene Verformung
F [kN]
w [mm]

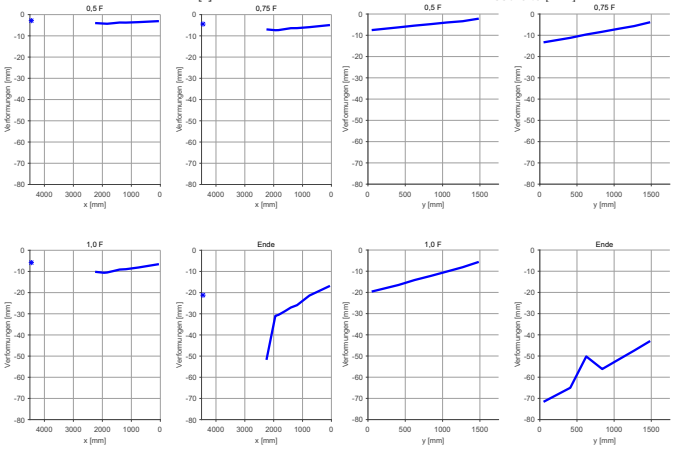

DS8
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

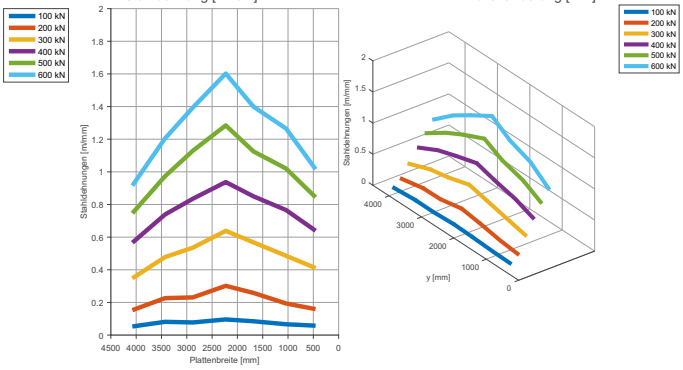

R1
R2
R3
R4
Rissbreite [mm]
Zeit [s]

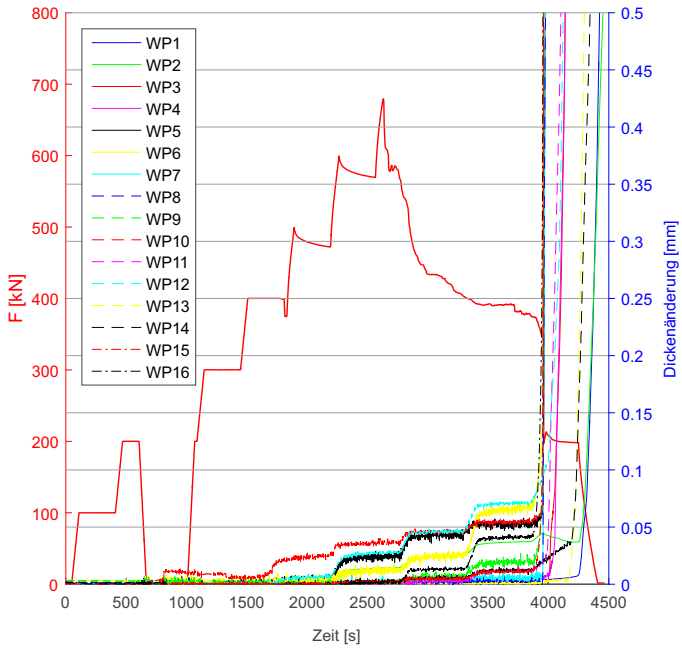

R1
R2
R3
R4
F [kN]
Rissbreite [mm]

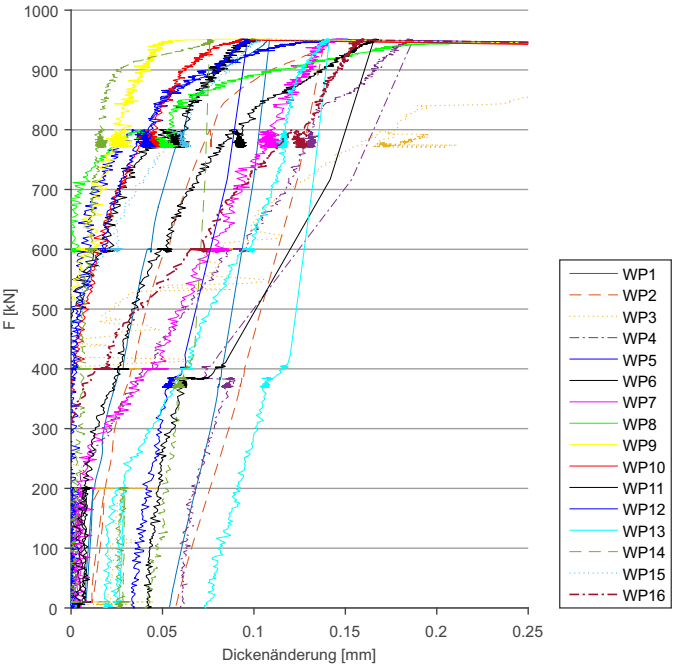

DS1
DS2
DS3
DS4
DS5
DS6
DS7
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

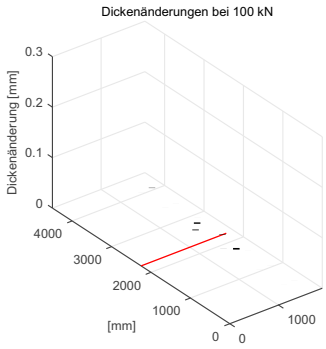

WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]

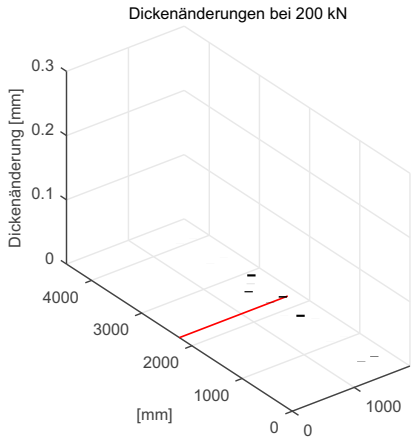

0,5 F
0,75 F
0,5 F
0,75 F
1,0 F
Ende
1,0 F
Ende
Verformungen [mm]
x [mm]
y [mm]

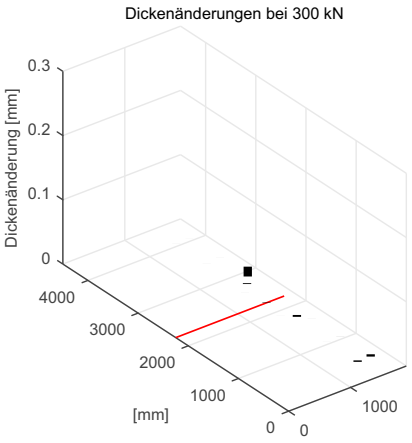

100 kN
200 kN
300 kN
400 kN
500 kN
600 kN
Stahldehnungen [mm/m]
Plattenbreite [mm]
y [mm]

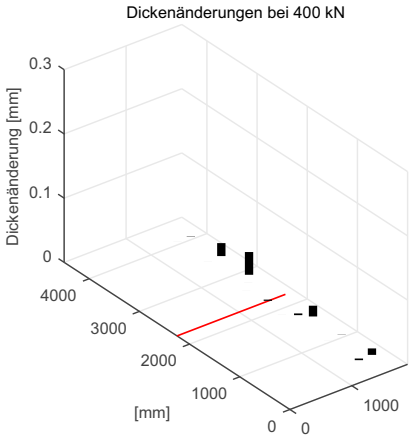

WP1
WP2
WP3
WP4
WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP11
WP12
WP13
WP14
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]
Zeit [s]

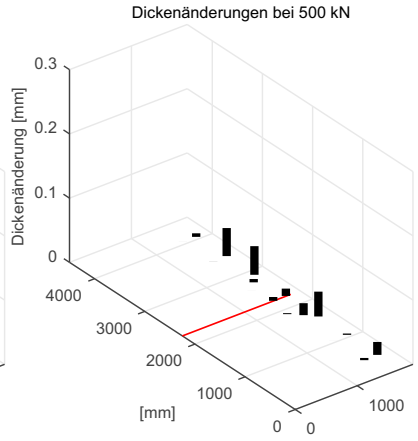

WP1
WP2
WP3
WP4
WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP11
WP12
WP13
WP14
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]

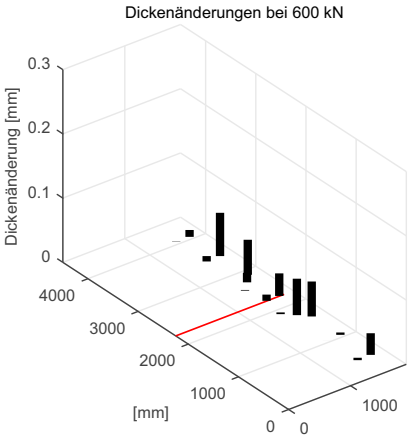

Dickenänderungen bei 100 kN
Dickenänderung [mm]
0.3
0.2
0.1
0
4000
3000
2000
1000
0
[mm]
0
1000

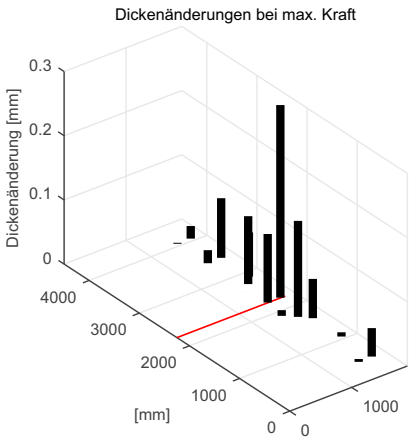

Dickenänderungen bei 200 kN
Dickenänderung [mm]
0.3
0.2
0.1
0
4000
3000
2000
1000
0
[mm]
0
1000

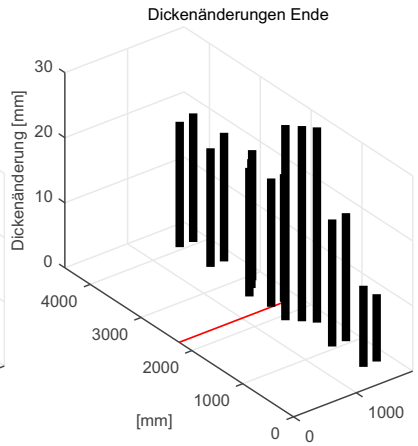

Dickenänderungen bei 300 kN
Dickenänderung [mm]
0.3
0.2
0.1
0
4000
3000
2000
1000
0
[mm]
0
1000


Dickenänderungen bei 400 kN
Dickenänderung [mm]
0.3
0.2
0.1
0
4000
3000
2000
1000
0
[mm]
0
1000


Dickenänderungen bei 500 kN
Dickenänderung [mm]
0.3
0.2
0.1
0
4000
3000
2000
1000
0
[mm]
0
1000

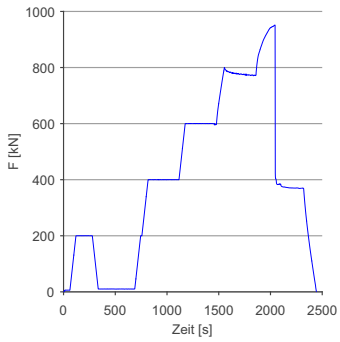

Dickenänderungen bei 600 kN
Dickenänderung [mm]
0.3
0.2
0.1
0
4000
3000
2000
1000
0
[mm]
0
1000

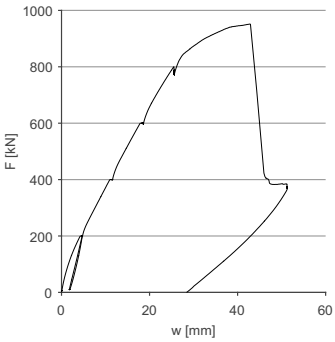

Dickenänderungen bei max. Kraft
Dickenänderung [mm]
0.3
0.2
0.1
0
4000
3000
2000
1000
0
[mm]
0
1000

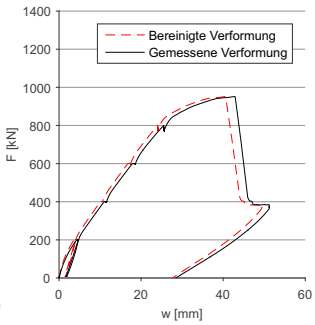

Dickenänderungen Ende
Dickenänderung [mm]
30
20
10
0
4000
3000
2000
1000
0
[mm]
0
1000

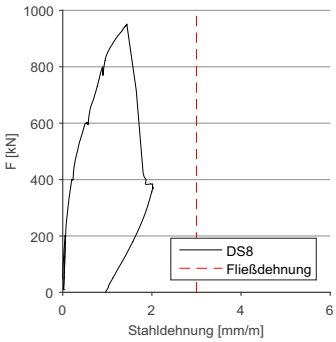
P11 / 3d-2

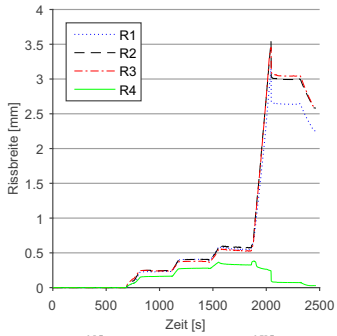
P12 / 2x5d

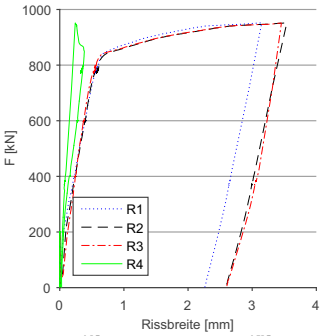

F [kN]
Zeit [s]

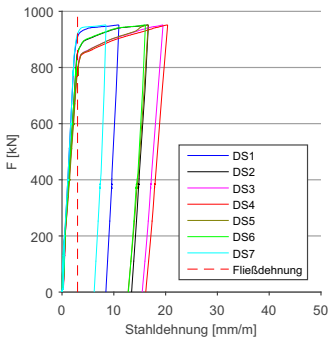

F [kN]
w [mm]

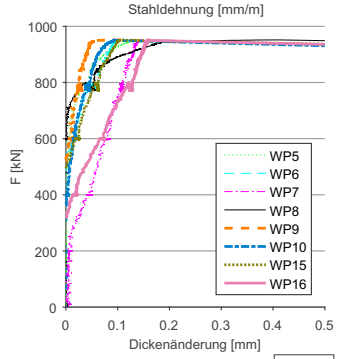

Bereinigte Verformung
Gemessene Verformung
F [kN]
w [mm]

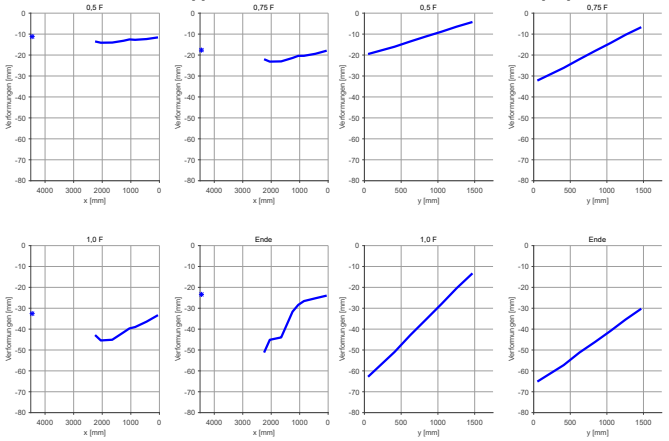

DS8
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

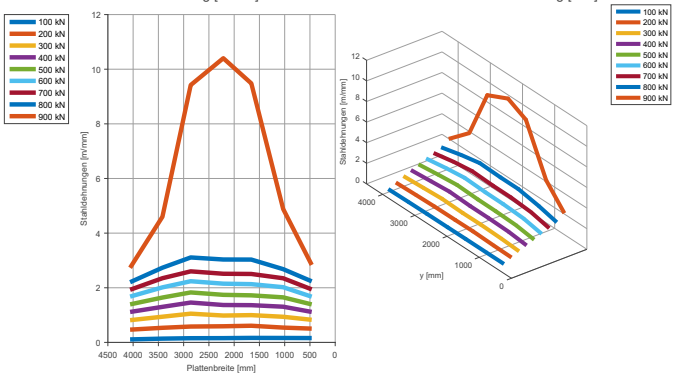

R1
R2
R3
R4
Rissbreite [mm]
Zeit [s]

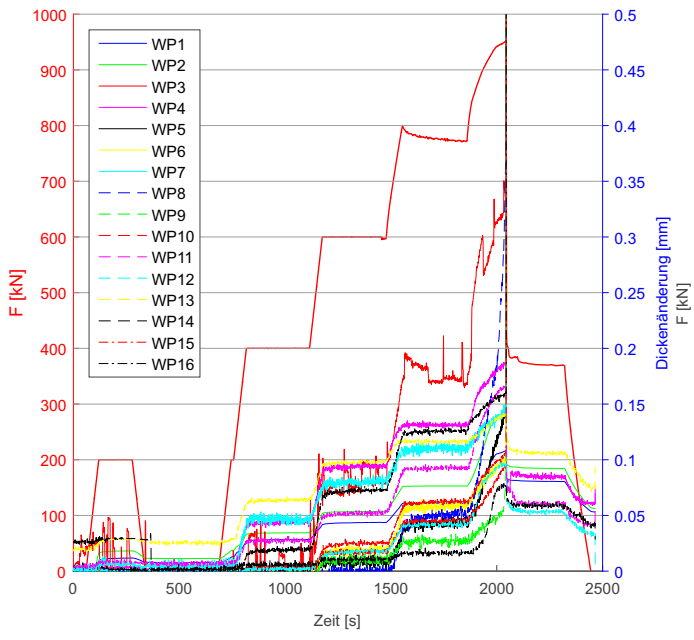

R1
R2
R3
R4
F [kN]
Rissbreite [mm]

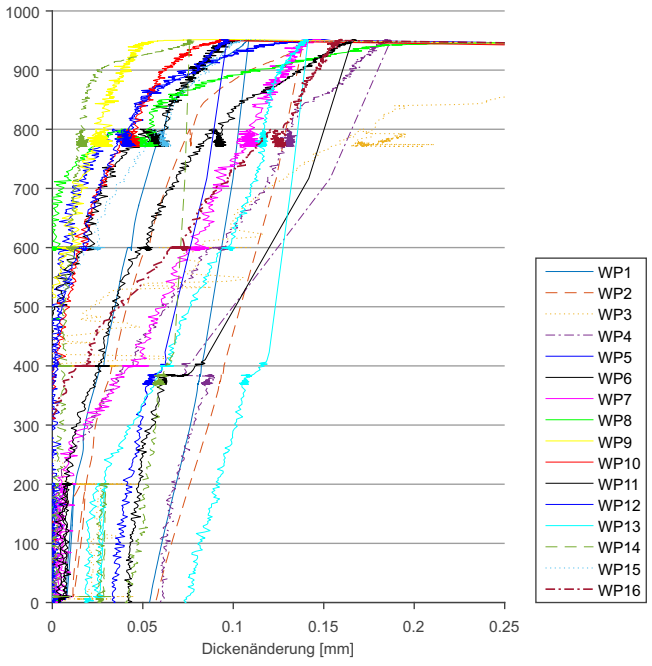

DS1
DS2
DS3
DS4
DS5
DS6
DS7
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

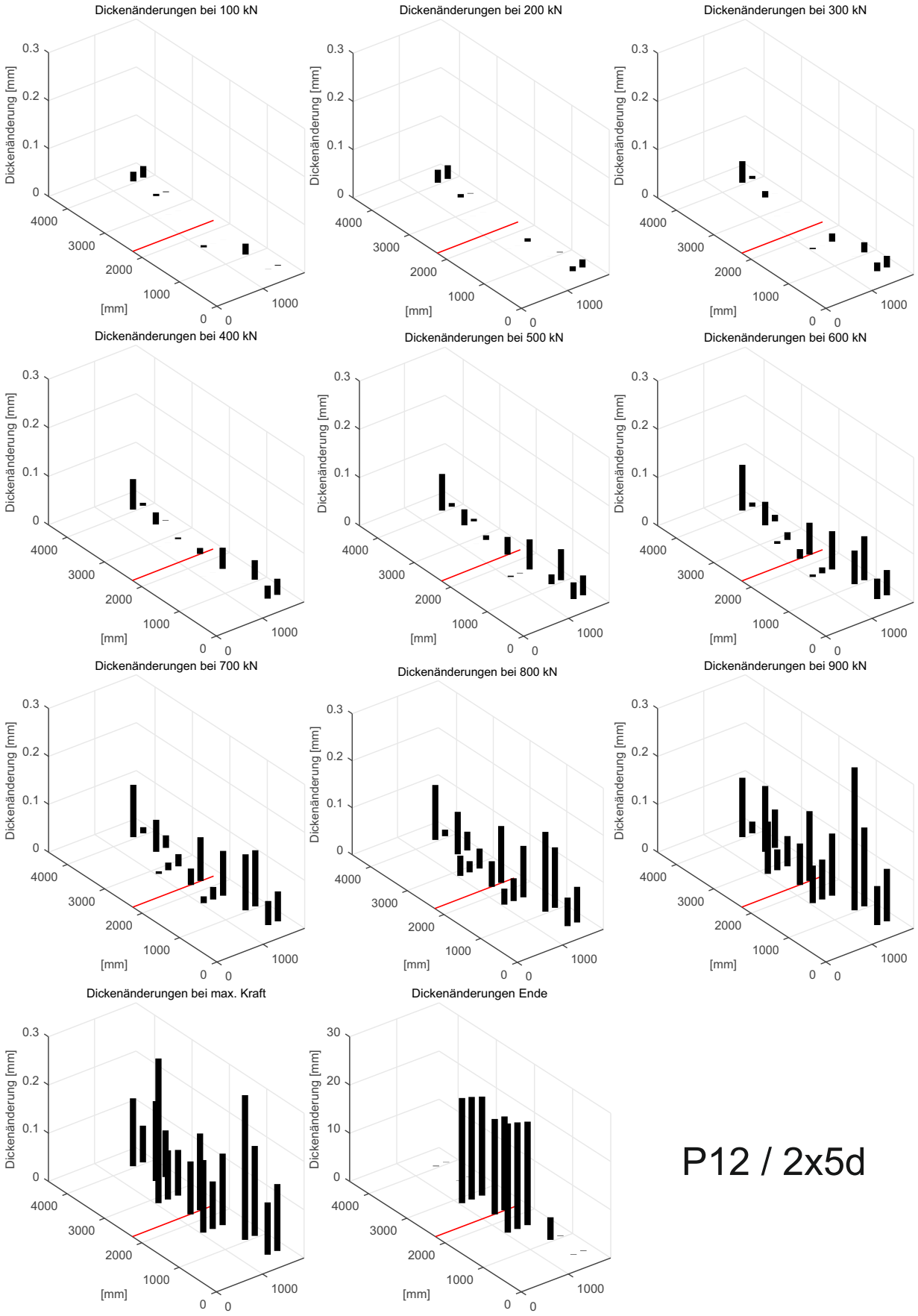

WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]


0,5 F
0,75 F
1,0 F
Ende
Verformungen [mm]


100 kN
200 kN
300 kN
400 kN
500 kN
600 kN
700 kN
800 kN
900 kN
Stahldehnungen [m/m]
Plattenbreite [mm]

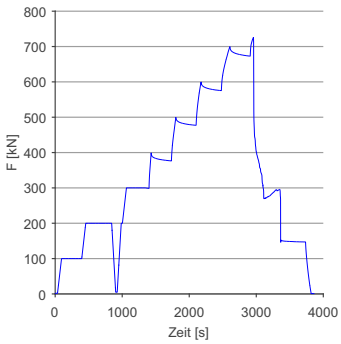

WP1
WP2
WP3
WP4
WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP11
WP12
WP13
WP14
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]
Zeit [s]

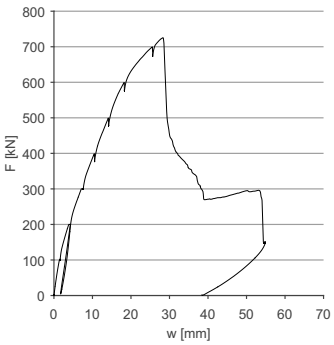

F [kN]
Dickenänderung [mm]

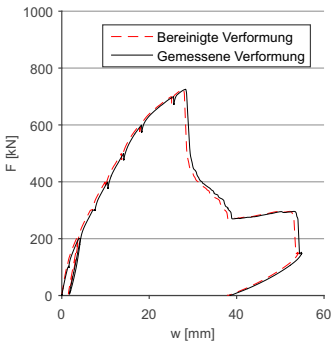

Dickenänderungen bei 100 kN
Dickenänderungen bei 200 kN
Dickenänderungen bei 300 kN
Dickenänderungen bei 400 kN
Dickenänderungen bei 500 kN
Dickenänderungen bei 600 kN
Dickenänderungen bei 700 kN
Dickenänderungen bei 800 kN
Dickenänderungen bei 900 kN
Dickenänderungen bei max. Kraft
Dickenänderungen Ende
Dickenänderung [mm]
[mm]

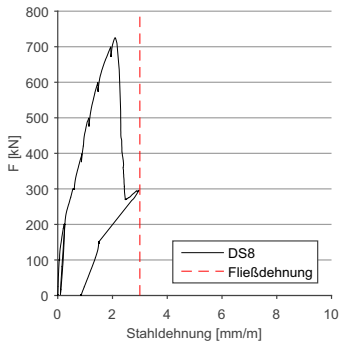
P12 / 2x5d

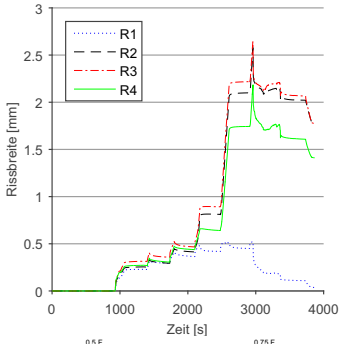
P13 / 4d-2

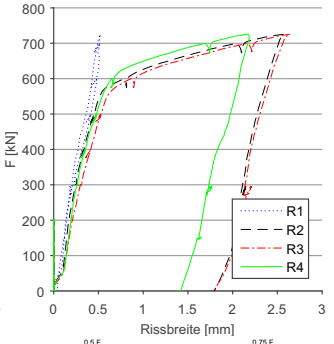

F [kN]
Zeit [s]

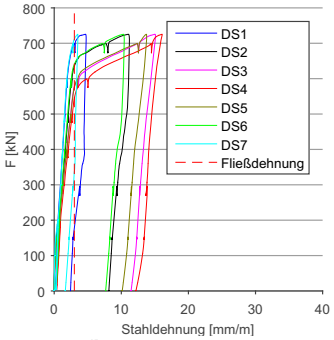

F [kN]
w [mm]

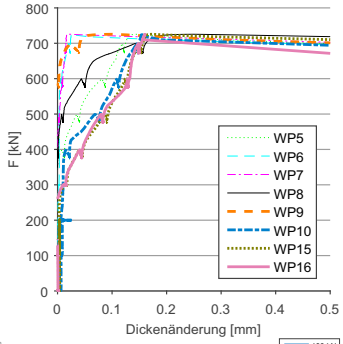

Bereinigte Verformung
Gemessene Verformung
F [kN]
w [mm]

