ETH zürich

ETH Library

Versuche zum Tragverhalten von Betonhohlplatten mit flexibler Auflagerung bei Raumtemperatur und Normbrandbedingungen

Report

Author(s):
Fontana, Mario; Borgogno, Walter

Publication date:
1996

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-001681894

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Originally published in:
IBK Bericht 219

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

Versuche zum Tragverhalten von Betonhohlplatten mit flexibler Auflagerung bei Raumtemperatur und Normbrandbedingungen

Walter Borgogno
Mario Fontana

Institut für Baustatik und Konstruktion
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Zürich, Mai 1996

Vorwort

Verbunddeckensysteme aus Betonfertigteilen und integrierten Stahlträgern kommen in Europa vermehrt zum Einsatz. In Skandinavien haben Deckensysteme bestehend aus asymmetrischen Stahlträgern mit breitem Unterflansch und Betonhohlplatten eine grosse Verbreitung gefunden. Erste Bauten in der Schweiz und vor allem in England zeigen, dass für diese Bauweise auch in anderen Ländern ein Potential besteht. Die Vorteile liegen insbesondere in der raschen, trockenen und resourcensparenden Bauausführung.

Betonhohlplatten wurden ursprünglich für die Auflagerung auf starren Wänden entwickelt. Für die Bemessung ist in der Regel der Biegewiderstand massgebend. Durch die Auflagerung auf Dekkenträgern (unabhängig, ob diese Träger aus Beton, Stahl oder anderen Materialien bestehen) entsteht eine Systemtragwirkung, welche deutlich von den Anwendungen mit Auflagerung auf Wänden abweicht. Dies wurde bisher nicht berücksichtigt. Versuche in Finnland bei Raumtemperatur haben auf das Problem aufmerksam gemacht.

Im Brandfalle wird das Systemtragverhalten verschärft, weil die Steifigkeit des Trägers i.A. stärker abnimmt als jene der Platten. Zudem sind die im Spannbett (d.h. ohne schlaffe Bewehrung und ohne Verankerungselemente der Spannlitzen) hergestellten Platten deutlich empfindlicher bezüglich Brandeinwirkung als normale schlaff bewehrte Betonteile. Eigenspannungen können zu Rissen im Beton führen, zudem wird die Vorspannung im Brandfall abgebaut und der Verbund geschädigt. Brandversuche in Frankreich deuteten auf erhebliche Systemeinflüsse hin.

Diese Ausgangslage war auslösend für das vorliegende Forschungsprojekt, welches durch die KWF (Kommission zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung) und die Industriepartner Geilinger AG, Winterthur und Brun AG, Emmen gefördert wird. Der hier vorliegende Versuchsbericht umschreibt umfangreiche Tragwiderstandsversuche bei Raumtemperatur und fünf Brandversuche an Deckenelementen. Die Erarbeitung von Tragmodellen ist geplant. Sie sollen zu einem späteren Zeitpunkt veröffentlicht werden.

Planung, Oranisation, Durchführung und Auswertung der Versuche erfolgte federführend durch Herrn W. Borgogno. Er wurde unterstützt durch die Herren H.P. Arm, P. Hefti, S. Bernasconi und für die Brandversuche zusätzlich durch die Herren R. Zumbühl, U. Brunschweiler, H. Blatter und R. Pasquariello. Herr W. Borgogno hat auch den vorliegenden Bericht verfasst und dargestellt.

Die Arbeiten wurden beratend begleitet durch die Herrren Dr. G. Marchand, E. Brun, Ch. Gemperli, E. Marti, J.B. Schleich und Dr. P. Wenk.

Allen Beteiligten möchte ich an dieser Stelle für ihren Einsatz und die geleistete Arbeit danken und für die weiteren ausstehenden Arbeiten raschen Fortschritt und Erfolg wünschen.

Zürich, März 1996 Prof. Dr. M. Fontana

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

1.1 Allgemeines 1
1.2 Abgrenzung 1
1.3 Problemstellung und Zielsetzung 1

2 Grundlagen 3

2.1 Allgemeines 3
2.1.1 Betonhohlplatten 3
2.1.2 Verbundträger 4
2.2 Brucharten 5
2.2.1 Gerissener Zustand 5
2.2.2 Bruchzustände 6

3 Versuchsprogramm 9

3.1 Kaltversuche 9
3.2 Brandversuche 12
3.3 Herstellung der Probekörper 12

4 Kaltversuche 14

4.1 Baustoffe 14
4.1.1 Beton 14
4.1.2 Bewehrungsstahl 15
4.1.3 Baustahl 16
4.2 Versuchskörper 17
4.3 Versuchseinrichtung 18
4.3.1 Versuchsrahmen 18
4.3.2 Auflager 18
4.3.3 Belastung 20
4.4 Versuchsdurchführung 21
4.5 Messungen 22
4.6 Versuchsresultate 22
4.7 Zusammenfassung der Kaltversuche 150

5 Brandversuche 154

5.1 Baustoffe 154
5.1.1 Beton 154
5.1.2 Bewehrungsstahl 154
5.1.3 Baustahl 155
5.2 Versuchskörper 155

5.3 Versuchseinrichtung 156
5.3.1 Ofen 156
5.3.2 Versuchsrahmen 156
5.3.3 Auflager 157
5.3.4 Belastung 158
5.4 Versuchsdurchführung 158
5.5 Messungen 159
5.6 Versuchsresultate 159
5.7 Zusammenfassung der Brandversuche 214

Zusammenfassung 215

Résumé 216

Summary 217

Bezeichnungen 218

Literatur 220

Anhang A Versuchskörper 222

A.1 Untersuchte Hohlplattentypen 222
A.2 Anfangsschlupf der Hohlplatten 224
A.3 Versuchskörper der Serien S1K, S2K, S5K und S6K 226
A.4 Versuchskörper der Serie S3K 227
A.5 Versuchskörper der Serie S4K 228
A.6 Versuchskörper der Serie B2 229
A.7 Versuchskörper der Serie B3 230

Anhang B Versuchseinrichtungen 231

B.1 Versuchsrahmen Kaltversuche 231
B.2 Belastungseinrichtung der Serie S5K 232
B.3 Ofen 233
B.4 Versuchsrahmen Brandversuche 234

Anhang C Messungen 235

C.1 Messungen der Serien S1K und S2K 235
C.2 Messungen der Serie S3K 236
C.3 Messungen der Serie S4K 237
C.4 Messungen der Serie S5K 238
C.5 Messungen der Serie S6K 239
C.6 Messungen der Serie B2 240
C.7 Oberflächentemperaturmessungen von B2-1, B2-2 und B2-4 241
C.8 Oberflächentemperaturmessungen von B2-3 242
C.9 Querschnitttemperaturmessungen der Serie B2 243
C.10 DMS-Messungen des Vorversuchs B2-2 und Relativverschiebungen Träger-Platten der Vorversuche B2 244
C.11 Messungen der Serie B3 245
C.12 Temperaturmessungen der Serie B3 246

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Die Slim Floor Konstruktionsweise ist ein integriertes Flachdeckensystem, welches aus Stahlträgern und Betonelementen besteht. Die Unterflansche asymmetrischer Stahlträger dienen als Auflager für die Deckenelemente (vgl. Abb. 1). Diese bestehen in der Regel aus Betonhohlplatten, alternativ können aber auch Profilblechverbundplatten, Filigranplatten mit Überbeton oder Holzverbundplatten eingesetzt werden, vgl. Fontana (1996).

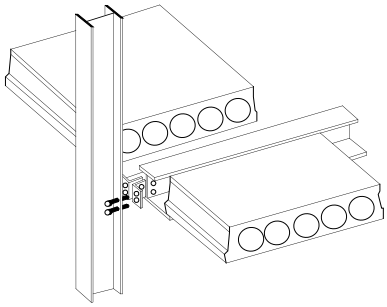


Abb. 1.1 Prinzip der Slim Floor Konstruktion

Die Vorteile dieser Bauweise liegen vor allem in der geringen Bauhöhe der Decken, den kurzen Bau- und Montagezeiten dank Trockenbauweise und hohem Vorfabrikationsgrad, einfachen Konstruktionsprinzipien und geringem Materialverbrauch durch gezielten Einsatz von Stahl und Stahlbeton. Diese Vorteile bewirken Einsparungen an Ressourcen, Arbeit und Zinsaufwendungen.

1.2 Abgrenzung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten zur Ausbildung der integrierten Stahlträger. Die Untersuchungen in diesem Versuchsprogramm beschränken sich auf einen Trägerquerschnitt, der sich aus einem halben IPE-Profil und einem Flachblech als Unterflansch zusammensetzt.

Als Deckenelemente wurden Betonhohlplatten gewählt. Die untersuchten Platten werden im Gleitfertigerverfahren hergestellt. Der Gleitfertiger ist selbst angetrieben, der Beton wird gestampft (im Gegensatz dazu wird beim Extrudierverfahren der Beton vibriert).

1.3 Problemstellung und Zielsetzung

Die Bemessung von Betonhohlplatten wird in CEB (1978), FIP (1988) und prEN 1168 (1993) beschrieben. In diesen Richtlinien werden jedoch verschiedene Parameter, welche für die Traglastberechnung von Slim Floors massgebend werden können, nicht berücksichtigt. Diese Einflussgrössen sind nachfolgend erläutert:

- Die Betonhohlplatten liegen auf dem Unterflansch eines nachgiebigen Trägers und nicht auf einer starren Wand auf. Der Träger biegt sich in Längsrichtung durch; im Extremfall kann für die Betonhohlplatten eine Ecklagerung entstehen.
- Der auskragende Unterflansch biegt sich mit zunehmender Auflagerkraft der Betonhohlplatte in Querrichtung; je nach Steifigkeitsverhältnissen kann sich das Auflager für die Betonhohlplatten verkleinern. Die Auflagerbreite kann, wenn sie zu gering ist, die Schubtragfähigkeit der Hohlplatte wesentlich abmindern. (N.B.: Die bisherigen Bemessungsmethoden gehen von einer starren Wandauflagerung aus.)
- Über das Brandverhalten von Hohlplatten liegen keine grundlegenden Tragmodelle vor. Die Bemessung erfolgt in der Regel auf der Grundlage einzelner Brandversuche. Für die rechnerische Ermittlung des Brandwiderstandes wird daher insbesondere eine Modellbildung für die Schubbemessung von Slim Floors mit Hohlplatten für den Brandfall notwendig.
- Für den Brandfall ergeben sich folgende Besonderheiten: Der Auflagerbereich der Betonhohlplatten auf dem ungeschützten Unterflansch des Stahlträgers ist im Brandfalle stärker dem Feuer ausgesetzt als bei konventioneller Bauweise. Eine spezielle Untersuchung des Auflagerbereiches ist somit notwendig.
- Der asymmetrische Stahlträger wird kammerbetoniert, dadurch ensteht eine gewisse Verbundwirkung. Bis jetzt wird allerdings als konservative Annahme für Raumtemperatur nur der Stahlträger mitgerechnet. Für den Brandfall ist diese Rechenannahme sehr unwirtschaftlich. Über die Verbundwirkung, insbesondere die Grösse der mitwirkenden Breite, sind noch keine wissenschaftlich abgesicherten Daten vorhanden.

Das Ziel dieser Versuche ist es, eine Grundlage für die Modellbildung zur Traglastberechnung der Slim Floor Bauweise bei Raumpemperatur und für den Brandfall zu liefern. In Anbetracht der Komplexität des Problems müssen sich die entstehenden Bemessungsmodelle auf die massgebenden Parameter beschränken. Die Versuche sollen somit auch über die Bedeutung der einzelnen Parameter Aufschluss liefern.

2 Grundlagen

2.1 Allgemeines

2.1.1 Betonhohlplatten

Bis heute wurden bereits verschiedene Versuchsserien an Betonhohlplatten bei Raumtemperatur durchgeführt. Die neueren behandelten v.a. die Schubtragfähigkeit. Für einen Vergleich dieser Versuche ist zu berücksichtigen, dass die Unterschiede der Abmessungen der untersuchten Betonhohlplatten, der verwendeten Materialien und der Herstellungsverfahren beträchlich sein können.

- Walraven (1983) hat 42 Versuche an extrudierten Betonhohlplatten durchgeführt. Er hat dabei folgende Parameter variert: Linienlast - konzentrierte Lasteinleitung, Schubspannweitenverhältnis a/l, Querschnittsabmessungen (h=200/255/265/300 mm) und Vorspanngrad. Die Spannweite betrug 7.20 m, die Auflagerbreite war bei allen Versuchen s=150 mm.
- Becker und Buettner (1985) haben 33 Schubversuche an extrudierten Betonhohlplatten durchgeführt. Sie varierten die Schubspannweite a/l, die Querschnittsabmessungen (h=200/240 mm), den Vorspanngrad und die Lasteinleitung (Linien- und konzentrierte Last). Die Spannweite betrug bei den Schubversuchen 4.57 m; um den Spannweiteneinfluss abzuschätzen, wurden zwei Versuche mit Spannweite 10.40 m durchgeführt.
- Pisanty (1992) hat 10 Schubversuche ebenfalls an extrudierten Betonhohlplatten ausgeführt. Er hat die Breite seiner Platten variert. Die Spannweite betrug 1.93 m und die Plattendicke 300 mm; die Platten wurden in der Mitte mit einer konzentrierten Kraft belastet. Er vergleicht die Schubbemessung von verschiedenen Normen.
- Pajari und Yang (1994) haben Tests an 6 Zweifeld-Deckensystemen (ca. 12m·5m) und 20 Kleinversuche an Einzelhohlplatten durchgeführt. An den Grossversuchen untersuchten sie das Systemverhalten von Hohlplatten auf flexiblen Trägern (Slim Floors). Sie stellten eine markante Abminderung des Schubwiderstandes der Betonhohlplatten bei flexibler Auflagerung fest. An den Kleinversuchen untersuchten sie den Widerstand bei Horizontal- und/oder Vertikalschub und den Einfluss von gefüllten Hohlräumen im Auflagerbereich. Die Spannweite der Kleinversuchen betrug 4.00 m. Alle Versuche wurden an Betonhohlplatten der Dicken 265 und 400 mm gefahren. Als Grundlage für die Auswertung dieser Versuche diente eine Zusammenstellung von möglichen Brucharten von Betonhohlplatten von Girhamar (1992), die Versuche selbst wurden von Pajari (1995) und Yang (1994 und 1995) ausgewertet.
- Eine mögliche Verstärkungsart von Betonhohlplatten im Auflagerbereich mittels Schubarmierung schlägt Park (1995) vor.
- Bode und Stengel (1995) haben Versuche über das Auflagerverhalten von Betonhohlplatten und den ungewollten Verbund zwischen Stahlträger und den Platten ausgeführt.
- Keuser (1990) hat mit FEM-Berechnungen den Verankerungsbereich von Betonhohlplatten modelliert. Er gibt Näherungslösungen zur Berechnung von der max. zulässigen Vorspannkraft. Yang (1994 und 1995) hat die bestehenden Bemessungsvorschläge für den Schubwiderstand (FIP, 1982) verfeinert und mit FEM-Berechnungen abgesichert.

Brandversuche an Betonhohlplatten nach ISO-Normbrandkurve im Ofen werden schon seit den Fünfziger-Jahren durchgeführt. Doch wurde bis jetzt nur der Biegewiderstand untersucht. Ein Schubversagen im Auflagerbereich wurde bewusst konstruktiv verhindert.

- Spancrete, Wisconsin liess schon 1958 und 1961 Brandversuche an Betonhohlplatten bei den Underwriters Laboratories durchführen. Bei Dehnungsbehinderung wurden über 2 Stunden Feuerwiderstand erreicht.
- Erste Bemessungsregeln für Betonhohlplatten bei Brand geben Seekamp et al. (1964). Bei Brandversuchen an Stahl- und Spannbetonelementen wurde der Einfluss der erhöhten Temperaturen auf den Biegewiderstand untersucht. Vorschläge für den Feuerwiderstand werden in Abhängigkeit der Plattenschlankheit und der Betonüberdeckung der Litzen gegeben.
- Weise (1978) hat das Biegetragverhalten von Betonhohlplatten an 4 Versuchen studiert. Auch er schlägt für die Bestimmung des Feuerwiderstandes eine Abhängigkeit der Plattenschlankheit und der Betonüberdeckung der Litzen vor.
- Richter (1987/1 u. 2) untersucht das Brandverhalten von Spannbetonelementen, u.a. von Betonhohlplatten, auf Biegung. Er unterscheidet verschiedene Spannbetonelemente bezüglich der Armierungslage, des Vorspanngrades und der Materialeigenschaften. Er schlägt ein Modell zur Biegetraglastberechnung unter Berücksichtigung der Verschiebung des inneren Hebelarmes mit zunehmender Temperatur vor.
- Görhs (1992) hat zwei Brandversuche an belasteten Betonhohlplatten durchgeführt. Sie schliesst bei ihren Versuchen ein Schubversagen aus, indem sie den Auflagerbereich der Betonhohlplatten konstruktiv schützt. Sie gibt ein Modell zur Schubbemessung an, bei dem sie die Schubbeanspruchung mit Anpassungsfaktoren in Abhängigkeit der Temperatur und der Ausnutzung berechnet.
- Fontana und Borgogno (1994) untersuchten in einem Brandversuch als Grundlage für die Brandbemessung eines geplanten Bürogebäudes eine Slim Floor Decke. Es wurde ein Feuerwiderstand von über 120 Minuten erreicht.
- Kruppa (1994) hat einen Brandversuch an Slim Floors durchgeführt, bei dem die belasteten Betonhohlplatten bereits nach 32 Minuten versagten. 1995 wurden zwei weitere Versuche gefahren. Beim einen trat ein Schubversagen der Betonhohlplatten bei hohem Lastniveau nach 50 Minuten ein. Der andere Versuch wurde weniger stark belastet. Dieser Versuch wurde nach 95 Minuten abgebrochen, wobei die Betonhohlplatten noch nicht versagten.

Die Notwendigkeit der Untersuchung von Betonhohlplatten bei Brand zeigt auch ein Brandfall in Sevilla, der von Crespo und Rui-Wamba (1994) beschrieben wird. Dabei sind die Platten längs an der dünnsten Stelle des Steges gebrochen. Genauere Hinweise zur Bruchart sind keine gegeben.

2.1.2 Verbundträger

Kindmann (1992) hat 12 Versuche an kammerbetonierten Walzprofilen bei Raumtemperatur durchgeführt. Diese werden durch Kindmann et al. (1993) ausgewertet. Sie geben Bemessungsvorschläge an, welche in der ENV 1994-1-1 Eingang fanden. Die Übertragbarkeit dieser Resultate auf asymmetrische Verbundträger muss erst abgeklärt werden.

In BS (1993) werden 8 Brandversuche an Slim Floor Trägern (I-Profil mit angeschweisstem Blech als breiterem Unterflansch, z.T. im Verbund) beschrieben. Daraus wird der Einfluss von verschiedenen Lastausnutzungsgraden ersichtlich.

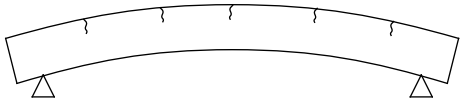
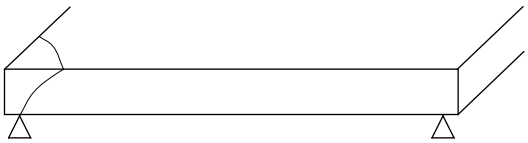
2.2 Brucharten

Die Brucharten der einzelnen Versuche werden in den folgenden Kapiteln beschrieben. Damit die Klassifizierung nachvollziehbar ist, wird eine Typologie der möglichen Brucharten von Betonhohlplatten, wie sie z.T. auch von Girhammar (1992) dargestellt werden, wiedergegeben. Es wird zwischen dem gerissenen Zustand, bei dem die Traglast des Bauteils nicht erreicht wird, und Bruchzuständen unterschieden. Im allgemeinen ist es schwierig, einzelne Schubbruchzustände auseinanderzuhalten; sie können auch kombiniert auftreten.

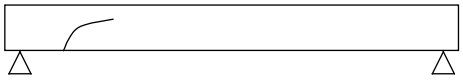
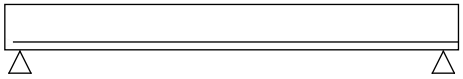
2.2.1 Gerissener Zustand

Bei den gerissenen Zuständen ist die Traglast noch nicht erreicht. In folgender Tabelle sind die verschiedenen Zustände dargestellt.

Tab. 2.1 Gerissene Zustände

Zustand	**Beschreibung**
Biegeriss (F)	Biegerisse treten zuerst an der Stelle des grössten Biegemomentes auf. Sie entstehen, wenn an der Unterseite der Betonhohlplatte die Zugfestigkeit des Betons überschritten wird.
Biegeriss an der Plattenoberseite (CT) 	Biegerisse an der Plattenoberseite treten dann auf, wenn die Zugspannungen aus Vorspannungen grösser als die Zugfestigkeit des Betons werden. Dies ist bei stark exzentrischer Lage der Litzen, fehlender oberer Vorspannlitzen oder grosser Vorspannung möglich.
Schubriss in der Ecke (E) 	Wenn die Auflagerpressungen in den Ecken der Platte grösser ist als im Rest des Auflagerbereiches, dann kann es zu Schubrissen in den Ecken infolge Durchstanzen kommen. Die Schubrisse können vom Typ A oder SC (vgl. Tab. 2.2) sein. Je nach Grösse der wegbrechenden Ecke ist die Traglast der Platte noch nicht erreicht.

Tab. 2.1 Gerissene Zustände

Zustand	**Beschreibung**
Biegeschubrisse (FSC) 	Als Biegeschubrisse werden Biegerisse bezeichnet, die durch Interaktion von Biegung und Schub diagonal abgelenkt werden. Diese Diagonalrisse steigen mit anwachsender Beanspruchung bis in die Druckzone des Betons an.
Litzenschlupf (SL) 	Zu Litzenschlupf kommt es beim Schneiden der Betonhohlplatten (vgl. Anhang A.2), oder wenn die aus äusserer Last zu übertragenden Schubspannungen der Litze die Adhäsion und die Haftreibung zwischen Litze und Beton übersteigen. Der Schlupf ist irreversibel, d.h. es kommt zu plastischen Verformungen. Das muss nicht zum Verankerungsbruch führen, denn mit zunehmender Relativverschiebung steigen die Verbundspannungen an (den Uijl,1994).

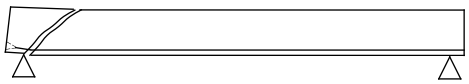
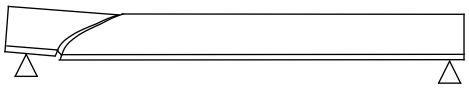
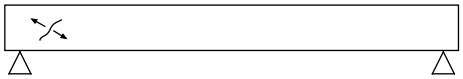
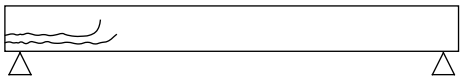
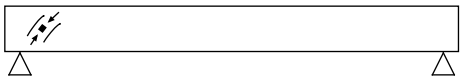
2.2.2 Bruchzustände

In der folgenden Tabelle sind die verschiedenen Brucharten dargestellt. Als Bruch wird der Zustand bezeichnet, bei dem die Beanspruchung den Widerstand des Tragelementes übersteigt.

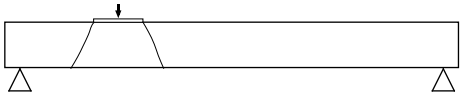
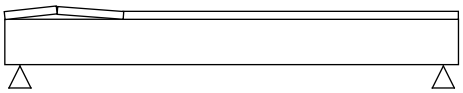
Tab. 2.2 Bruchzustände

Bruch	**Beschreibung**
Stahlbruch infolge Biegung (FT)	Die Litzen brechen, wenn die Zugspannungen aus der Plattenbeanspruchung die Zugfestigkeit der Litzen erreichen. Zu diesem Zeitpunkt ist die Druckfestigkeit im Beton noch nicht erreicht. Diese Bruchart ist duktil.
Betonbruch infolge Biegung (FC)	Die Druckfestigkeit im Beton wird vor der Zugfestigkeit in den Litzen erreicht.

Tab. 2.2 Bruchzustände

Bruch	Beschreibung
Verankerungsbruch der Litzen (A) 	Verankerungsbruch der Litzen tritt dann auf, wenn die zu übertragenden Schubspannungen der Litzen die Verbundspannungen übersteigen. Der Verbundspannungsverlust kann auch eintreten, wenn infolge Querbiegung in der Platte Längsrisse entlang der Litzen entstehen. Nach dem Bruch, der von spröder Art ist, sind die Litzen eingezogen (d.h. es ist eine deutliche Relativverschiebung zwischen Beton und Litze erkennbar).
Biegeschubbruch (SC) 	Die Biegeschubrisse steigen bei zunehmender Beanspruchung bis in die Druckzone des Betons an. Die Druckzone wird durchtrennt, und es kommt zum Bruch, welcher spröd ist.
Schubzugbruch (ST) 	Dieser Bruch tritt dort auf, wo es noch keine Biegerisse hat. Die Schubzugrisse entstehen, wenn die Hauptzugspannungen in der massgebenden Stelle des Steges die Zugfestigkeit des Betons übersteigen. Der Riss beginnt meist in der Mitte des Steges (dünnste Stelle) im Abstand der halben Plattendicke von der Auflagerinnenkante. Er weitet sich gleichmässig nach oben und unten aus bis die Brucharten A oder SC eintreten.
Stegschublängsbruch (LWS) 	Diese Bruchart kann sowohl entlang der Litzen auftreten (eigentlich Verankerungsbruch), als auch in der Mitte des Steges. Sie ist spröd.
Stegschubdruckbruch (WSC) 	Stegschubdruckbruch kann nur in auf Schub überbewehrten Betonelementen auftreten. Diese spröde Bruchart entsteht, wenn die Hauptdruckspannungen die Betonfestigkeit vor dem Fliessen der Schubbewehrung erreicht. Sie ist für die unbewehrten Hohlplatten irrelevant.

Tab. 2.2 Bruchzustände

Bruch	**Beschreibung**
Durchstanzen (P) 	Bei konzentrierter Lasteinleitung kann ein Durchstanzversagen auftreten.
Schubbruch in der Fuge zwischen Überbeton und Betonhohlplatte (S) 	Bei zu grossen Schubspannungen in der Fuge zwischen Überbeton und der Platte kann sich der Überbeton ablösen. Es trägt dann nur noch die Hohlplatte allein und in der Platte kann es zum Schubbruch (A oder SC) oder Biegebruch kommen.