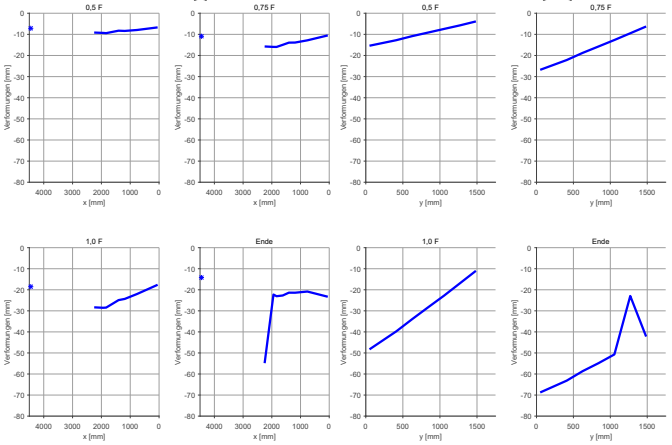

DS8
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

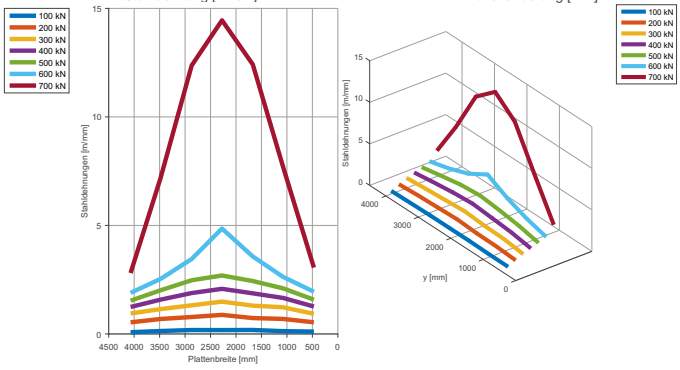

R1
R2
R3
R4
Rissbreite [mm]
Zeit [s]

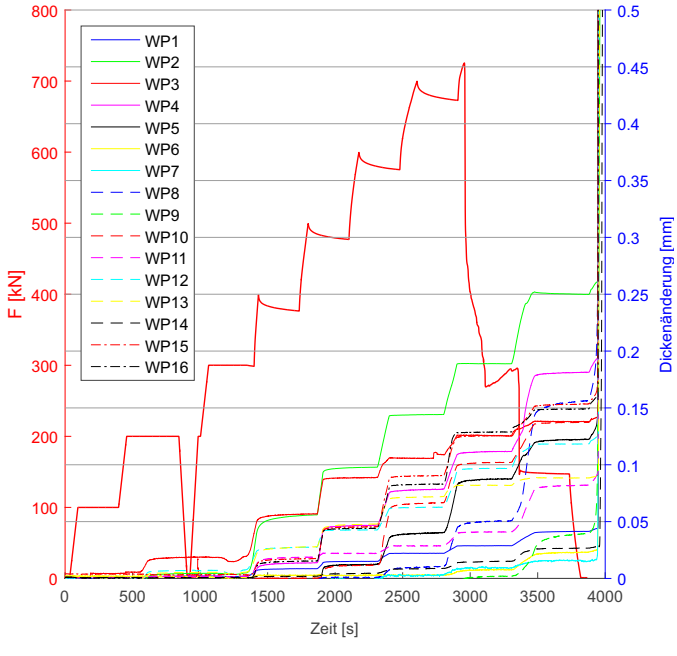

R1
R2
R3
R4
F [kN]
Rissbreite [mm]

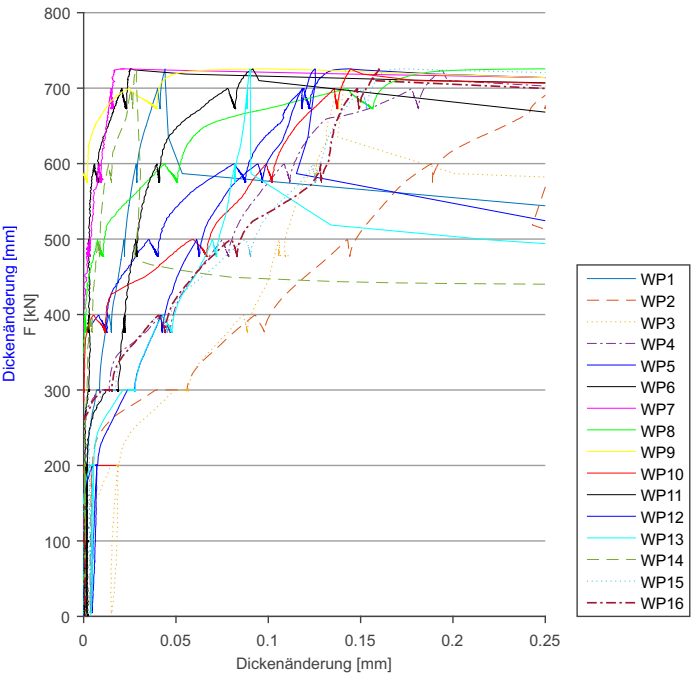

DS1
DS2
DS3
DS4
DS5
DS6
DS7
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

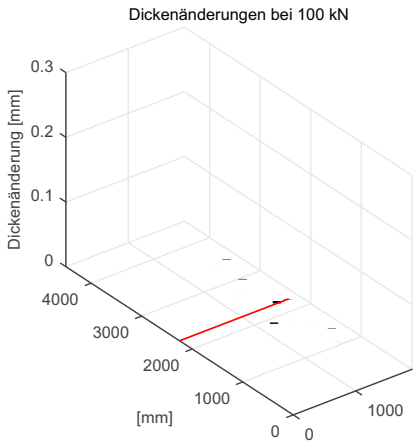

WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]

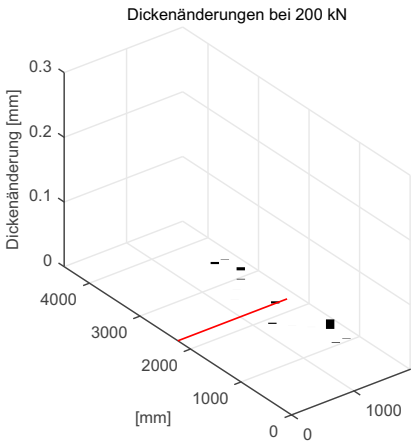

0,5 F
0,75 F
1,0 F
Ende
Verformungen [mm]

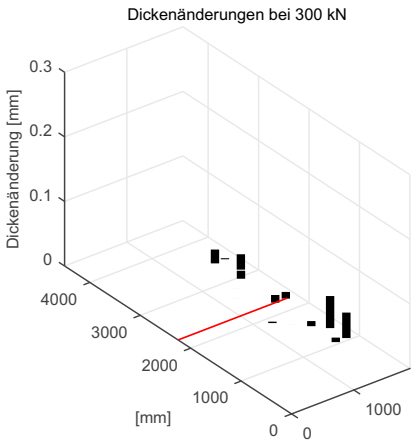

100 kN
200 kN
300 kN
400 kN
500 kN
600 kN
700 kN
Stahldehnungen [m/mm]
Plattenbreite [mm]
y [mm]

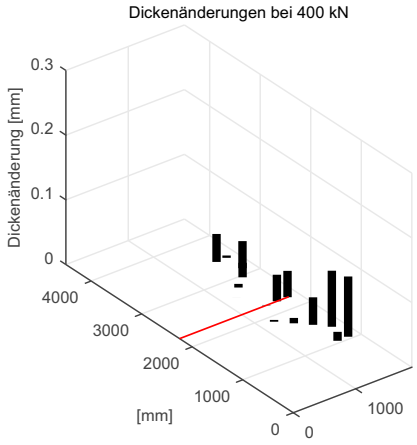

WP1
WP2
WP3
WP4
WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP11
WP12
WP13
WP14
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]
Zeit [s]

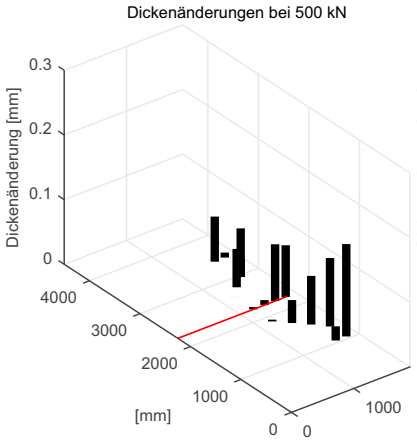

F [kN]
Dickenänderung [mm]

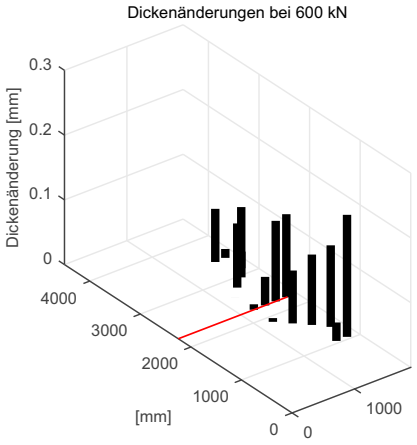

Dickenänderungen bei 100 kN
Dickenänderung [mm]
0.3
0.2
0.1
0
4000
3000
2000
1000
0
[mm]
0
1000

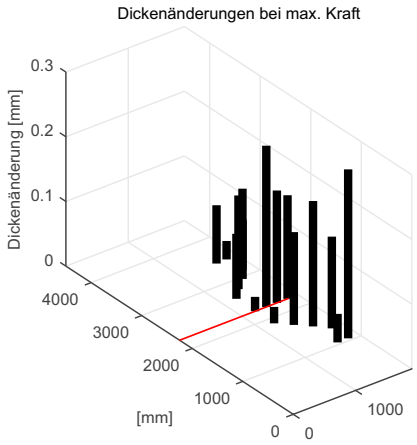

Dickenänderungen bei 200 kN
Dickenänderung [mm]
0.3
0.2
0.1
0
4000
3000
2000
1000
0
[mm]
0
1000

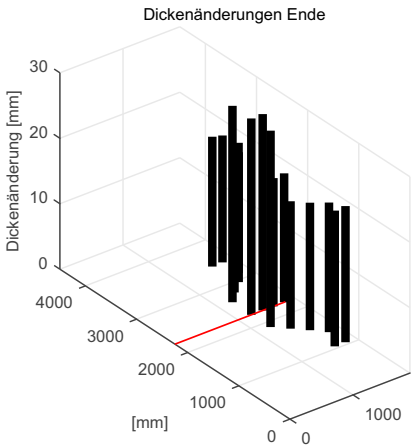

Dickenänderungen bei 300 kN
Dickenänderung [mm]
0.3
0.2
0.1
0
4000
3000
2000
1000
0
[mm]
0
1000


Dickenänderungen bei 400 kN
Dickenänderung [mm]
0.3
0.2
0.1
0
4000
3000
2000
1000
0
[mm]
0
1000

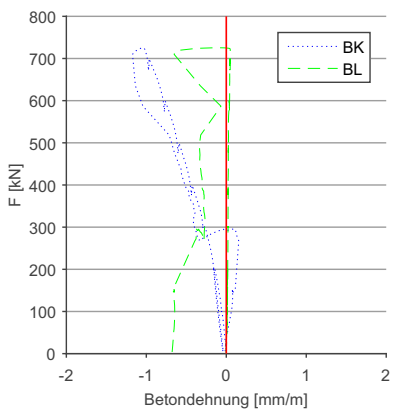

Dickenänderungen bei 500 kN
Dickenänderung [mm]
0.3
0.2
0.1
0
4000
3000
2000
1000
0
[mm]
0
1000

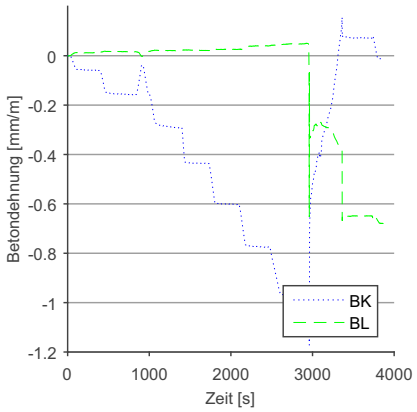

Dickenänderungen bei 600 kN
Dickenänderung [mm]
0.3
0.2
0.1
0
4000
3000
2000
1000
0
[mm]
0
1000


Dickenänderungen bei max. Kraft
Dickenänderung [mm]
0.3
0.2
0.1
0
4000
3000
2000
1000
0
[mm]
0
1000

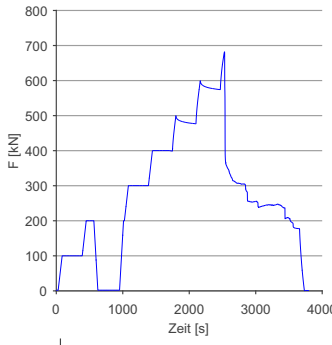

Dickenänderungen Ende
Dickenänderung [mm]
30
20
10
0
4000
3000
2000
1000
0
[mm]
0
1000

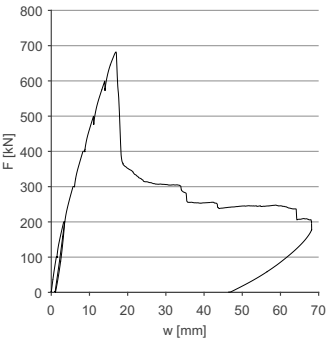
P13 / 4d-2

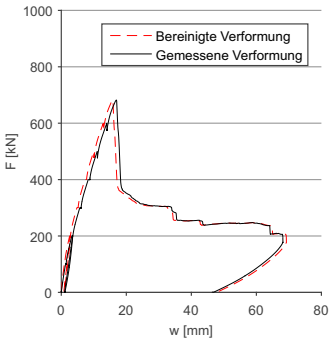

F [kN]
800
700
600
500
400
300
200
100
0
-2
-1
0
1
2
Betondehnung [mm/m]
BK
BL

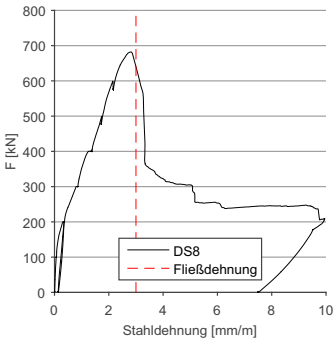

Betondehnung [mm/m]
0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1
-1.2
0
1000
2000
3000
4000
Zeit [s]
BK
BL

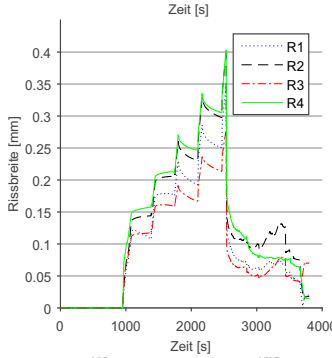
P14 / 4d-3

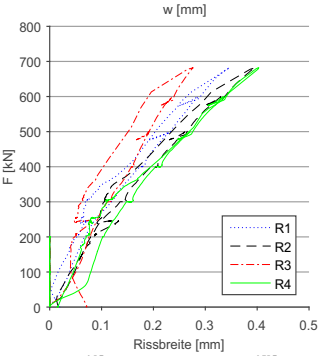

F [kN]
Zeit [s]

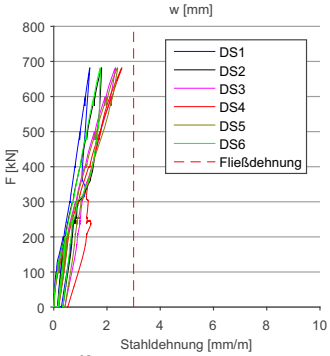

F [kN]
w [mm]

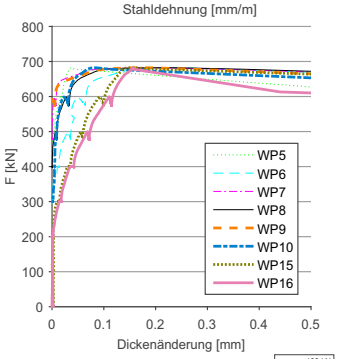

Bereinigte Verformung
Gemessene Verformung
F [kN]
w [mm]

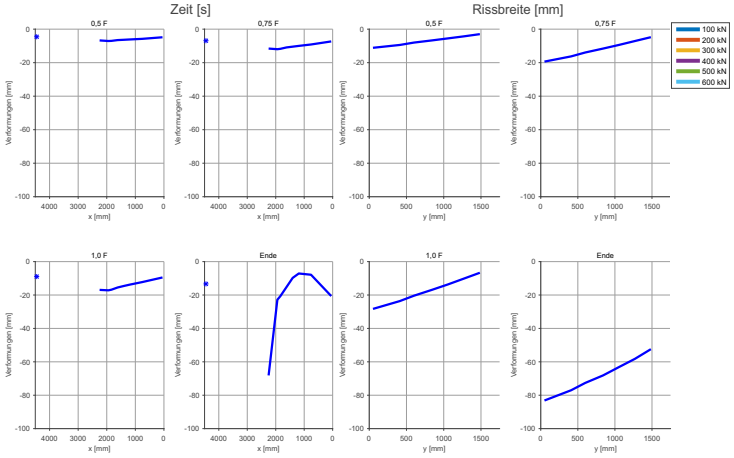

DS8
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

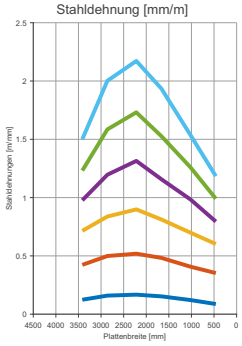

R1
R2
R3
R4
Rissbreite [mm]
Zeit [s]

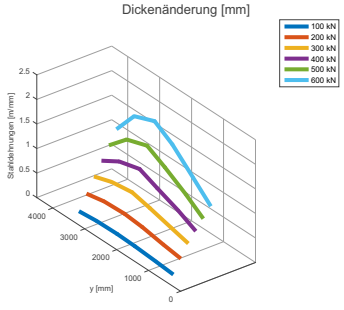

R1
R2
R3
R4
F [kN]
Rissbreite [mm]

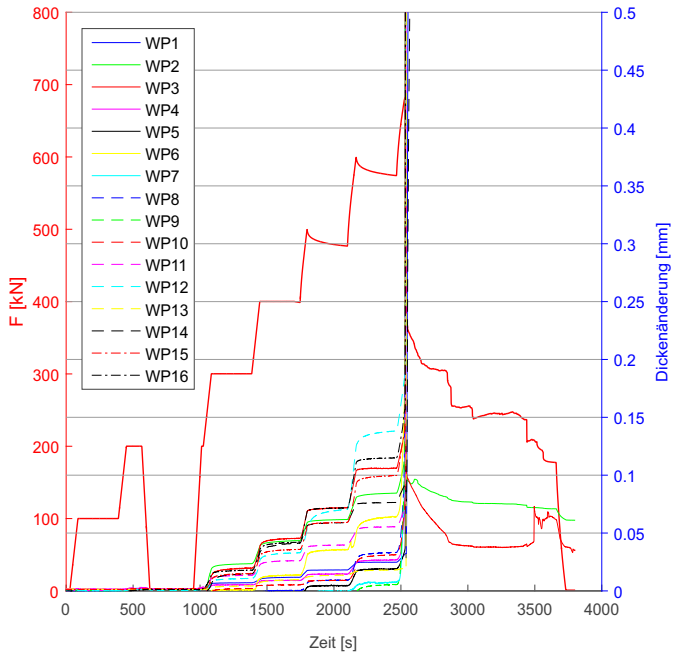

DS1
DS2
DS3
DS4
DS5
DS6
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

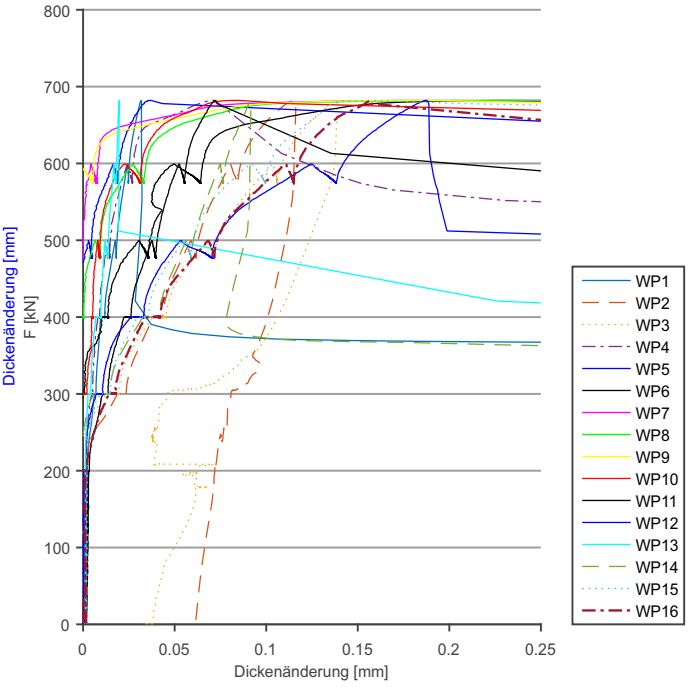

WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]

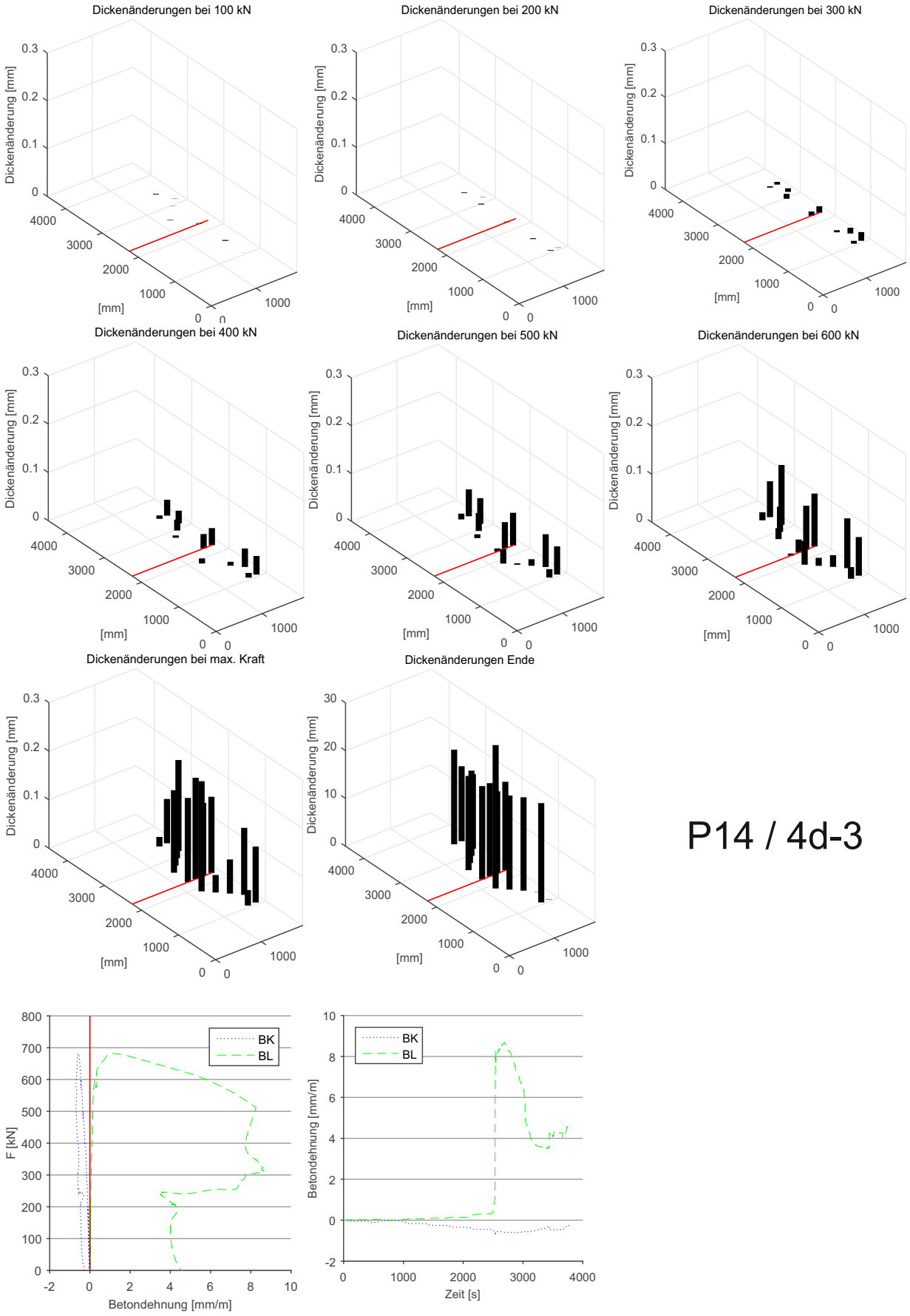

0,5 F
0,75 F
1,0 F
Ende
100 kN
200 kN
300 kN
400 kN
500 kN
600 kN


Stahldehnungen [m/mm]
Plattenbreite [mm]


100 kN
200 kN
300 kN
400 kN
500 kN
600 kN

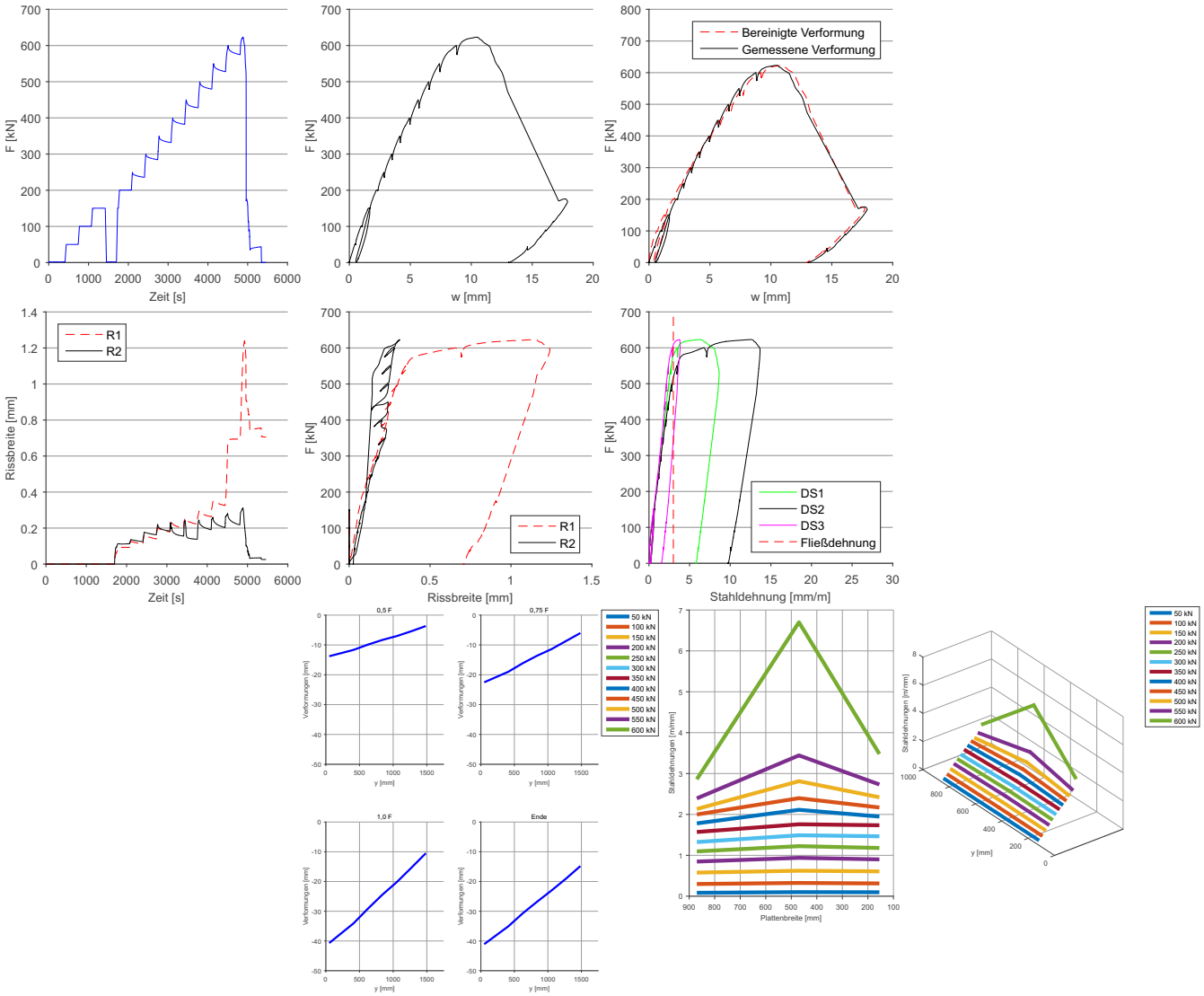

WP1
WP2
WP3
WP4
WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP11
WP12
WP13
WP14
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]
Zeit [s]

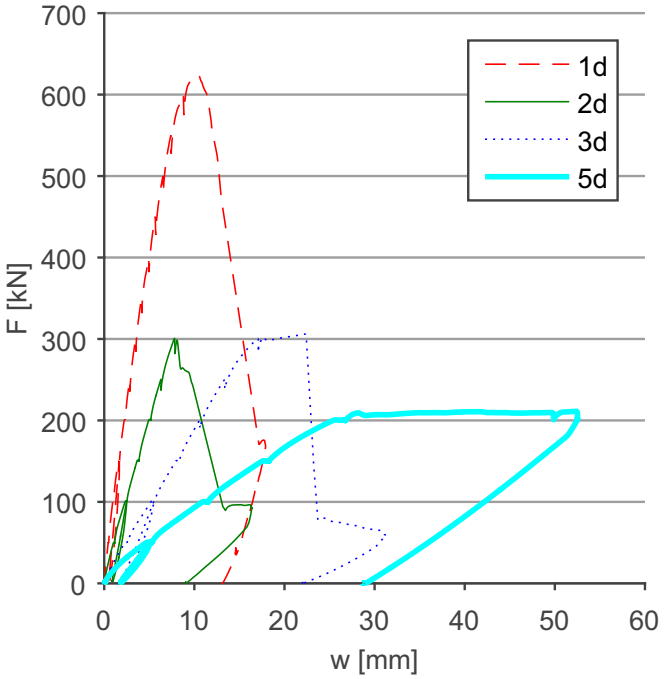

WP1
WP2
WP3
WP4
WP5
WP6
WP7
WP8
WP9
WP10
WP11
WP12
WP13
WP14
WP15
WP16
F [kN]
Dickenänderung [mm]


Dickenänderungen bei 100 kN
Dickenänderungen bei 200 kN
Dickenänderungen bei 300 kN
Dickenänderungen bei 400 kN
Dickenänderungen bei 500 kN
Dickenänderungen bei 600 kN
Dickenänderungen bei max. Kraft
Dickenänderungen Ende
Dickenänderung [mm]
[mm]
F [kN]
Betondehnung [mm/m]
Zeit [s]
BK
BL

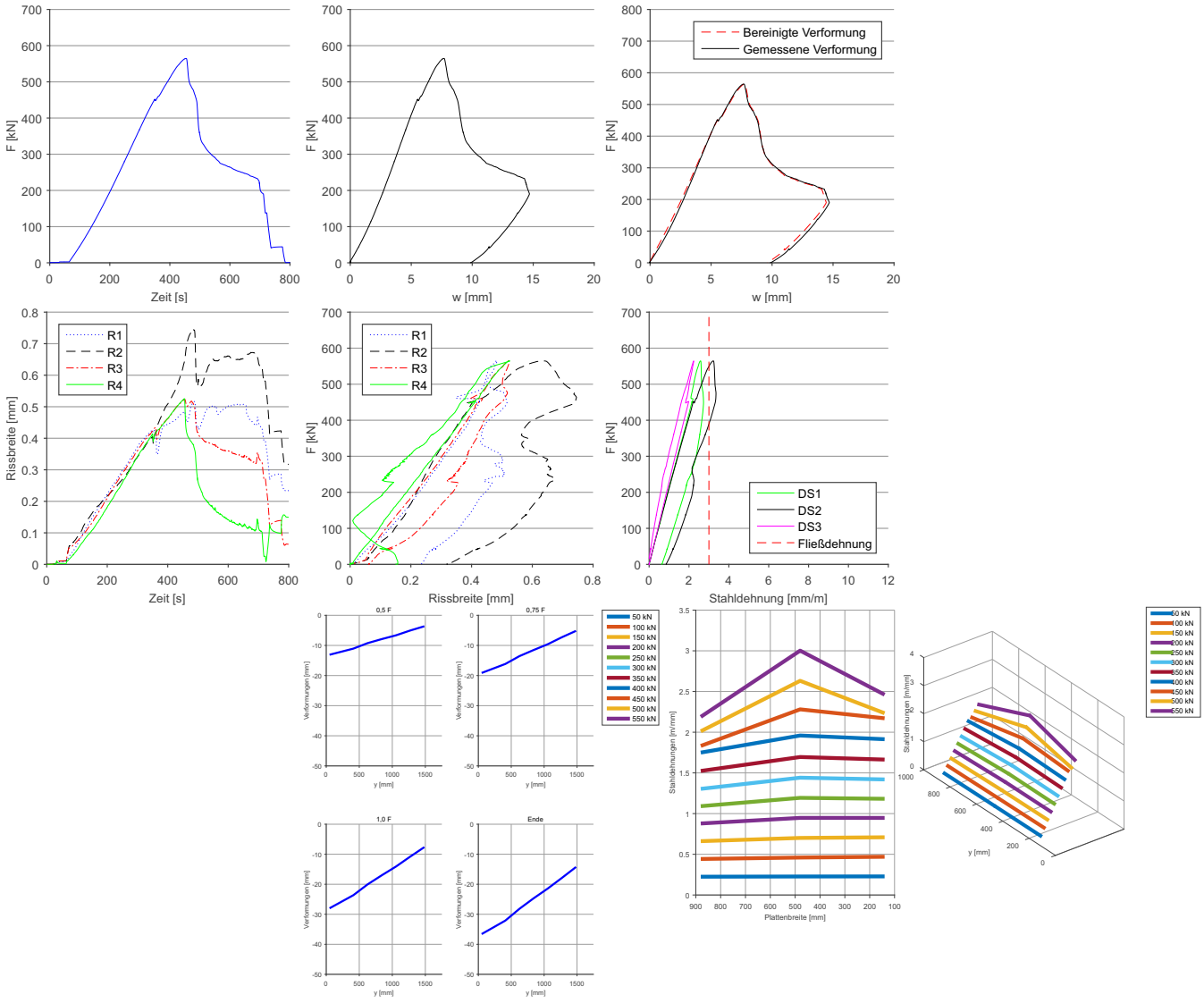
P14 / 4d-3

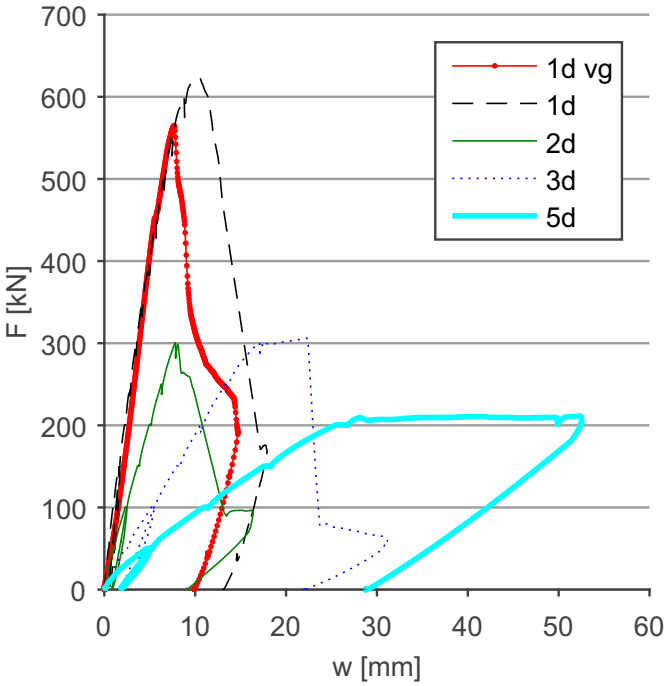
P15 / 1d


F [kN]
Zeit [s]
w [mm]
Bereinigte Verformung
Gemessene Verformung
Rissbreite [mm]
R1
R2
Rissbreite [mm]
DS1
DS2
DS3
Fließdehnung
Stahldehnung [mm/m]
0,5 F
0,75 F
1,0 F
Ende
Verformungen [mm]
y [mm]
Stahldehnungen [m/m]
Plattenbreite [mm]
50 kN
100 kN
150 kN
200 kN
250 kN
300 kN
350 kN
400 kN
450 kN
500 kN
550 kN
600 kN

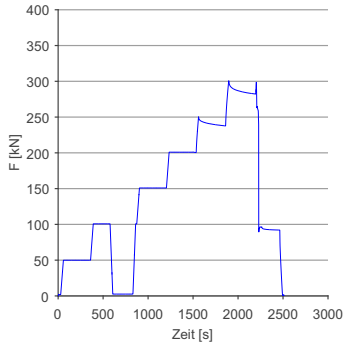

F [kN]
w [mm]
1d
2d
3d
5d

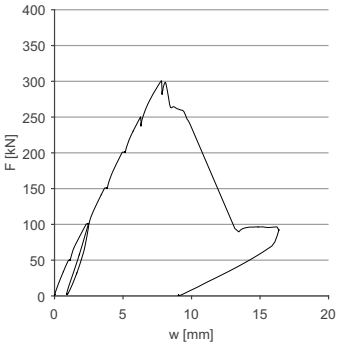
P15 / 1d vg

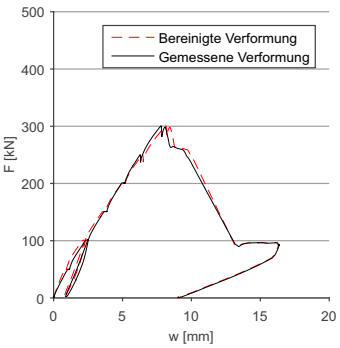

F [kN]
Zeit [s]
w [mm]
Bereinigte Verformung
Gemessene Verformung
Rissbreite [mm]
R1
R2
R3
R4
DS1
DS2
DS3
Fließdehnung
Stahldehnung [mm/m]
0,5 F
0,75 F
1,0 F
Ende
Verformungen [mm]
y [mm]
Stahldehnungen [m/mm]
Plattenbreite [mm]

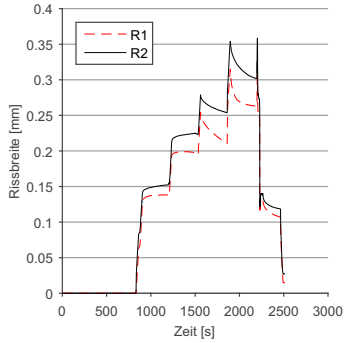

1d vg
1d
2d
3d
5d
F [kN]
w [mm]

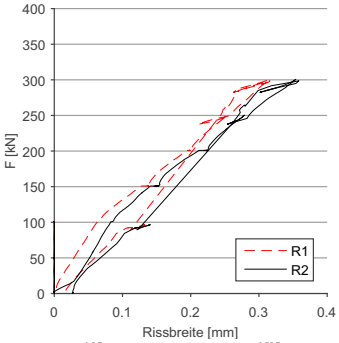
P15 / 2d

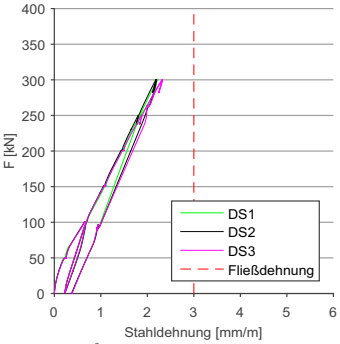

F [kN]
Zeit [s]

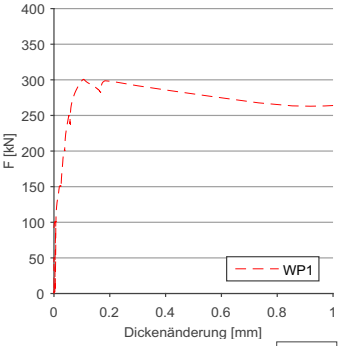

F [kN]
w [mm]

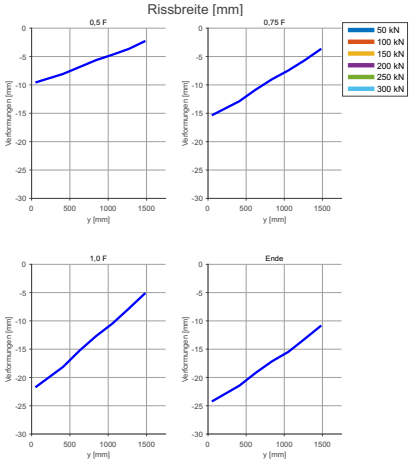

Bereinigte Verformung
Gemessene Verformung
F [kN]
w [mm]

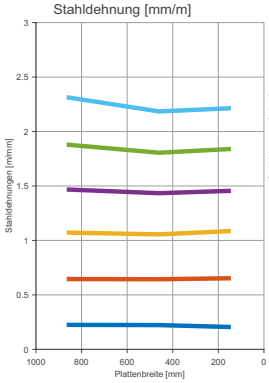

R1
R2
Rissbreite [mm]
Zeit [s]

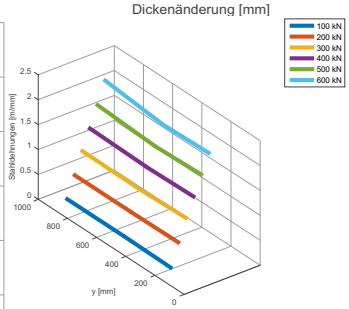

R1
R2
F [kN]
Rissbreite [mm]

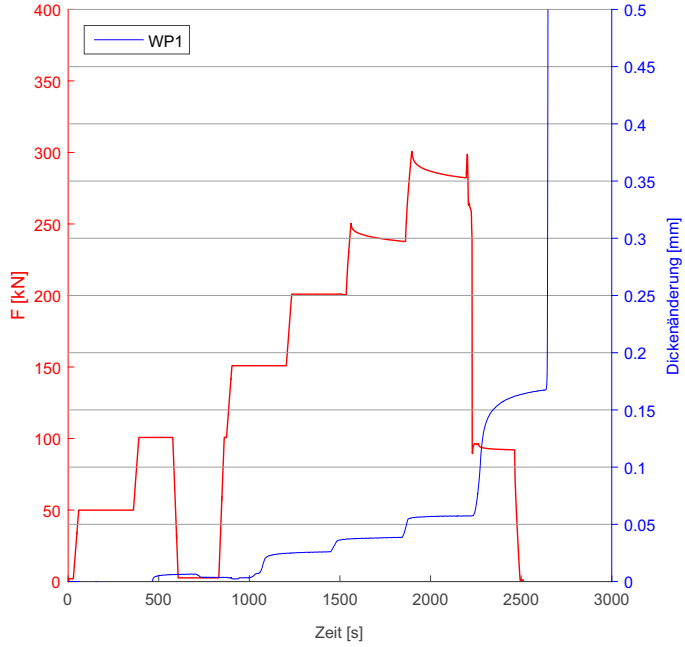

DS1
DS2
DS3
Fließdehnung
F [kN]
Stahldehnung [mm/m]

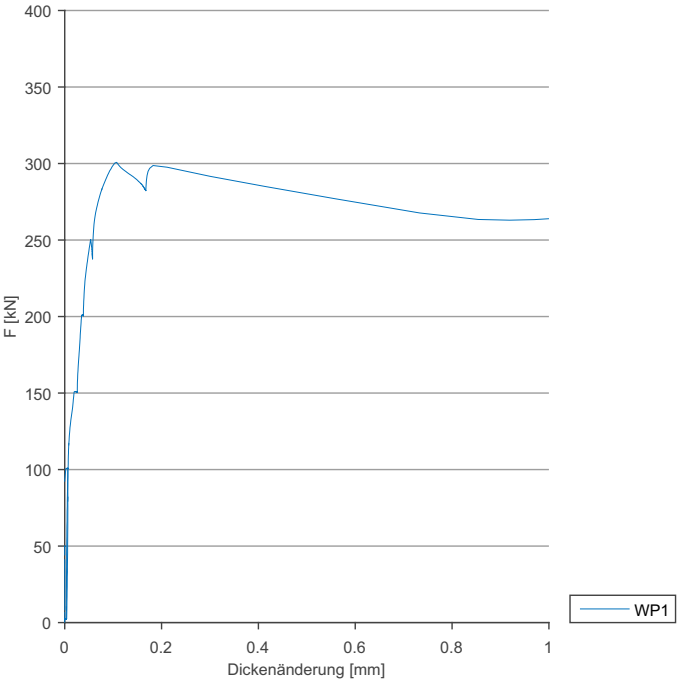

WP1
F [kN]
Dickenänderung [mm]

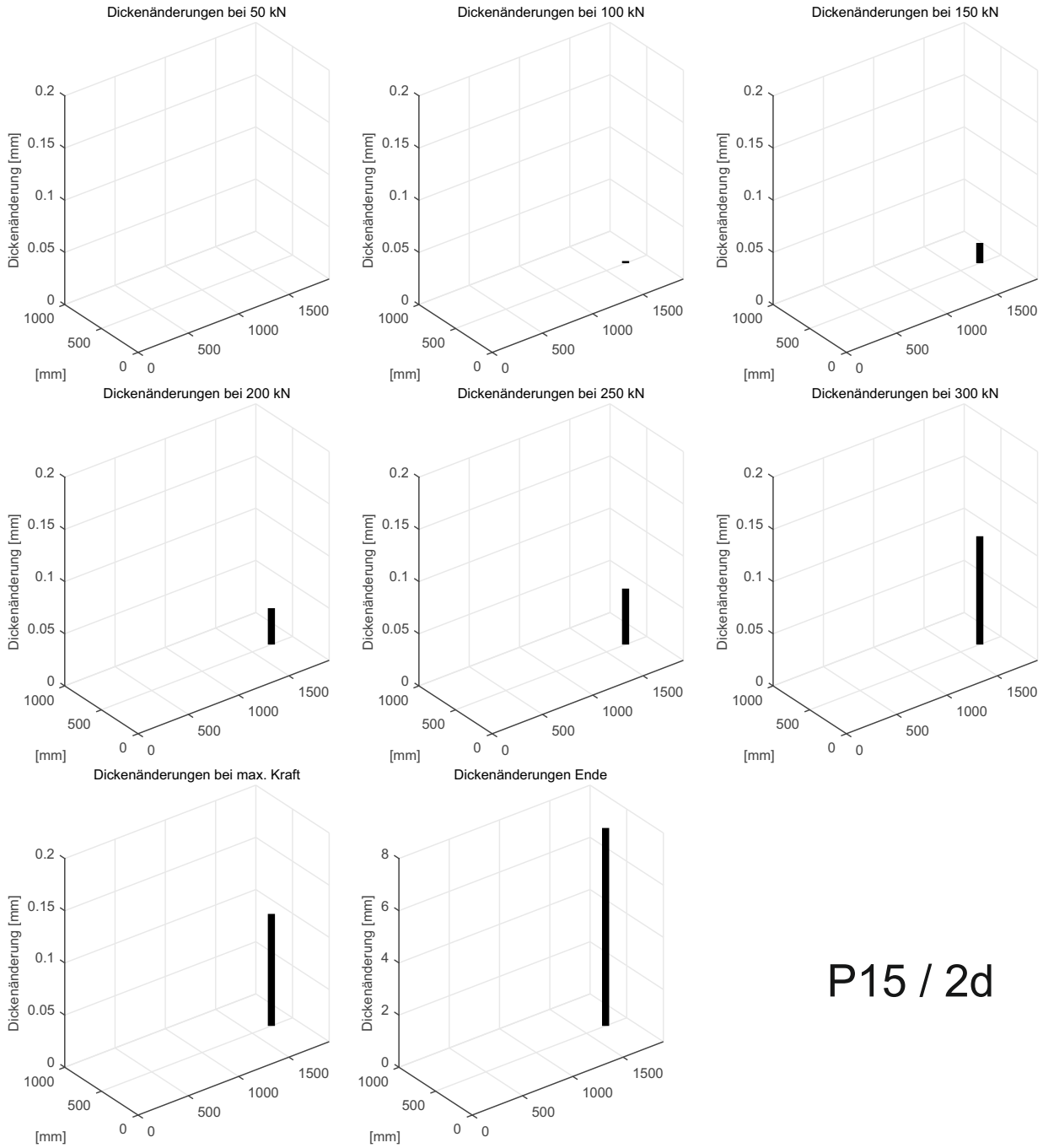

0,5 F
0,75 F
1,0 F
Ende
Verformungen [mm]
y [mm]
50 kN
100 kN
150 kN
200 kN
250 kN
300 kN


Stahldehnungen [mm/m]
Plattenbreite [mm]


100 kN
200 kN
300 kN
400 kN
500 kN
600 kN
Stahldehnungen [mm/m]
y [mm]

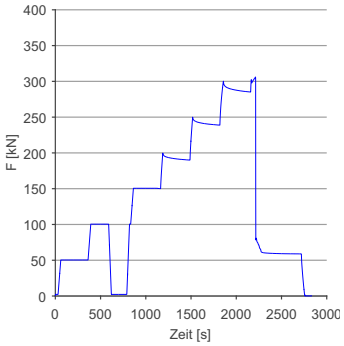

WP1
F [kN]
Dickenänderung [mm]
Zeit [s]

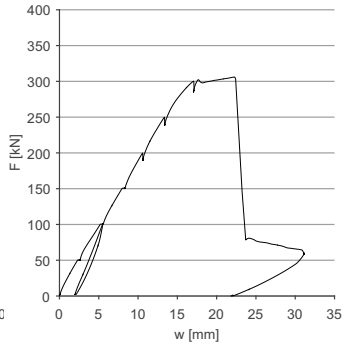

WP1
F [kN]
Dickenänderung [mm]

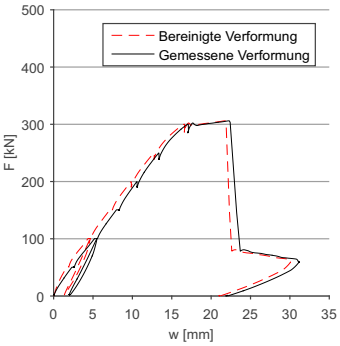

Dickenänderungen bei 50 kN
Dickenänderungen bei 100 kN
Dickenänderungen bei 150 kN
Dickenänderungen bei 200 kN
Dickenänderungen bei 250 kN
Dickenänderungen bei 300 kN
Dickenänderungen bei max. Kraft
Dickenänderungen Ende
Dickenänderung [mm]
[mm]

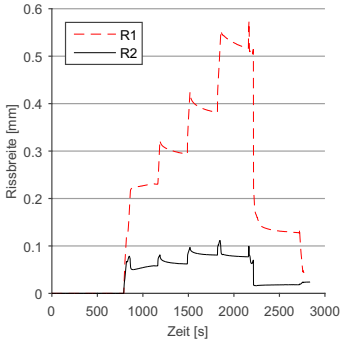
P15 / 2d

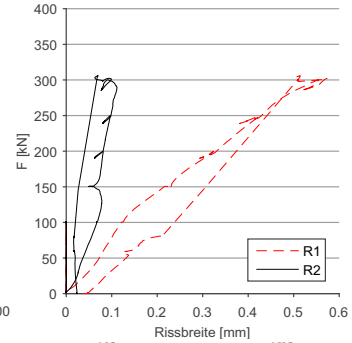
P15 / 3d

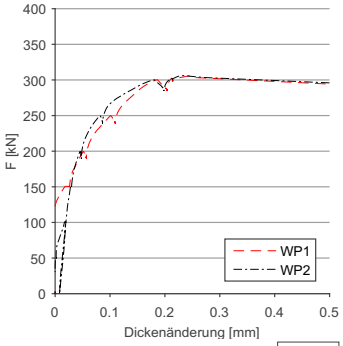

F [kN]
Zeit [s]

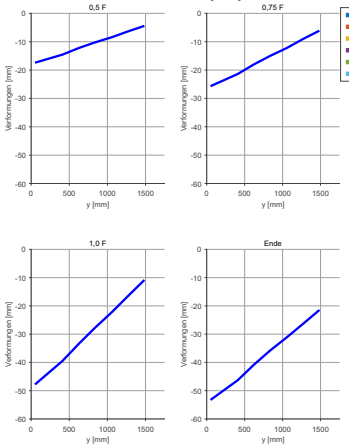

F [kN]
w [mm]

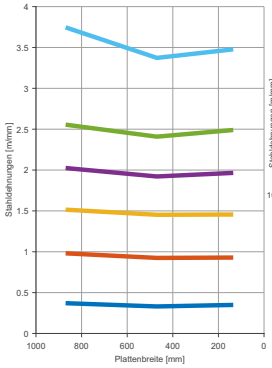

Bereinigte Verformung
Gemessene Verformung
F [kN]
w [mm]

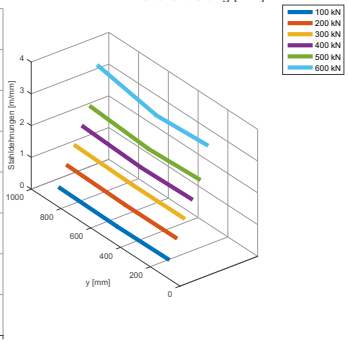

R1
R2
Rissbreite [mm]
Zeit [s]

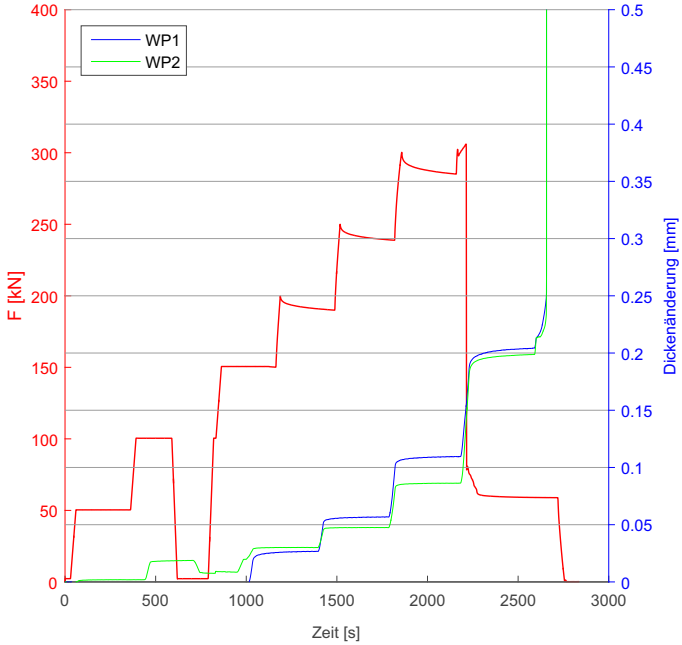

R1
R2
F [kN]
Rissbreite [mm]

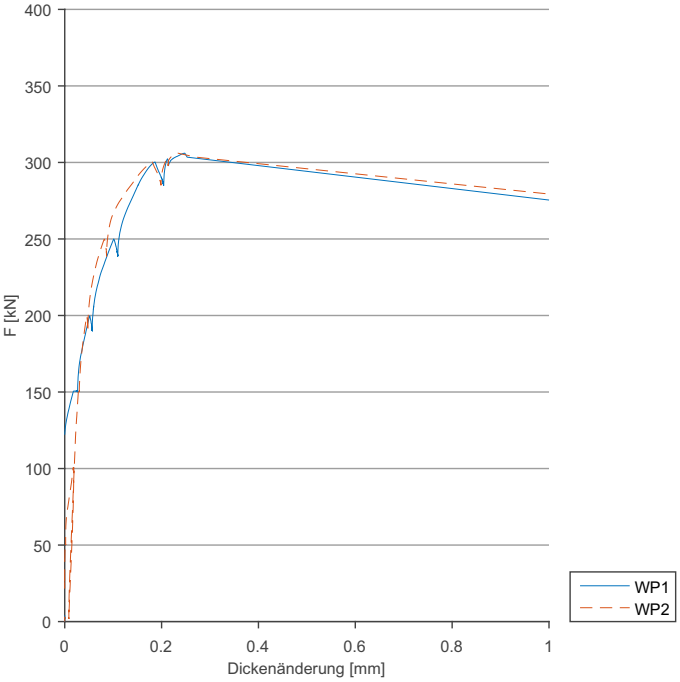

WP1
WP2
F [kN]
Dickenänderung [mm]