3 Versuchsprogramm

3.1 Kaltversuche

Das Programm der Kaltversuche umfasste 6 Versuchsserien an Betonhohlplatten der Firma Brun AG, Emmen (vgl. Anhang A). Es wurden in allen Serien Schubversuche durchgeführt, ausser bei der Serie S4K (Biegeversuche). In jeder Versuchsserie wurden isolierte Parameter variiert. In den folgenden Tabellen werden die Versuche mit den entsprechenden Parametern aufgelistet. Übersichtshalber werden die im Versuch gemessenen Tragwiderstände in diese Tabellen integriert.

In der Serie S1K wurden Platten des Typs P20 untersucht (vgl. Anhang A.1). Das Auflager war starr, das Schubspannweitenverhältnis a/l und die Auflagerbreite s wurden variiert. Die Serie umfasste insgesamt 15 Versuche an 11 Platten.

Tab. 3.1 Versuchsprogramm der Serie S1K

Versuch	Lagerung	Last	Platte	a [mm]	l [m]	s [mm]	Prüfdatum	V_u [kN]
S1K01	starr	LL	P20	720	2.4	60	20.10.94	205.0
S1K02a	starr	LL	P20	480	2.4	60	26.10.94	156.1
S1K02b	starr	LL	P20	240	2.4	60	26.10.94	220.3
S1K03a	starr	LL	P20	240	2.4	120	28.10.94	281.2
S1K03b	starr	LL	P20	240	2.4	80	28.10.94	245.2
S1K04	starr	LL	P20	480	2.4	80	04.11.94	252.3
S1K05	starr	LL	P20	480	2.4	120	09.11.94	249.7
S1K06	starr	LL	P20	720	2.4	80	11.11.94	203.7
S1K07	starr	LL	P20	720	2.4	120	24.11.94	224.8
S1K08	starr	LL	P20	880	2.4	80	07.12.94	188.0
S1K09	starr	LL	P20	880	2.4	60	08.12.94	173.1
S1K10a	starr	LL	P20	240	2.4	60	09.12.94	235.6
S1K10b	starr	LL	P20	600	2.4	60	09.12.94	210.2
S1K11a	starr	LL	P20	240	2.4	80	12.12.94	219.7
S1K11b	starr	LL	P20	600	2.4	80	12.12.94	242.2

LL: Linienlast

In der Serie S2K wurde der Plattentyp variiert (vgl. Anhang A). Die Versuchsanordnung und die untersuchten Parameter waren dieselben wie in der Serie S1K.

Tab. 3.2 Versuchsprogramm der Serie S2K

Versuch	Lagerung	Last	Platte	a [mm]	l [m]	s [mm]	Prüfdatum	V_u [kN]
S2K01a	starr	LL	P20, PL	240	2.4	60	13.01.95	235.2
S2K01b	starr	LL	P20, PL	880	2.4	60	13.01.95	199.6
S2K02a	starr	LL	P20, PL	360	2.4	60	16.01.95	206.8

Tab. 3.2 Versuchsprogramm der Serie S2K

Versuch	Lagerung	Last	Platte	a [mm]	l [m]	s [mm]	Prüfdatum	V_u [kN]
S2K02b	starr	LL	P20, PL	480	2.4	60	16.01.95	216.0
S2K03a	starr	LL	P20, PL	240	2.4	80	17.01.95	278.9
S2K03b	starr	LL	P20, PL	880	2.4	80	17.01.95	213.0
S2K04a	starr	LL	P20, PL	360	2.4	80	18.01.95	241.6
S2K04b	starr	LL	P20, PL	480	2.4	80	18.01.95	218.4
S2K05a	starr	LL	P20, RV	240	2.4	60	19.01.95	182.4
S2K05b	starr	LL	P20, RV	880	2.4	60	19.01.95	170.7
S2K06a	starr	LL	P20, RV	360	2.4	60	20.01.95	178.6
S2K06b	starr	LL	P20, RV	480	2.4	60	20.01.95	171.8
S2K07a	starr	LL	P20, RV	240	2.4	80	24.01.95	242.0
S2K07b	starr	LL	P20, RV	880	2.4	80	24.01.95	167.8
S2K08a	starr	LL	P20, RV	360	2.4	80	24.01.95	213.0
S2K08b	starr	LL	P20, RV	480	2.4	80	25.01.95	211.1
S2K09a	starr	LL	P16	240	2.4	60	25.01.95	133.7
S2K09b	starr	LL	P16	880	2.4	60	25.01.95	123.4
S2K10a	starr	LL	P16	360	2.4	60	26.01.95	143.5
S2K10b	starr	LL	P16	480	2.4	60	26.01.95	156.3
S2K11a	starr	LL	P16	240	2.4	80	27.01.95	179.0
S2K11b	starr	LL	P16	880	2.4	80	27.01.95	131.5
S2K12a	starr	LL	P16	360	2.4	80	27.01.95	168.8
S2K12b	starr	LL	P16	480	2.4	80	27.01.95	154.7
S2K13a	starr	LL	P20, UL	240	2.4	60	29.09.95	227.9
S2K13b	starr	LL	P20, UL	880	2.4	60	29.09.95	195.9
S2K14a	starr	LL	P20, UL	360	2.4	60	10.10.95	253.7
S2K14b	starr	LL	P20, UL	480	2.4	60	10.10.95	217.2
S2K15a	starr	LL	P20, UL	240	2.4	80	11.10.95	294.8
S2K15b	starr	LL	P20, UL	880	2.4	80	11.10.95	174.7
S2K16a	starr	LL	P20, UL	360	2.4	80	12.10.95	251.0
S2K16b	starr	LL	P20, UL	480	2.4	80	12.10.95	265.9

PL: Profilierte Litzen
RV: Reduzierte Vorspannung
UL: Litzen aus tordierten Drähten

In der Serie S3K wurden Schubversuche an Platten durchgeführt, welche auf kurzen, flexiblen Slim Floor Trägern (l=1.2m) aufgelagert waren. Infolge Überbeton und durchlaufender Bewehrung wurde im Bereich des Plattenauflagers dadurch z.T. eine gewisse Durchlaufwirkung erreicht.

Tab. 3.3 Versuchsprogramm der Serie S3K

Versuch	Lagerung	Last	Platte	a [mm]	l [m]	s [mm]	Prüfdatum	V_u [kN]
S3K1a	UF	LL	P20	720	2·2.47	90	15.02.95	122.2
S3K1b	UF	LL	P20	720	2·2.47	90	15.02.95	167.8

Tab. 3.3 Versuchsprogramm der Serie S3K

Versuch	Lagerung	Last	Platte	a [mm]	l [m]	s [mm]	Prüfdatum	V_u [kN]
S3K2a	UF	LL	P20	720	2·2.47	85	20.02.95	132.4
S3K2b	UF	LL	P20	720	2·2.47	85	20.02.95	169.1
S3K3	UF	LL	P20	720	2·2.47	77	17.02.95	222.8
S3K4	UF	LL	P16, ÜB	720	2·2.47	80	21.02.95	310.0

UF: Unterflansch eines Slim Floor Trägers
ÜB: Überbeton 8cm mit Netzbewehrung

Die Serie S4K umfasste 2 Biegeversuche mit Platten P20 zur Untersuchung des Einflusses einer 8 cm dicken Überbetonschicht.

Tab. 3.4 Versuchsprogramm der Serie S4K

Versuch	Lagerung	Last	Platte	a [mm]	l [m]	s [mm]	Prüfdatum	M_u [kN]
S4K1	starr	DLL	P20	1600	4.72	290	07.05.95	192.5
S4K2	starr	DLL	P20, ÜB	1600	4.72	290	08.05.95	291.0

DLL: Doppellinienlast
ÜB: Überbeton 8cm

In der Serie S5K wurde ein Versuch mit gleichmässig verteilter Belastung durchgeführt. Die Abmessungen sind die gleichen wie in den Versuchsserien S1K und S2K.

Tab. 3.5 Versuchsprogramm der Serie S5K

Versuch	Lagerung	Last	Platte	a [mm]	l [m]	s [mm]	Prüfdatum	V_u [kN]
S5K1	starr	GM	P20, UL	600	2.4	80	08.11.95	252.6

GM: Gleichmässig verteilte Belastung

In der Versuchsserie S6K war der geprüfte Auflagerbereich flexibel. Er bestand aus einem I-Profil (vgl. Anhang C.5), das über 2 m spannte. Zum Vergleich wurde ein Versuch mit einem starren Auflager durchgeführt. Die Plattenabmessungen waren dieselben wie in S1K, S2K und S5K.

Tab. 3.6 Versuchsprogramm der Serie S6K

Versuch	Lagerung	Last	Platte	a [mm]	l [m]	s [mm]	Prüfdatum	V_u [kN]
S6K1	flex.	EL	P20	880	2.4	80	16.11.95	153.4
S6K2	flex.	EL	P20, UL	880	2.4	80	17.11.95	134.7
S6K3	flex.	LL	P20	880	2.4	80	20.11.95	182.4
S6K4	flex.	LL	P20, UL	880	2.4	80	20.11.95	156.6
S6K5	flex.	ZL	P20	880	2.4	80	21.11.95	180.4

Tab. 3.6 Versuchsprogramm der Serie S6K

Versuch	Lagerung	Last	Platte	a [mm]	l [m]	s [mm]	Prüfdatum	V_u [kN]
S6K6	flex.	ZL	P20, UL	880	2.4	80	21.11.95	166.9
S6K7	starr	ZL	P20	880	2.4	80	23.11.95	213.0

EL: Punktlast
LL: Linienlast
ZL: Zwei nebeneinanderliegende Punktlasten

3.2 Brandversuche

Es wurden zwei Serien Brandversuche durchgeführt, bei denen die Schubtragfähigkeit von Betonhohlplatten bei unterschiedlichen Auflagerbedingungen und Belastungen untersucht wurde. Die Serie B2 umfasste 4 Brandversuche an Slim Floor Decken mit flexibler Auflagerung der Betonhohlplatte auf dem Stahlträger. Der Stahlträger wurde zusätzlich direkt belastet, um eine grössere Durchbiegung zu erreichen. Die Serie B3 bestand aus einem Versuch, bei dem nur die Betonhohlplatten auf einem starren Auflager geprüft wurden.

Tab. 3.7 Versuchsprogramm der Brandversuche

Versuch	Lagerung	Last	Platte	Belastung	a [mm]	l [m]	s [mm]	Prüfdatum
B2-1	flex.	ZL	P20	Tr/Pl	740	2.20	85	21.03.95
B2-2	flex.	ZL	P20	Tr/Pl	740	2.20	80	15.03.95
B2-3	flex.	ZL	P20	Tr/Pl	740	2.20	80	27.03.95
B2-4	flex.	ZL	P20, PL	Tr/Pl	740	2.20	89	23.06.95
B3-1-N	starr	ZL	P20	Pl	900	2.40	80	05.07.95
B3-1-P	starr	ZL	P20, PL	Pl	900	2.40	80	05.07.95

Tr/Pl: Belastung des Trägers und der Betonhohlplatten
Pl: Belastung der Betonhohlplatten
ZL: Zwei nebeneinanderliegende Punktlasten

3.3 Herstellung der Probekörper

Die einzelnen Plattentypen wurden jeweils in derselben Charge hergestellt. Für die Kaltversuche der Serie S3K und die Brandversuche mussten in einem weiteren Herstellungsgang die Kammern der Stahlträger ausbetoniert werden, und für den Versuch S4K2 musste noch der Überbeton aufgebracht werden. Die folgende Tabelle zeigt die Herstellungsdaten der Probekörper.

Tab. 3.8 Herstellung der einzelnen Plattenchargen und des Kammerbetons (KB) bzw. des Überbetons (ÜB)

Charge	Herstellung	KB/ÜB	Herstellung
P16	31.03.94	S3K	23.11.94
P20	20.07.94	S4K2	19.01.95

Tab. 3.8 Herstellung der einzelnen Plattenchargen und des Kammerbetons (KB) bzw. des Überbetons (ÜB)

Charge	Herstellung	KB/ÜB	Herstellung
P20, PL	20.07.94	B2-1 bis B2-3	23.11.94
P20, RV	20.07.94	B2-4	24.04.95
P20, UL	05.05.95	B3-1	24.04.95

PL: Profilierte Litzen
RV: Reduzierte Vorspannung
UL: Litzen aus tordierten Drähten

4 Kaltversuche

4.1 Baustoffe

4.1.1 Beton

Vom Beton der Hohlplatten wurden zwei Probenarten entnommen. Einerseits wurden vom Frischbeton Zylinder (200·200) abgefüllt, andererseits wurden aus den Versuchskörpern Bohrkerne (pro Bohrkern mehrere Zylinder 50·50) entnommen. Von den Zylindern wurde nur die Druckfestigkeit ermittelt. Der Belastungsvorgang war weggesteuert. Die Prüfung erfolgte gemäss SIA 162/1 (1989).

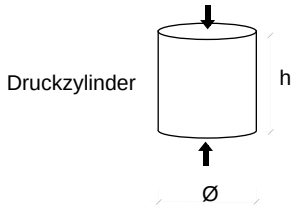


Abb. 4.1 Druckversuch für Beton

Der Hohlplattenbeton bestand aus einem normalen Portlandzement (PC). Der Zementanteil betrug 350 kg/m^3. Als Zuschlagstoffe wurde Kiessand mit Korngrössen zwischen 0 und 16 mm verwendet. Für den Kammer- bzw. Überbeton wurde hochwertiger Portlandzement (HPC) zu einem Anteil von 325 kg/m^3 verwendet. Die Korngrössen der Zuschlagstoffe liegen ebenfalls zwischen 0 und 16 mm.

Die abgefüllten Frischbetonformen hatten eine grössere Dichte als die Bohrkerne der Hohlplatten. Die Festigkeitswerte der Bohrkerne geben daher die effektiv vorhandenen Werten besser wieder.

Frischbeton

Vom Frischbeton der Hohlplatten der Charge P20 wurden 6 Zylinder mit Durchmesser 200 mm und Höhe 200 mm entnommen. Vom Frischbeton des Kammerbetons der Serie S3K bzw. B2-1 bis B2-3 wurden 3 Zylinder derselben Grösse abgefüllt. Die Kennwerte sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tab. 4.1 Kennwerte der Zylinderproben des Frischbetons

Charge	Anzahl Proben	f_{cm} [N/mm^2]	x_s [N/mm^2]	ρ_m [kg/m^3]
P20	6	38.5	6.3	2268
KB	3	66.4	1.6	2347

f_{cm}: Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit
x_s: Standardabweichung der Zylinderdruckfestigkeit
ρ_m: Mittelwert der Dichten der Druckzylinder

Der Kammerbeton zeigt eine deutlich höhere Festigkeit, da er aus einem hochwertigen Zement besteht und besser verdichtet wurde.

Versuchskörper

Aus den Versuchskörpern wurden Bohrkerne mit Durchmesser 50 mm aus dem Stegoberteil der Hohlplatten bzw. aus dem Kammerbeton rausgebohrt. Je nach Länge der Bohrkerne konnten daraus mehrere Zylinder der Länge 50 mm gefräst werden. Die Platten P20, P20,PL und P20,RV wurden in der gleichen Charge hergestellt; darum werden die Zylinder aus den drei Plattentypen zur Charge P20 zusammengefasst. Die Platten P20, UL wurden in einer späteren Charge hergestellt; diese Charge wird separat behandelt. Die nächste Tabelle zeigt die Kennwerte.

Tab. 4.2 Kennwerte der Zylinderproben aus den Bohrkernen

Charge	Anzahl Proben	f_{cm} [N/mm^2]	x_s [N/mm^2]	ρ_m [kg/m^3]
P20	28	36.1	7.7	2207
P20, UL	11	18.2	4.3	2128
KB	7	37.1	3.0	2273

Die Charge P20, UL zeigt ungewöhnlich tiefe Festigkeitswerte. Dies kann auf eine schlechte Verdichtung (tieferes ρ_m als bei der Charge P20) zurückzuführen sein.

4.1.2 Bewehrungsstahl

Als Bewehrungsstahl für alle Hohlplatten wurden 3/8”-Litzen (Ø=9.3 mm) benutzt. Je nach Charge haben sich die Litzen in der Profilierung oder im Vorspanngrad unterschieden. Als schlaffe Bewehrung wurden beim Kammerbeton eine Längsbewehrung Ø26 und eine Bügelbewehrung Ø14 (beide Topar 500s) und für den Überbeton eine Netzbewehrung Ø8/150 (Artec K335) verwendet. Die Bügel Ø14 konnten wegen den kurzen Längen zwischen den Abbiegungen nicht geprüft werden. Die Prüfung erfolgte nach SIA 162/1 (1989) und EN 10002-1.

Spannstahl

Die Prüflängen der Litzen war ca. 2.00 m. Es wurden die Fliessgrenze bei einer bleibenden Dehnung von 0.2% ($f_{py,0.2}$) und die Zugfestigkeit (f_{pt}) gemessen. Je nach Bruchart (z.T. sind nur einzelne Drähte nahe der Einspannung gebrochen) konnte auch der E-Modul berechnet werden. Die Kennwerte der Litzen sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tab. 4.3 Kennwerte der Spannlitzen

Probe (Charge)	$f_{py,0.2}$ [N/mm^2]	f_{pt} [N/mm^2]	E_p [kN/mm^2]
L1 (P20, P16)	1750	1929	-
L2 (P20, P16)	1740	1885	-
PL1 (P20, PL)	1850	1930	196
PL2 (P20, PL)	-	1926	-
PL3 (P20, PL)	-	1938	-
UL1 (P20, UL)	1688	-	202

Tab. 4.3 Kennwerte der Spannlitzen

Probe (Charge)	$f_{py,0.2}$ [N/mm^2]	f_{pt} [N/mm^2]	E_p [kN/mm^2]
UL2 (P20, UL)	1671	1844	203
UL3 (P20, UL)	1688	1844	204

$f_{py,0.2}$: 0.2%-Dehngrenze des Spannstahls
f_{pt}: Zugfestigkeit des Spannstahls
E_p: Elastizitätsmodul des Spannstahls

Schlaffe Bewehrung

Bei der schlaffen Bewehrung wurden die obere Fliessgrenze (f_{sy}) und die Zugfestigkeit (f_{st}) gemessen. Aufgrund einer Anfangsmesslänge konnte die Bruchdehnung ($\varepsilon_{u,5}$) berechnet werden. Die Resultate sind aus der folgenden Tabelle ersichtlich.

Tab. 4.4 Kennwerte der schlaffen Bewehrung

Probe (Versuch)	Ø [mm]	f_{sy} [N/mm^2]	f_{st} [N/mm^2]	$\varepsilon_{u,5}$ [%]
Netz1 (S3K4)	8	579	602	8
Netz2 (S3K4)	8	574	610	15
Bew1 (S3K2)	26	491	627	44
Bew2 (S3K2)	26	487	628	40

Ø: Durchmesser
f_{st}: Zugfestigkeit des Bewehrungsstahls
f_{sy}: Fliessgrenze des Bewehrungsstahls
$\varepsilon_{u,5}$: Bruchdehnung

4.1.3 Baustahl

Die Stahlträger bestanden aus einem 1/2-IPE 400 und einem FLA 400/12. Die Probenentnahmestellen und -form sind in der nächsten Abbildung dargestellt. Die Prüfungen erfolgten gemäss EN 10002-1.

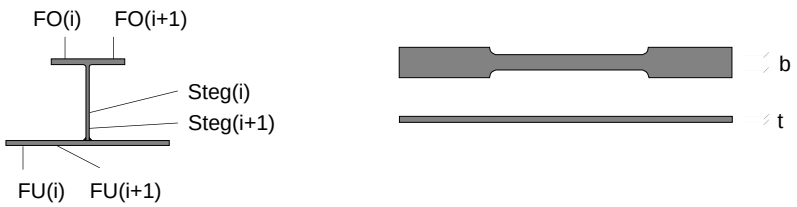


Abb. 4.2 Probenentenahmestellen und -form des Baustahls

Bei den Baustahlproben wurden die obere Fliessgrenze (f_{ay}) und die Zugfestigkeit (f_{st}) gemessen. Aufgrund einer Anfangsmesslänge konnte die Bruchdehnung ($\varepsilon_{u,5}$) berechnet werden. Die Resultate sind aus der folgenden Tabelle ersichtlich.

Tab. 4.5 Kennwerte des Baustahls

Probe (Serie)	t·b [mm]	f_{ay} [N/mm^2]	f_{at} [N/mm^2]	$\varepsilon_{u,5}$ [%]
FO1 (S3K)	13.3·25.0	283	426	31
FO2 (S3K)	13.3·25.0	281	420	31
FU1 (S3K)	12.3·25.0	250	393	35
FU2 (S3K)	12.4·25.0	250	395	34
Steg1 (S3K)	8.3·19.9	312	433	16
Steg2 (S3K)	8.4·19.9	297	431	17

f_{at}: Zugfestigkeit des Baustahls
f_{ay}: Fliessgrenze des Baustahls
$\varepsilon_{u,5}$: Bruchdehnung

4.2 Versuchskörper

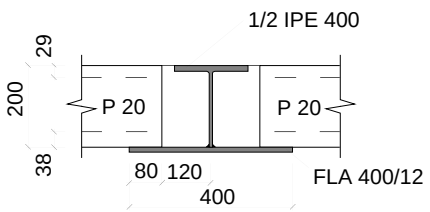
Die untersuchten Betonhohlplattentypen sind in Anhang A.1 dargestellt. Es wurden nur 3/8” Litzen (ausser bei P20, RV) gebraucht. Durch verschiedene Litzenarten konnten die Verbundeigenschaften variert werden. Es wurden normale Litzen (P16 und P20), Litzen aus profilierten Drähten (P20, PL) und Litzen aus tordierten Drähten (P20, UL) benutzt. Die Vorspannkraft bei den 3/8” Litzen unmittelbar nach dem Vorspannen im Spannbett betrug 56 kN pro Litze (vgl. Anhang A.1).

Serien S1K, S2K, S5K und S6K

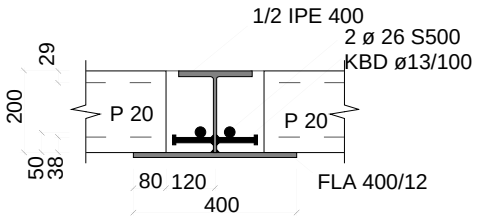
Diese Serien dienten als Querkraftversuche an einfach gelagerten Betonhohlplatten auf starrem Auflager. Die Länge der Versuchskörper betrug l=2.70 m. Alle Platten sind herstellungsbedingt b=1.20 m breit, die Höhe der Platten P20 ist h=200 mm und der Platten P16 h=160 mm (vgl. Anhänge A.1 und A.2).

Serie S3K

Die Betonhohlplatten der Serie S3K lagen auf dem Unterflansch eines Slim Floor Trägers. Durch das Vergiessen der Kammern wurden die Hohlkörper auf einer Länge von ca. 100 mm gefüllt. Die Hohlkörper mit der abgebogenen Zugarmierung (2 pro Platte) der Versuche S3K3 und S3K4 waren auf einer Länge von ca. 500 mm mit Beton gefüllt. In Abb. 4.3 sind die untersuchten Querschnitte über dem Mittelauflager abgebildet. In den Versuchen S3K1 bis S3K3 wurden Platten P20 untersucht, im Versuch S3K4 Platten P16 mit 80 mm Überbeton (vgl. Anhänge A.1 und A.3).



S3K1



S3K2

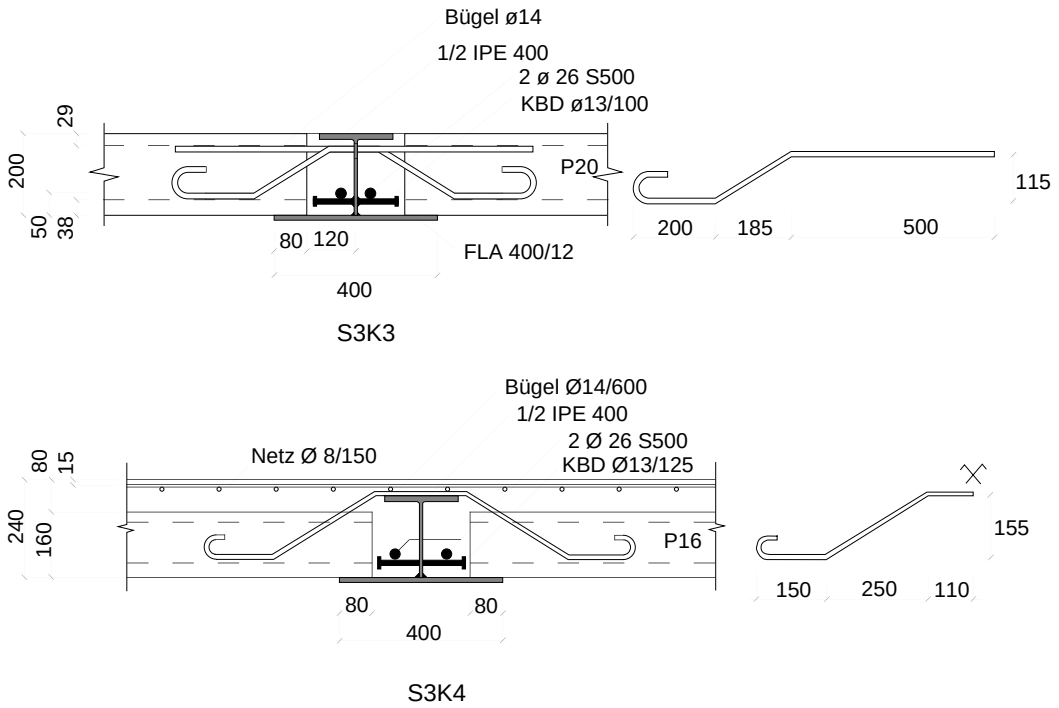


Abb. 4.3 Trägerquerschnitte der Serie S3K

Serie S4K

Die Serie S4K bestand aus zwei Biegeversuchen. Die Länge der Versuchskörper betrug l=5.00 m, die Platten waren 1.20 m breit und 200 mm bzw. 280 mm hoch (vgl. Anhänge A.1 und A.4).

4.3 Versuchseinrichtung

4.3.1 Versuchsrahmen

Der Versuchsrahmen des IBK im HIF C36 (vgl. Anhang B.1) besteht aus einem Aufspannrahmen am Boden, zwei Jochen und einem Längsträger. Der Kraftfluss im Rahmen ist somit in sich geschlossen ist. Der Aufspannrahmen besteht aus zwei Rechteckträgern die mit insgesamt 4 Querträgern miteinander verbunden sind. Der Aufspannrahmen ist mit einer M20-Lochung mit 80 mm Abstand versehen. Die Joche bestehen jeweils aus zwei HEB 300 Profilen, die oben durch einen Querriegel verbunden sind. Auf diesen Querriegeln liegt ein Längsträger, an welchem die Ölhydraulikpressen verschiebbar befestigt sind.