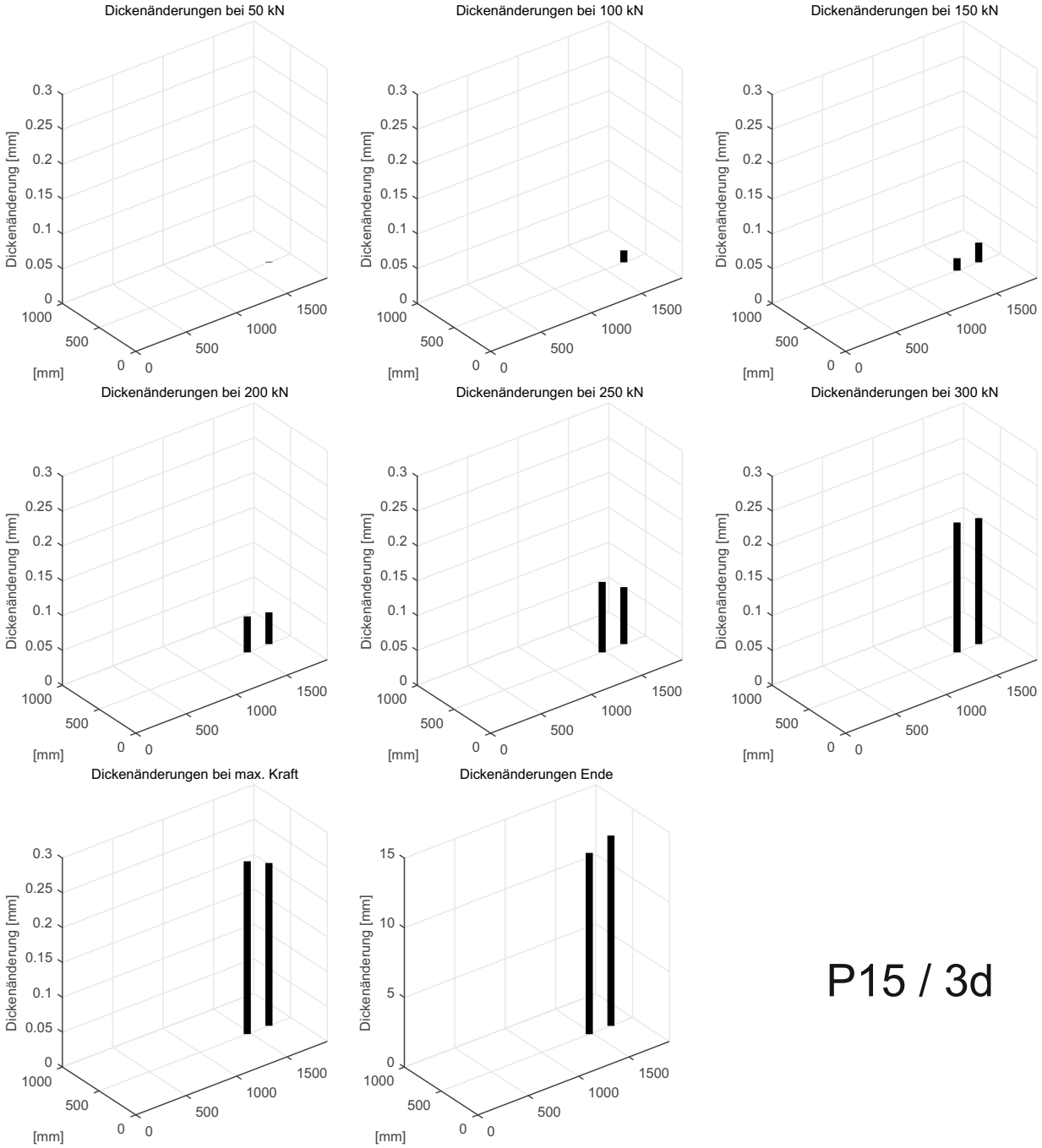

0,5 F
0,75 F
1,0 F
Ende
50 kN
100 kN
150 kN
200 kN
250 kN
300 kN
Verformungen [mm]
y [mm]


Stahldehnungen [m/mm]
Plattenbreite [mm]


100 kN
200 kN
300 kN
400 kN
500 kN
600 kN
Stahldehnungen [m/mm]
y [mm]

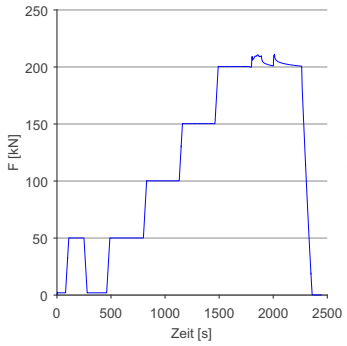

WP1
WP2
F [kN]
Dickenänderung [mm]
Zeit [s]

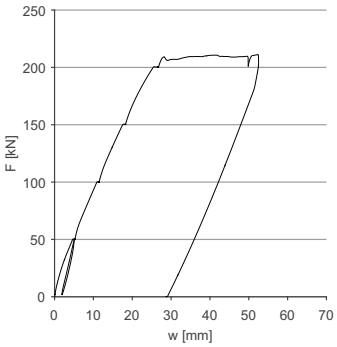

WP1
WP2
F [kN]
Dickenänderung [mm]

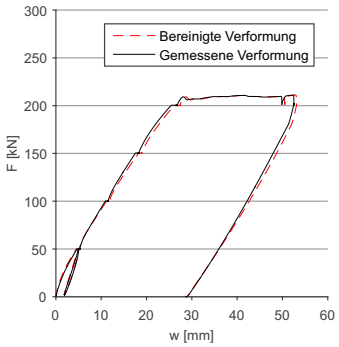

Dickenänderungen bei 50 kN
Dickenänderungen bei 100 kN
Dickenänderungen bei 150 kN
Dickenänderungen bei 200 kN
Dickenänderungen bei 250 kN
Dickenänderungen bei 300 kN
Dickenänderungen bei max. Kraft
Dickenänderungen Ende
Dickenänderung [mm]
[mm]

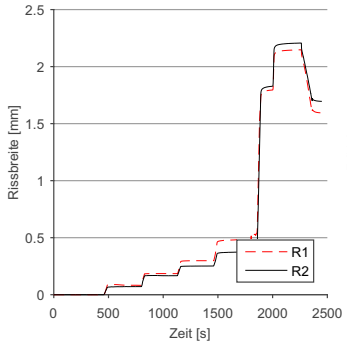
P15 / 3d

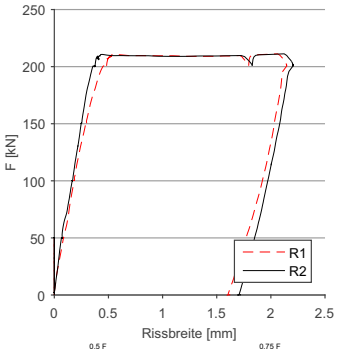
P15 / 5d

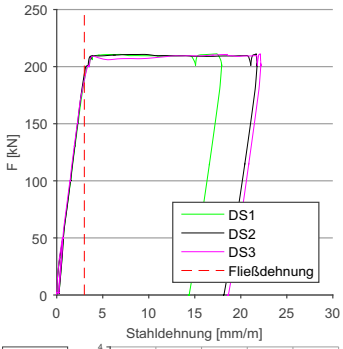

F [kN]
Zeit [s]

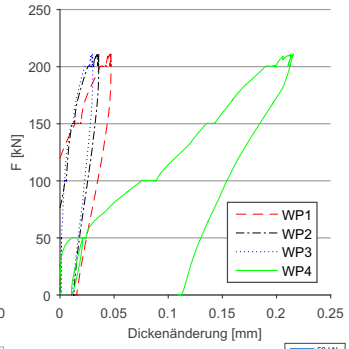

F [kN]
w [mm]

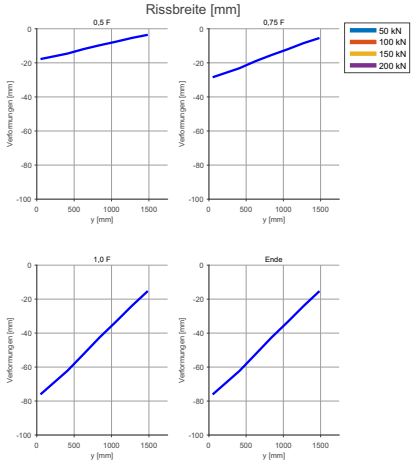

Bereinigte Verformung
Gemessene Verformung
F [kN]
w [mm]

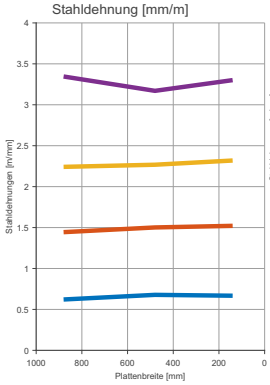

Rissbreite [mm]
R1
R2
Zeit [s]

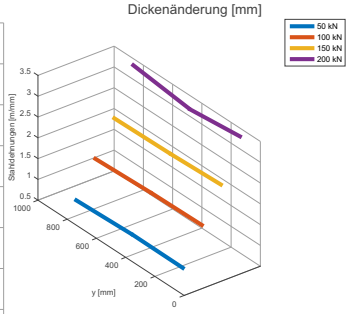

F [kN]
R1
R2
Rissbreite [mm]

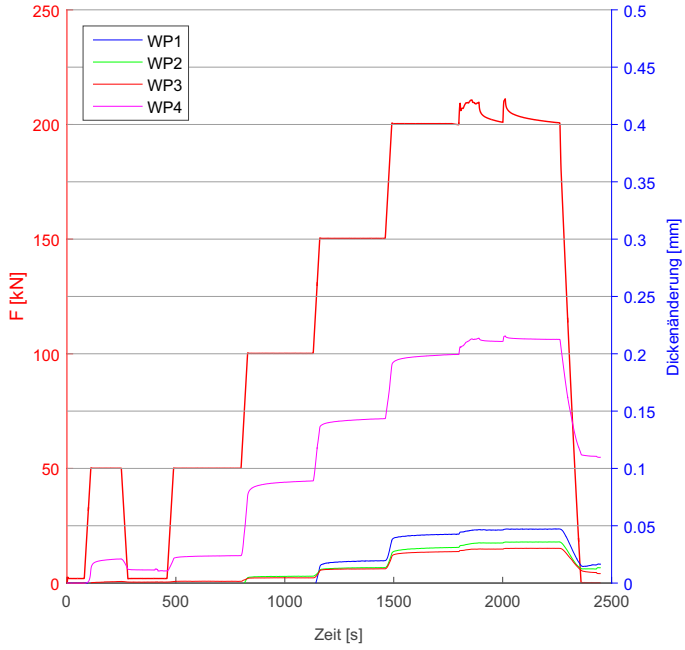

F [kN]
DS1
DS2
DS3
Fließdehnung
Stahldehnung [mm/m]

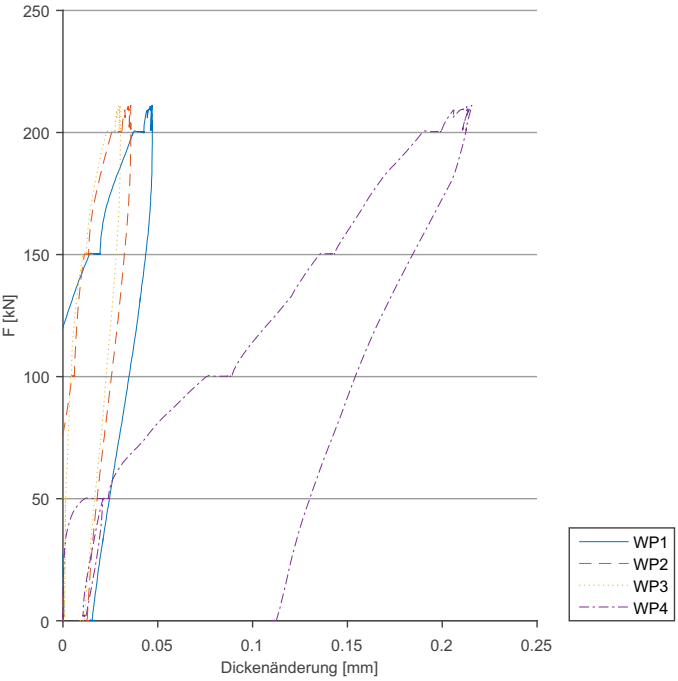

F [kN]
WP1
WP2
WP3
WP4
Dickenänderung [mm]

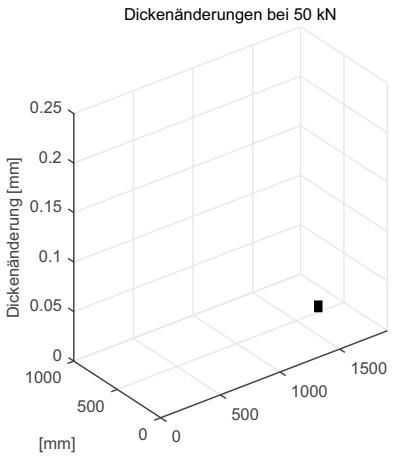

0,5 F
0,75 F
1,0 F
Ende
Verformungen [mm]
y [mm]
50 kN
100 kN
150 kN
200 kN

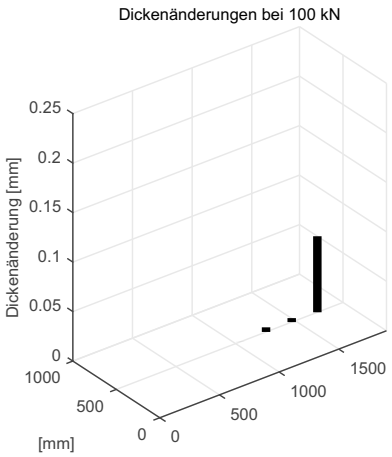

Stahldehnungen [m/mm]
Plattenbreite [mm]

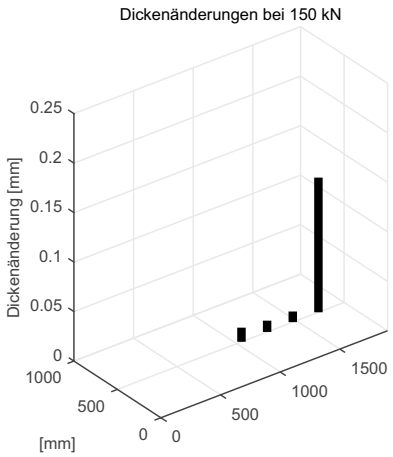

50 kN
100 kN
150 kN
200 kN
Stahldehnungen [m/mm]
y [mm]

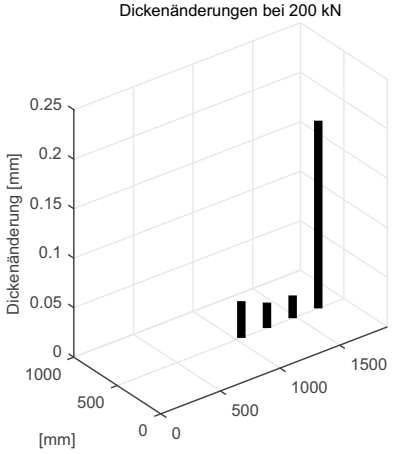

WP1
WP2
WP3
WP4
F [kN]
Dickenänderung [mm]
Zeit [s]

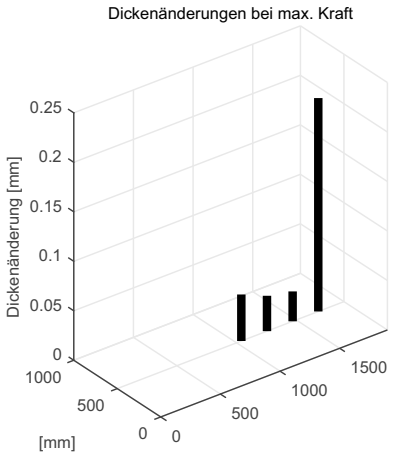

F [kN]
Dickenänderung [mm]
WP1
WP2
WP3
WP4

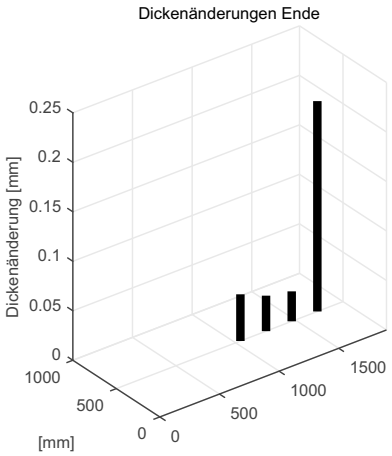

Dickenänderungen bei 50 kN
Dickenänderung [mm]
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
1000
500
0
[mm]
0
500
1000
1500


Dickenänderungen bei 100 kN
Dickenänderung [mm]
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
1000
500
0
[mm]
0
500
1000
1500


Dickenänderungen bei 150 kN
Dickenänderung [mm]
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
1000
500
0
[mm]
0
500
1000
1500

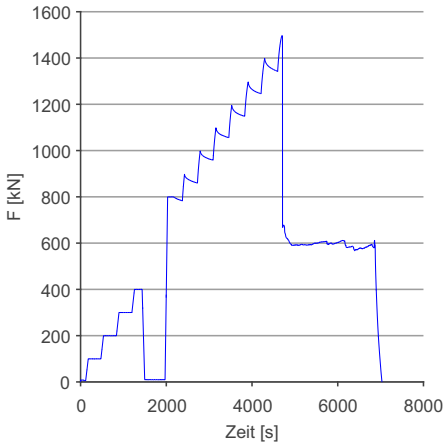

Dickenänderungen bei 200 kN
Dickenänderung [mm]
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
1000
500
0
[mm]
0
500
1000
1500


Dickenänderungen bei max. Kraft
Dickenänderung [mm]
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
1000
500
0
[mm]
0
500
1000
1500


Dickenänderungen Ende
Dickenänderung [mm]
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
1000
500
0
[mm]
0
500
1000
1500