4.3.2 Auflager

Um die Parameter bei den Kaltversuchen gezielt untersuchen zu können, waren verschiedene Auflagerkonstruktionen notwendig. In den folgenden Abbildungen sind diese Auflager dargestellt.

Bei den Serien S1K, S2K, S4K, S5K und z.T. S6K wurden die Auflagerkräfte am starren Auflager (Abk. starr , vgl. Abb. 4.4) gemessen. Damit die Mitte der Auflagerbreite stets über dem Steg des HEB 300 lag, wurde als unmittelbares Auflager für die Hohlplatten ein verschiebliches Flachblech auf dem HEB 300 aufgelegt. Die zwei Kraftmessdosen (vgl. Anhang C.1) hatten einen Abstand von 1.20 m und konnten max. bis zu 300 kN belastet werden. Der HEB 300 wurde gegen Kippen gesichert.

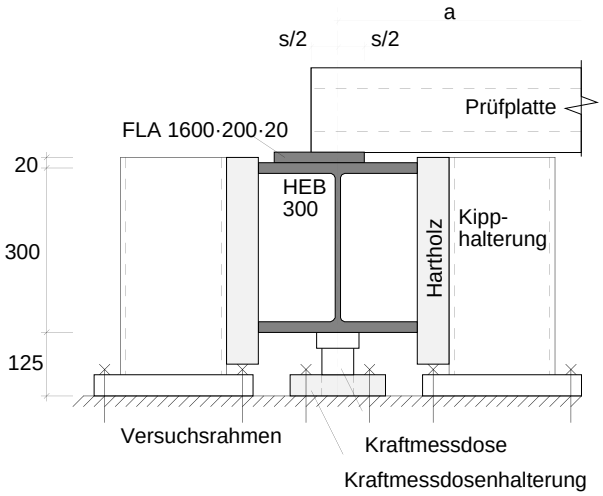


Abb. 4.4 Starres Auflager

In den Versuchen S1K und S2K1 bis 12 wurden beim verschieblichen Auflager die Querkräfte nicht gemessen (vgl. Abb. 4.5 links). Bei den Versuchen S2K13 bis 16, S3K, S4K, S5K und S6K wurden die Auflagerkräfte auch auf der Seite des verschieblichen Auflagers gemessen (vgl. Abb. 4.5 rechts). Dazu wurden unter dem Auflagerträger zwei Kraftmessdosen im Abstand von 1.20 m befestigt. Zur Verhinderung eines Schubbruches am verschieblichen Auflager wurde die Presse jeweils näher am starren Auflager angeordnet. Zudem war am verschieblichen Auflager ein Überstand der Hohlplatte auf dem Auflagerträger (HEB 300) vorhanden.

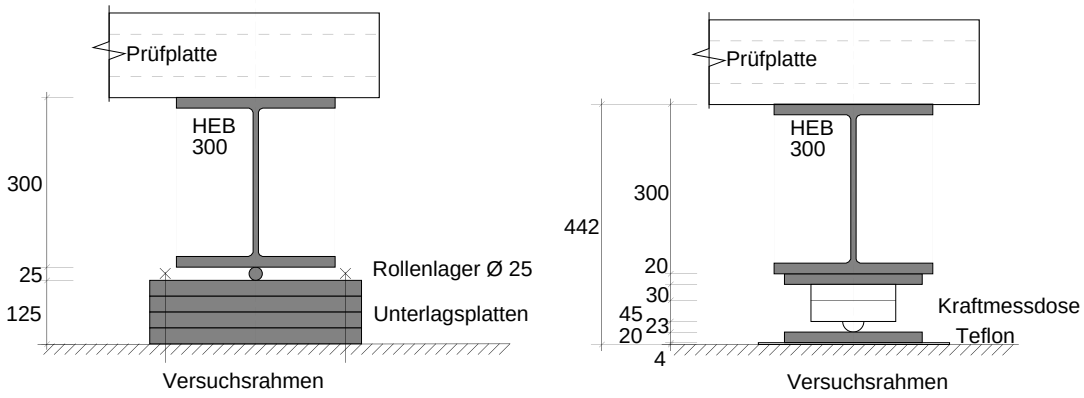


Abb. 4.5 Verschiebliches Auflager

Das Mittelauflager der Versuchsserie S3K ist in Abb. 4.6 dargestellt. Das Auflager für die Hohlplatten bildete der Slim Floor Träger (UF). Dieser wiederum wurde auf zwei Kraftmessdosen im Abstand von 1.20 m gelagert (vgl. Anhang C.2). Die Kraftmessdosen wurden auf einem Träger aufgelagert, damit der Versuchskörper horizontal lag.

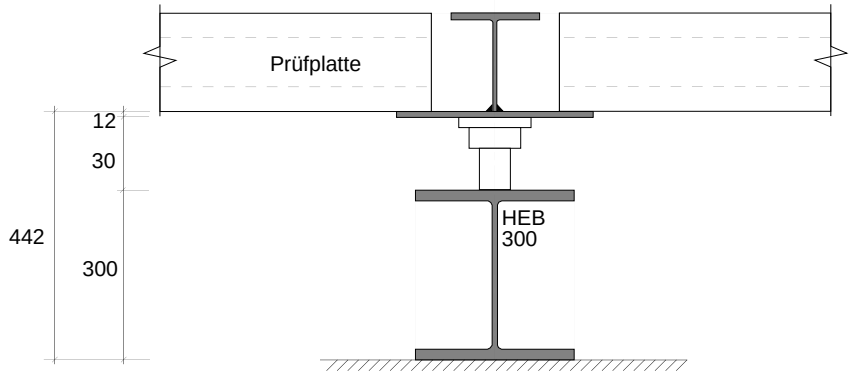


Abb. 4.6 Mittelauflager

Das flexible Auflager (Abk. flex.) bildete ein Profil HEM 140 (vgl. Anhang C.5), welches auf zwei Kraftmessdosen im Abstand von 2.00 m aufgelagert war. Um das Auflager über dem Steg des HEM 140 zu zentrieren, wurde wie beim starren Auflager auch ein Flachblech FLA (1200·80·10) benutzt.

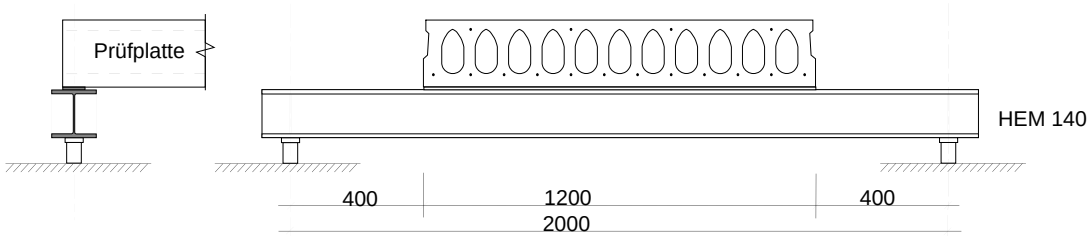


Abb. 4.7 Flexibles Auflager

4.3.3 Belastung

Die Kraft für die Belastung wurde von Pressen (Parker, Bohrung 127 mm, Hub 200 mm) mit einer max. möglichen Druckkraft von 443 kN (Abk. K) aufgebracht. Die Belastung durch das Aggregat war kraftgesteuert. Zur Lastverteilung diente ein Profil HEB 300 mit einer Länge von 1.40 m, um eine möglichst gleichmässige Linienlast quer zur Plattenachse zu gewährleisten.

Bei den Linienlasten lag unter dem HEB 300 eine Stahlleiste (FLA 1600·50·20) und ein Streifen Hartfaser Holzwerkstoff (1200·50·2), um leichte Unebenheiten der Betonoberfläche auszugleichen. Bei der Belastungsart “Linienlast (LL)“ wurde nur eine Presse eingesetzt, bei der “Doppellinienlast (DLL)“ deren zwei. Der Lastabstand a von der Auflagermitte wurde immer bis zur Mitte des FLA 1600·50·20 gemessen (vgl. Abb. 4.8).

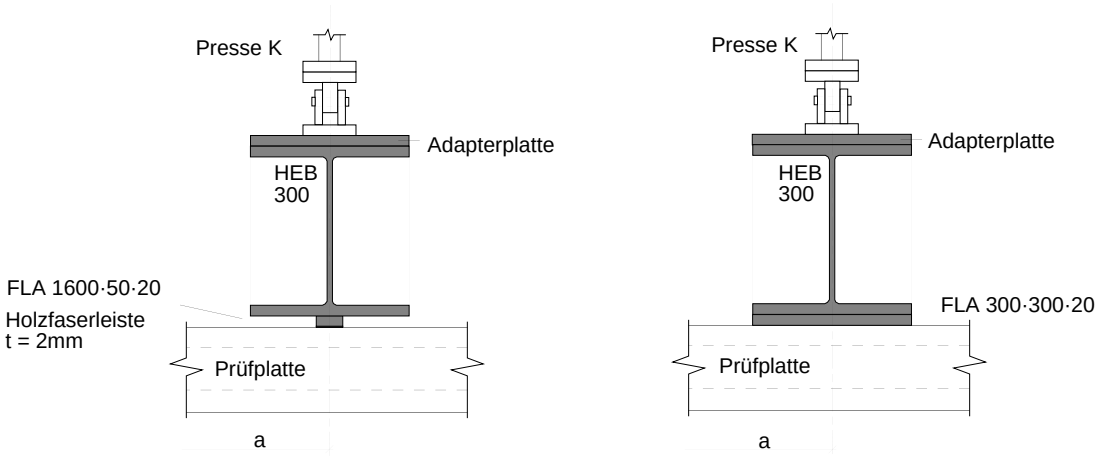


Abb. 4.8 Lasteinleitung von Linienlast (LL bzw. DLL) und Punktlast (EL bzw. ZL)

Bei den Punktlasten lag unter dem HEB 300 eine (EL) bzw. zwei (ZL) Stahlplatten (300·300·20). Der Kraftabstand a von der Auflagermitte wurde immer bis zur Auflagermitte gemessen (vgl. Abb. 4.8 und 4.9).

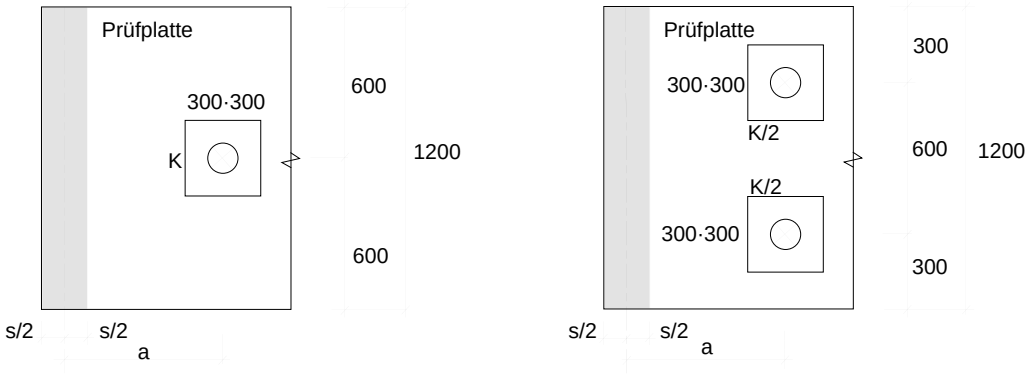


Abb. 4.9 Lage der Punktlasten

Der Versuch S5K1 wurde gleichmässig (GM) belastet (vgl. Anhang B.2). Dazu wurden Kissen mit Luft gefüllt und mit einem Stahlrahmen umfasst. Auf diesen wurde ein Rost mit Stahlprofilen aufgelegt, welcher von unten mit Zugstangen am Aufspannrahmen (Anhang B.1) befestigt wurde. Damit die Kissen bei grossen Verformungen der Prüfplatte seitlich nicht entweichen konnten, wurden zwischen Stahlrahmen und Kissen Abkantbleche eingelegt, die bei grösser werdenden Durchbiegungen der Prüfplatte nach unten gezogen wurden. (Luftversuche bieten ein grosses Risiko unkontrollierter Energiefreisetzung. Wassergefüllte Kissen sind vorzuziehen.)

4.4 Versuchsdurchführung

Die Versuchskörper wurden im Werk der Firma Brun AG erstellt und fertig an die ETH Zürich geliefert. Sie wurden mittels eines Hubstaplers in den Versuchsrahmen eingebaut. Für den Transport und den Einbau mussten die Versuchskörper der Serie S3K durch einen Rahmen stabilisiert werden. Sämtliche Versuche wurden kraftgesteuert durchgeführt. Traten in den Decken-

elementen Biegerisse auf, so wurden sie entlastet. So konnten Weggeber zur Messung des Öffnungszeitpunktes der Risse montiert werden. Danach wurde bis zum Bruch belastet.

4.5 Messungen

Die Pressen bei den Kaltversuchen wurden von Hand gesteuert. Die Messungen wurden bei jeder Laststufe durchgeführt. Es wurden Durchbiegungen, Öldruck der Pressen, Schlupf und Auflagerkräfte gemessen. Sämtliche Messparameter sind im Anhang C dargestellt. Die Genauigkeit der einzelnen Messinstrumente ist in folgender Tabelle dargestellt.

Tab. 4.6 Genauigkeit der Messinstrumente

Messinstrument	Max. mögl. Wert	Bezogene Genauigkeit	Absolute Genauigkeit
Kraftmessdose	300 kN	0.25 %	0.8 kN
	121 kN	0.1 %	0.1 kN
	50 kN	0.1 %	0.1 kN
Weggeber	100 mm	0.3 %	0.3 mm
	50 mm	0.3 %	0.2 mm
Schlupfmesser	10 mm	0.25 %	0.03 mm
	10 mm	0.1 %	0.01 mm
Pressendruck	350 bar	0.25 %	0.9 bar

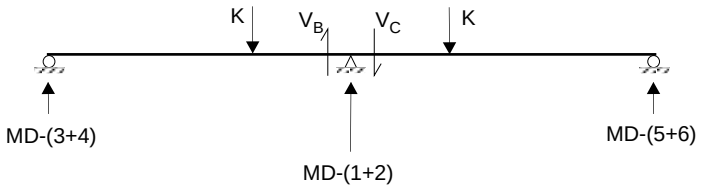
4.6 Versuchsresultate

Jeder Kaltversuch wird nachfolgend auf einer Doppelseite dargestellt. Folgende Punkte erläutern die Darstellung der Kaltversuche:

- Im Titel jedes Kaltversuches wird neben der Versuchsbezeichnung (z.B. S1K07) auch der Versuchstyp beschrieben. Der Typ wird durch die Spannweite (l), den Kraftabstand (a), die Auflagerbreite (s), den Plattentyp (P16/ÜB, P20/PL/RV/ÜB/UL), den Auflagertyp (flex., starr, UF) und die Art der Lasteinleitung (LL, DLL, EL, ZL) definiert.
- In den Messwerten ist das Eigengewicht und das Gewicht der Lasteinleitungskonstruktion nicht enthalten. In der Zusammenstellung der Resultate der Kaltversuche in Kap. 4.7 wird dieser Anteil berücksichtigt.
- Bei den Schlupfmessungen waren infolge der Herstellungstoleranzen der Hohlplatten einzelne Weggeber nicht funktionsfähig. Diese Weggeber sind dann in den Diagrammen nicht aufgeführt.
- Bei den Spaltmessungen ist z.T. der Bruch nicht in den gemessenen Rissen aufgetreten.
- In den Bruchbildern sind die grössten und für den Bruch massgebenden Risse eingezeichnet. Dünn gezeichnete Risse spielen eine untergeordnete Rolle; wegen der Übersicht wurden viele kleine Risse weggelassen.
- Die Versuchsfotos sind jeweils mit der Versuchsbezeichnung und mit der Laststufe der Pressenkraft K gekennzeichnet.

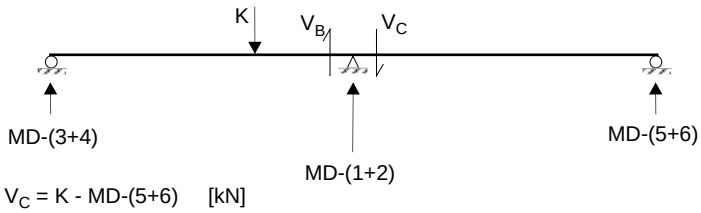
- Bei der Bezeichnung der Bruchart bedeuten Klammern, dass die entsprechende Bruchart nur in einem Teil der Platte aufgetreten ist. Beim Litzenschlupf (SL) bedeuten Klammern, dass nur an einzelne Litzen Relativverschiebungen aufgetreten sind, oder dass sich die Litzen nur wenig (weniger als 0.1 mm) bewegt haben.
- Die Versuchskörper der Serie S3K waren statisch unbestimmt gelagert. Die für den Bruch massgebenden Querkräfte wurden gemäss folgender Abbildung bestimmt.

Stat. Modell für S3K1a, S3K2a, S3K3 und S3K4



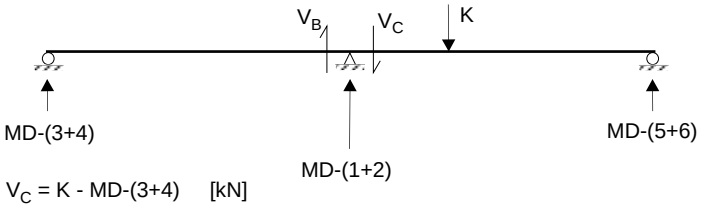
V_B = MD-(1+2) - K + MD-(5+6) [kN]
V_C = MD-(1+2) - K + MD-(3+4) [kN]

Stat. Modell für S3K2b



V_C = K - MD-(5+6) [kN]

Stat. Modell für S3K1b



V_C = K - MD-(3+4) [kN]

Abb. 4.10 Querkräfte der Versuchsserie S3K

Tab. 4.7 Versuchsresultate S1K01

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	199.1	130.6	168.0	-	-
f_{Km} [mm]	-	-	-	-	-

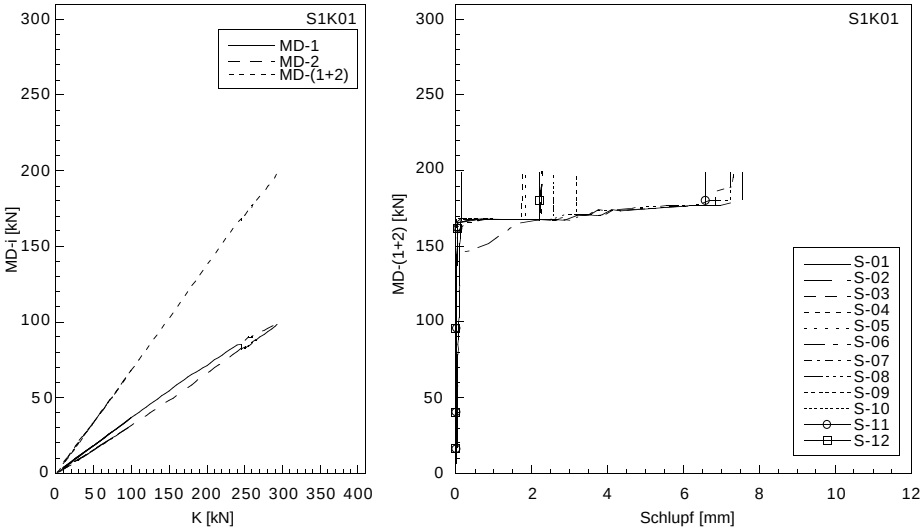


Abb. 4.11 Pressen-, Auflagerkräfte und Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

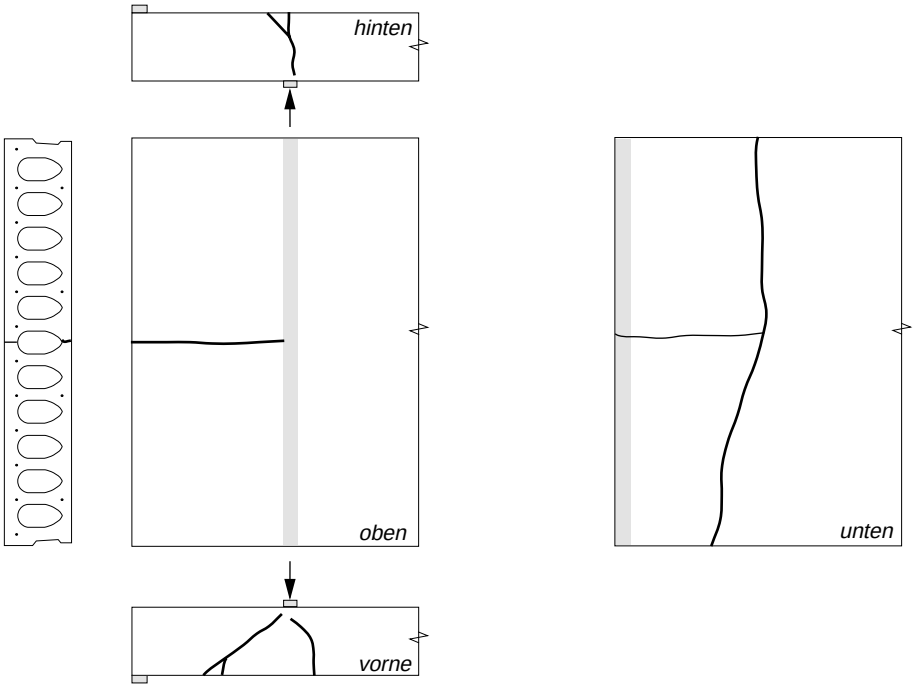


Abb. 4.12 Bruchbild

Abb. 4.13 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Leichte Abplatzungen bei den Auflagern bei K=200 kN
Längsriss in Plattenmitte bei K=285 kN
Versuch wegen zu grossen Durchbiegungen abgebrochen
Bruchart SL/(SC)

Tab. 4.8 Versuchsresultate S1K02a

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	150.1	-	-	-	-
f_{Km} [mm]	-	-	-	-	-

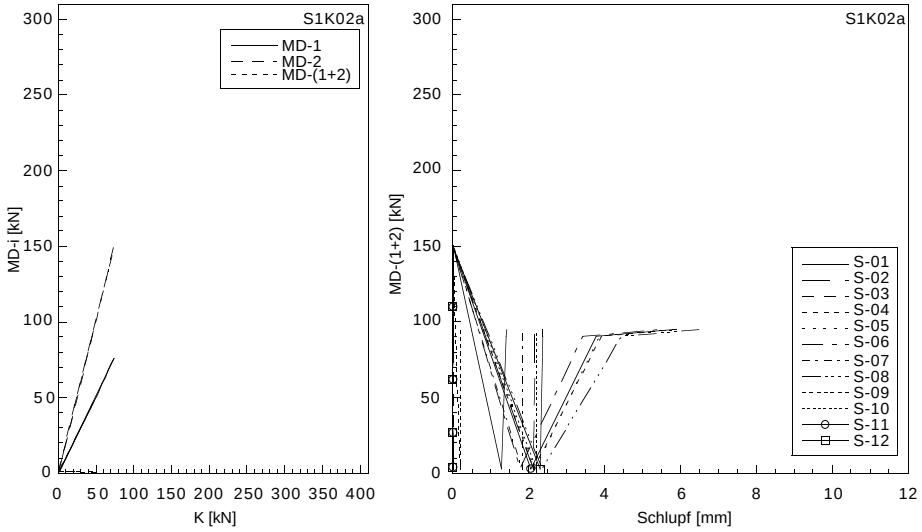


Abb. 4.14 Pressen-, Auflagerkräfte und Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

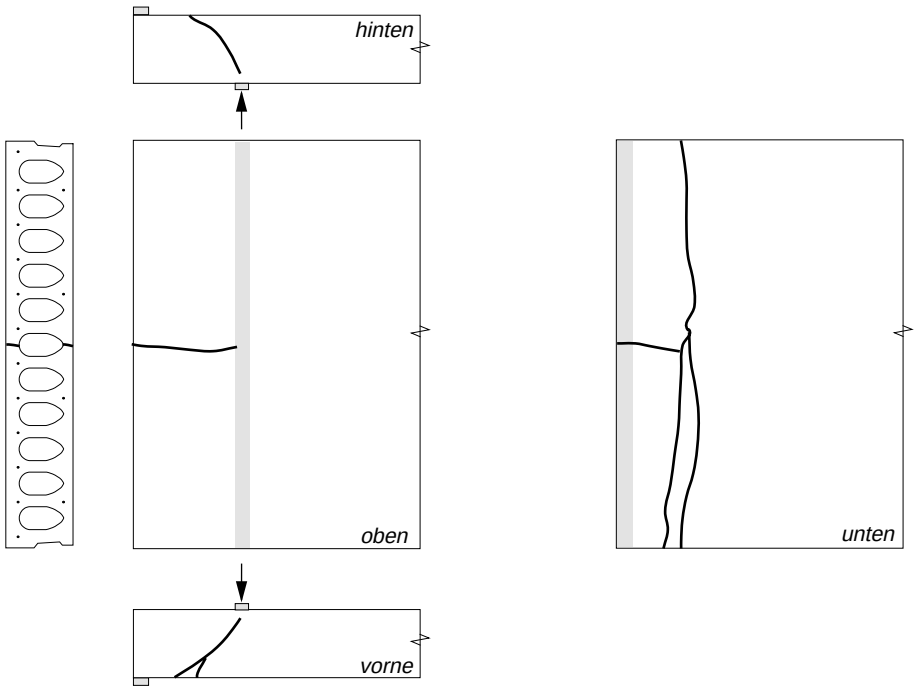


Abb. 4.15 Bruchbild

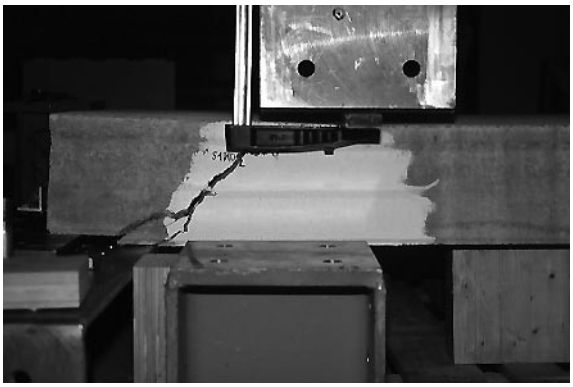


Abb. 4.16 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Längsriss in Plattenmitte, bei Wiederbelastung wird die Bruchlast nicht mehr erreicht
Bruchart A

Tab. 4.9 Versuchsresultate S1K02b

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	214.1	-	-	-	-
f_{Km} [mm]	-	-	-	-	-