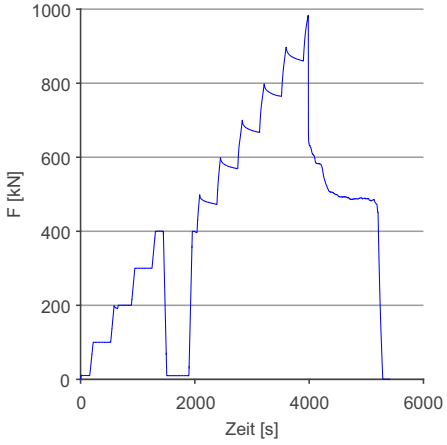
P15 / 5d

1d

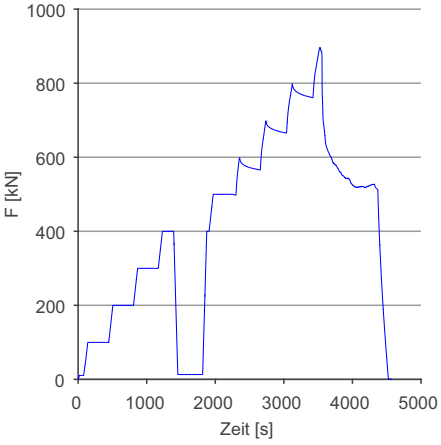


Kraft/Zeit

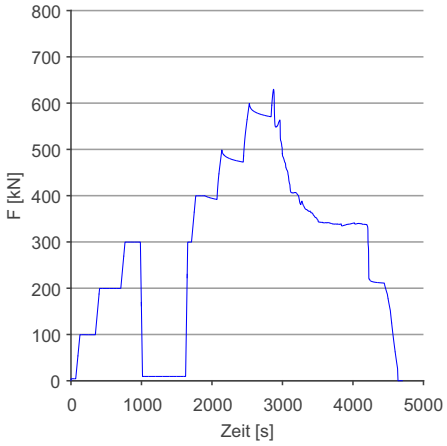
2d - 1



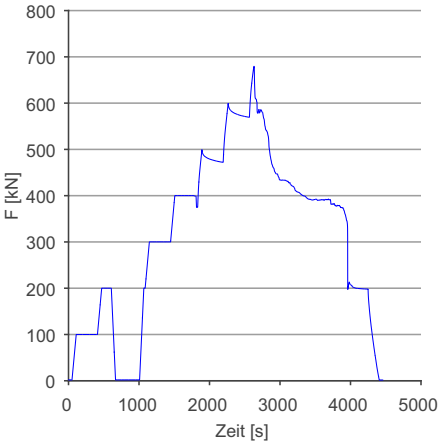
2d - 2



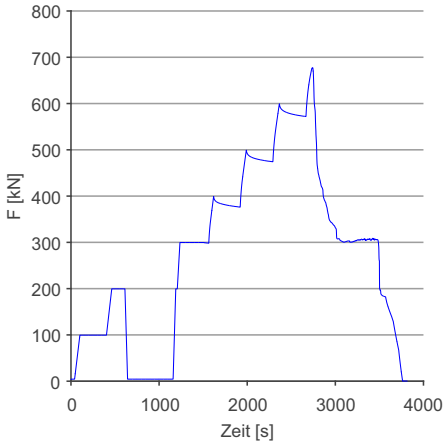
3d - 1



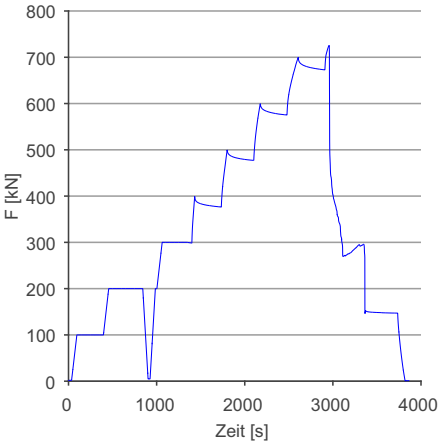
3d - 2



4d - 1

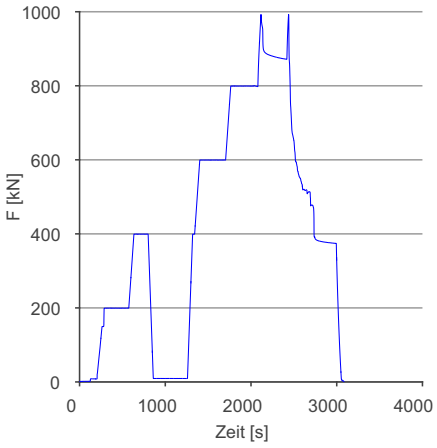


4d - 2

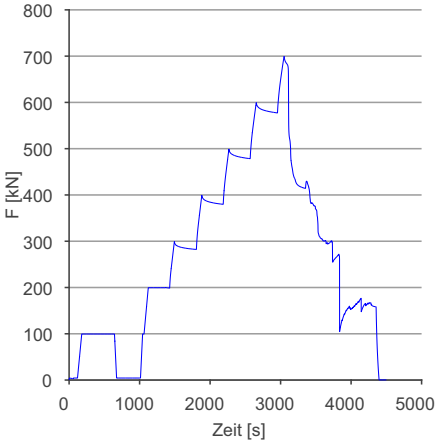


Kraft/Zeit

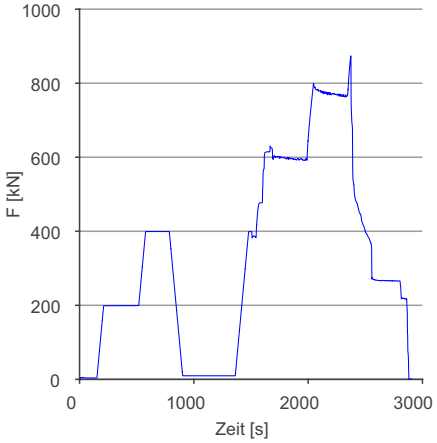
2x2d



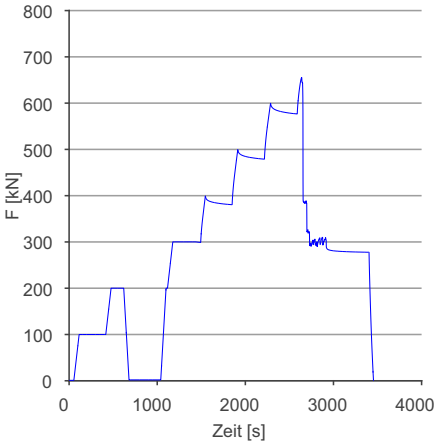
5d



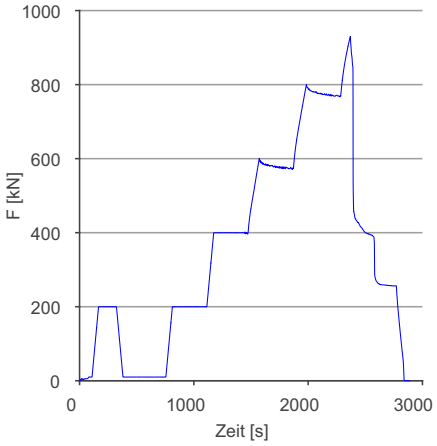
2x3d



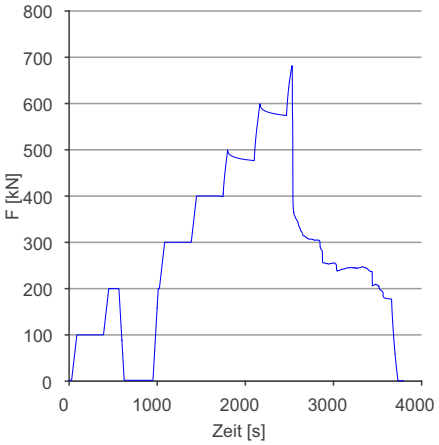
6d



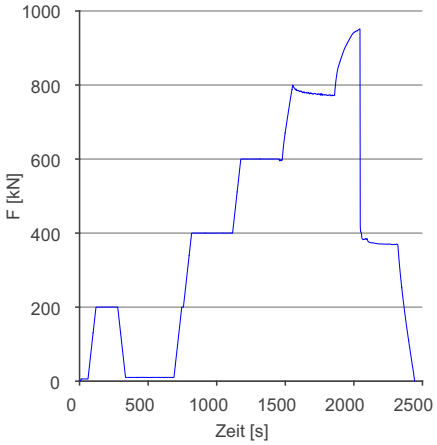
2x4d



4d - 3

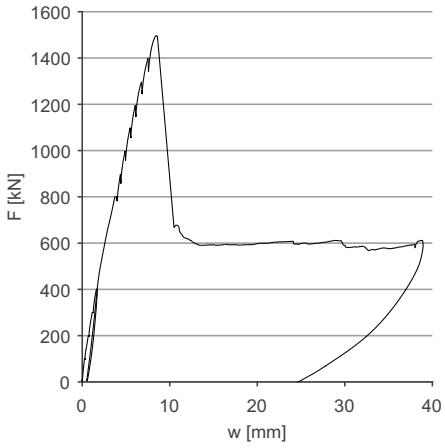


2x5d

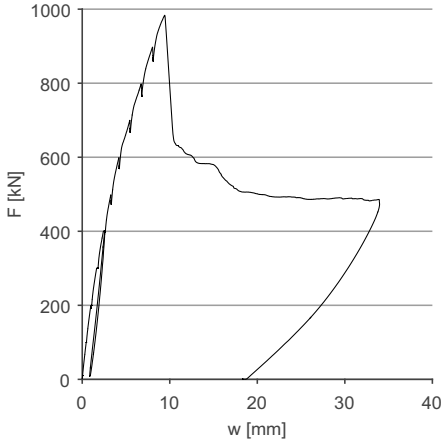


Kraft/Verformung

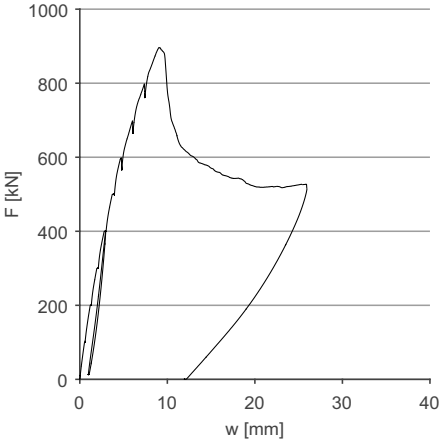
1d



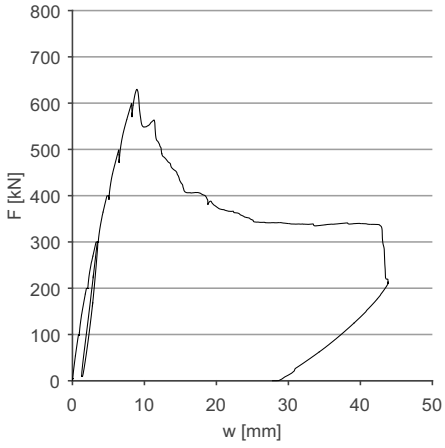
2d - 1



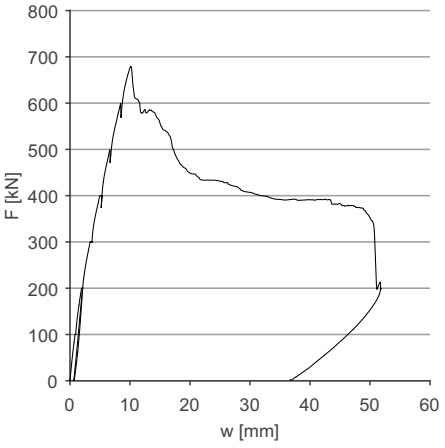
2d - 2



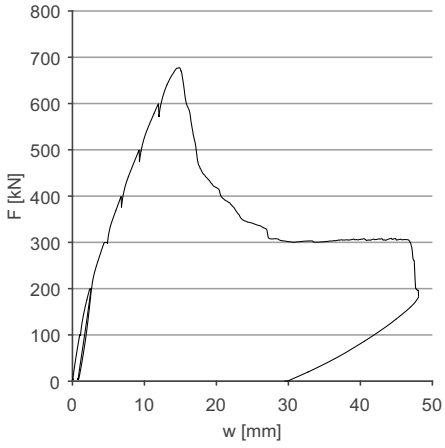
3d - 1



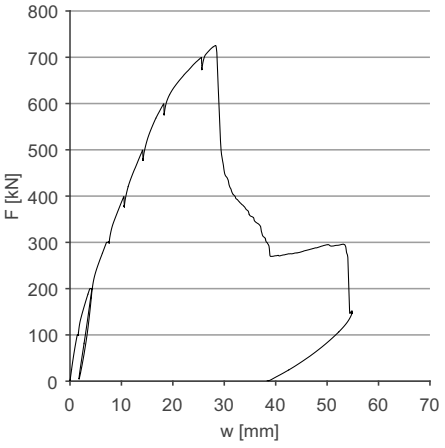
3d - 2



4d - 1

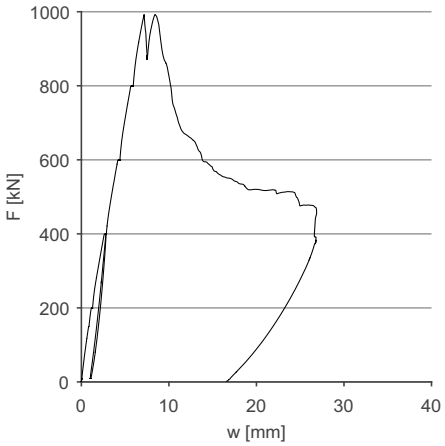


4d - 2

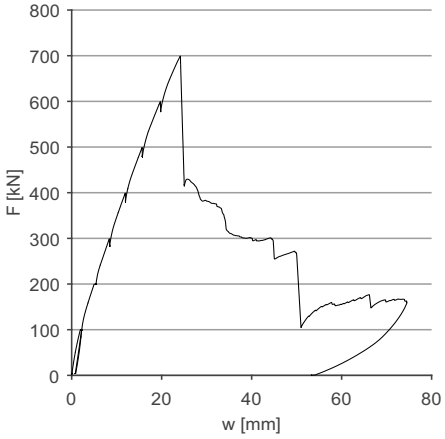


Kraft/Verformung

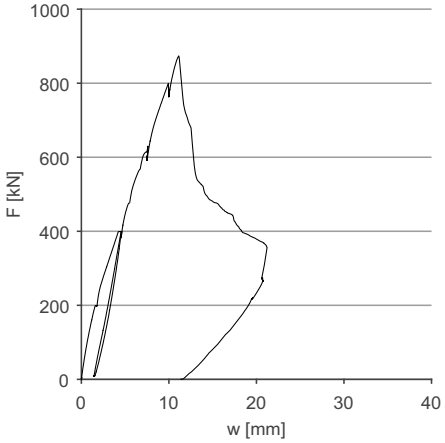
2x2d



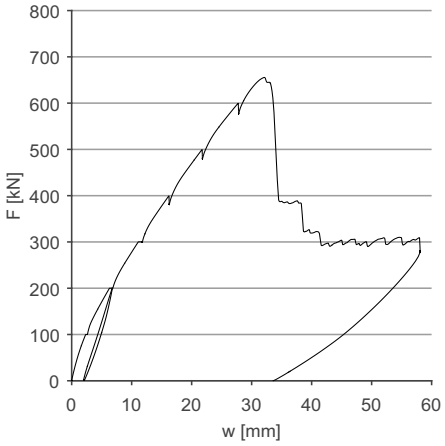
5d



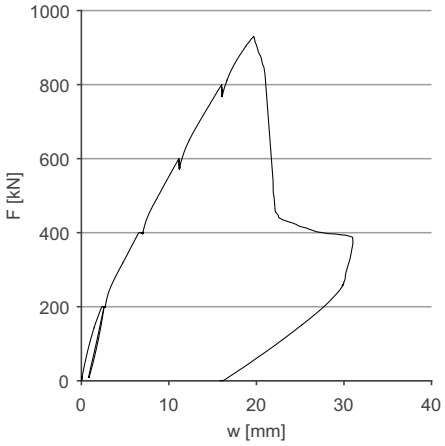
2x3d



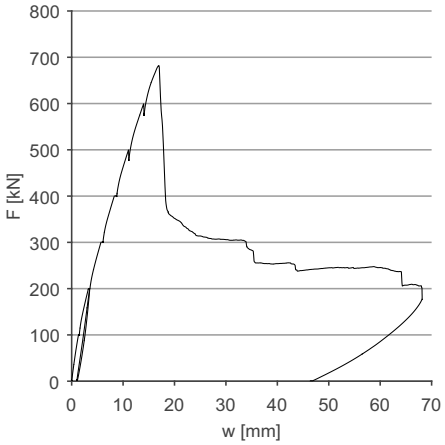
6d



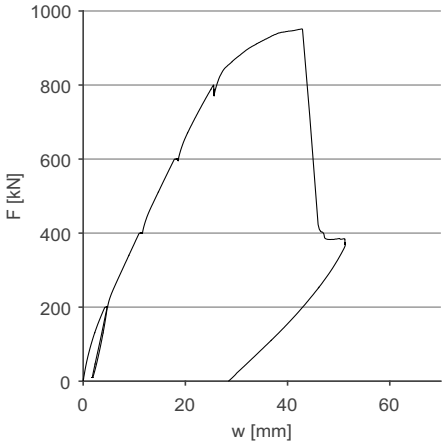
2x4d



4d - 3

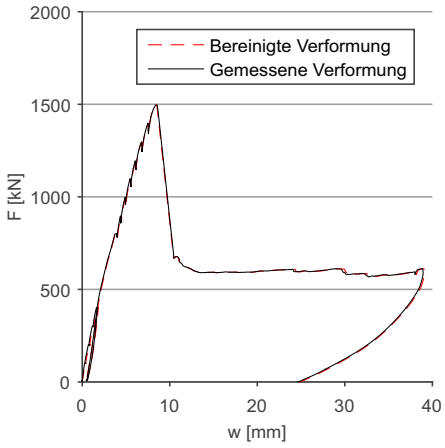


2x5d

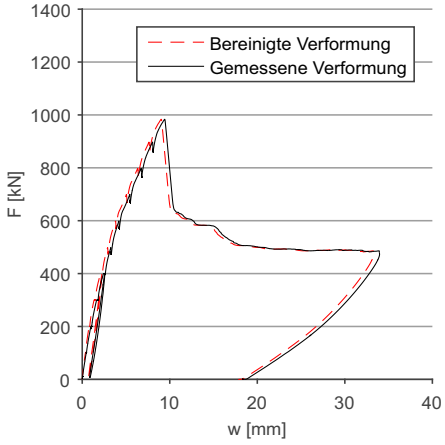


Kraft/Verformung bereinigt

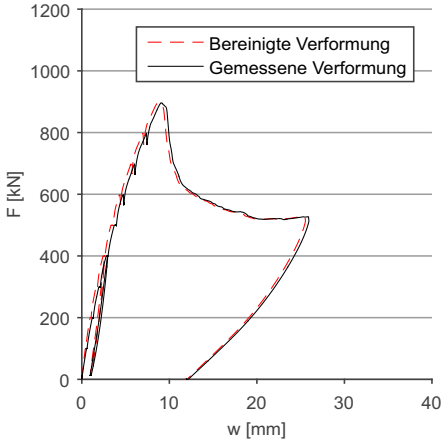
1d



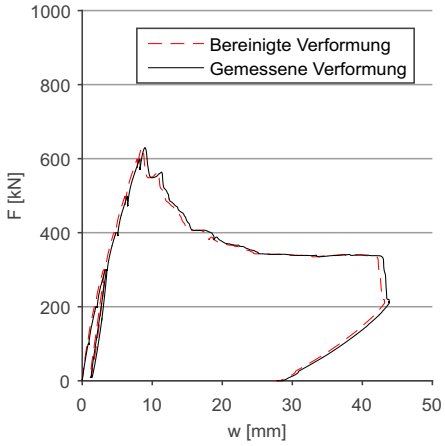
2d - 1



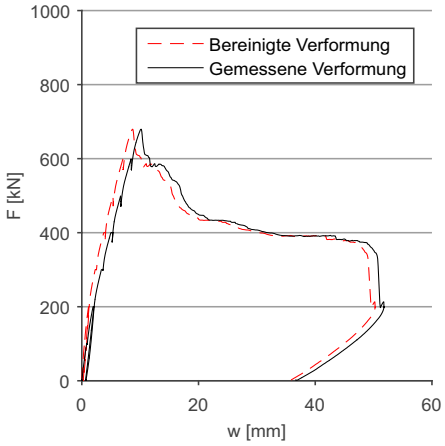
2d - 2



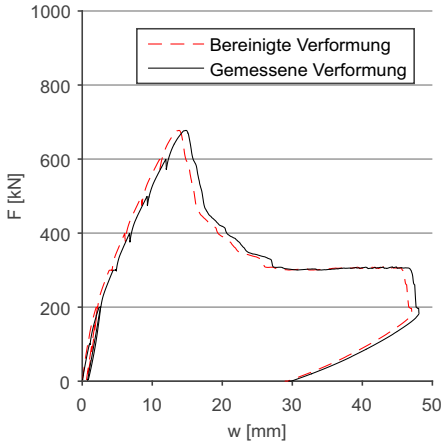
3d - 1



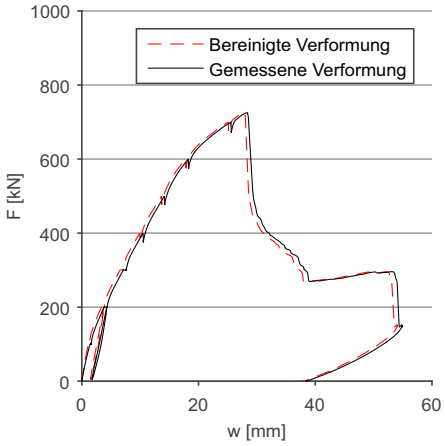
3d - 2



4d - 1

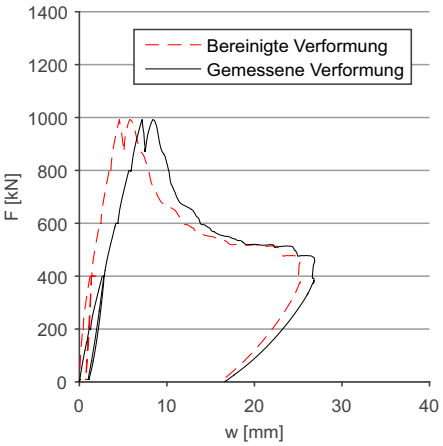


4d - 2

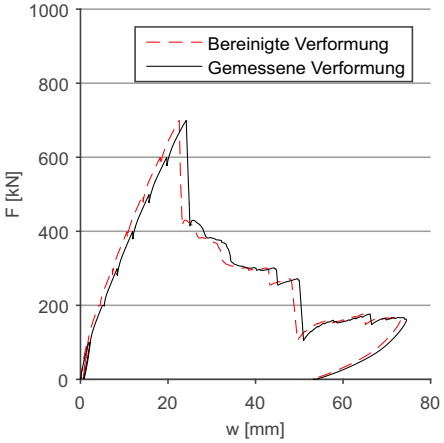


Kraft/Verformung bereinigt

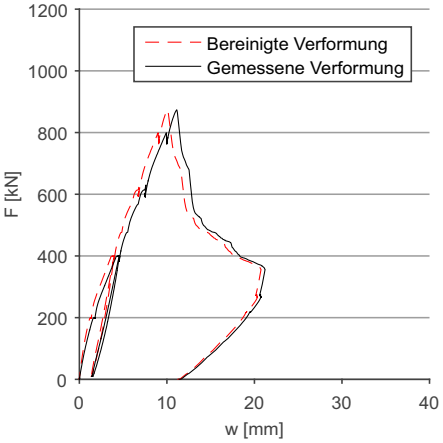
2x2d



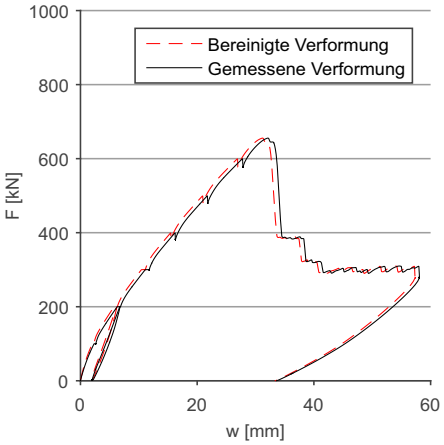
5d



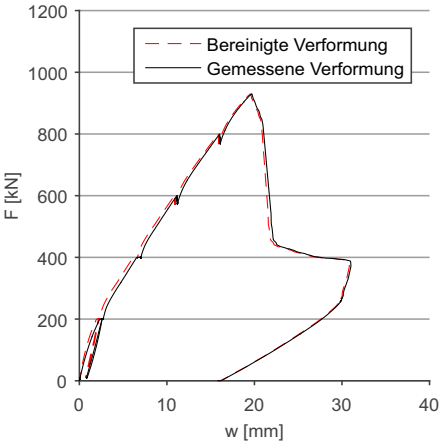
2x3d



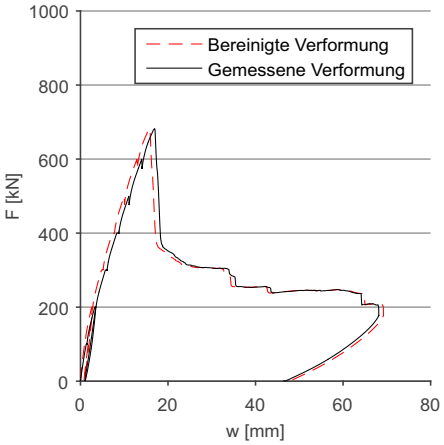
6d



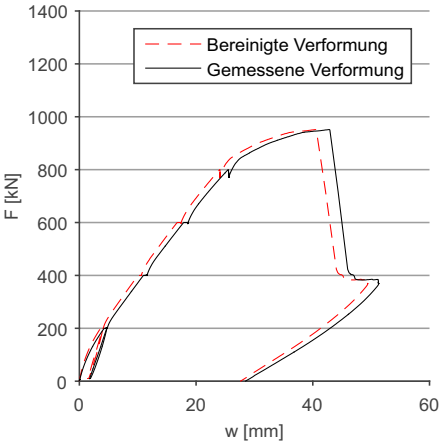
2x4d



4d - 3

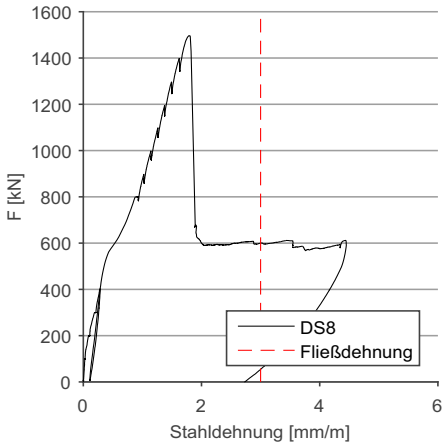


2x5d

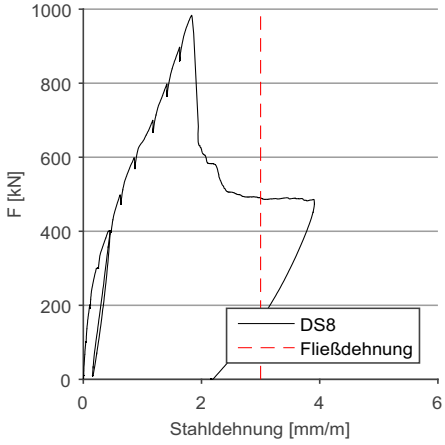


Kraft/Stahldehnung Querrichtung

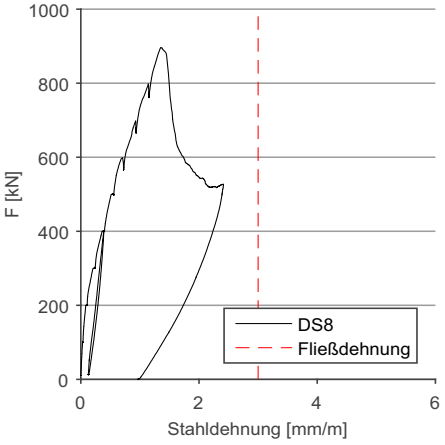
1d



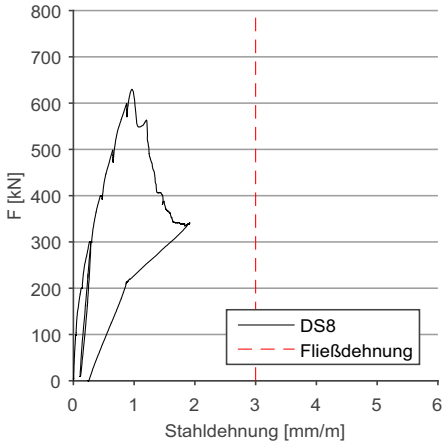
2d - 1



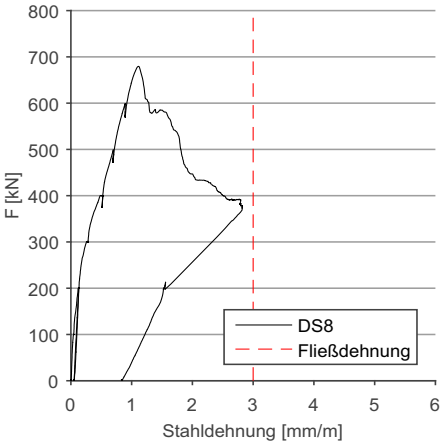
2d - 2



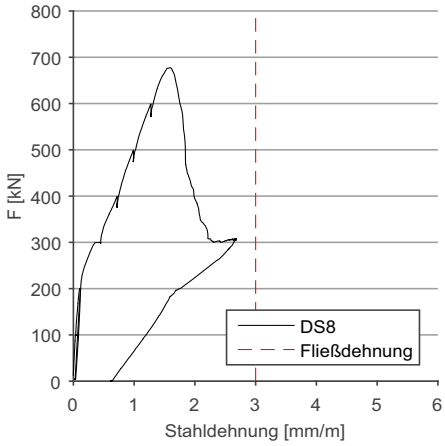
3d - 1



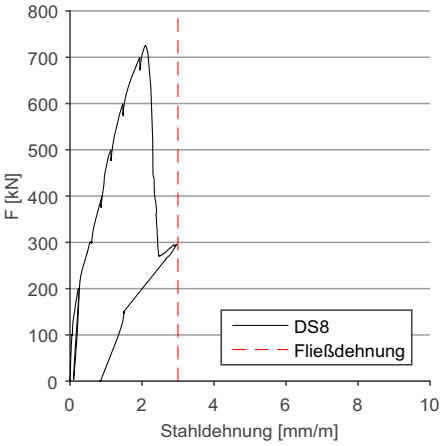