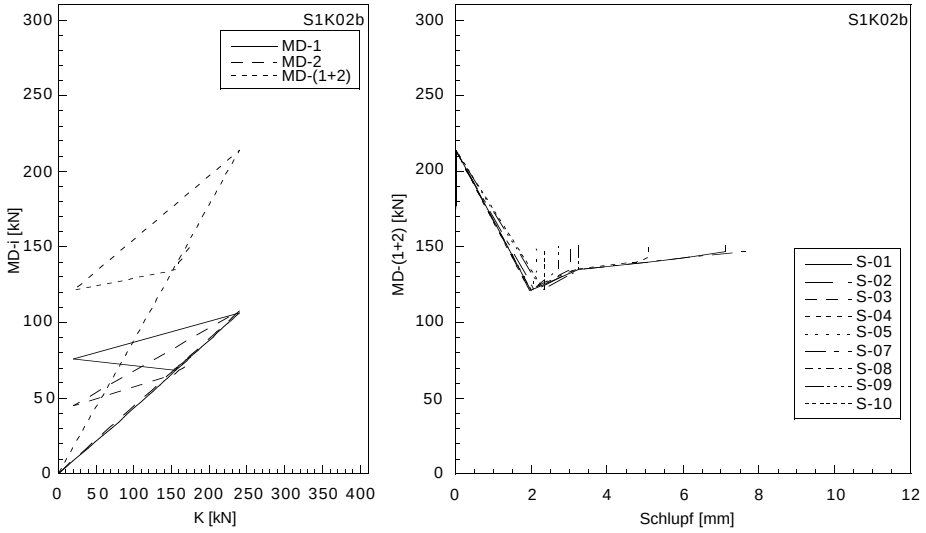


Abb. 4.17 Pressen-, Auflagerkräfte und Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

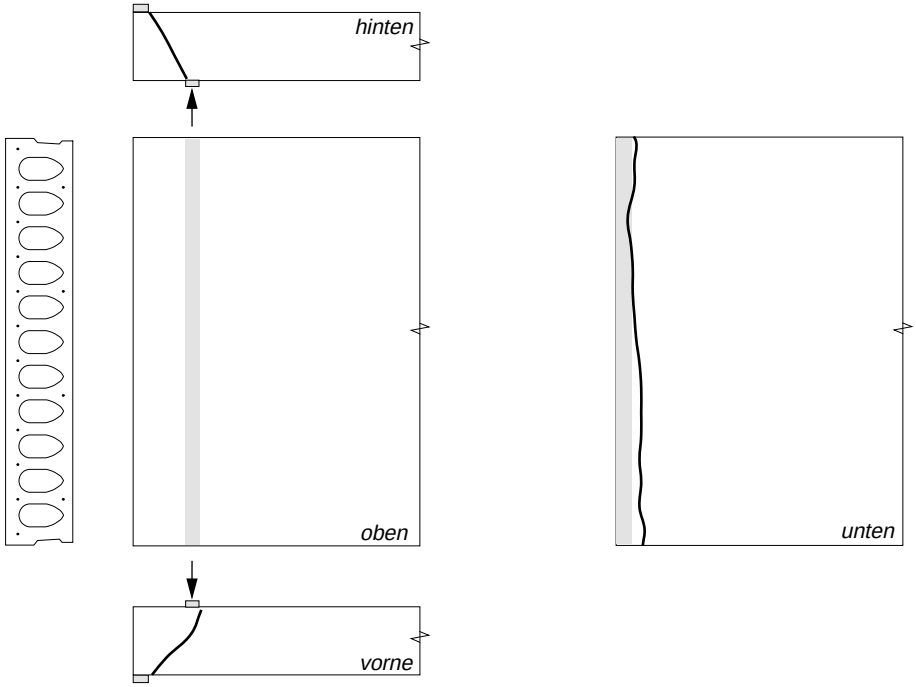


Abb. 4.18 Bruchbild

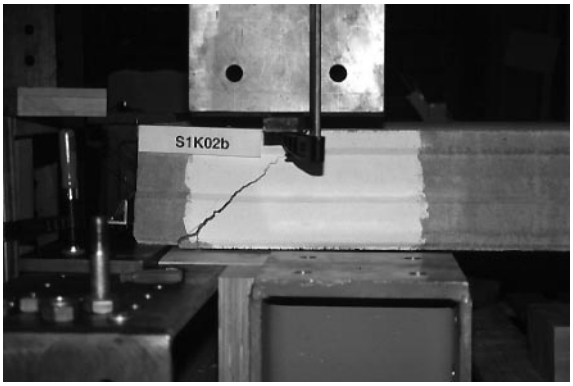


Abb. 4.19 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Bei Wiederbelastung wird die Bruchlast nicht mehr erreicht
Bruchart A

Tab. 4.10 Versuchsresultate S1K03a

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	275.0	225.8	229.0	-	-
f_{Km} [mm]	-	-	-	-	-

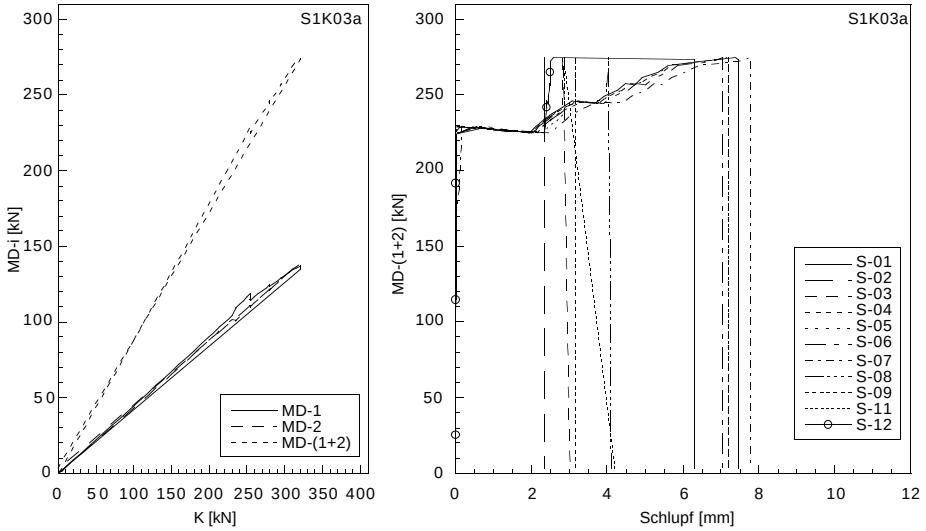


Abb. 4.20 Pressen-, Auflagerkräfte und Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

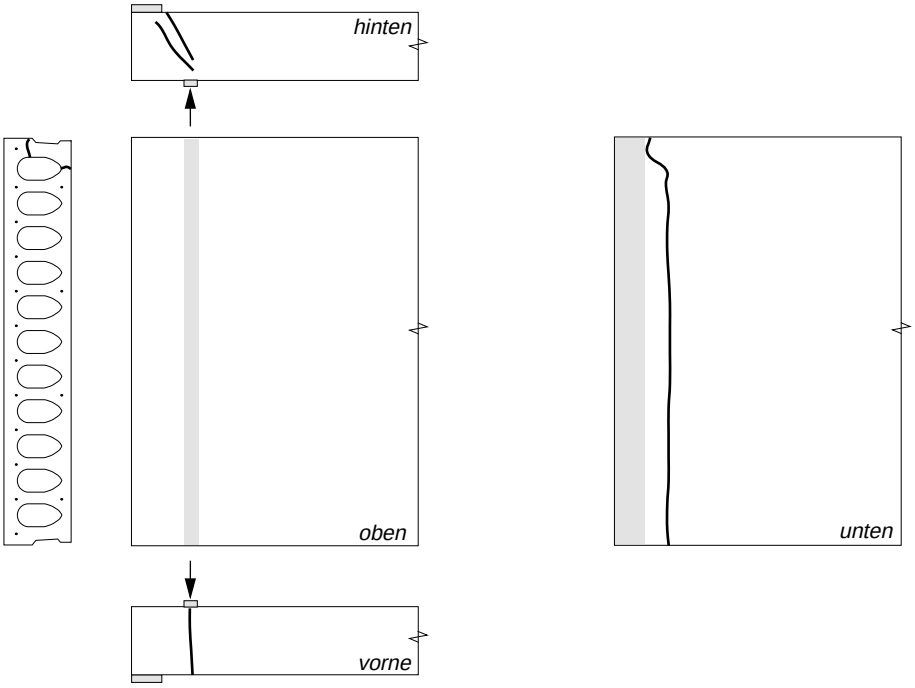


Abb. 4.21 Bruchbild

Abb. 4.22 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Schubzugriss in Steg 12 bei K=235 kN (vgl. Anhang C.1)
Bruchart ST/SL/A

Tab. 4.11 Versuchsresultate S1K03b

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	239.0	232.0	232.0	-	-
f_{Km} [mm]	17.9	1.9	1.9	-	-

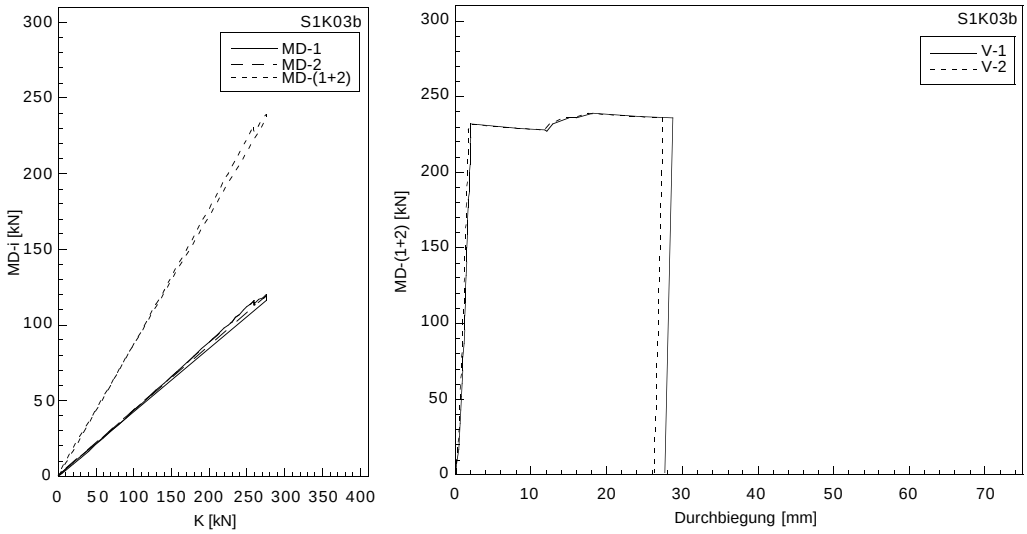


Abb. 4.23 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

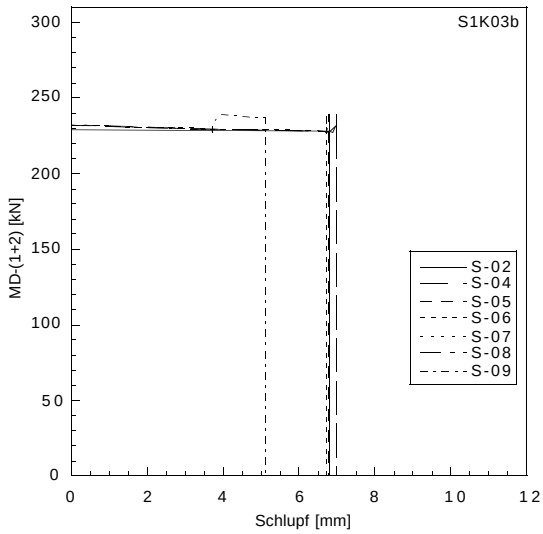


Abb. 4.24 Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

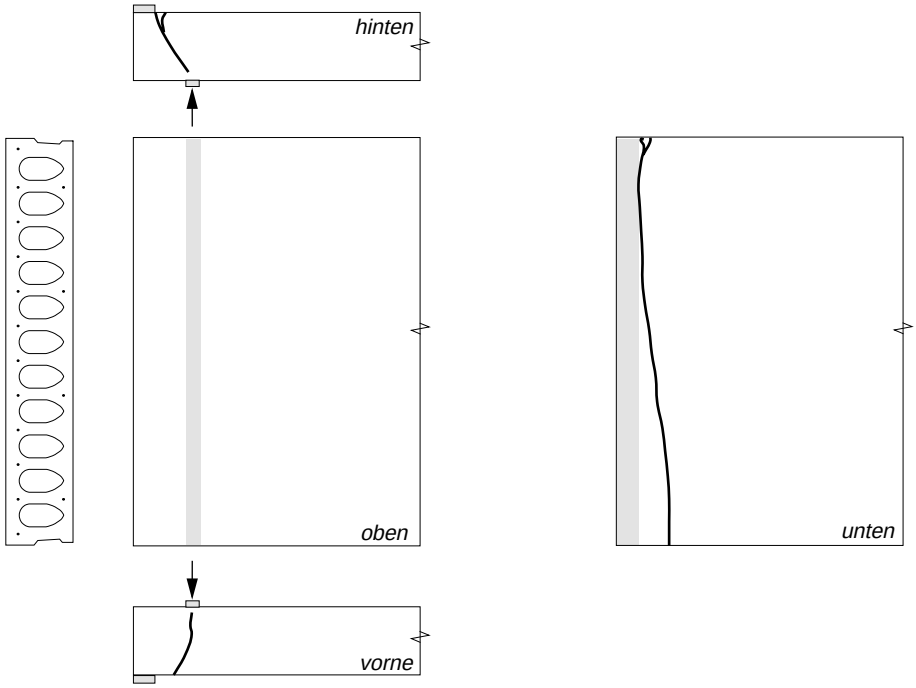


Abb. 4.25 Bruchbild

Abb. 4.26 Bruchzustand von hinten

Bemerkung: Bruchart SL/A

Tab. 4.12 Versuchsresultate S1K04

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	246.3	186.0	186.0	101.5	164.1
f_{Km} [mm]	34.7	3.8	3.8	5.7	7.2

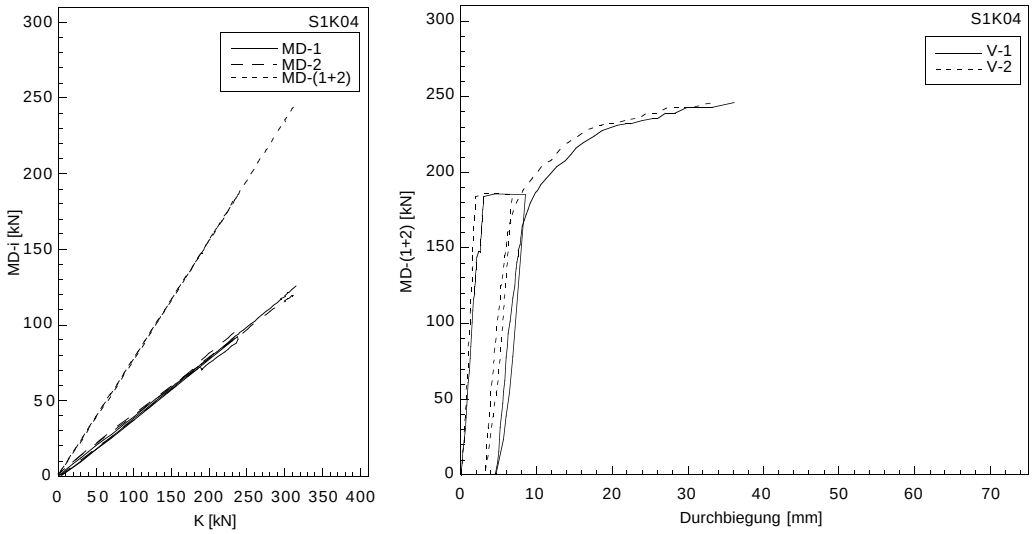


Abb. 4.27 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

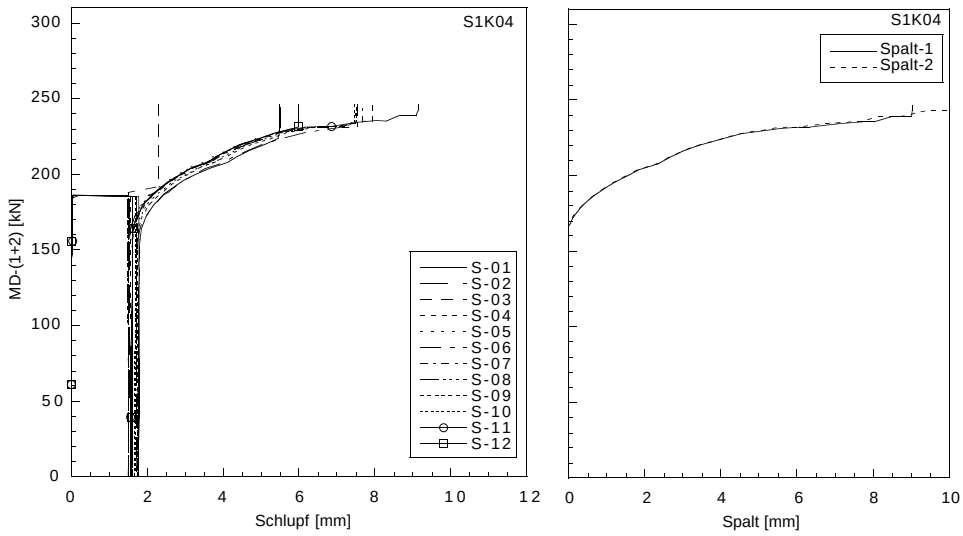


Abb. 4.28 Schlupf- und Spaltmessungen (vgl. Anhang C.1)

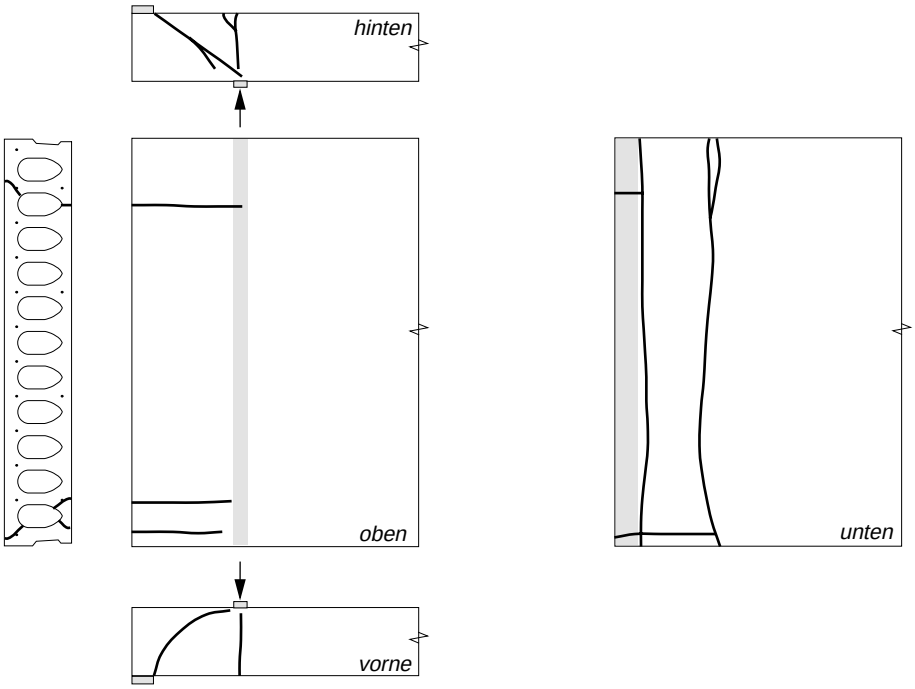


Abb. 4.29 Bruchbild

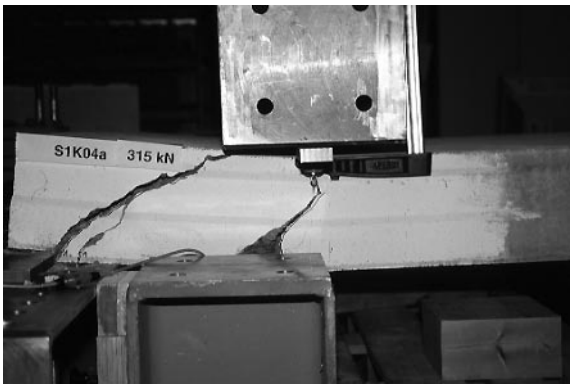


Abb. 4.30 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Diagonalriss in Steg 1 bei K=190 kN (vgl. Anhang C.1)
Bruchart SL/A

Tab. 4.13 Versuchsresultate S1K05

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	243.7	192.9	189.8	161.6	185.8
f_{Km} [mm]	18.7	3.4	4.1	3.1	3.8

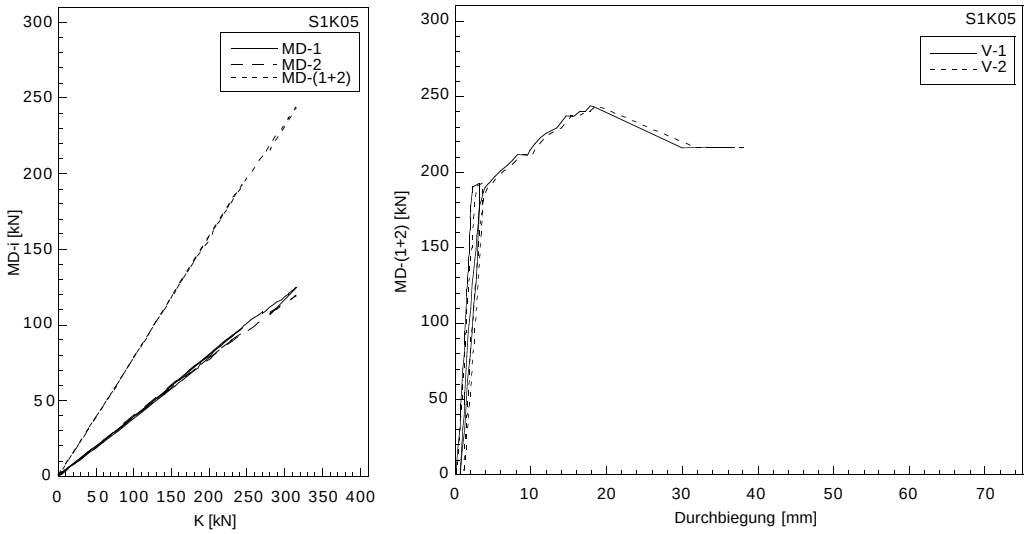


Abb. 4.31 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

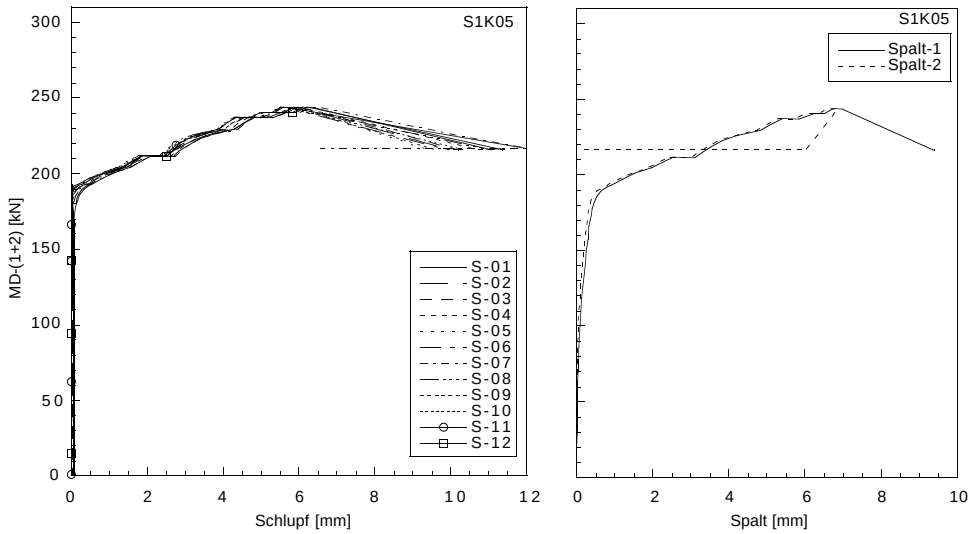


Abb. 4.32 Schlupf- und Spaltmessungen (vgl. Anhang C.1)

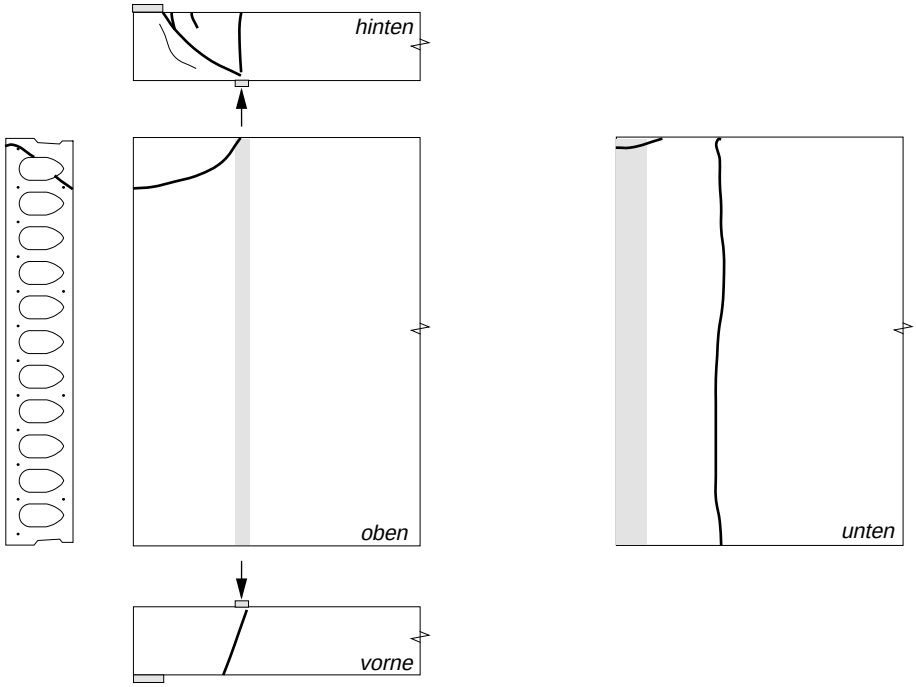


Abb. 4.33 Bruchbild

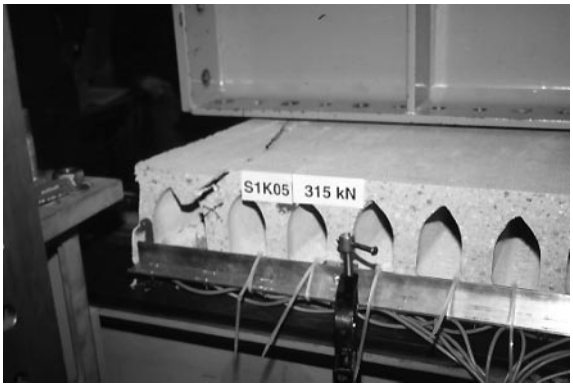


Abb. 4.34 Bruchzustand von der Ecke hinten

Bemerkung: Diagonalriss im Steg 12 bei K=180 kN (vgl. Anhang C.1)
Schubzugriss in Steg 12 bei K=225 kN
Ecke hinten bricht ganz weg bei K=315 kN
Bruchart: ST/SL/E