3d - 2



4d - 1

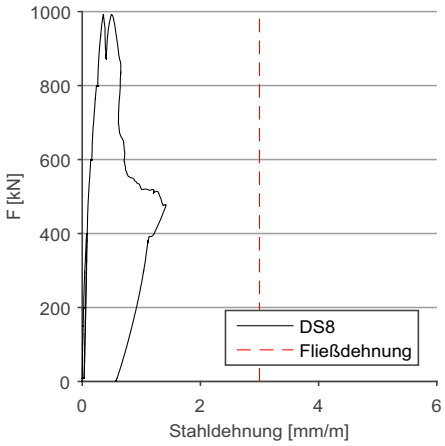


4d - 2

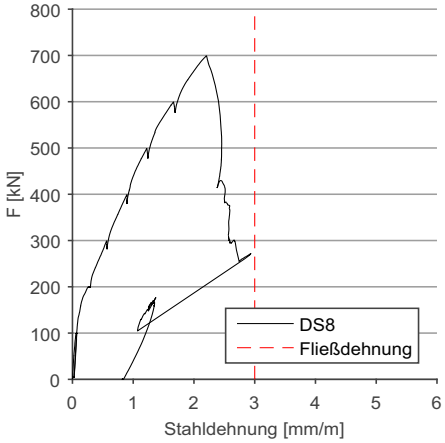


Kraft/Stahldehnung Querrichtung

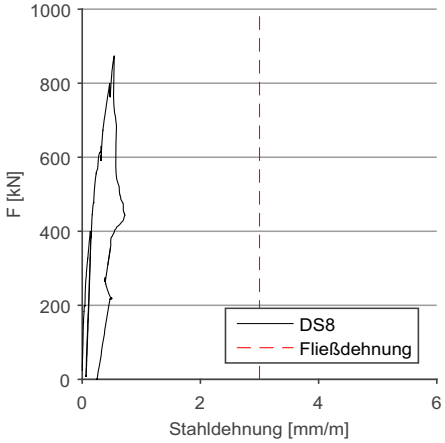
2x2d



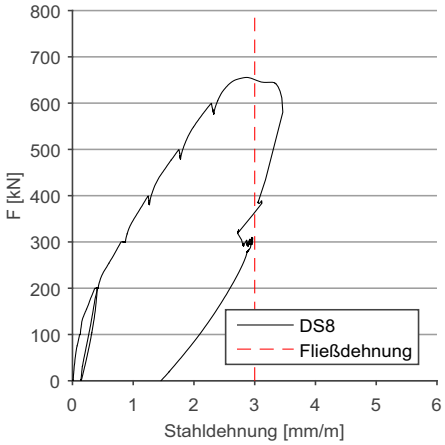
5d



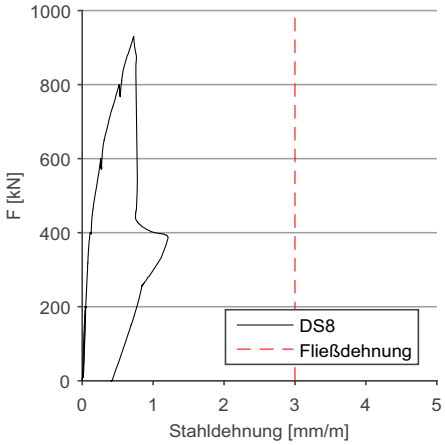
2x3d



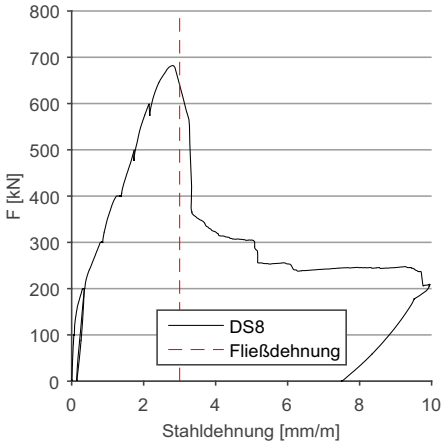
6d



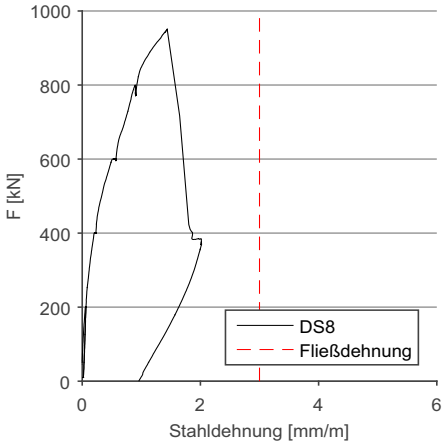
2x4d



4d - 3

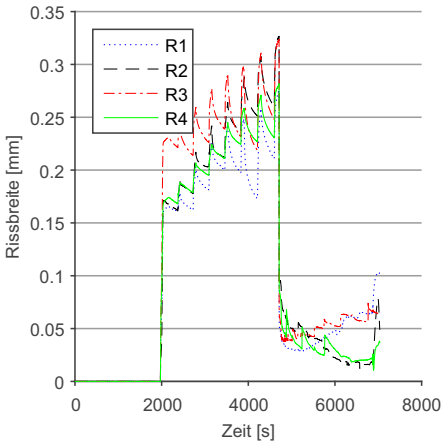


2x5d

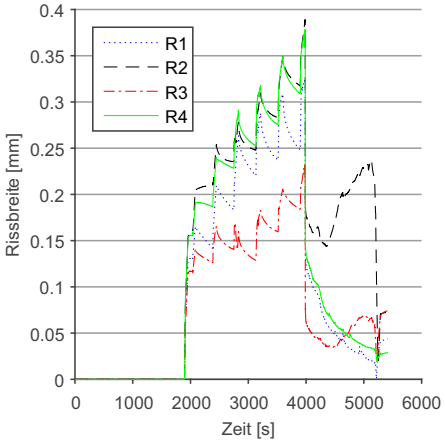


Rissbreite/Zeit

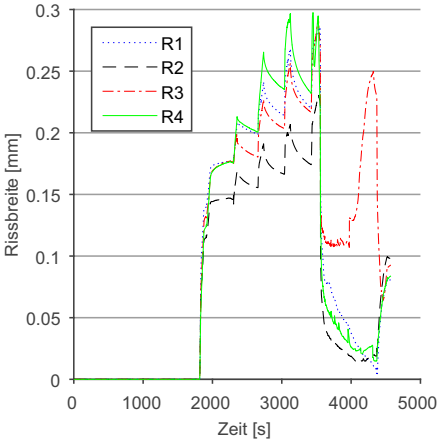
1d



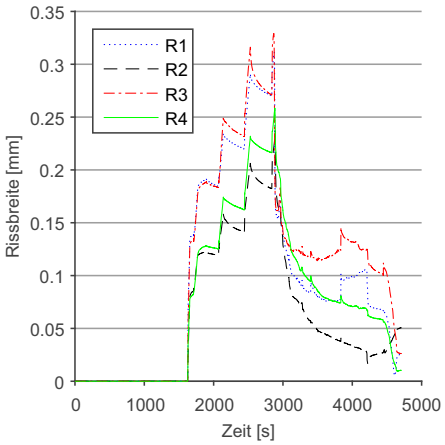
2d - 1



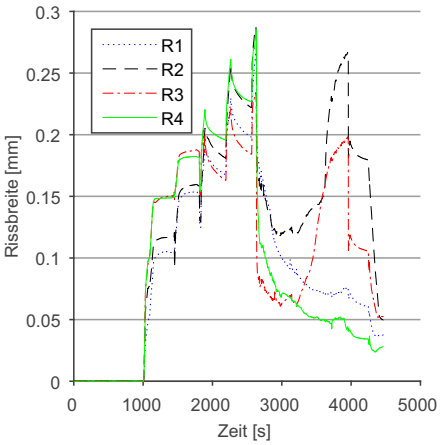
2d - 2



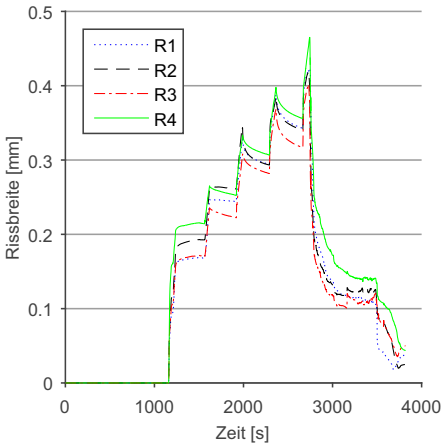
3d - 1



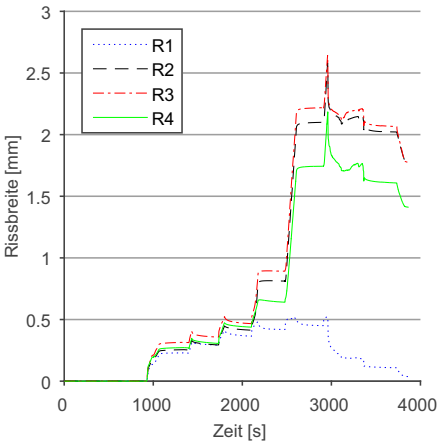
3d - 2



4d - 1

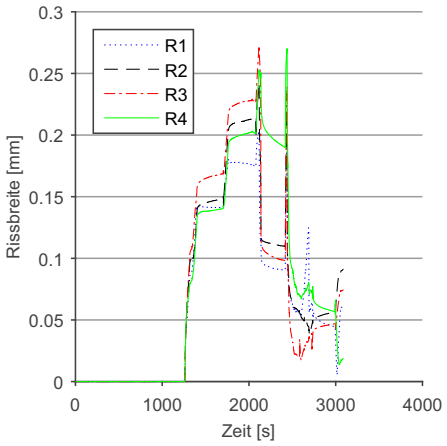


4d - 2

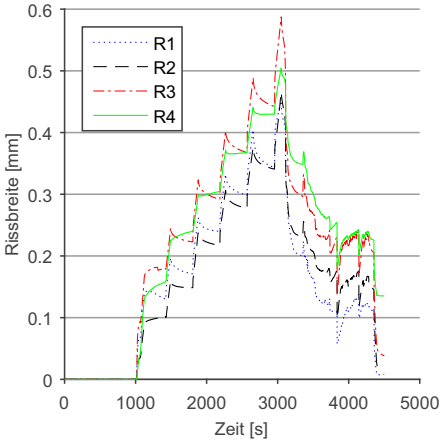


Rissbreite/Zeit

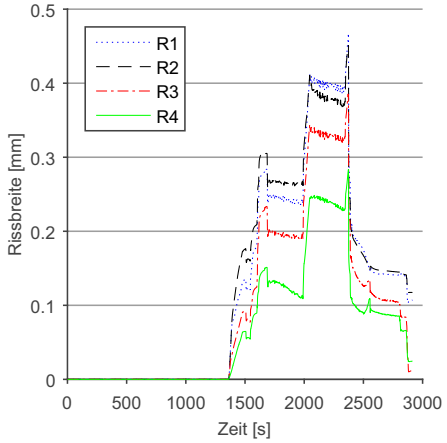
2x2d



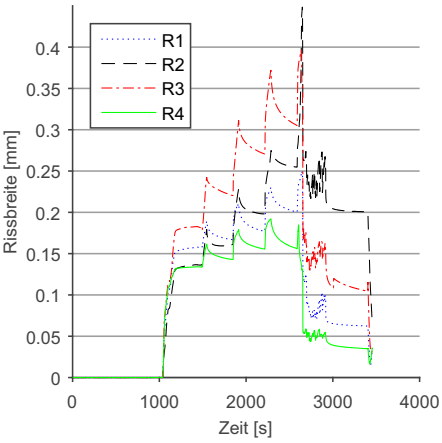
5d



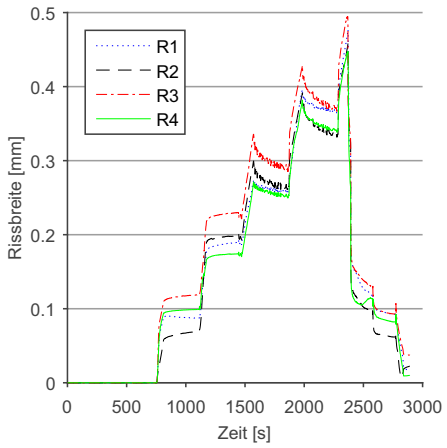
2x3d



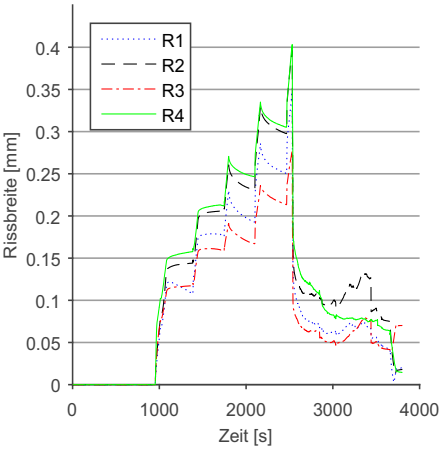
6d



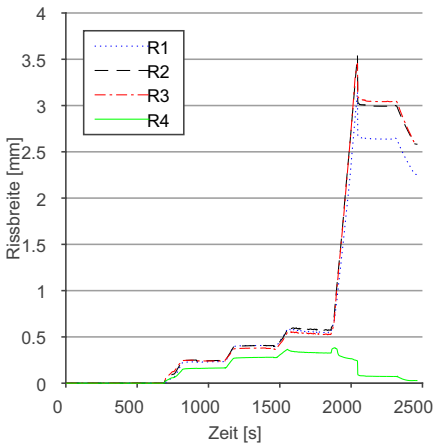
2x4d



4d - 3

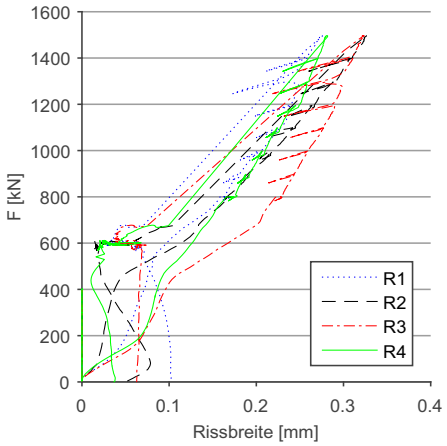


2x5d

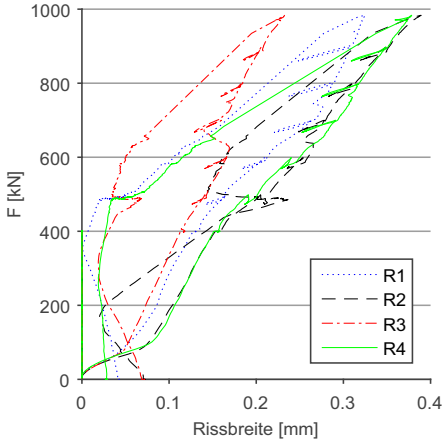


Kraft/Rissbreite

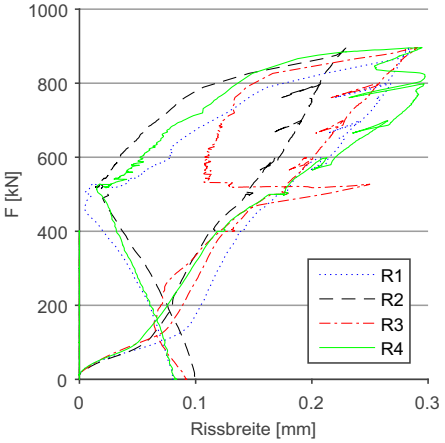
1d



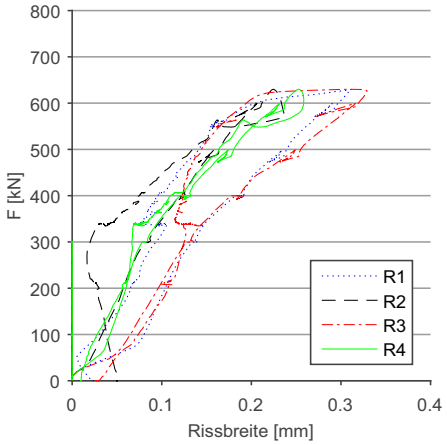
2d - 1



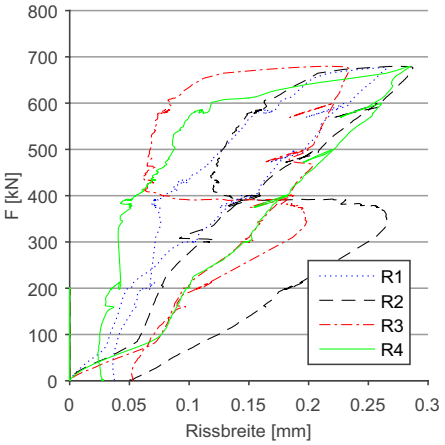
2d - 2



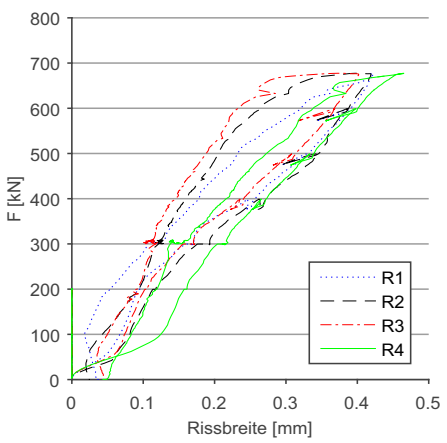
3d - 1



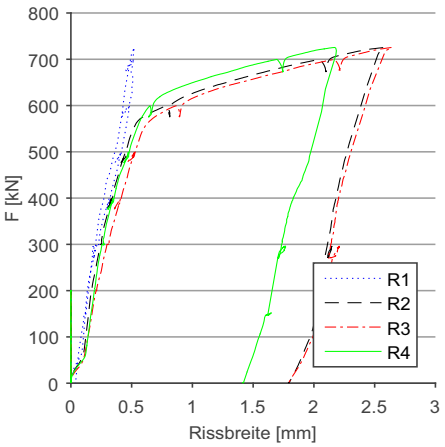
3d - 2



4d - 1

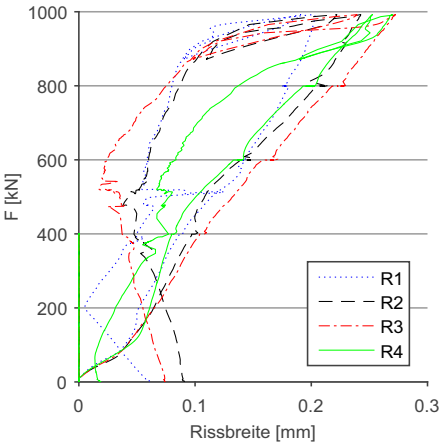


4d - 2

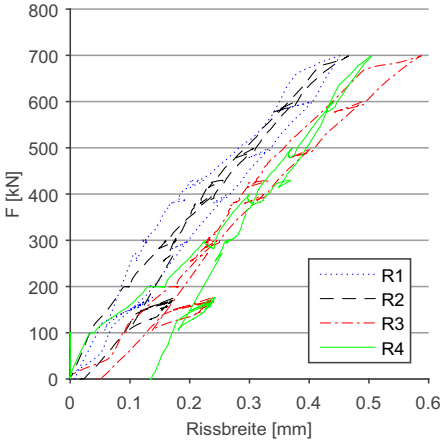


Kraft/Rissbreite

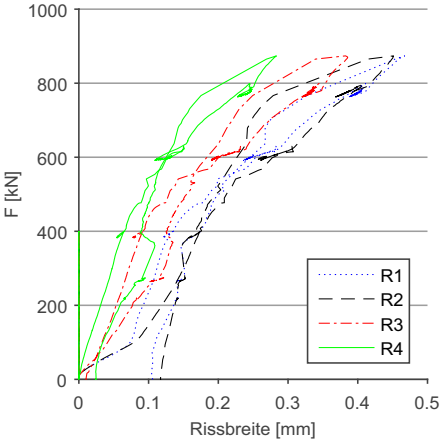
2x2d



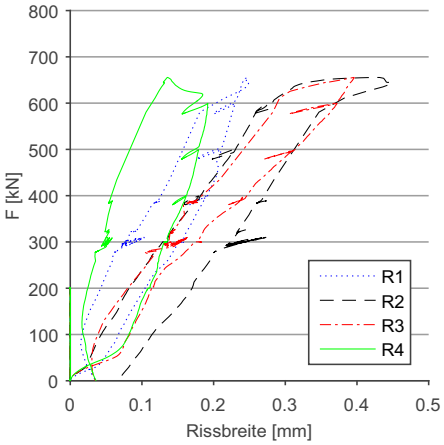
5d



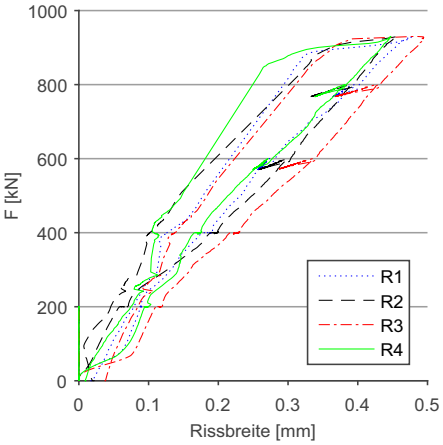
2x3d



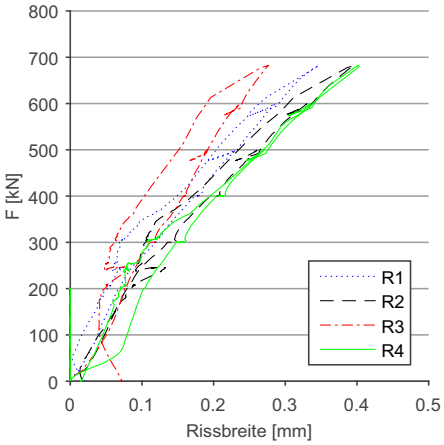
6d



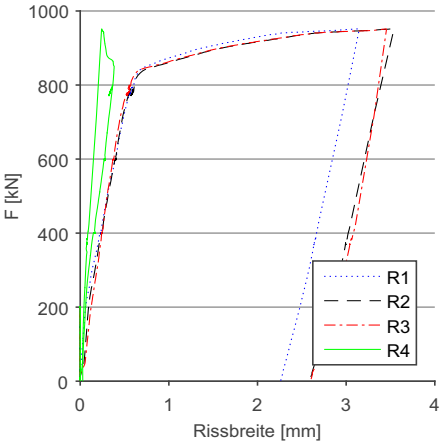
2x4d



4d - 3

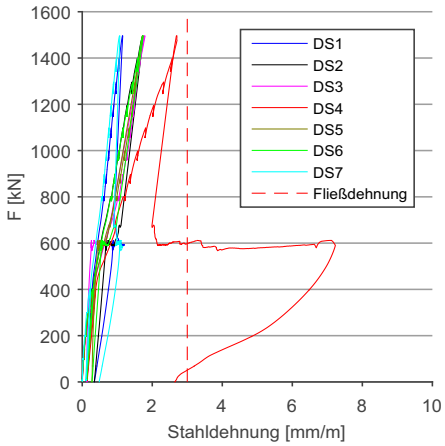


2x5d

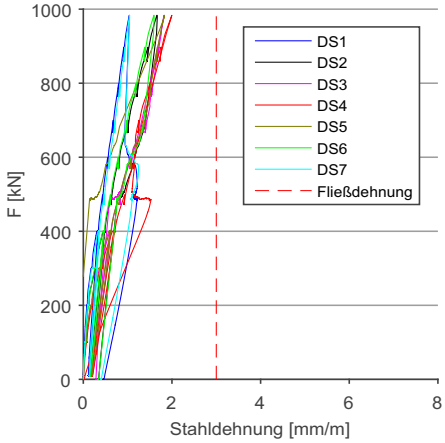


Kraft/Stahldehnung

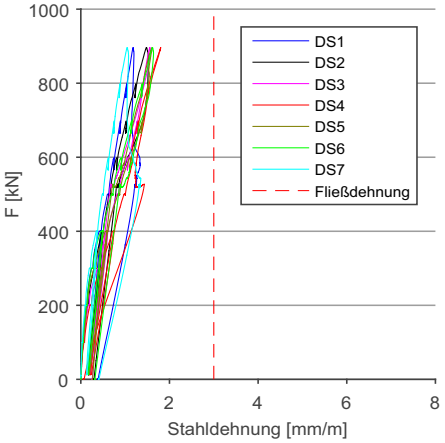
1d



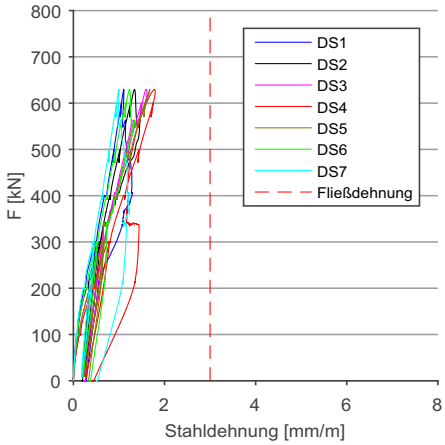
2d - 1



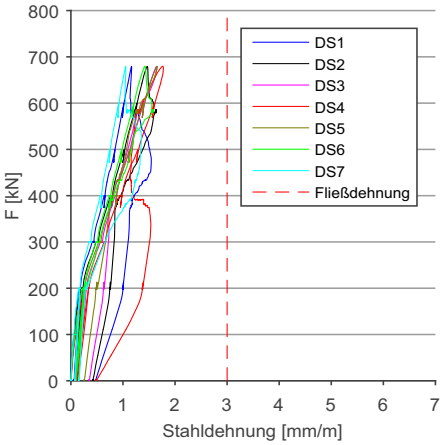
2d - 2



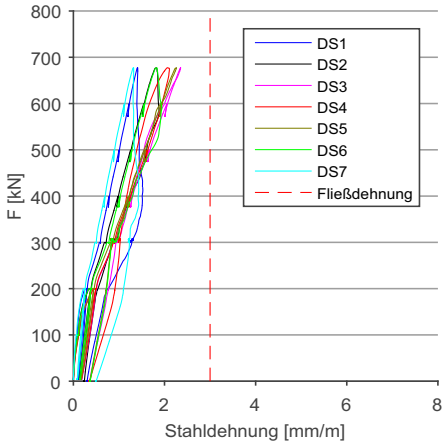
3d - 1



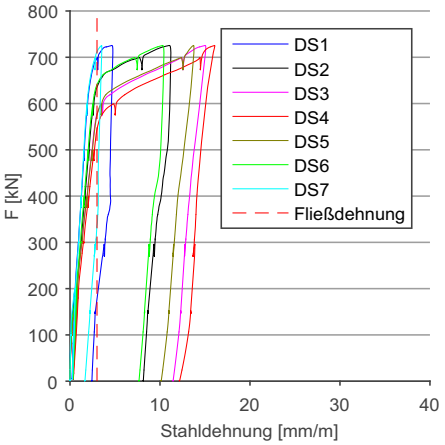
3d - 2



4d - 1

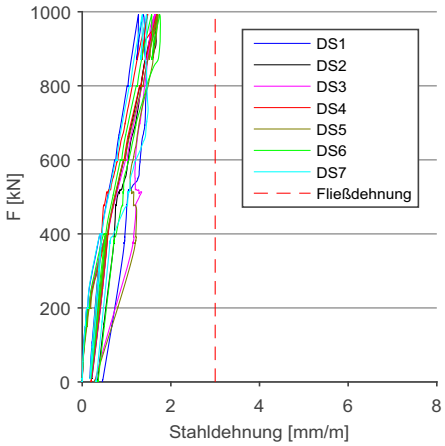


4d - 2

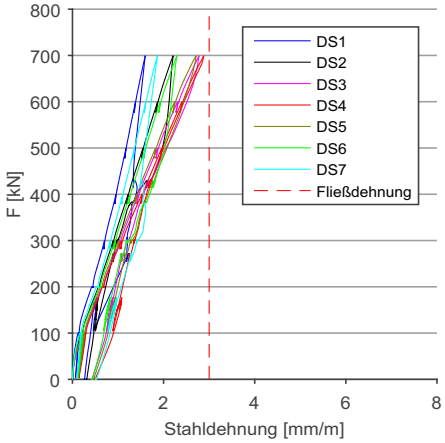


Kraft/Stahldehnung

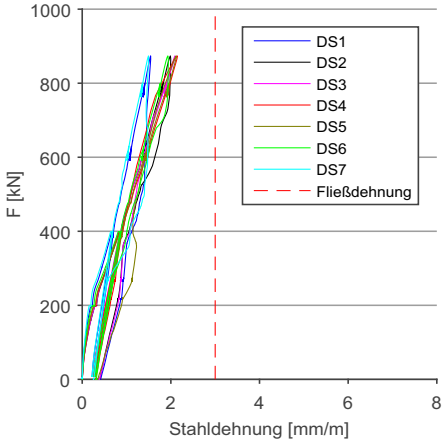
2x2d



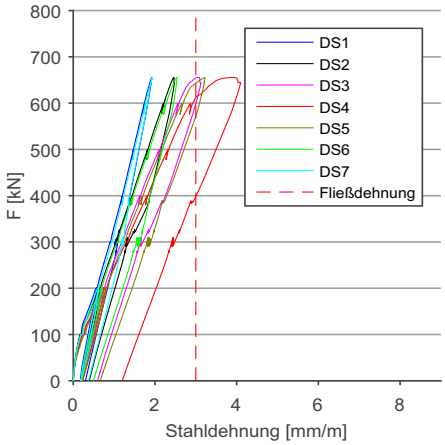
5d



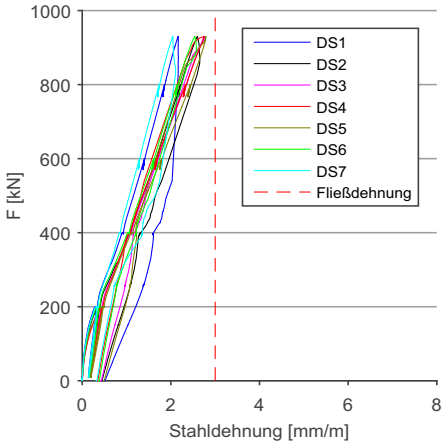
2x3d



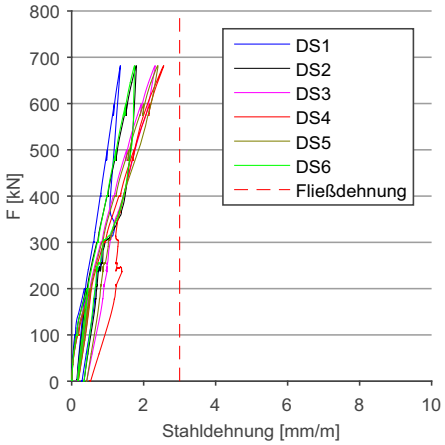