Tab. 4.14 Versuchsresultate S1K06

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	197.8	127.1	168.2	88.9	102.6
f_{Km} [mm]	63.9	2.9	7.4	2.5	2.8

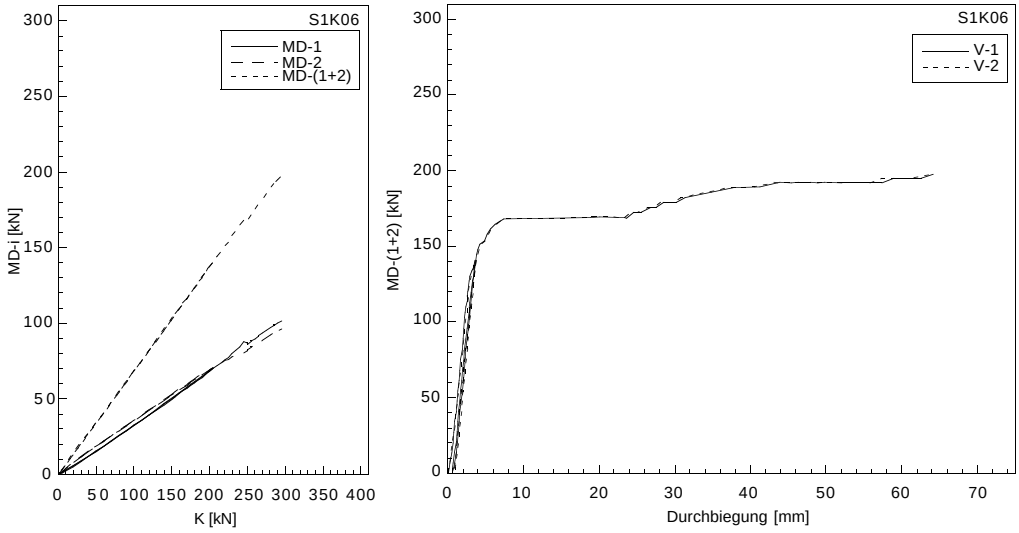


Abb. 4.35 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

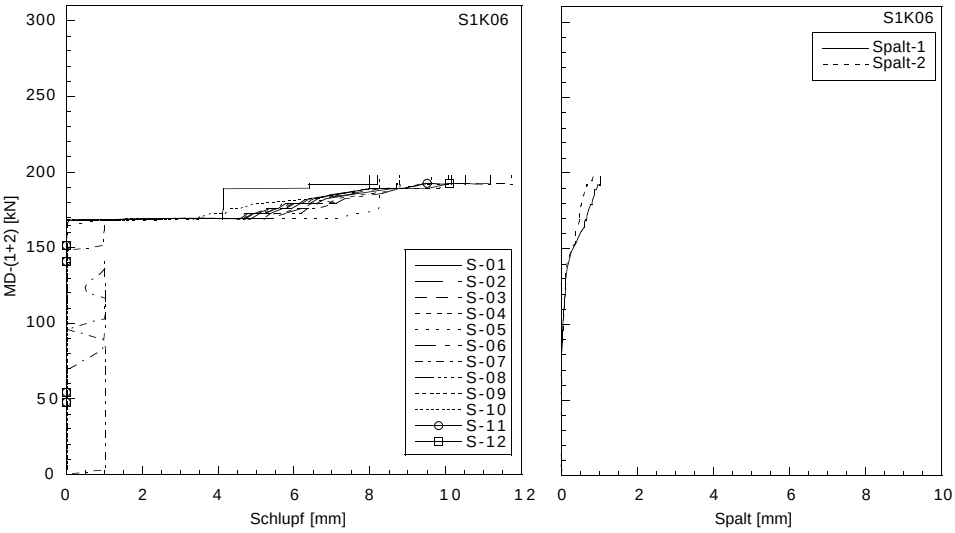


Abb. 4.36 Schlupf- und Spaltmessungen (vgl. Anhang C.1)

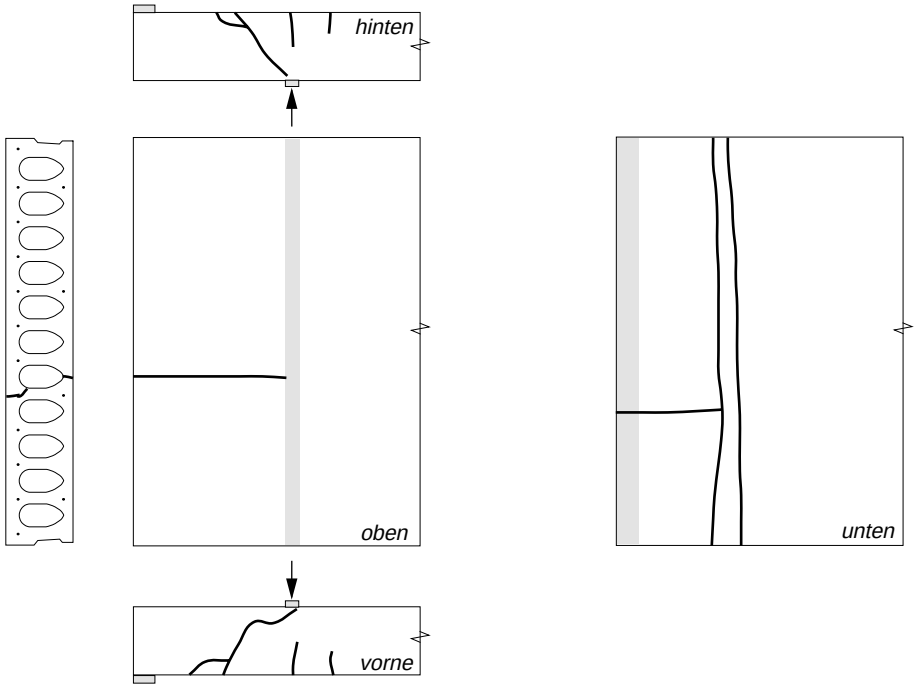


Abb. 4.37 Bruchbild

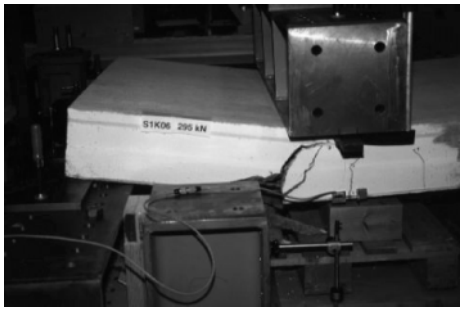


Abb. 4.38 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Riss in Plattenlängsrichtung bei K=290 kN (vgl. Anhang C.1)
Bruchart SL/SC

Tab. 4.15 Versuchsresultate S1K07

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	218.9	133.0	183.4	109.0	132.8
f_{Km} [mm]	54.3	3.2	9.7	2.7	3.3

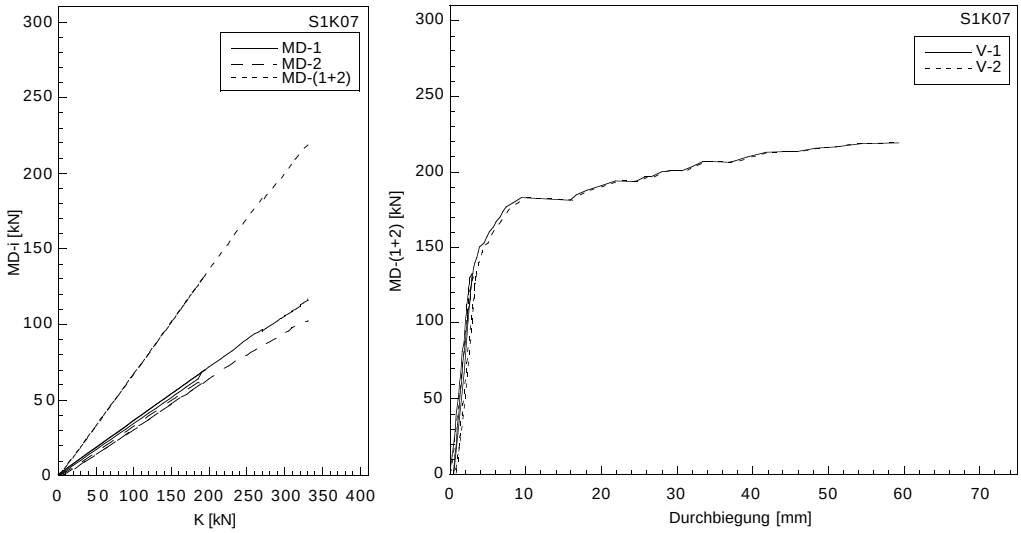


Abb. 4.39 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

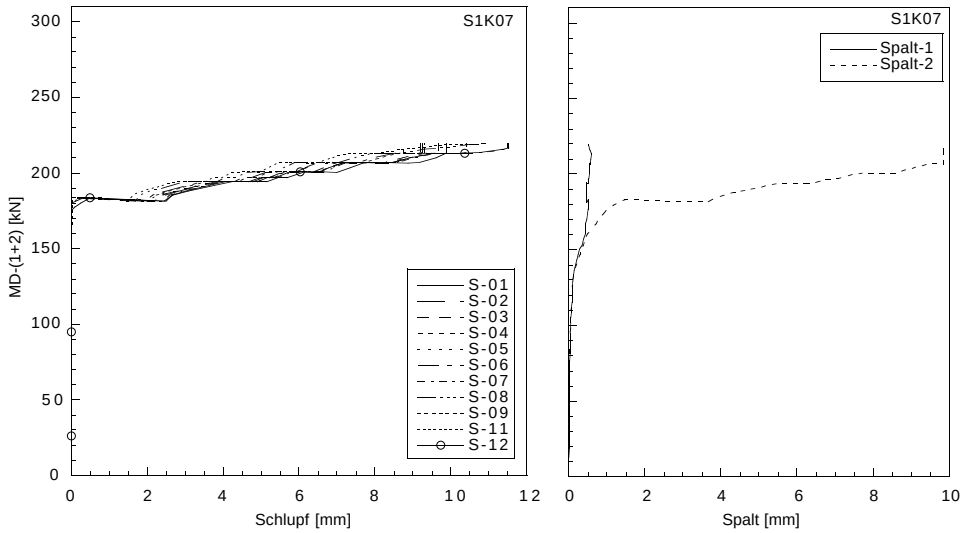


Abb. 4.40 Spalt- und Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

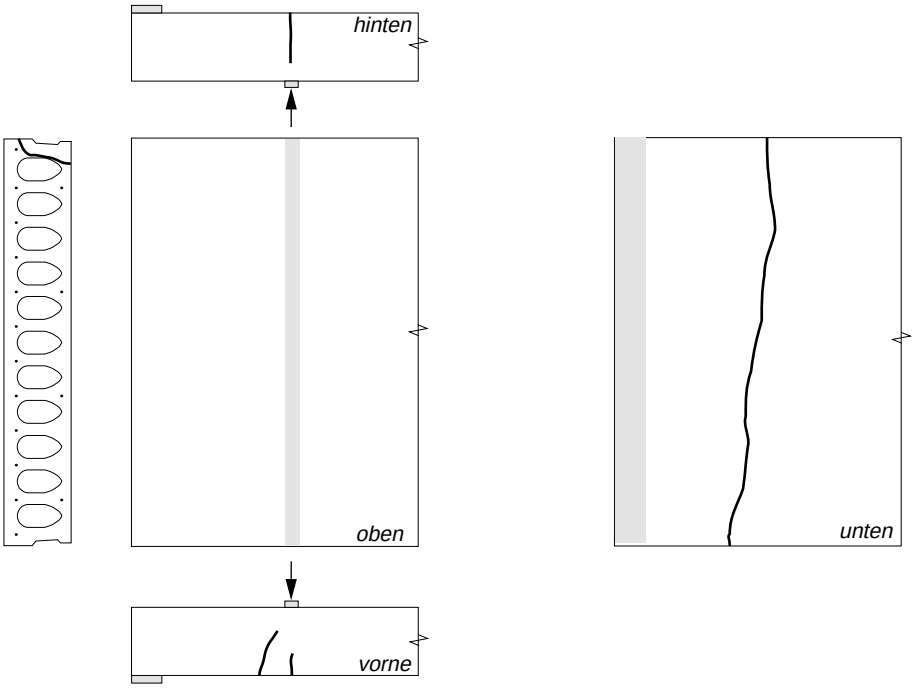


Abb. 4.41 Bruchbild

Abb. 4.42 Bruchzustand von hinten

Bemerkung: Risse in Ecke hinten bei K=190 kN
Einzelne Drähte brechen bei K=325 kN, Versuch wird abgebrochen
Bruchart SL/(FT-SC)

Tab. 4.16 Versuchsresultate S1K08

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	182.2	111.4	160.5	92.8	102.2
f_{Km} [mm]	67.2	3.8	16.8	3.2	3.6

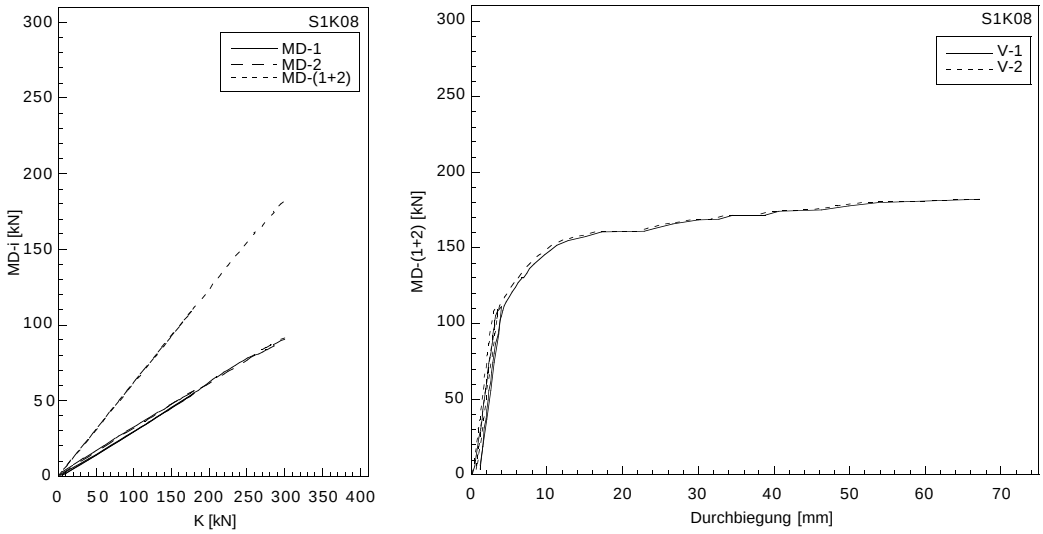


Abb. 4.43 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

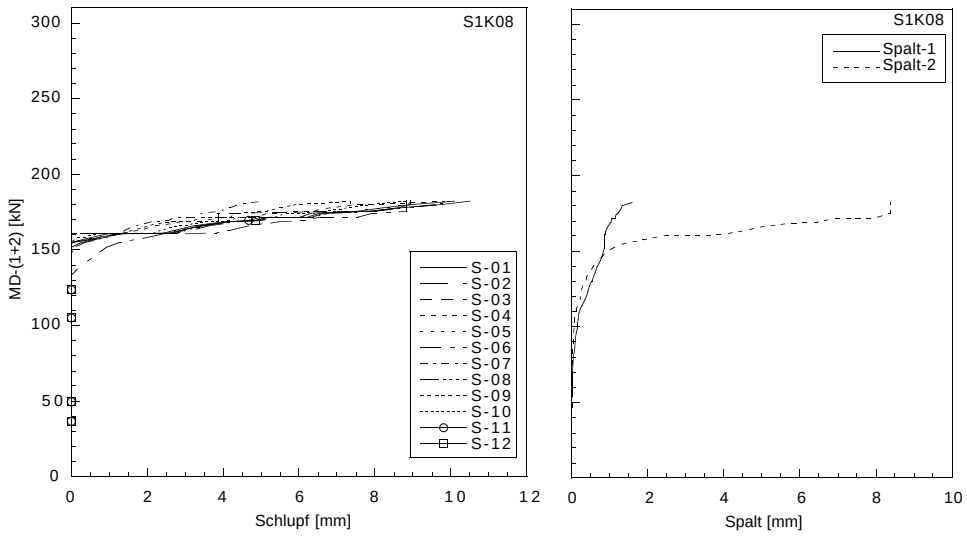


Abb. 4.44 Schlupf- und Spaltmessungen (vgl. Anhang C.1)

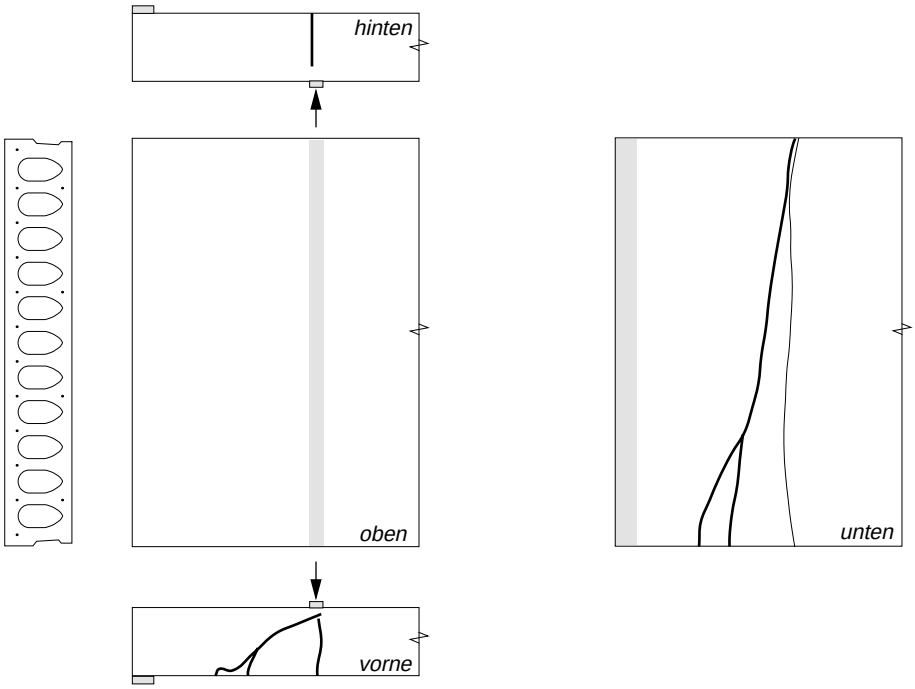


Abb. 4.45 Bruchbild

Abb. 4.46 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Einzelne Drähte reissen bei K=300 kN, Versuch wird abgebrochen
Bruchart SL/(FT-SC)

Tab. 4.17 Versuchsresultate S1K09

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	167.3	105.7	155.8	71.1	86.9
f_{Km} [mm]	25.6	3.5	13.3	2.6	3.1

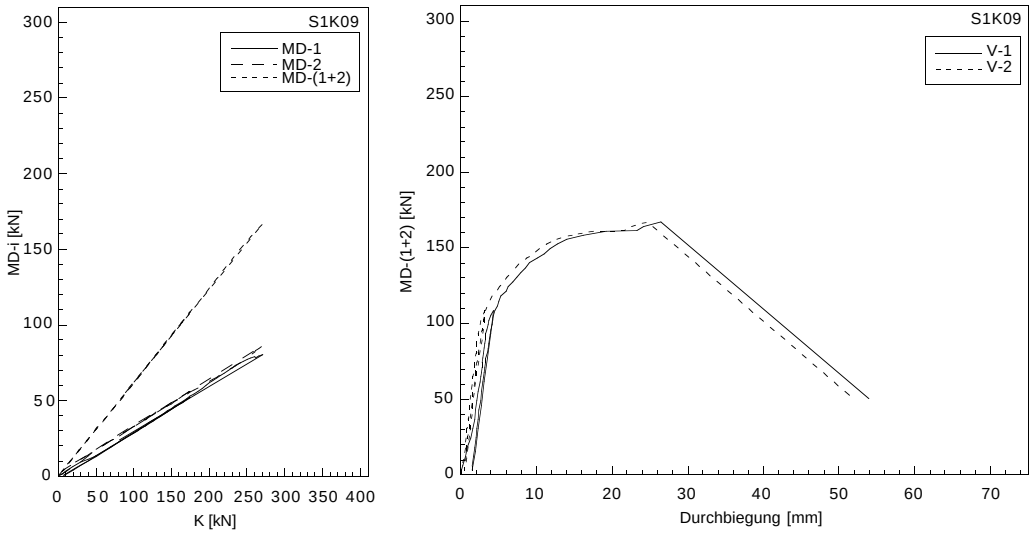


Abb. 4.47 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

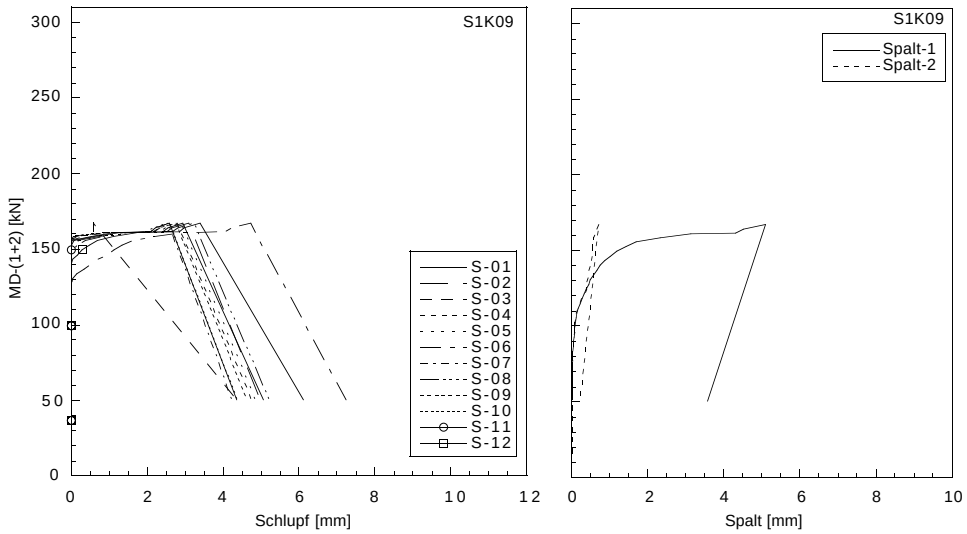


Abb. 4.48 Schlupf- und Spaltmessungen (vgl. Anhang C.1)

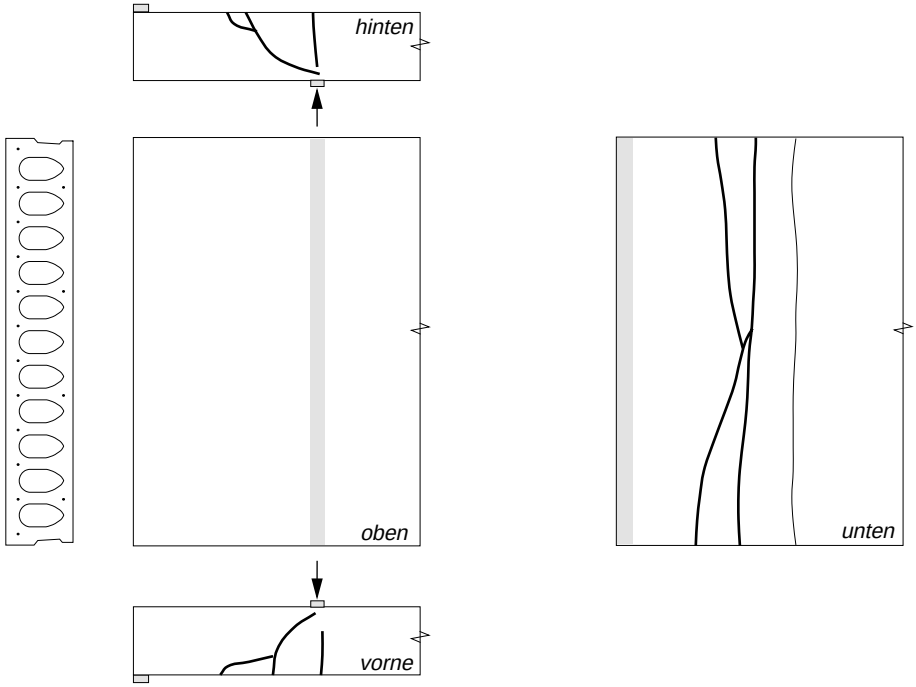


Abb. 4.49 Bruchbild

Abb. 4.50 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Bruchart SL/SC

Tab. 4.18 Versuchsresultate S1K10a

	Bruch	Riss	Schlupf	Dec-	Dec+
MD-(1+2) [kN]	229.4	-	229.4	-	-
f_{Km} [mm]	2.0	-	2.0	-	-

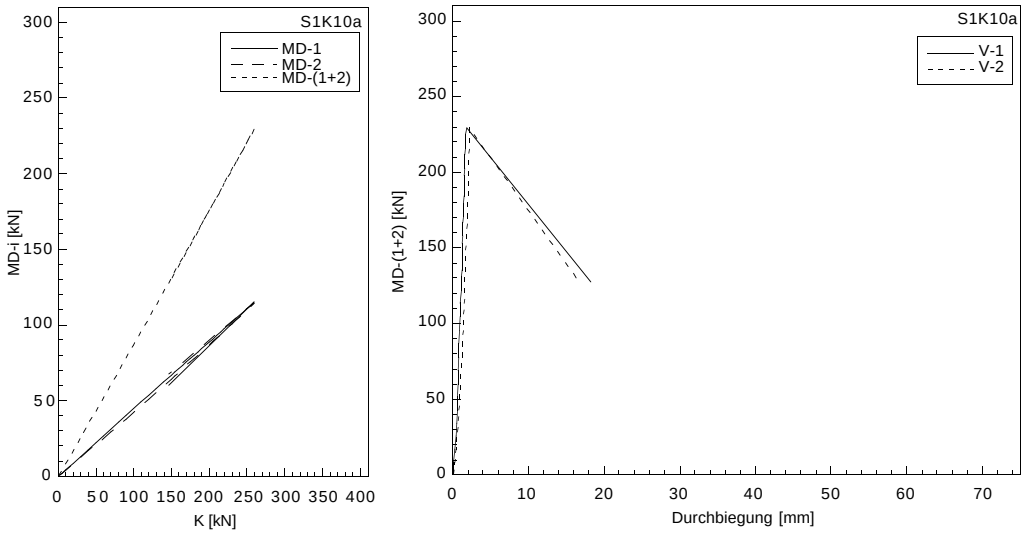


Abb. 4.51 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

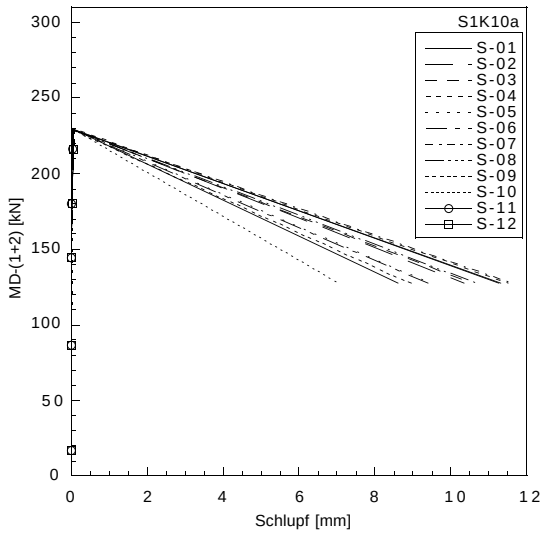


Abb. 4.52 Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

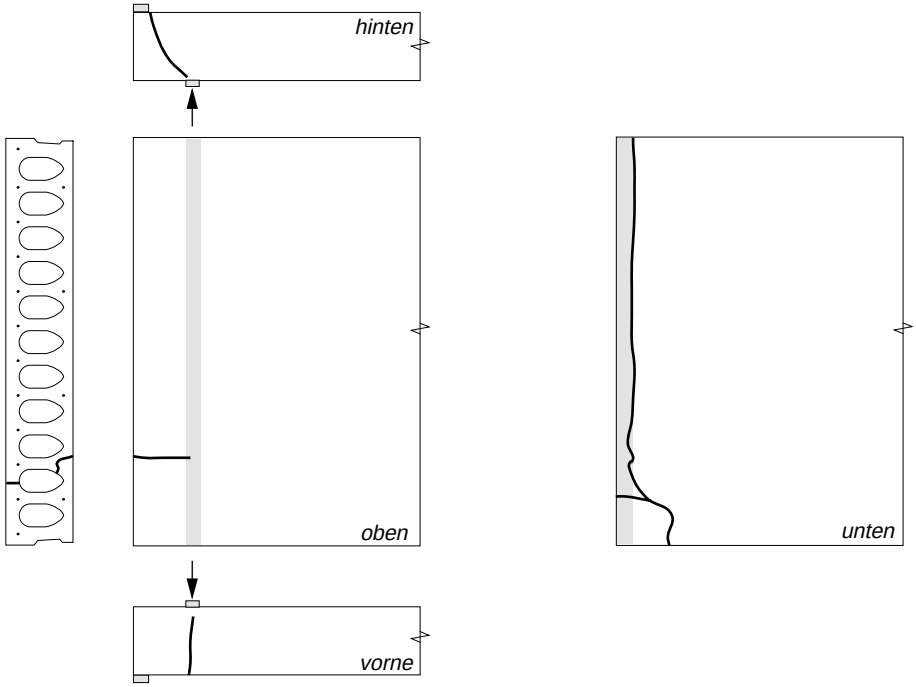


Abb. 4.53 Bruchbild

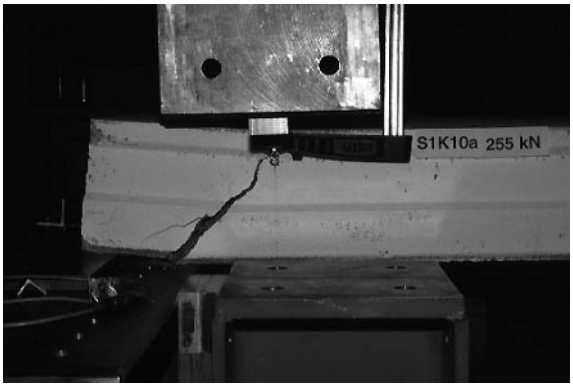


Abb. 4.54 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Abplatzungen an der Ecke hinten bei K=190 kN
Bruchart A

Tab. 4.19 Versuchsresultate S1K10b

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	204.2	154.1	172.6	87.4	124.3
f_{Km} [mm]	37.2	3.2	5.3	2.2	2.8

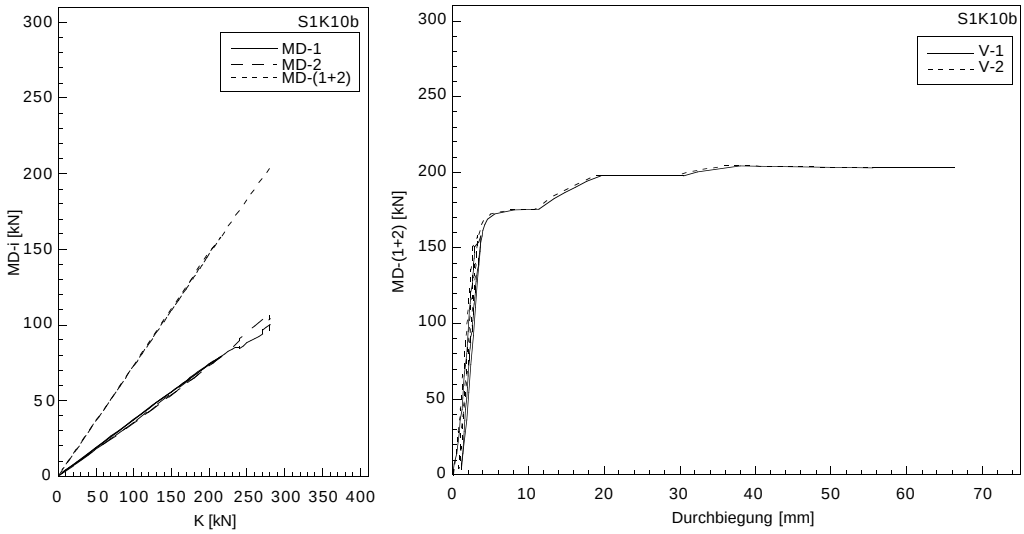


Abb. 4.55 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

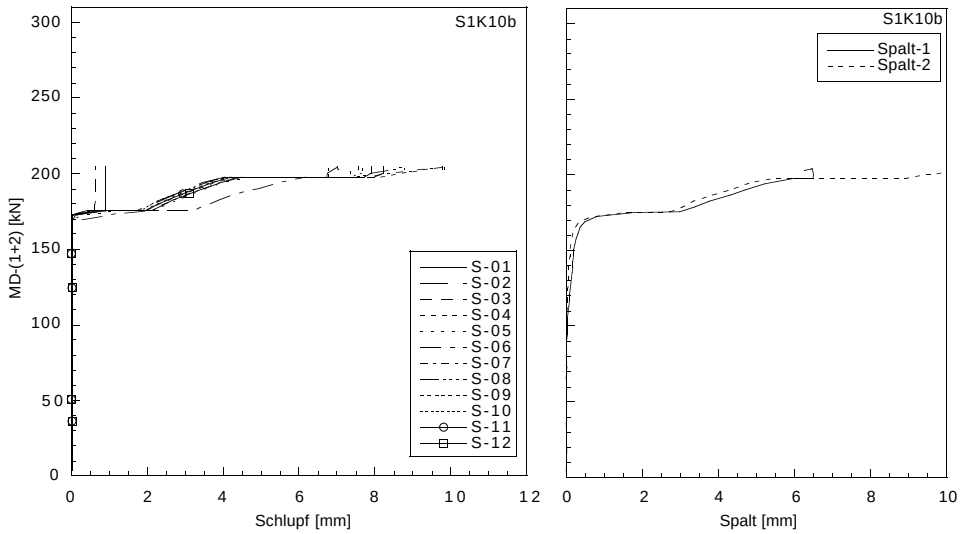


Abb. 4.56 Schlupf- und Spaltmessungen (vgl. Anhang C.1)

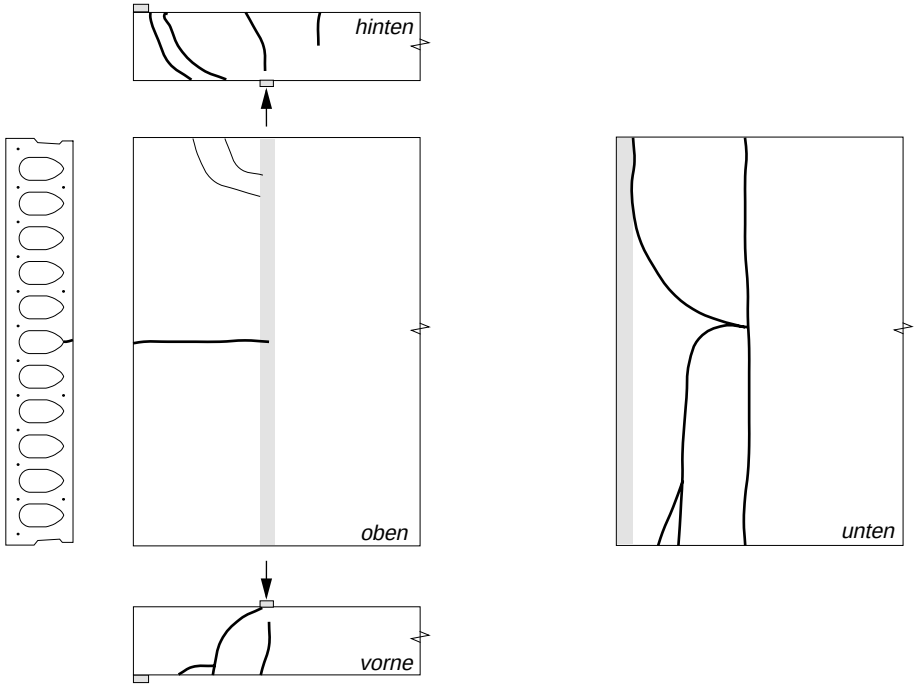


Abb. 4.57 Bruchbild

Abb. 4.58 Bruchzustand von hinten

Bemerkung: Bruchart SL/A-SC

Tab. 4.20 Versuchsresultate S1K11a

	Bruch	Riss	Schlupf	Dec-	Dec+
MD-(1+2) [kN]	213.5	-	213.5	-	-
f_{Km} [mm]	1.9	-	1.9	-	-

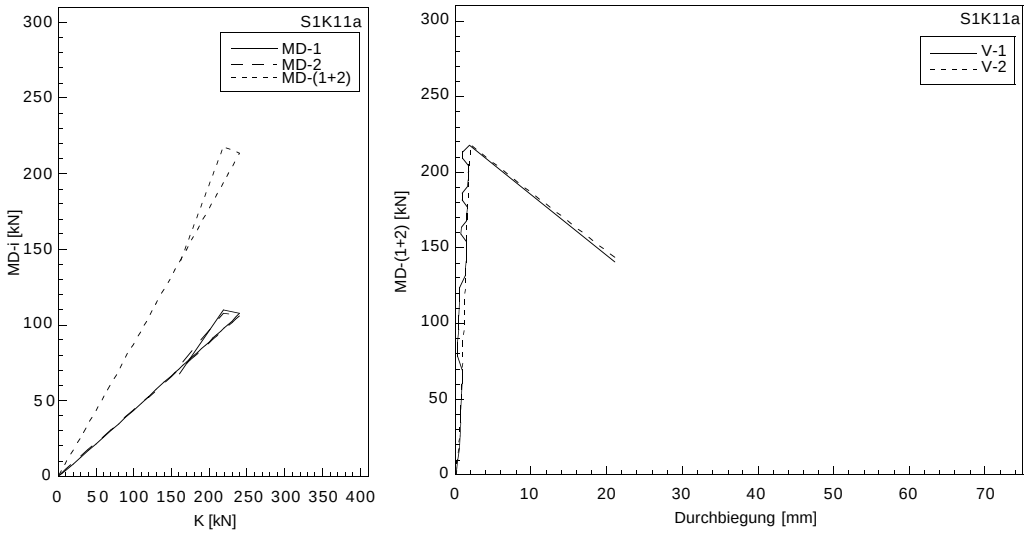


Abb. 4.59 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

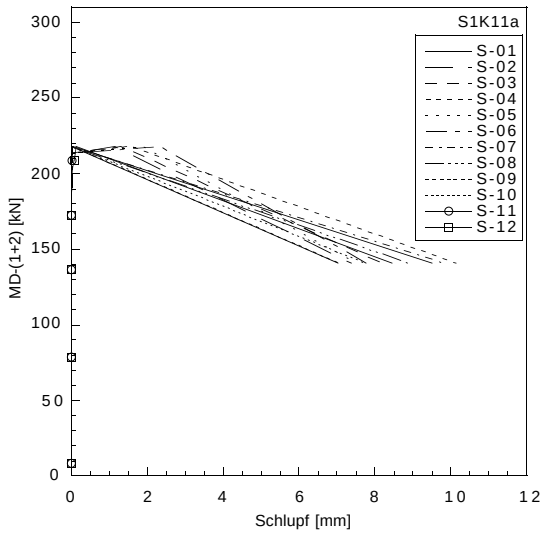


Abb. 4.60 Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

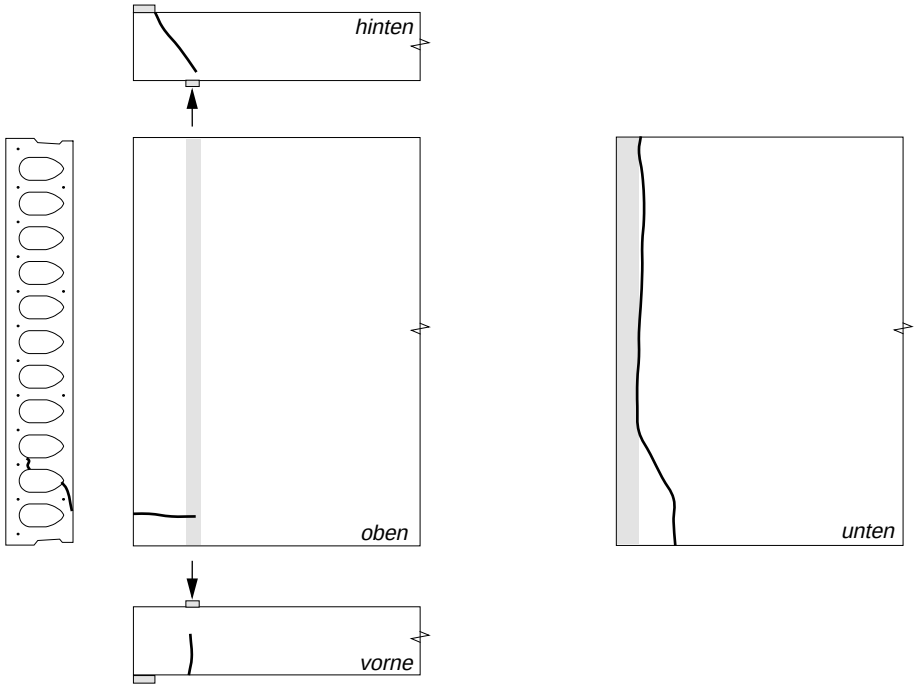


Abb. 4.61 Bruchbild

Abb. 4.62 Bruchzustand von hinten

Bemerkung: Weggeber V-2 mit Wackelkontakt
Bruchart SL/A

Tab. 4.21 Versuchsresultate S1K11b

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	236.2	150.7	194.6	102.9	150.8
f_{Km} [mm]	33.6	2.6	7.3	2.2	3.1

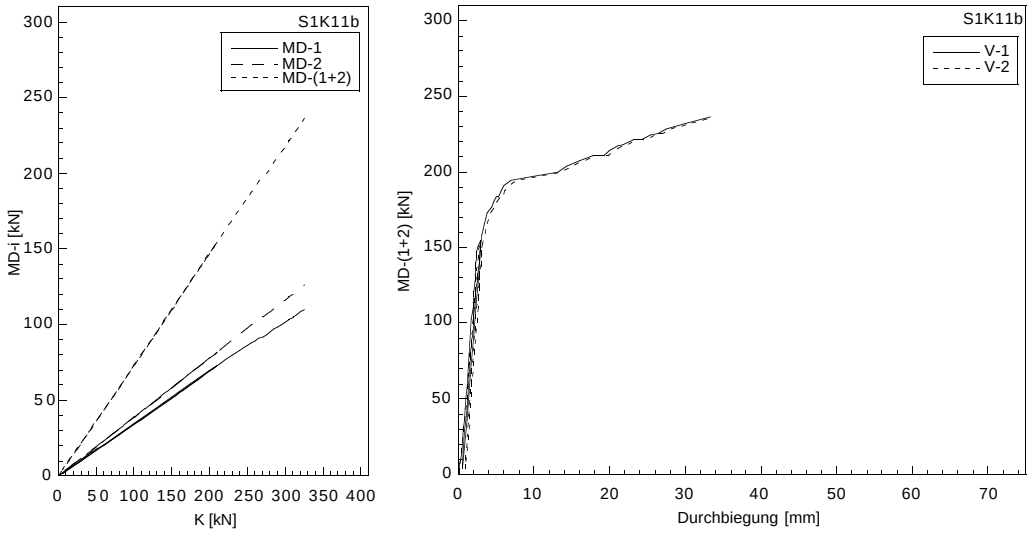


Abb. 4.63 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

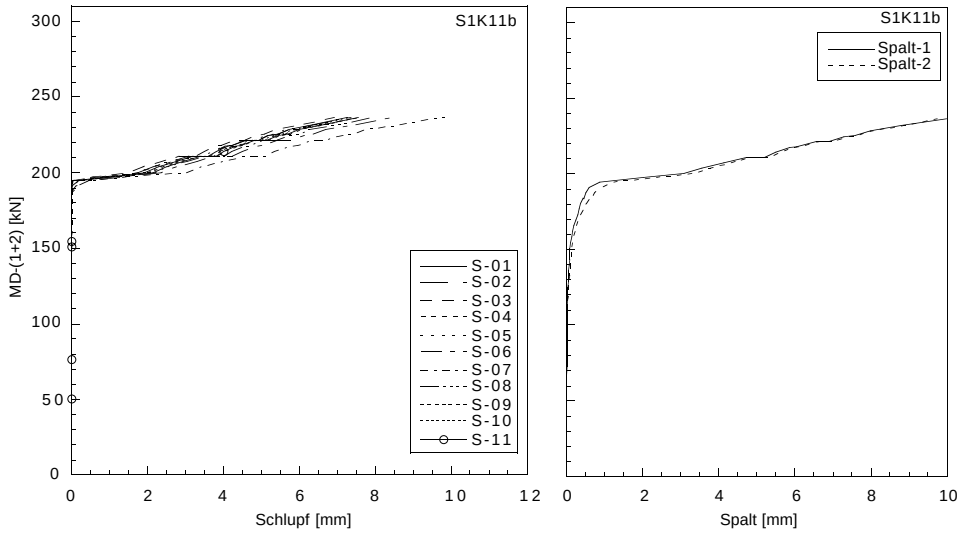


Abb. 4.64 Schlupf- und Spaltmessungen (vgl. Anhang C.1)

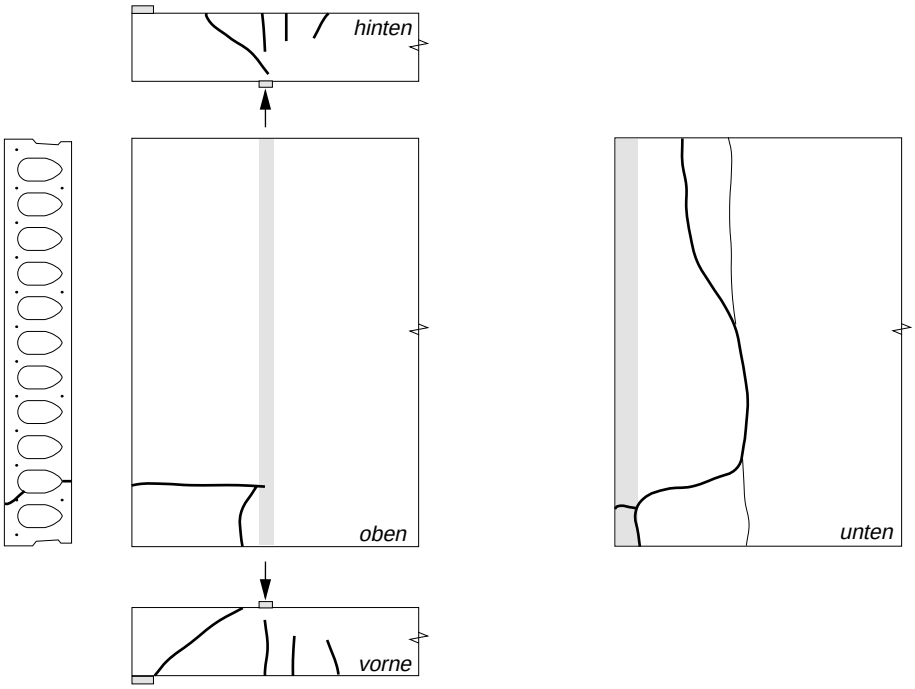


Abb. 4.65 Bruchbild

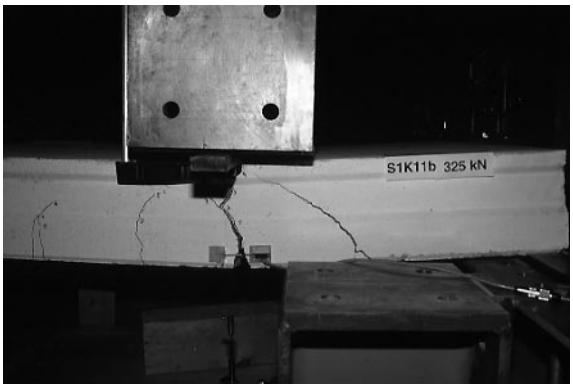


Abb. 4.66 Bruchzustand von hinten

Bemerkung: Bruchart SL/A-SC

Tab. 4.22 Versuchsresultate S2K01a

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	229.0	-	229.0	-	-
f_{Km} [mm]	1.5	-	1.5	-	-

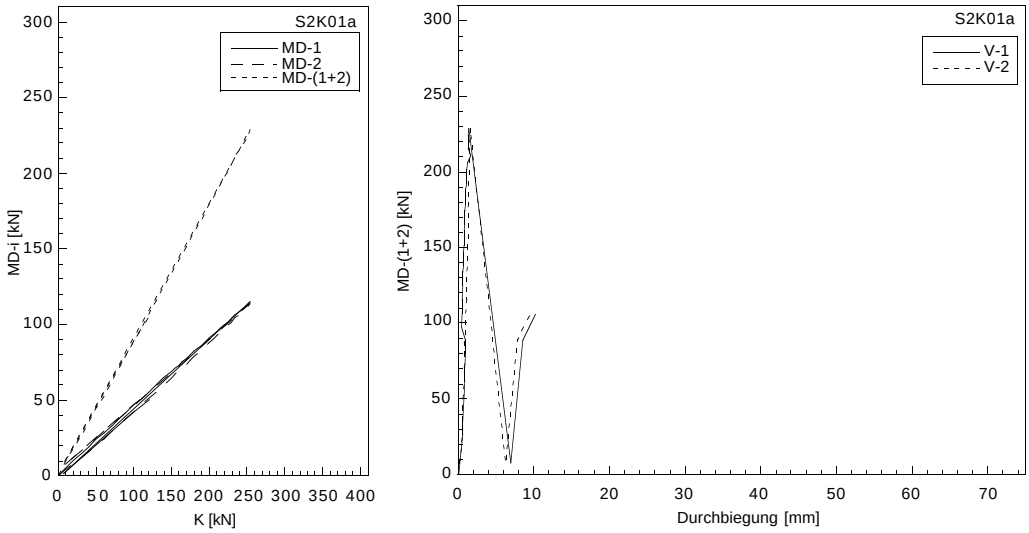


Abb. 4.67 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

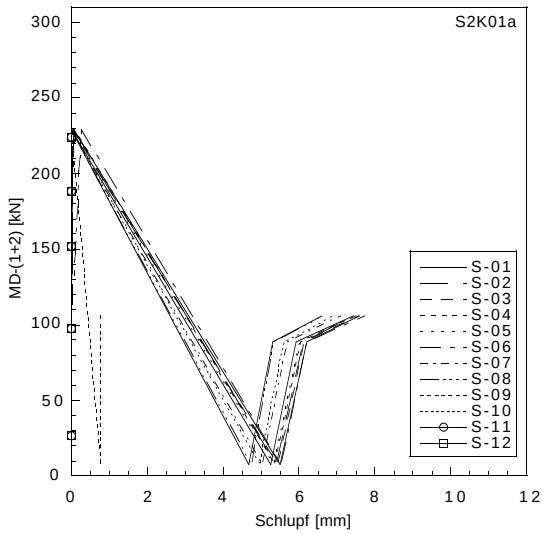


Abb. 4.68 Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

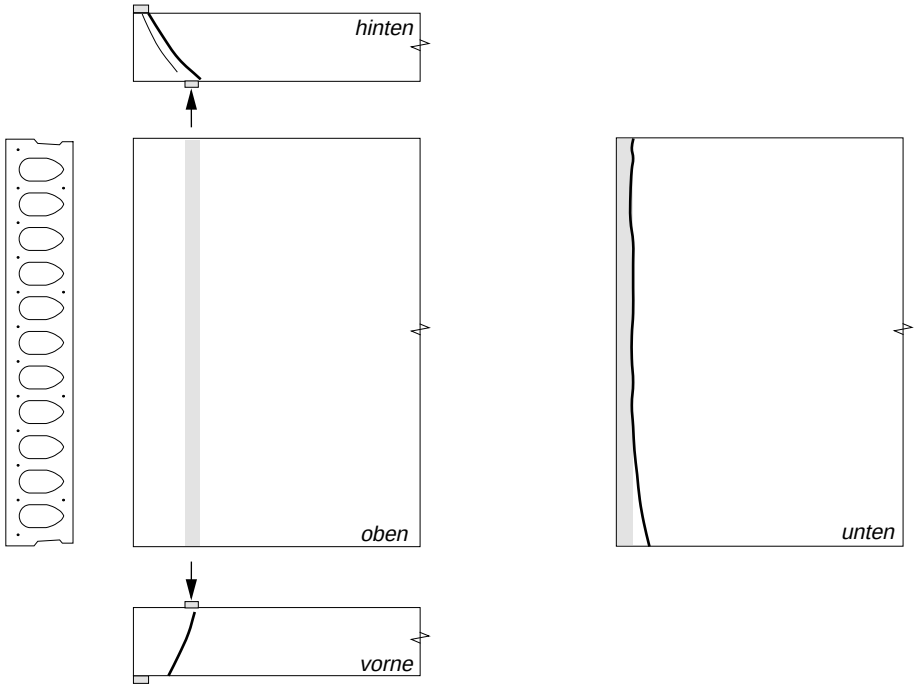


Abb. 4.69 Bruchbild

Abb. 4.70 Bruchzustand von hinten

Bemerkung: Abplatzungen an der Ecke vorne bei K=165 kN
Bruchart A

Tab. 4.23 Versuchsresultate S2K01b

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	193.8	116.1	-	85.6	116.6
f_{Km} [mm]	16.8	3.6	-	2.6	3.8