6d



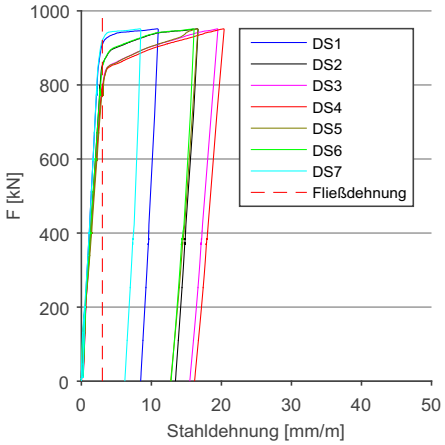
2x4d



4d - 3

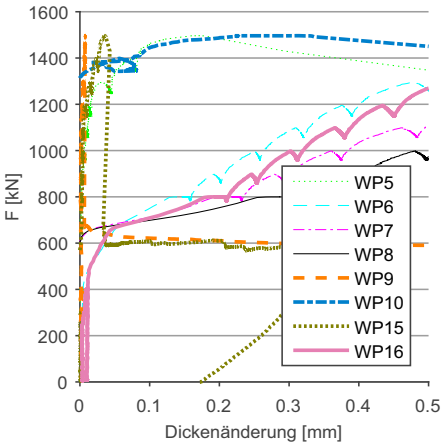


2x5d

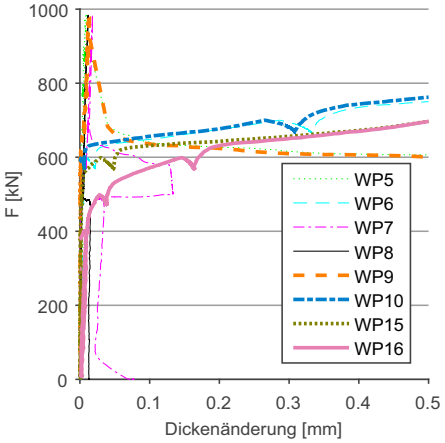


Kraft/Dickenänderung

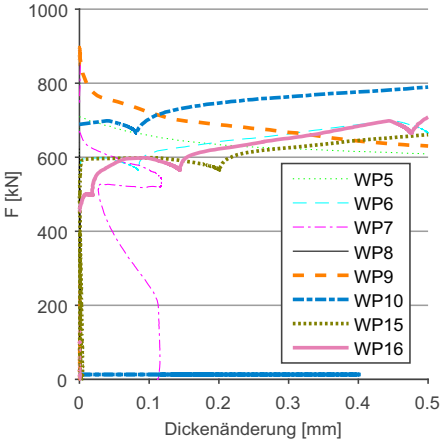
1d



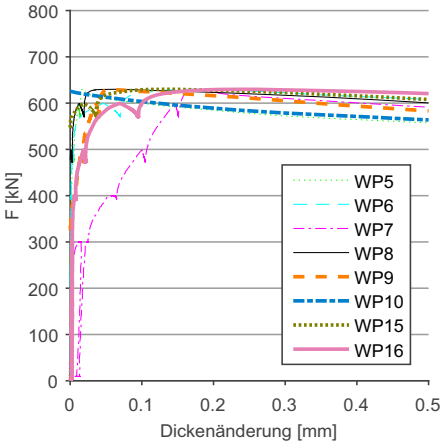
2d - 1



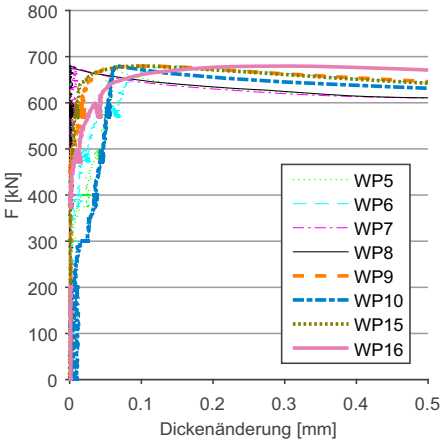
2d - 2



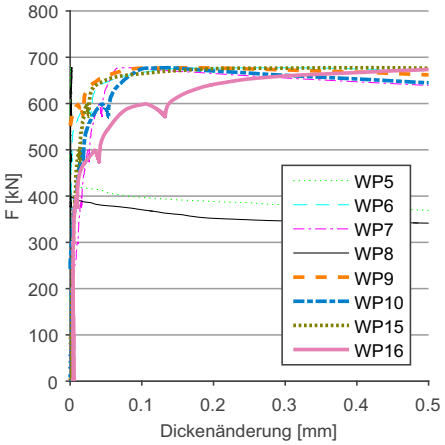
3d - 1



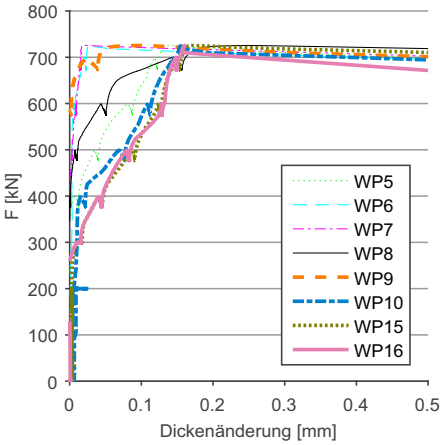
3d - 2



4d - 1

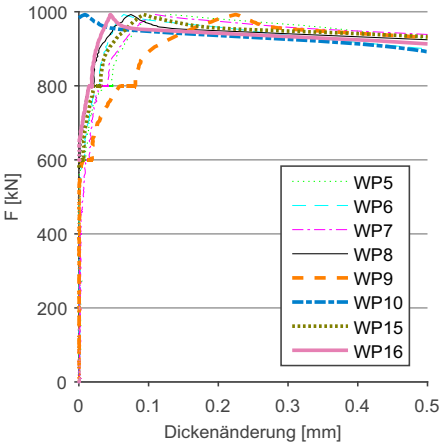


4d - 2

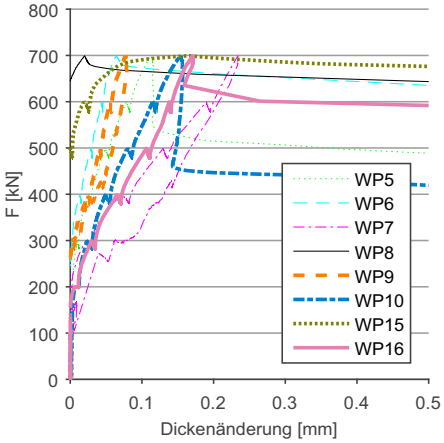


Kraft/Dickenänderung

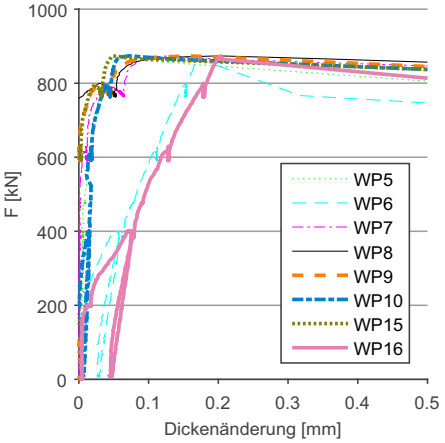
2x2d



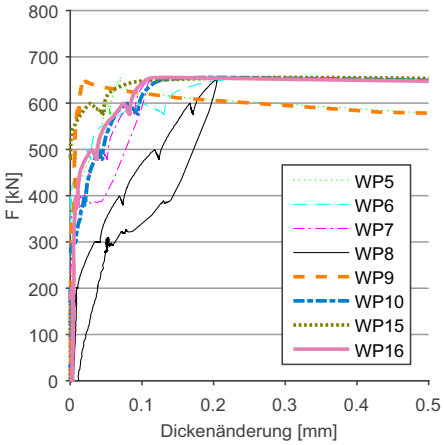
5d



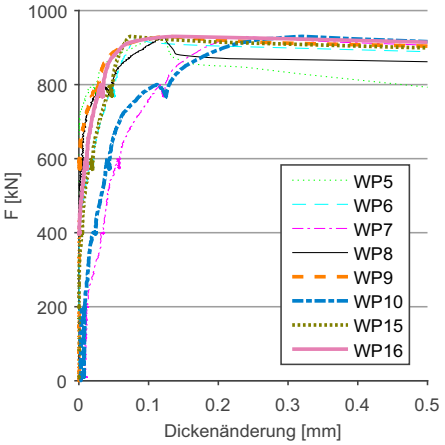
2x3d



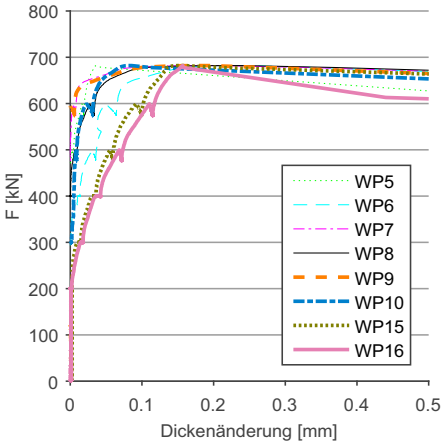
6d



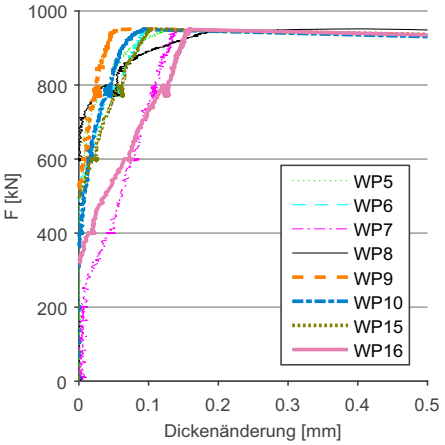
2x4d



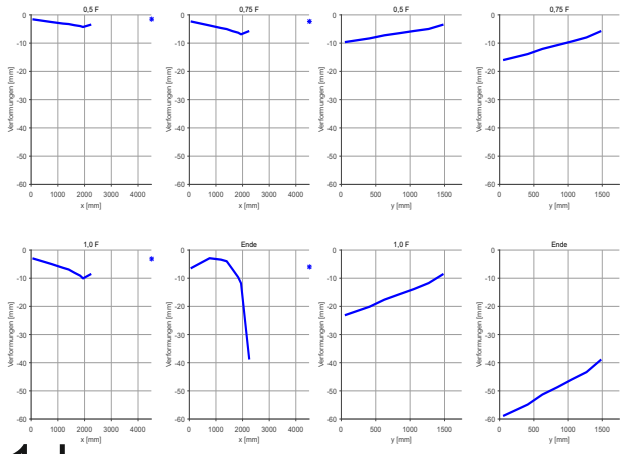
4d - 3



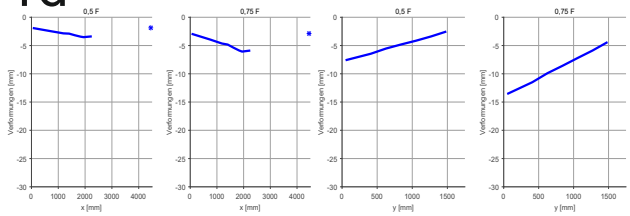
2x5d

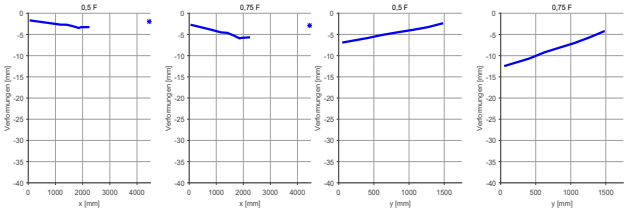


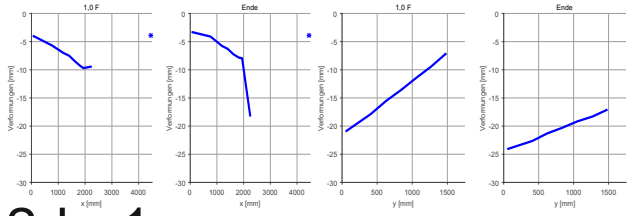
Verformungen



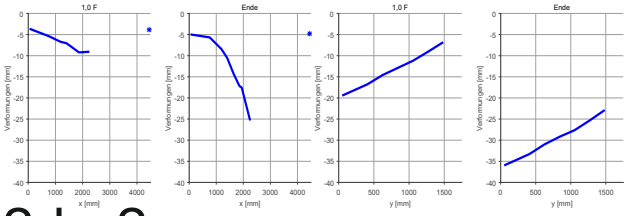
1d



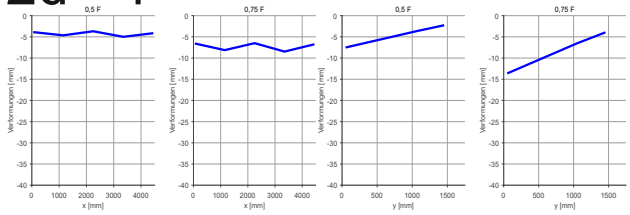


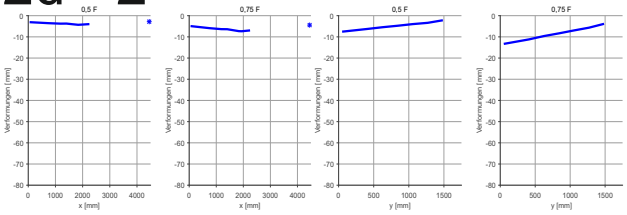


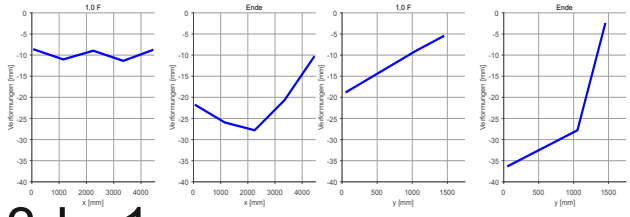
2d - 1



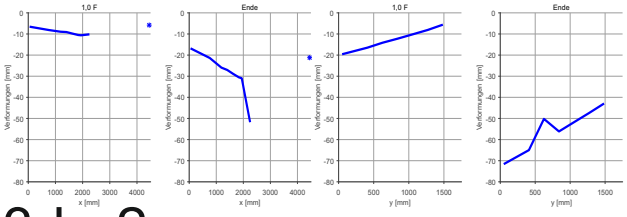
2d - 2



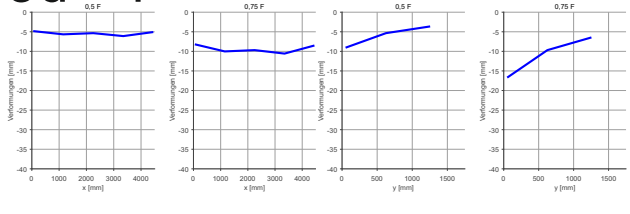


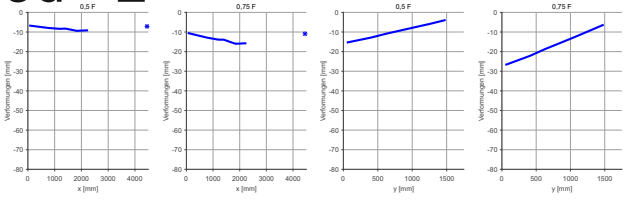


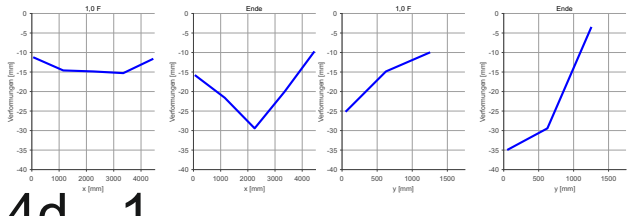
3d - 1



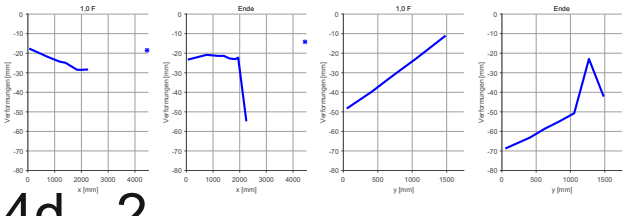
3d - 2





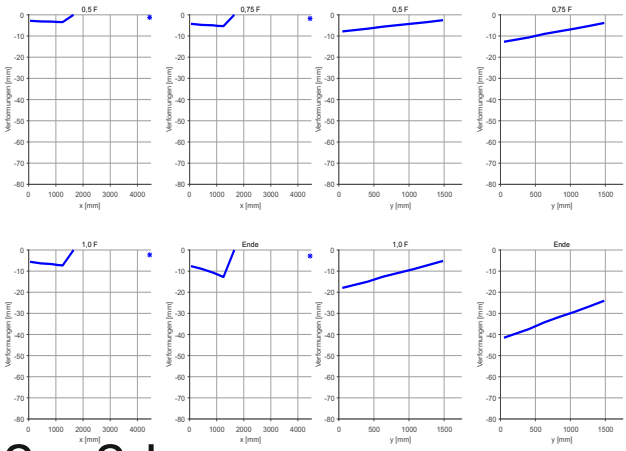


4d - 1

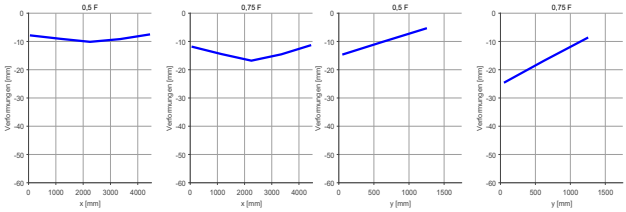


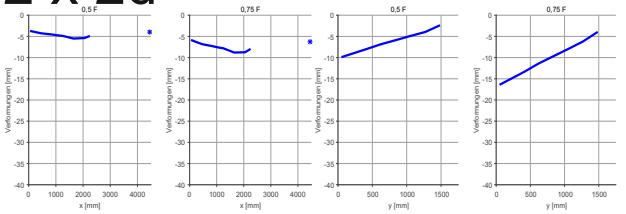
4d - 2

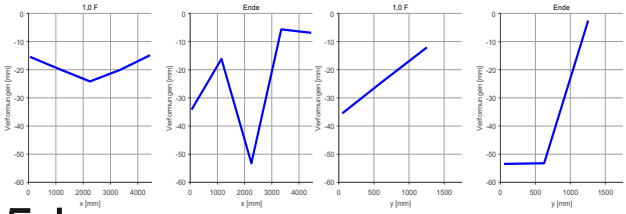
Verformungen



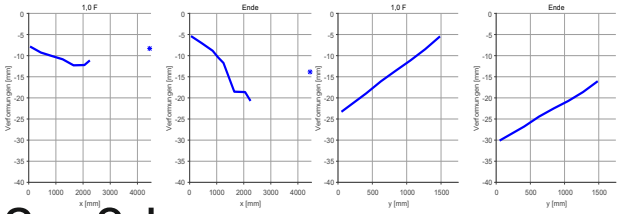
2 x 2d



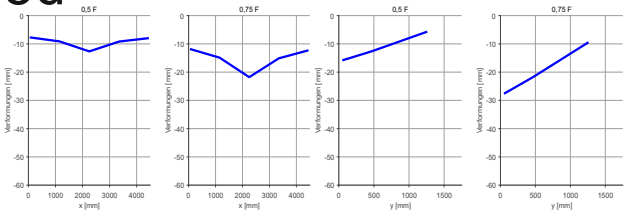


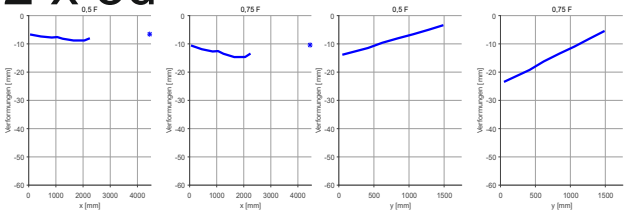


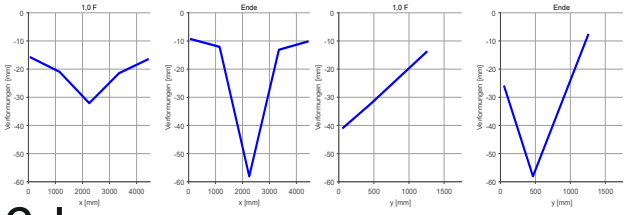
5d



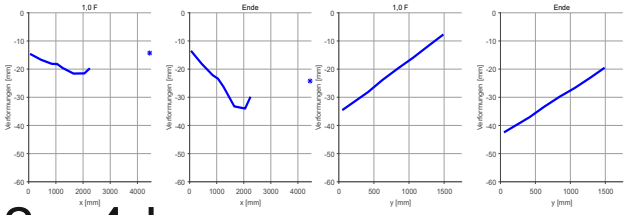
2 x 3d



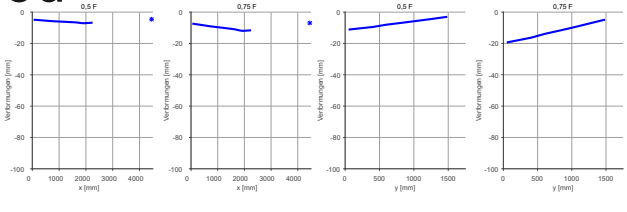


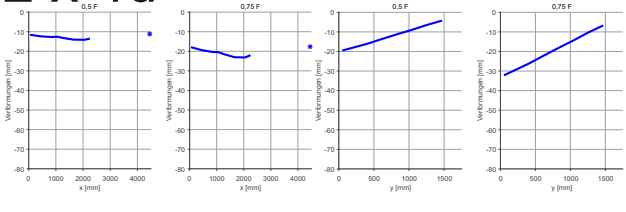


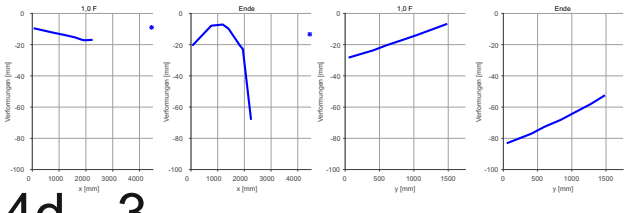
6d



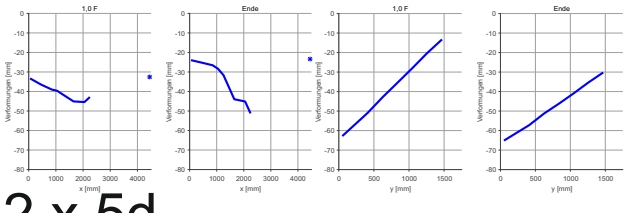
2 x 4d







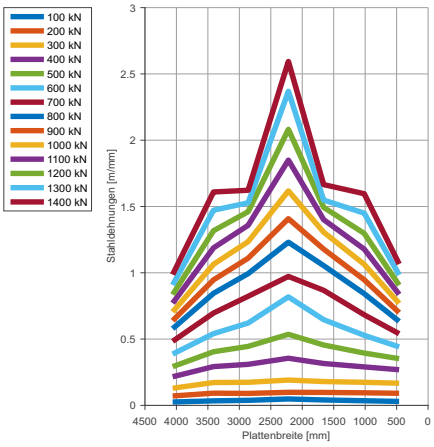
4d - 3



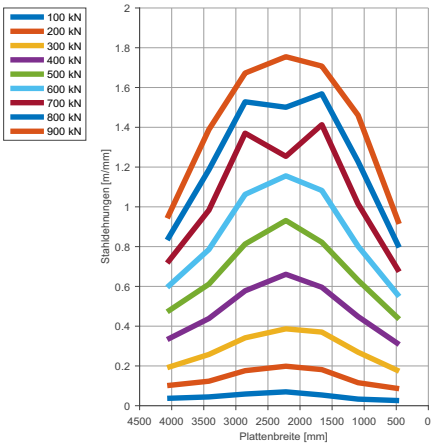
2 x 5d

Stahldehnungen je Laststufe

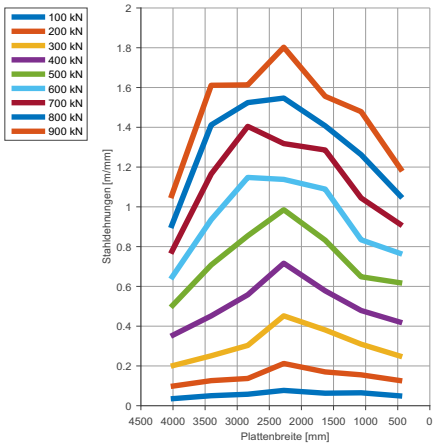
1d



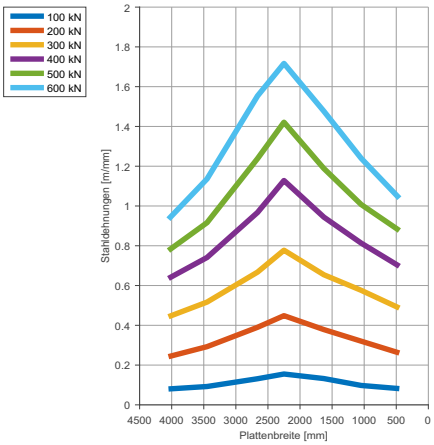
2d - 1



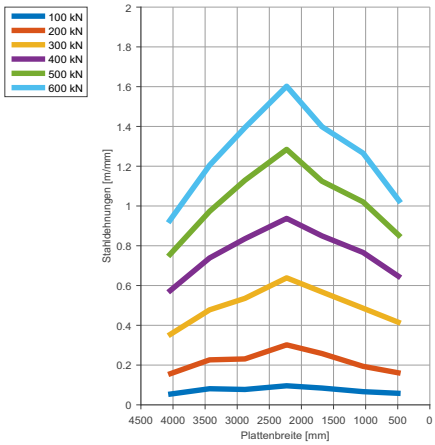
2d - 2



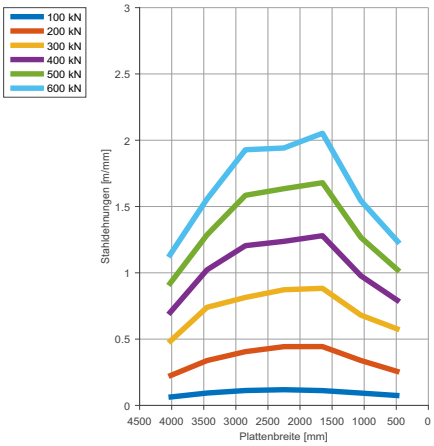
3d - 1



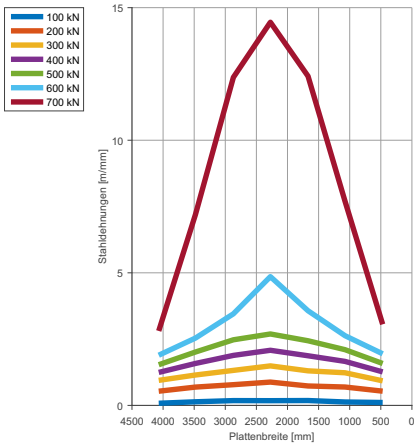
3d - 2



4d - 1

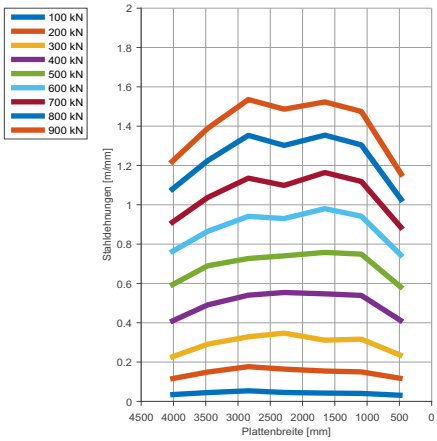


4d - 2