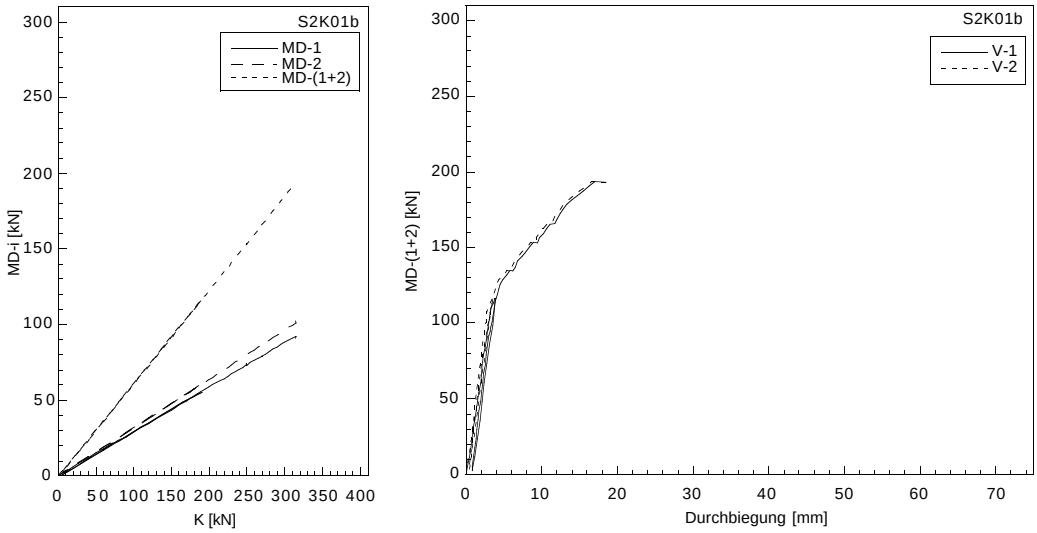


Abb. 4.71 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

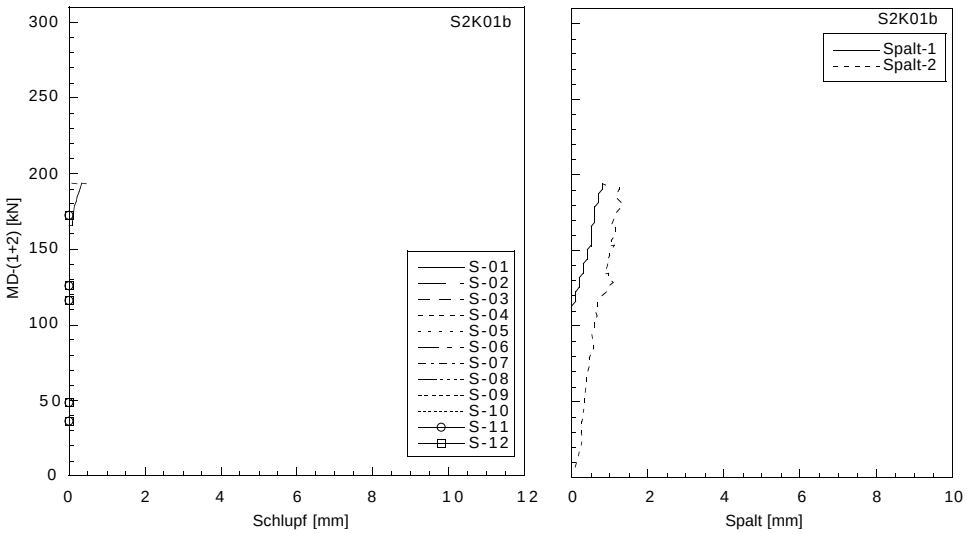


Abb. 4.72 Schlupf- und Spaltmessungen (vgl. Anhang C.1)

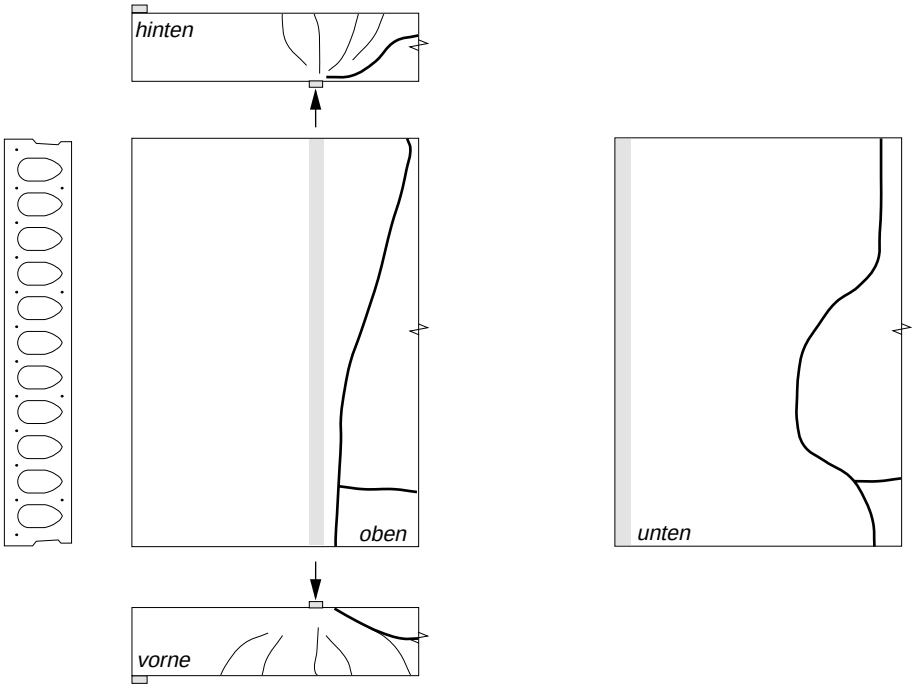


Abb. 4.73 Bruchbild

Abb. 4.74 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Abplatzungen an der Ecke vorne bei K=200 kN
Bruchart LWS

Tab. 4.24 Versuchsresultate S2K02a

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	200.7	-	200.7	-	-
f_{Km} [mm]	2.1	-	2.1	-	-

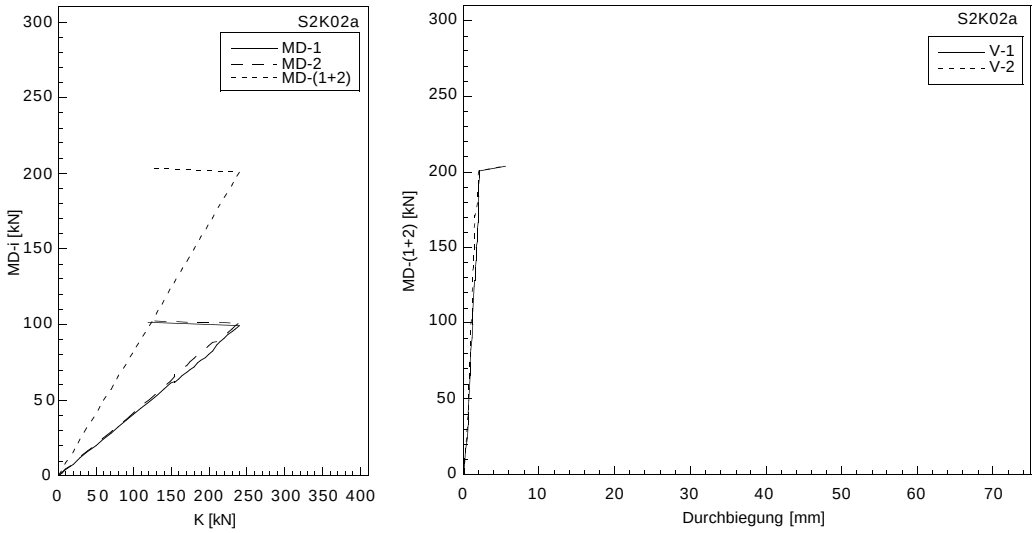


Abb. 4.75 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

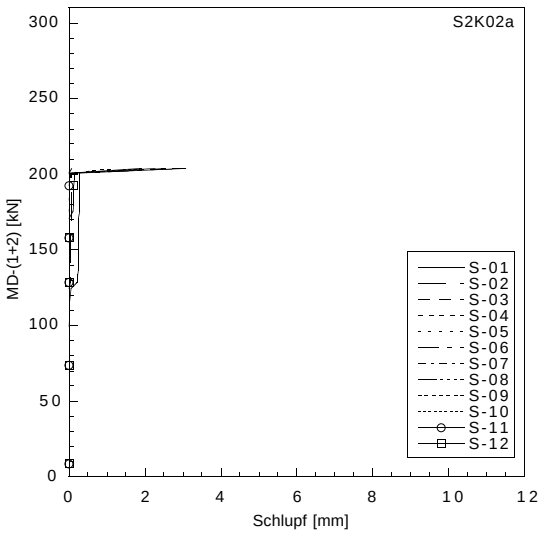


Abb. 4.76 Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

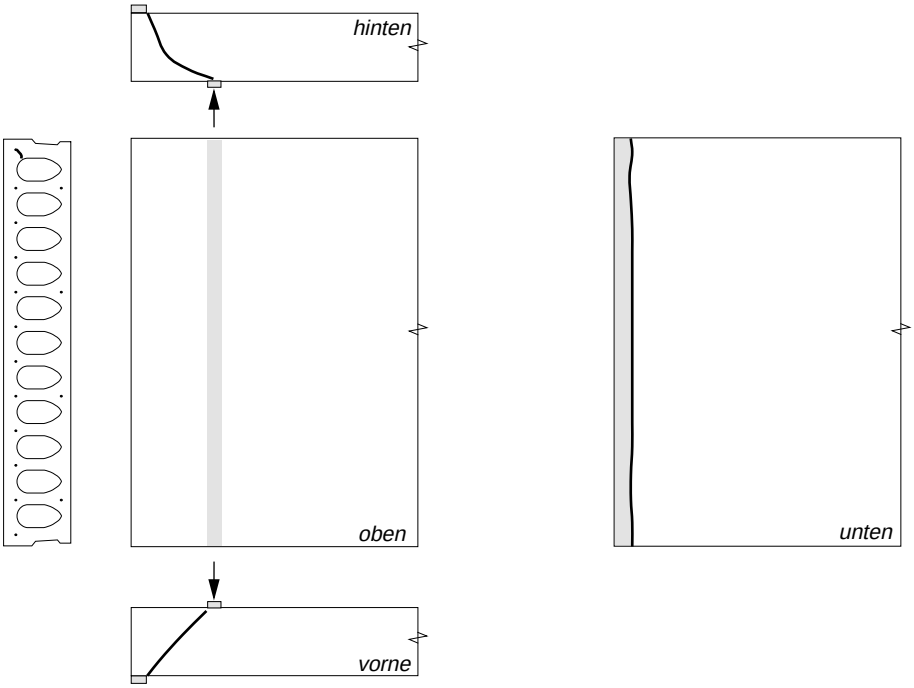


Abb. 4.77 Bruchbild

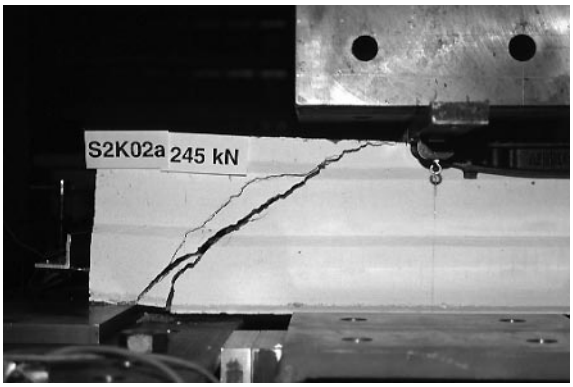


Abb. 4.78 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Diagonalriss in Steg 1 bei K=150 kN (vgl. Anhang C.1)
Diagonalriss im Steg 12 bei K=215 kN
Bruchart A

Tab. 4.25 Versuchsresultate S2K02b

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	210.0	-	210.0	-	-
f_{Km} [mm]	2.9	-	2.9	-	-

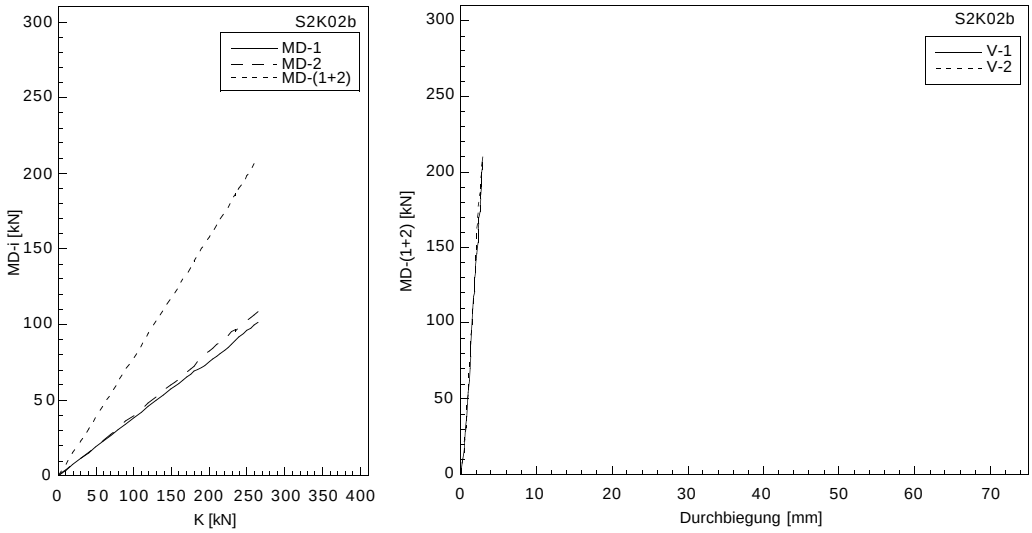


Abb. 4.79 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

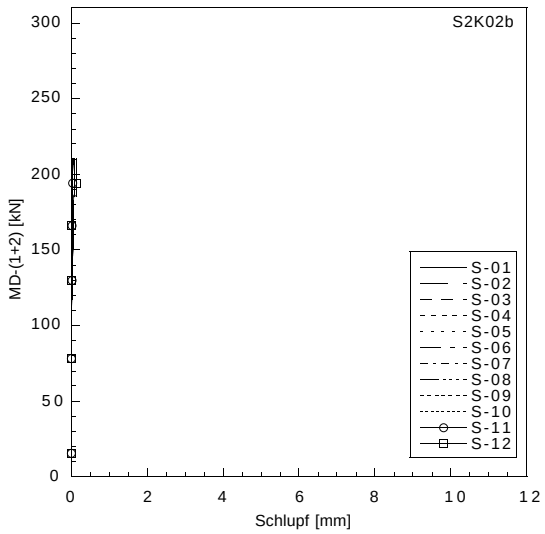


Abb. 4.80 Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

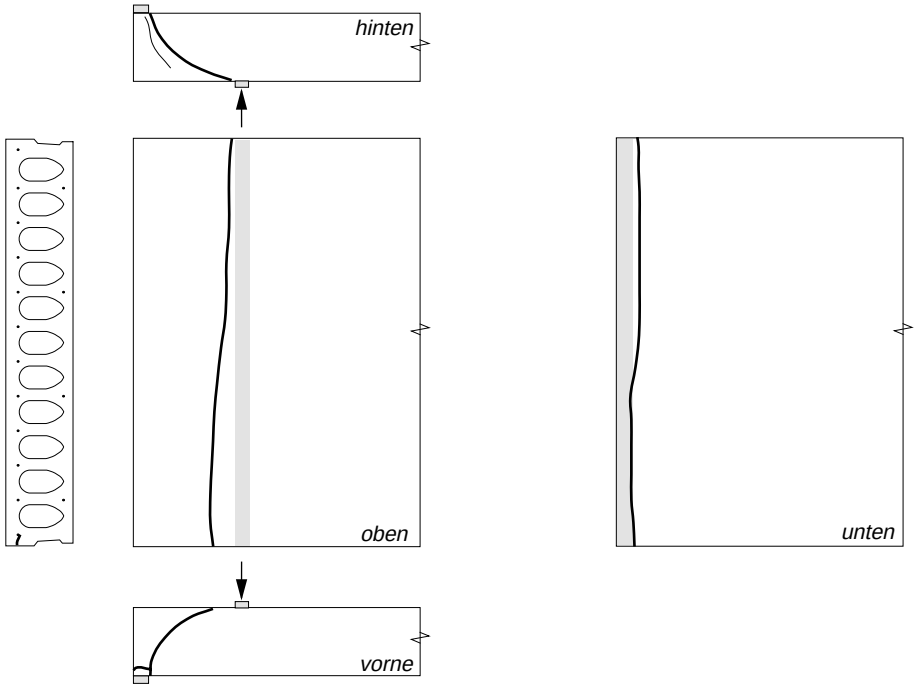


Abb. 4.81 Bruchbild

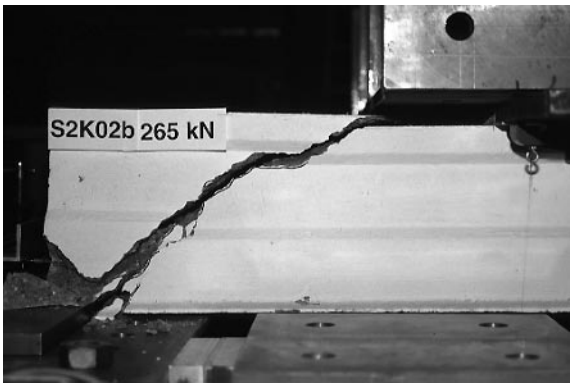


Abb. 4.82 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Diagonalriss im Steg 1 bei K=185 kN (vgl. Anhang C.1)
Diagonalriss im Steg 12 bei K=235 kN
Bruchart A

Tab. 4.26 Versuchsresultate S2K03a

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	272.7	-	272.7	-	-
f_{Km} [mm]	2.0	-	2.0	-	-

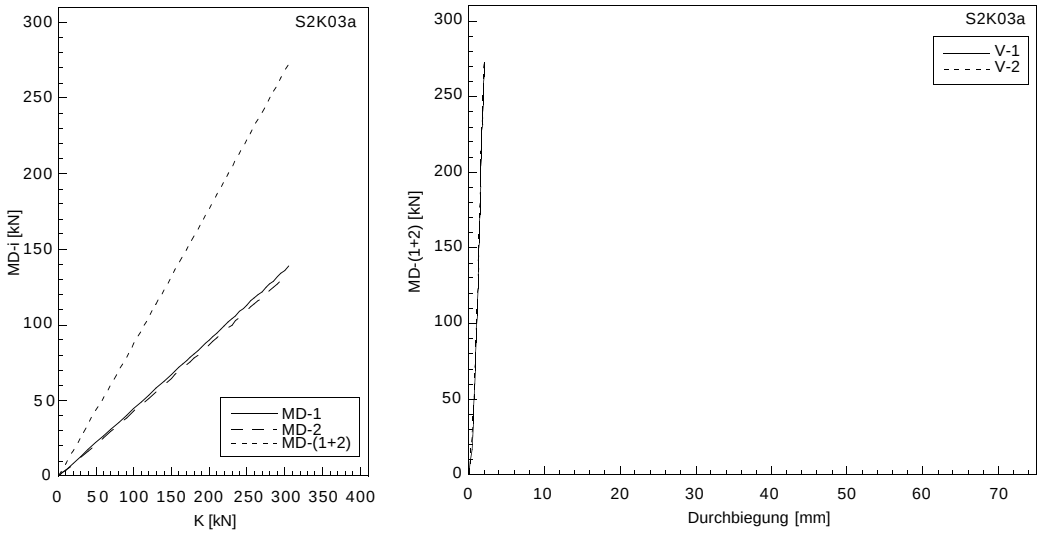


Abb. 4.83 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

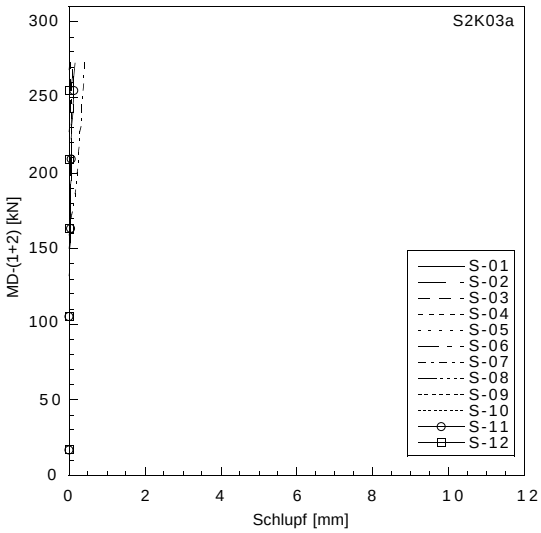


Abb. 4.84 Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

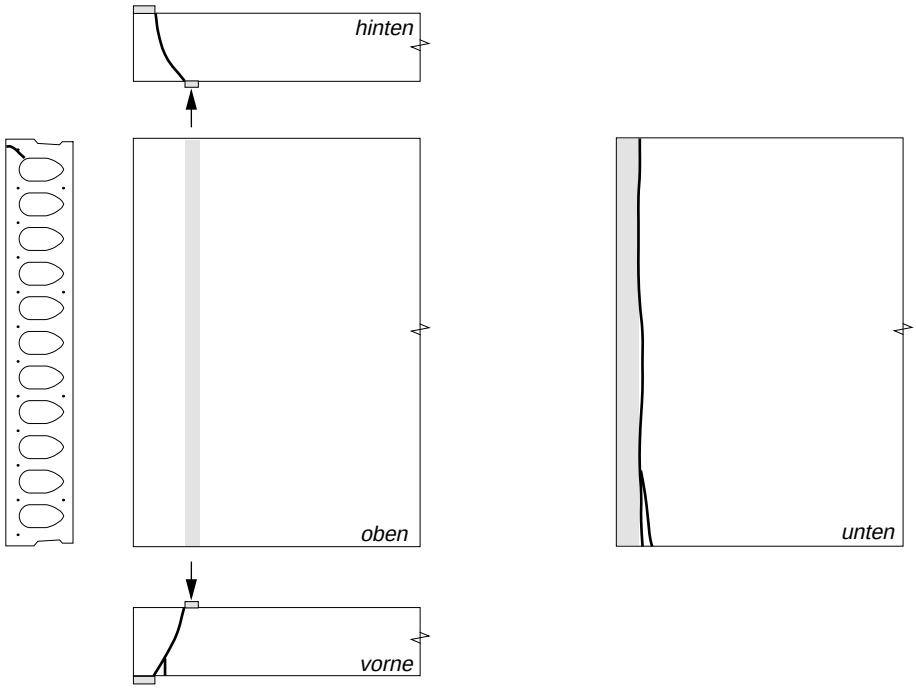


Abb. 4.85 Bruchbild

Abb. 4.86 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Bruchart A

Tab. 4.27 Versuchsresultate S2K03b

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	207.2	118.5	180.2	93.1	118.3
f_{Km} [mm]	22.7	4.1	12.7	3.2	4.2

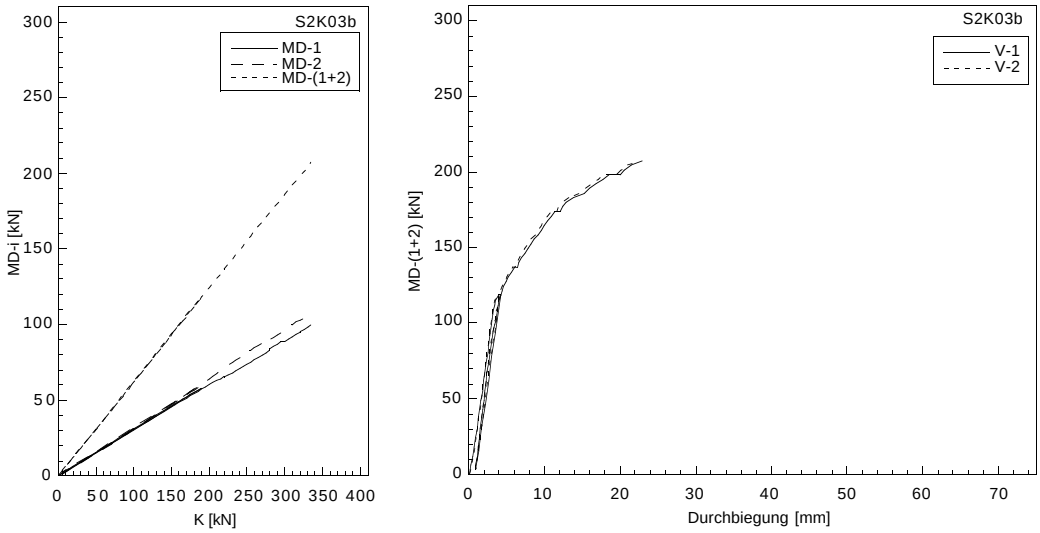


Abb. 4.87 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

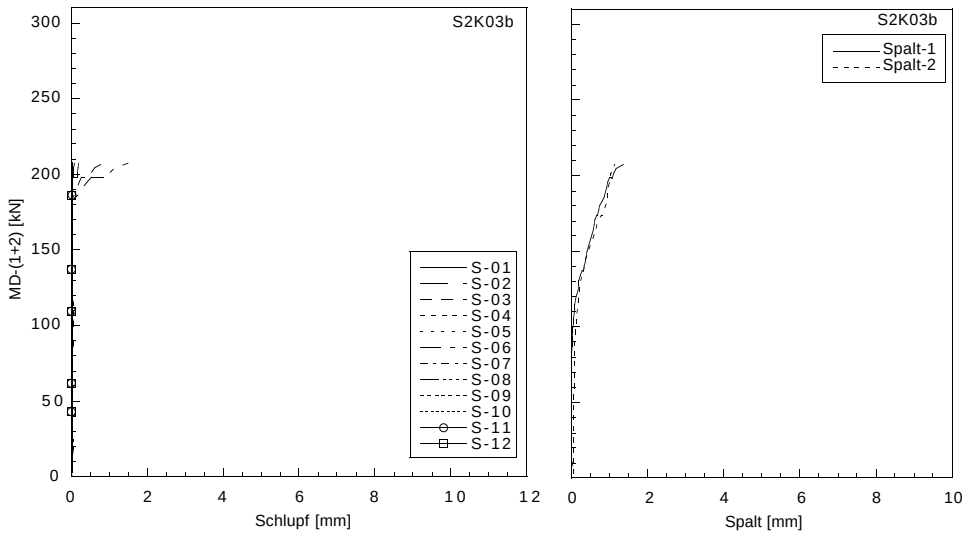


Abb. 4.88 Schlupf- und Spaltmessungen (vgl. Anhang C.1)