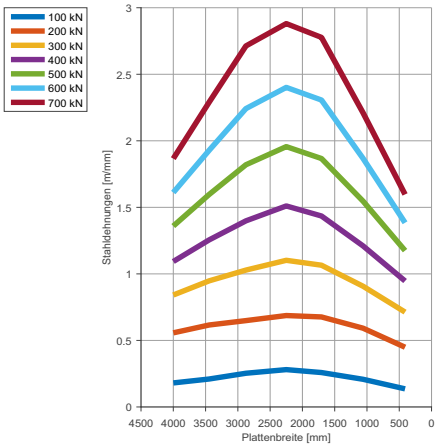


Stahldehnungen je Laststufe

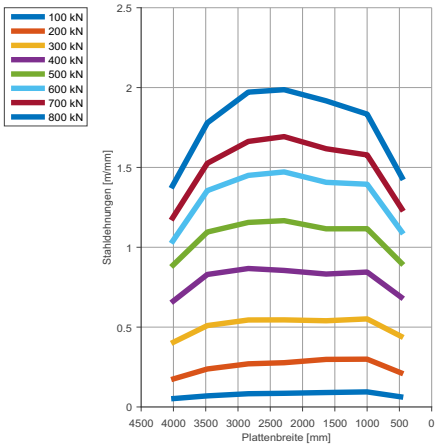
2x2d



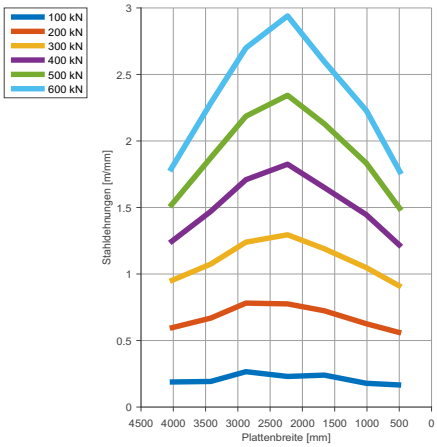
5d



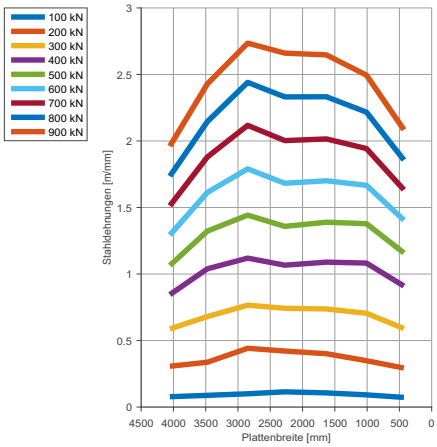
2x3d



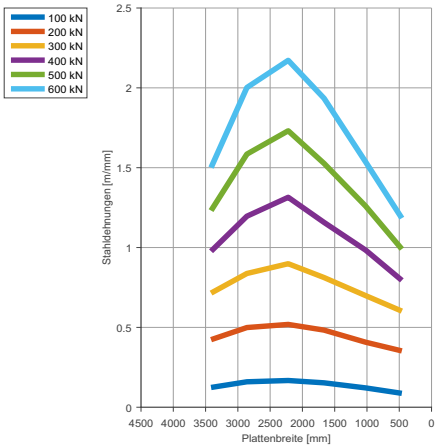
6d



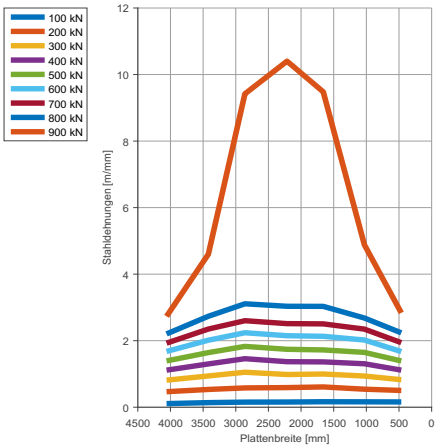
2x4d



4d - 3

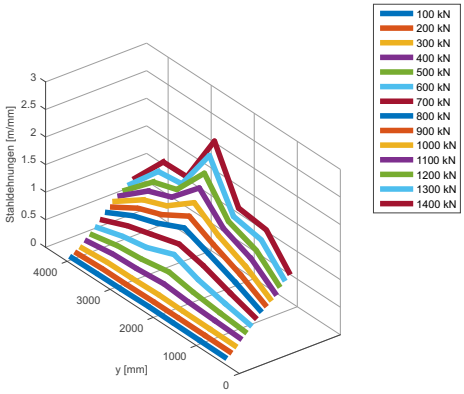


2x5d

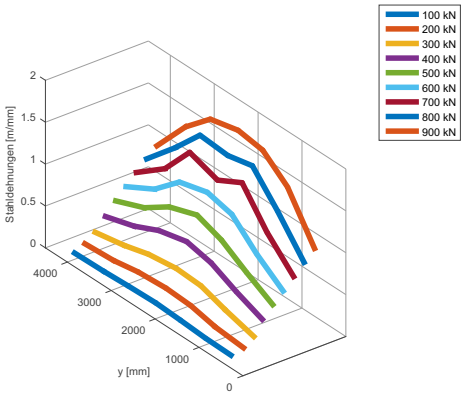


Stahldehnungen je Laststufe 3D

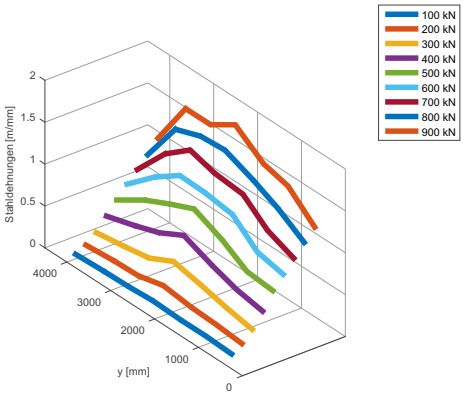
1d



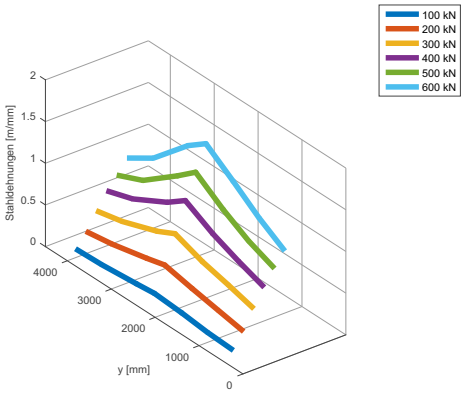
2d - 1



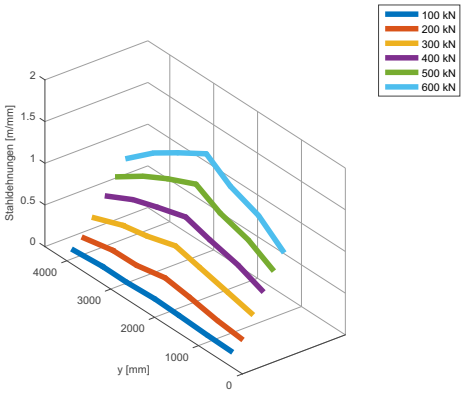
2d - 2



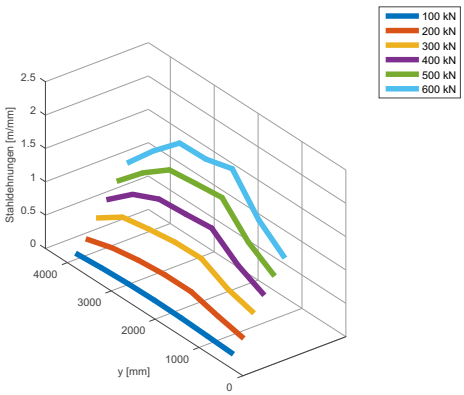
3d - 1



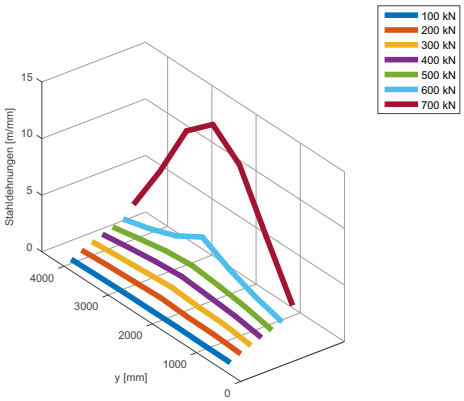
3d - 2



4d - 1

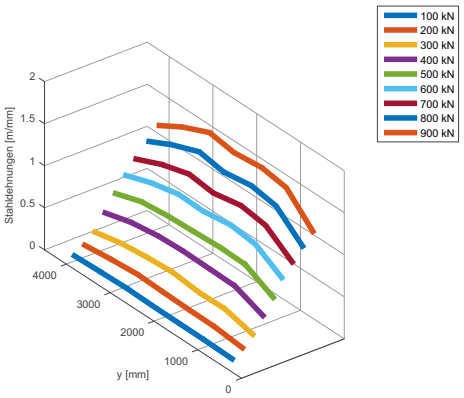


4d - 2

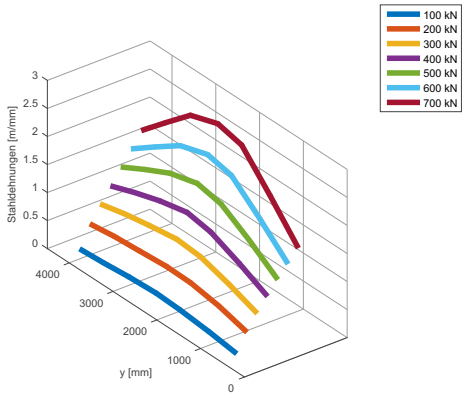


Stahldehnungen je Laststufe 3D

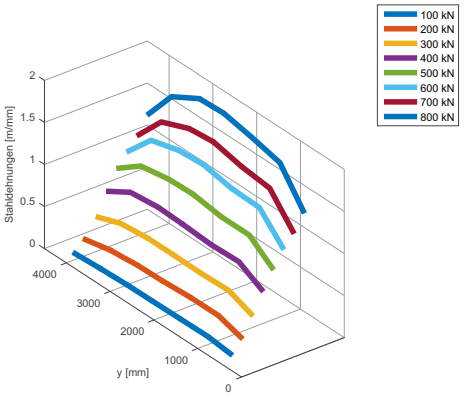
2x2d



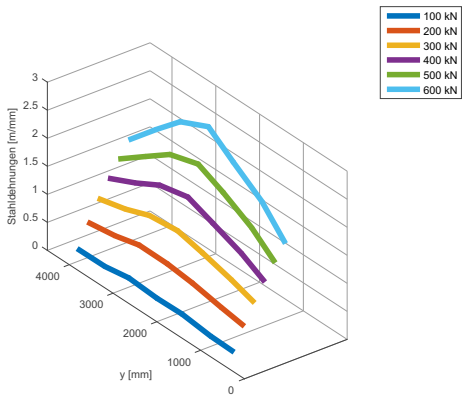
5d



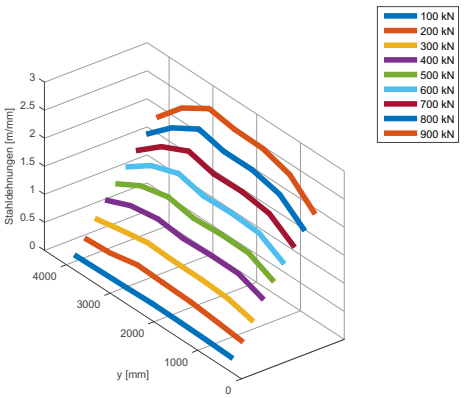
2x3d



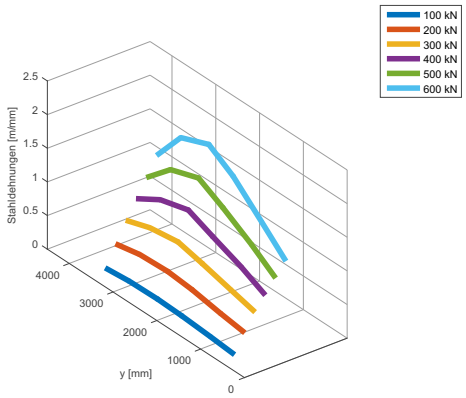
6d



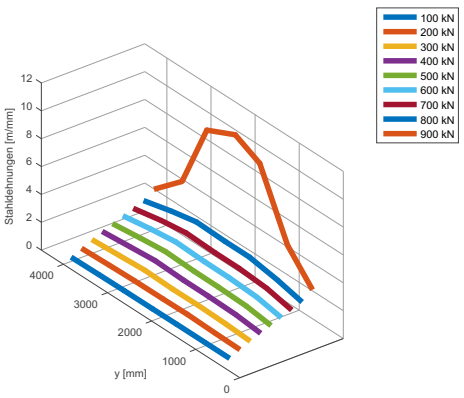
2x4d



4d - 3

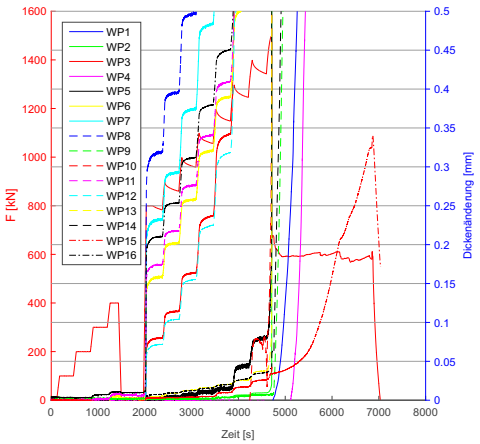


2x5d

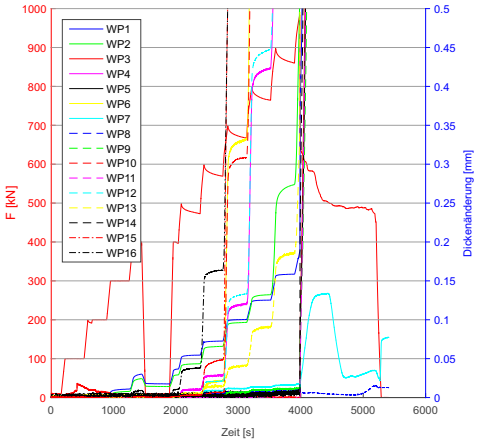


Kraft/Zeit/ Dickenänderung

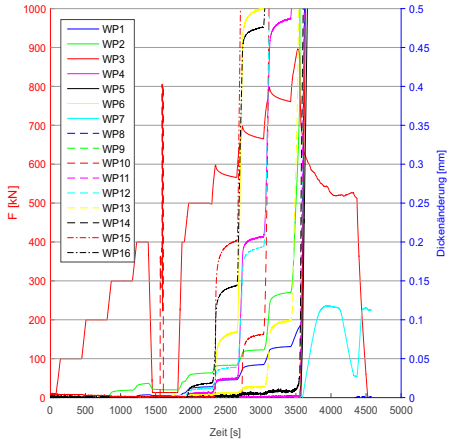
1d



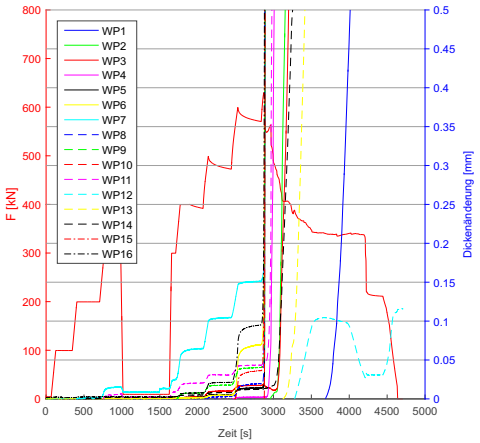
2d - 1



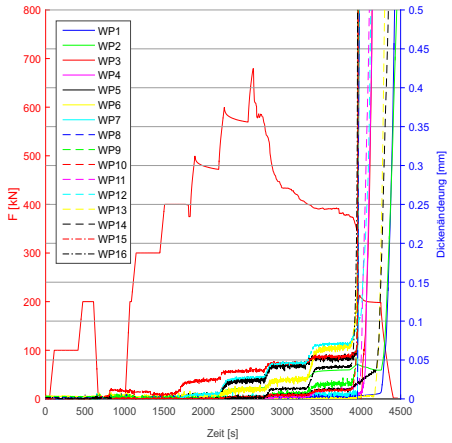
2d - 2



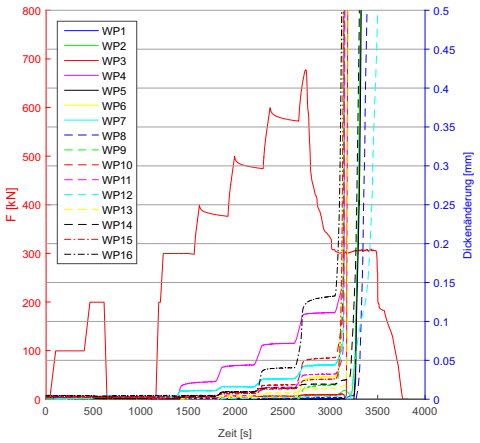
3d - 1



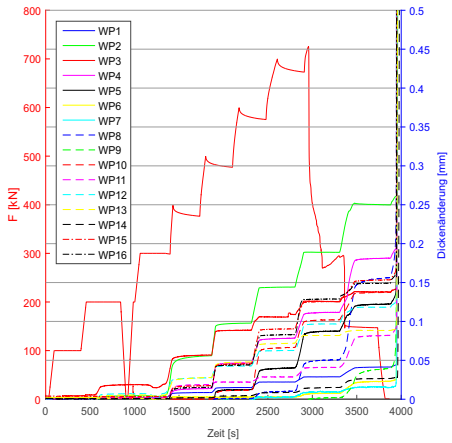
3d - 2



4d - 1

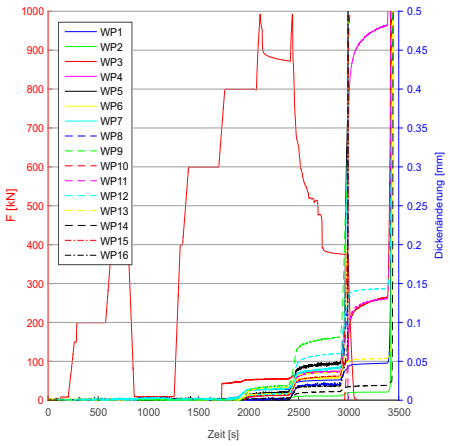


4d - 2

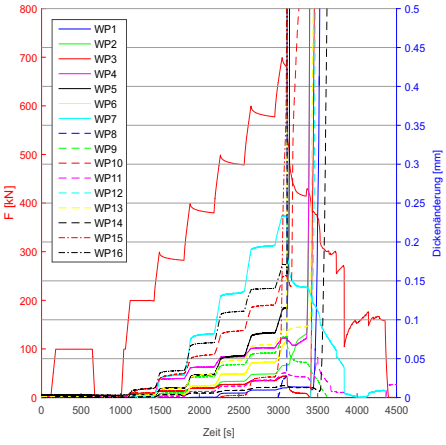


Kraft/Zeit/ Dickenänderung

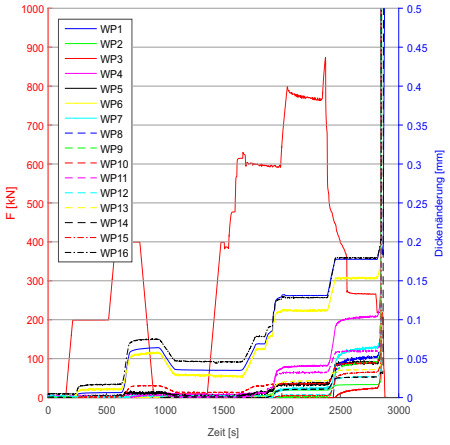
2x2d



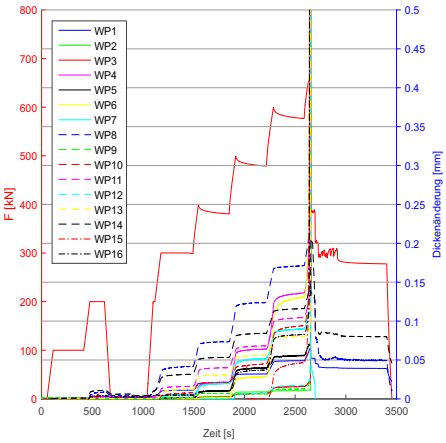
5d



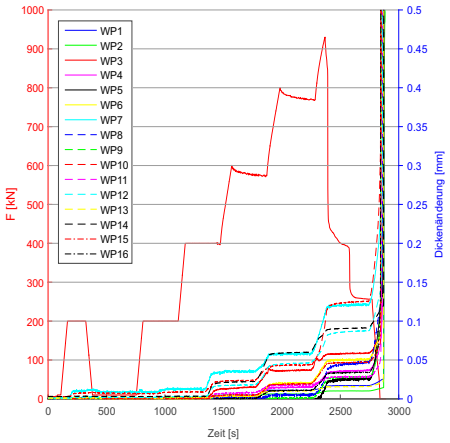
2x3d



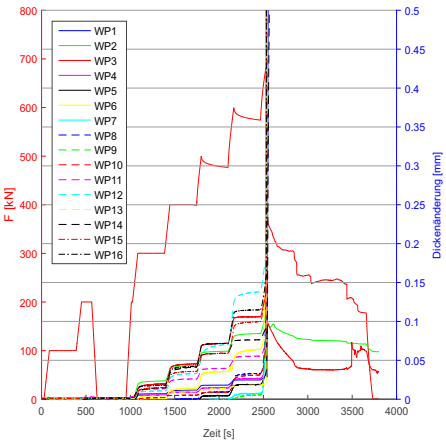
6d



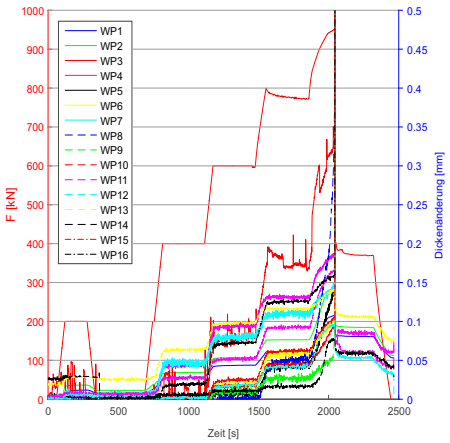
2x4d



4d - 3

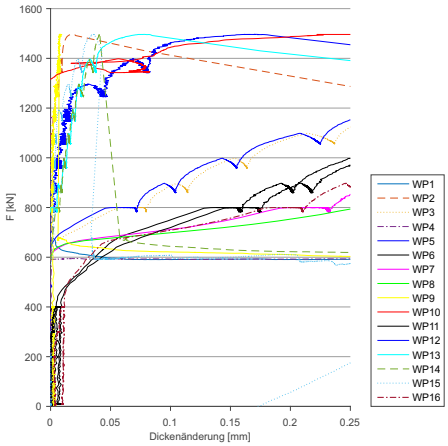


2x5d

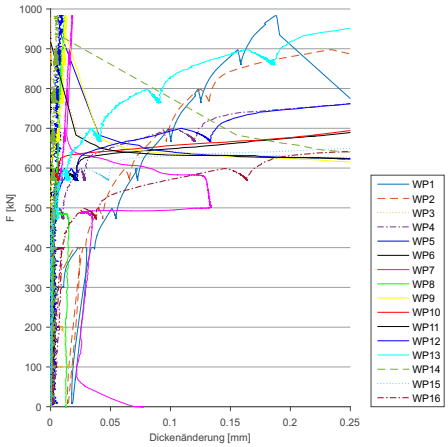


Kraft/ Dickenänderung

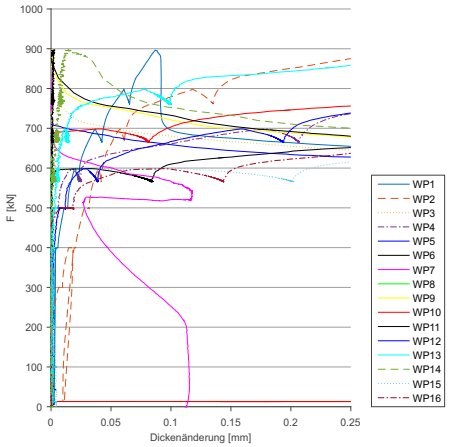
1d



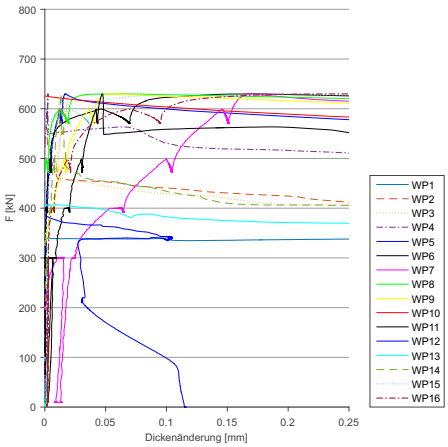
2d - 1



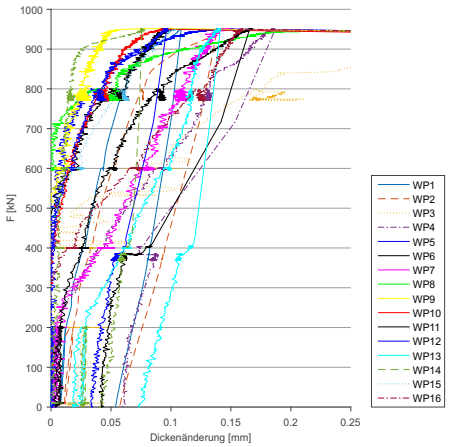
2d - 2



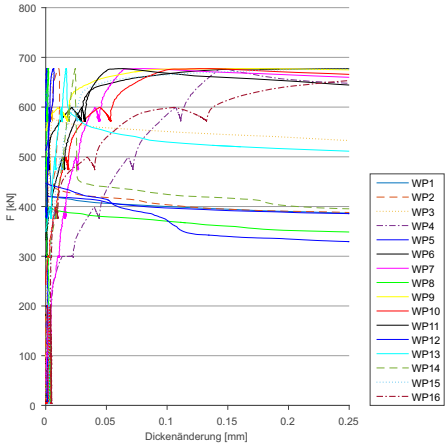
3d - 1



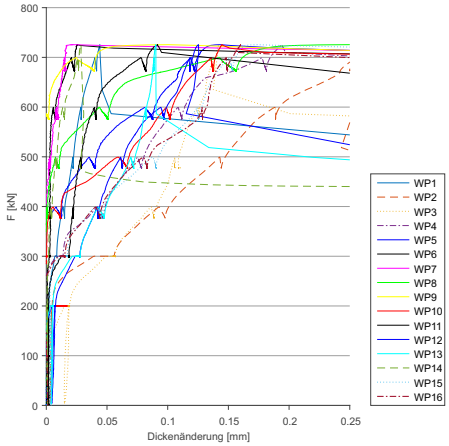
3d - 2



4d - 1

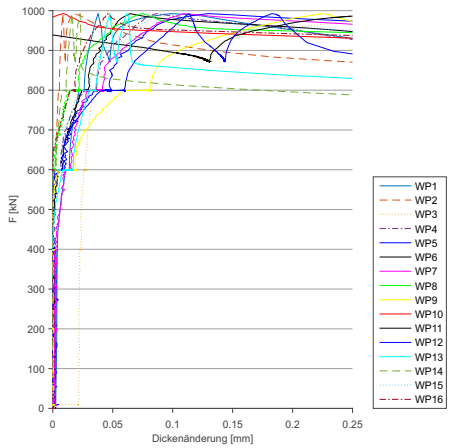


4d - 2

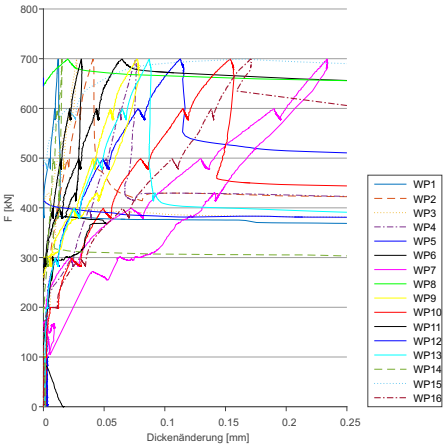


Kraft/ Dickenänderung

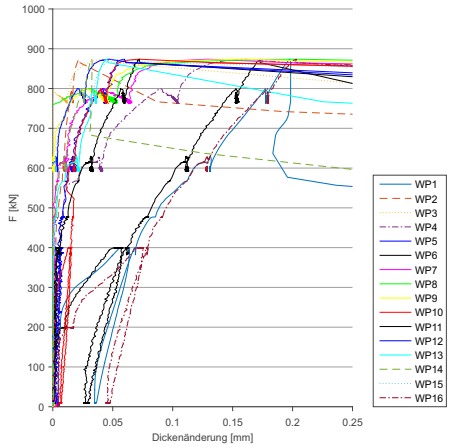
2x2d



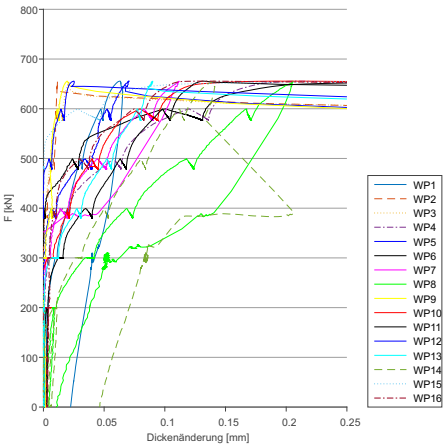
5d



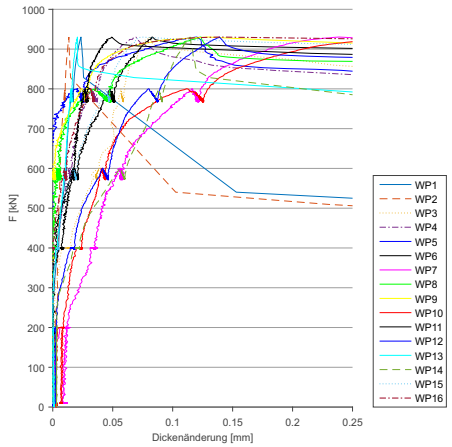
2x3d



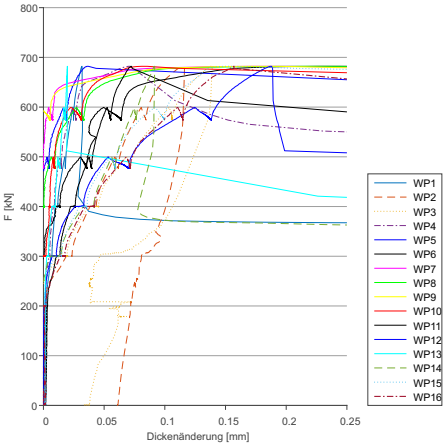
6d



2x4d



4d - 3



2x5d