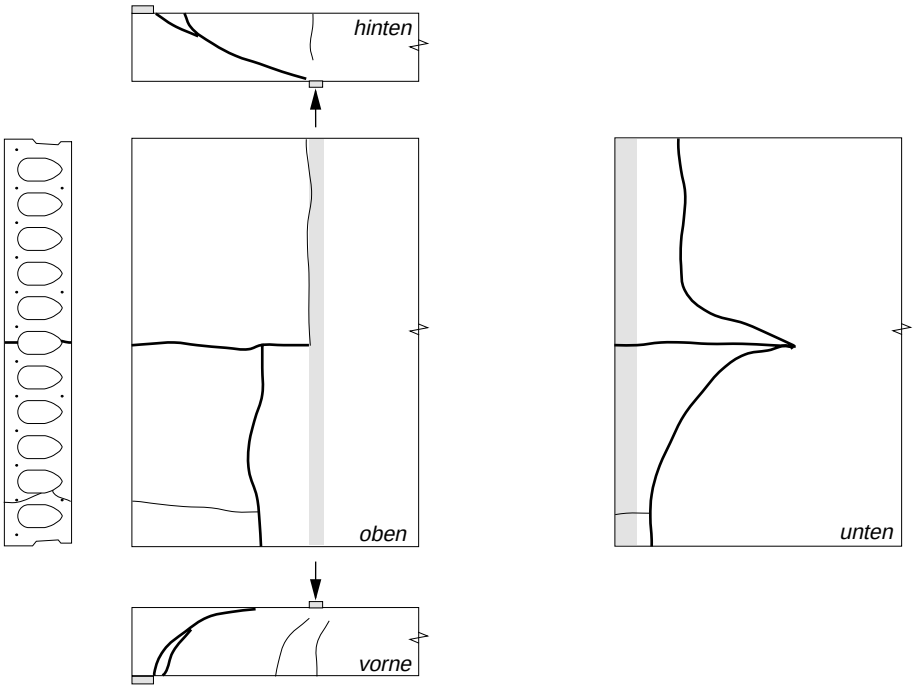


Abb. 4.89 Bruchbild

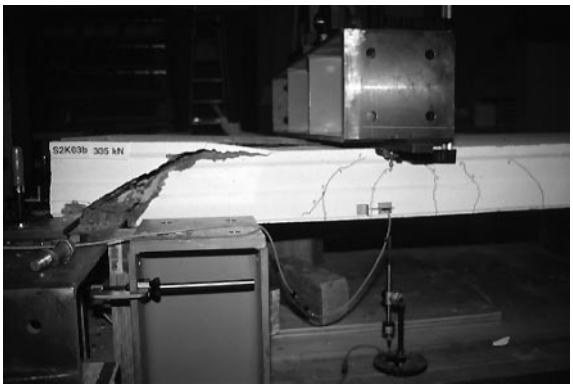


Abb. 4.90 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Vordere Plattenhälfte bricht, hintere Hälfte trägt weiter
Bruchart SL/A(-SC)

Tab. 4.28 Versuchsresultate S2K04a

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	235.5	-	235.5	-	-
f_{Km} [mm]	2.4	-	2.4	-	-

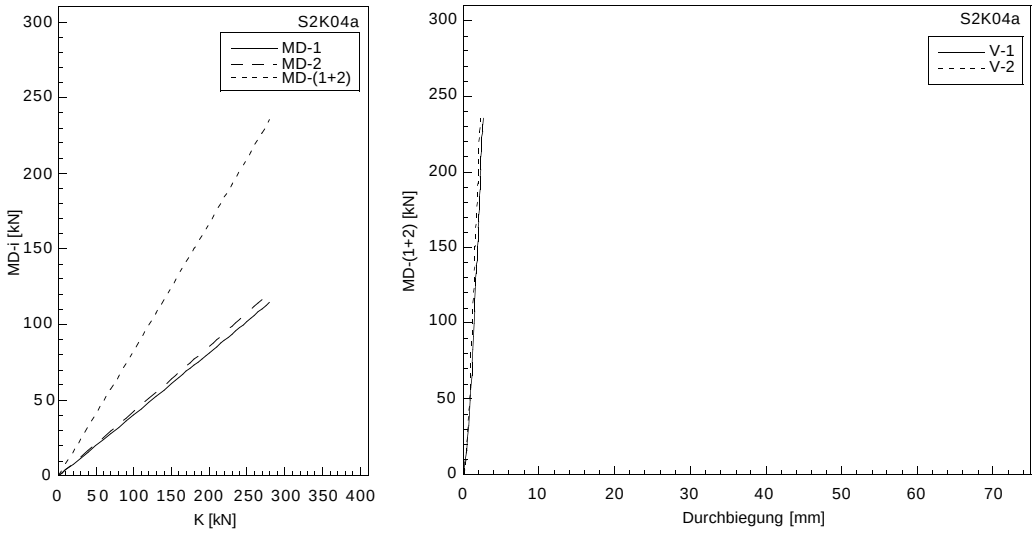


Abb. 4.91 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

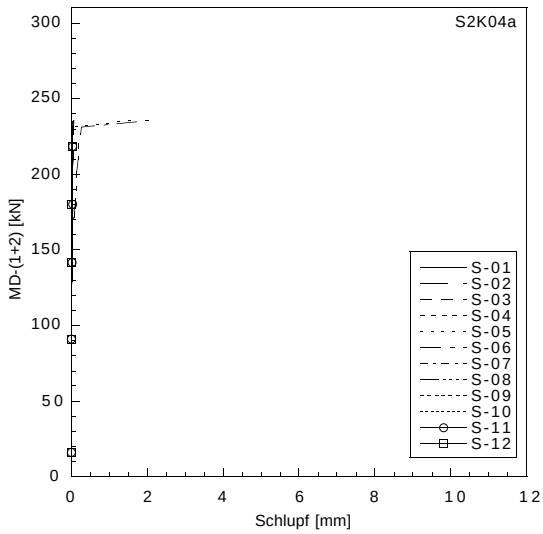


Abb. 4.92 Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

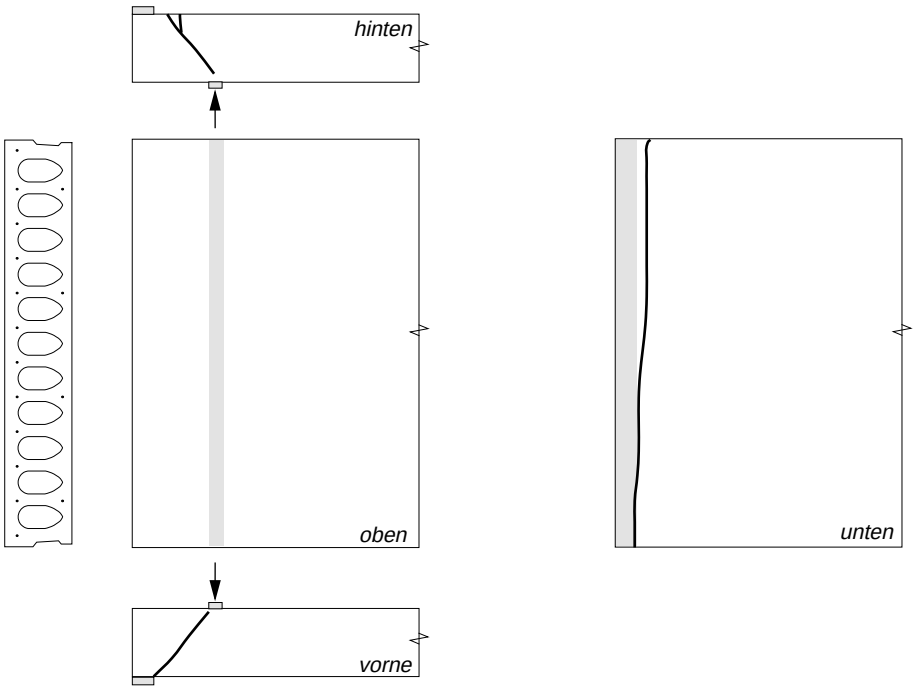


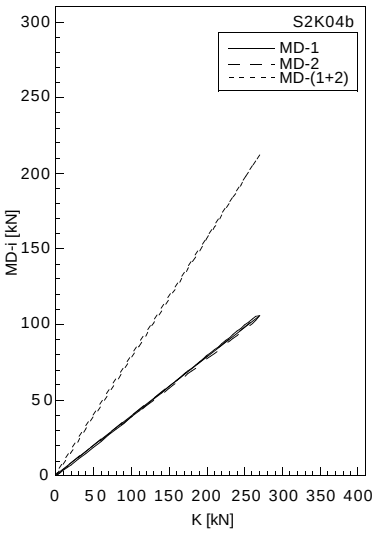
Abb. 4.93 Bruchbild

Abb. 4.94 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Bruchart (SL)/A

Tab. 4.29 Versuchsresultate S2K04b

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	212.4	-	212.4	-	-
f_{Km} [mm]	3.7	-	3.7	-	-



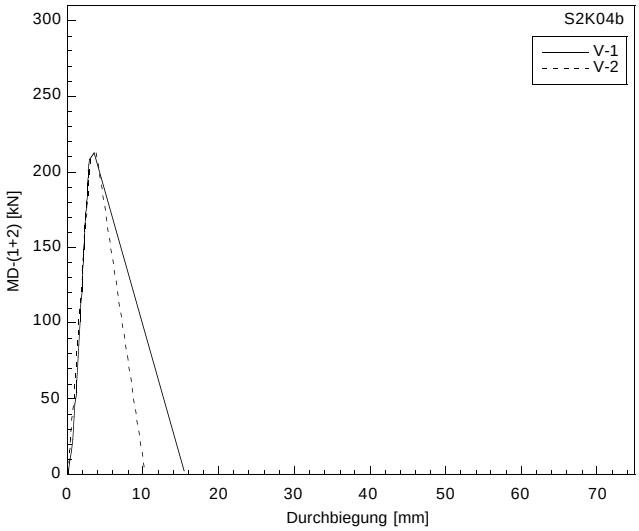


Abb. 4.95 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

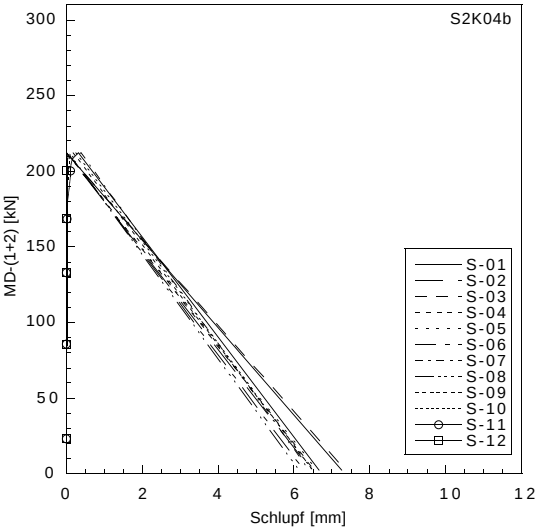


Abb. 4.96 Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

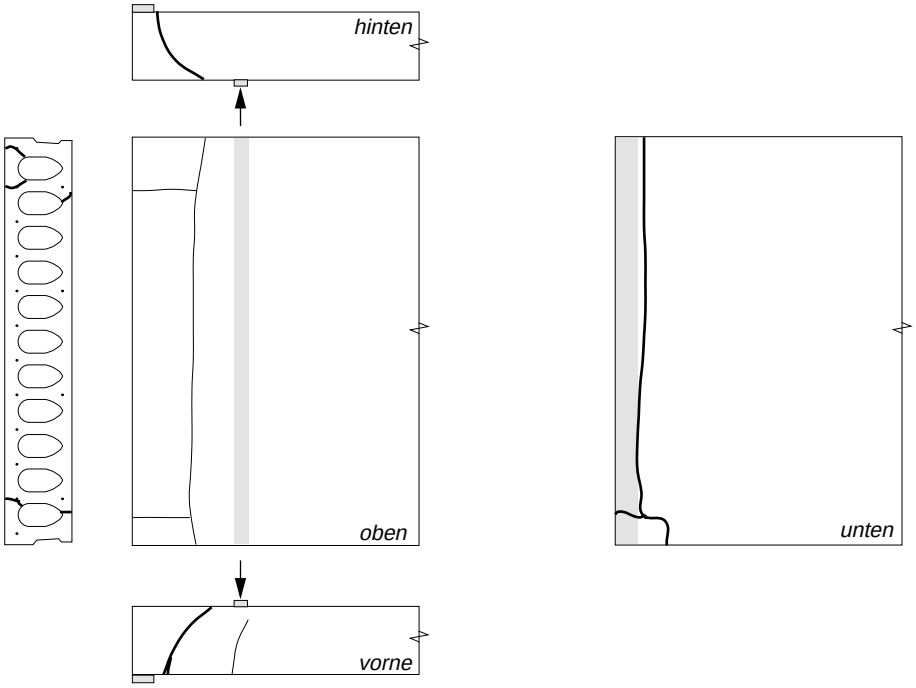


Abb. 4.97 Bruchbild

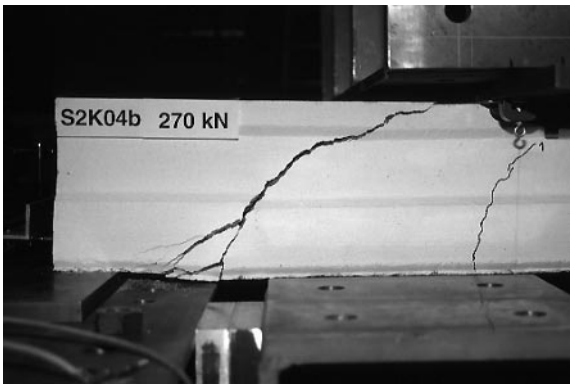


Abb. 4.98 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Bruchart (SL)/A

Tab. 4.30 Versuchsresultate S2K05a

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	176.2	-	154.1	-	-
f_{Km} [mm]	2.9	-	2.8	-	-

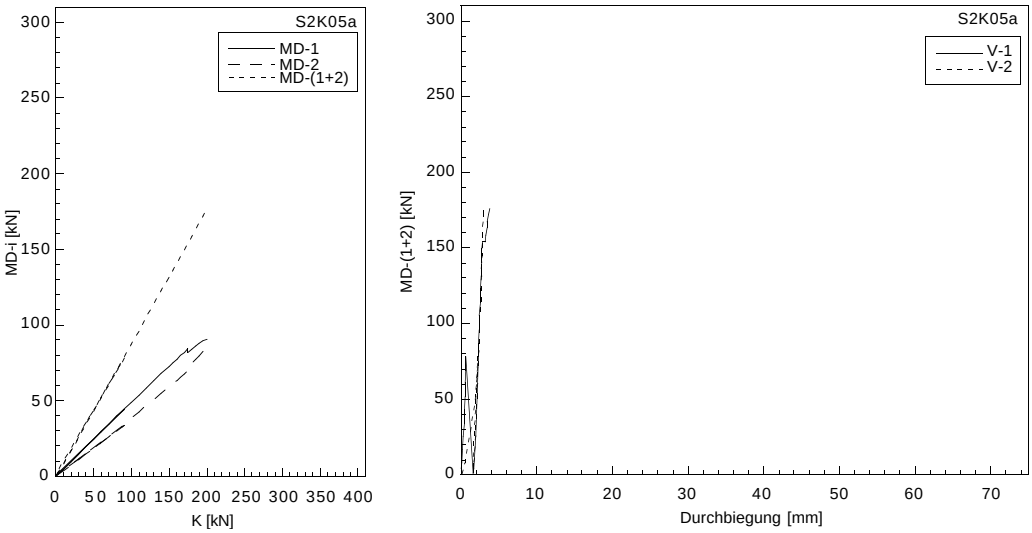


Abb. 4.99 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

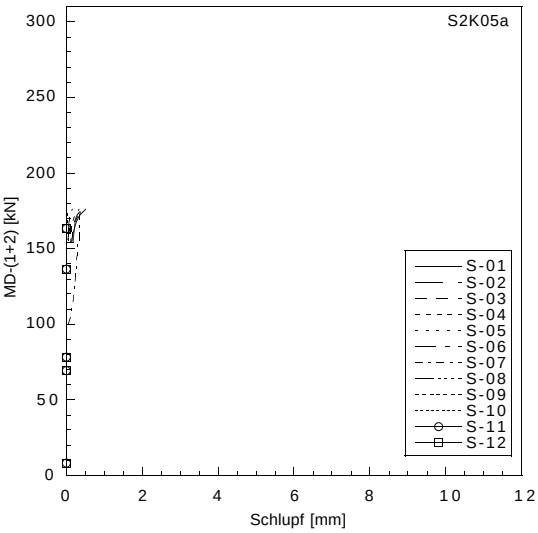


Abb. 4.100 Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

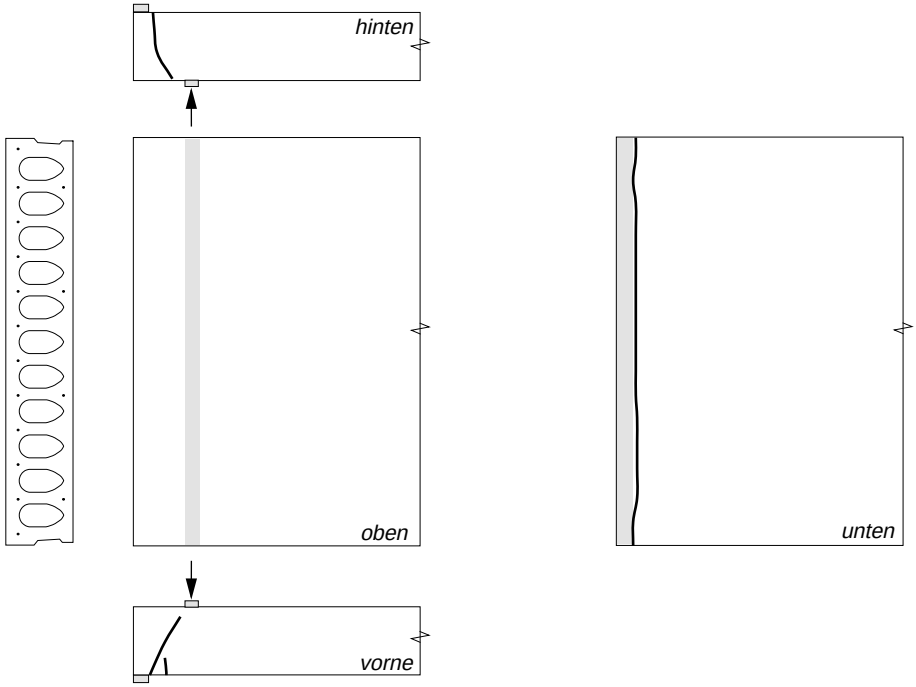


Abb. 4.101 Bruchbild

Abb. 4.102 Bruchzustand von hinten

Bemerkung: Schubzugriss im Steg 1 bei K=175 kN (vgl. Anhang C.1)
Bruchart ST/SL/A

Tab. 4.31 Versuchsresultate S2K05b

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	164.9	111.4	145.0	74.2	102.0
f_{Km} [mm]	44.3	3.3	9.6	2.2	3.2

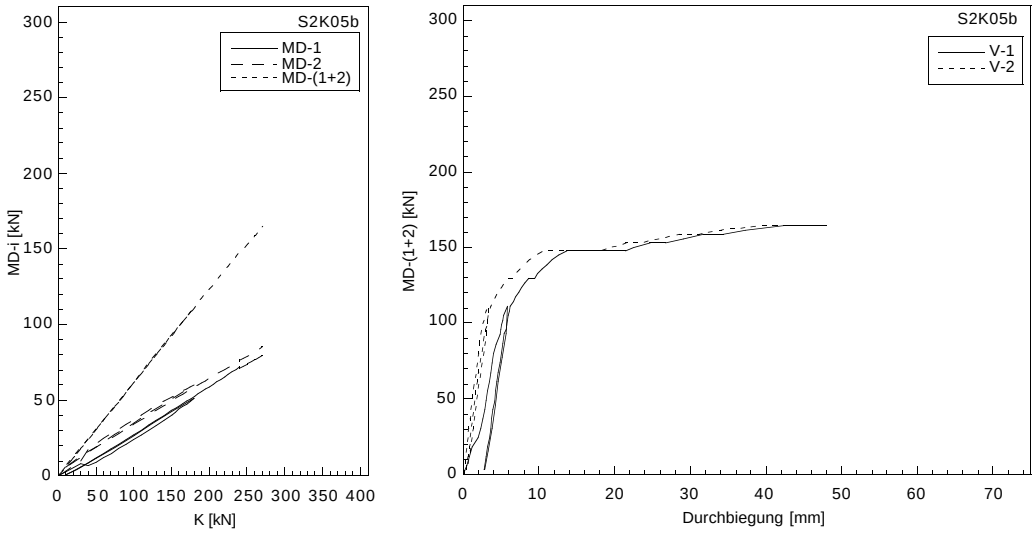


Abb. 4.103 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

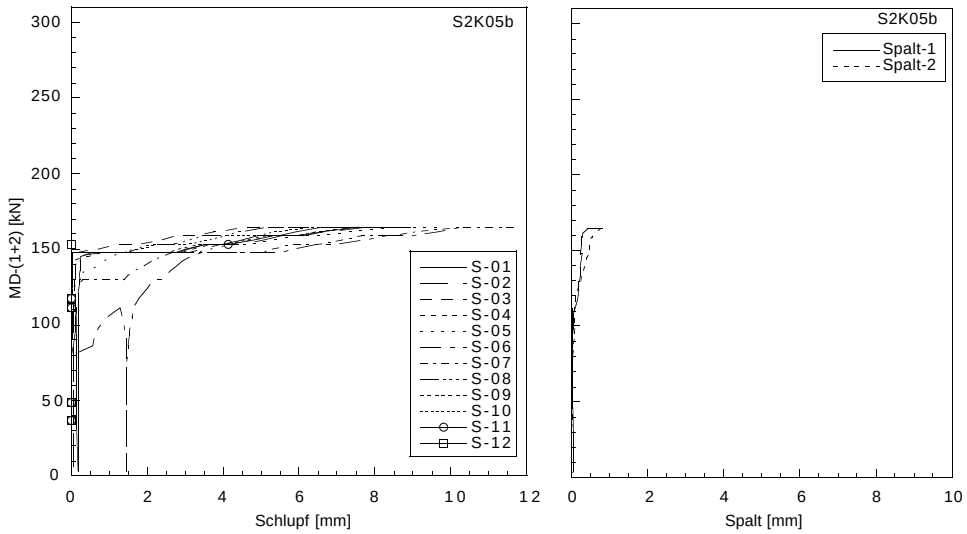


Abb. 4.104 Schlupf- und Spaltmessungen (vgl. Anhang C.1)

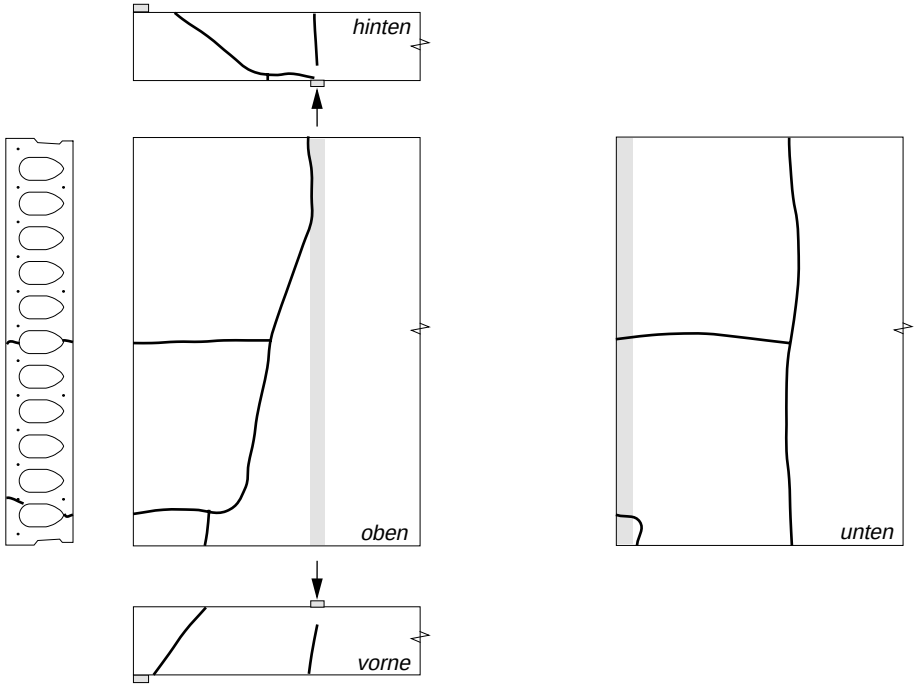


Abb. 4.105 Bruchbild

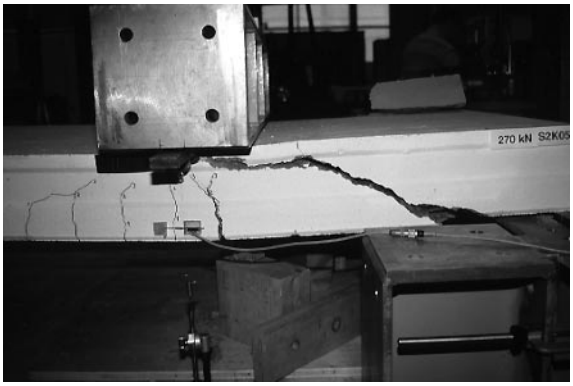


Abb. 4.106 Bruchzustand von hinten

Bemerkung: Diagonalriss im Steg 1 bei K=140 kN (vgl. Anhang C.1)
Bruchart SL/SC

Tab. 4.32 Versuchsresultate S2K06a

	Bruch	Riss	Schlupf	Dec-	Dec+
MD-(1+2) [kN]	172.5	-	-	-	-
f_{Km} [mm]	1.6	-	-	-	-

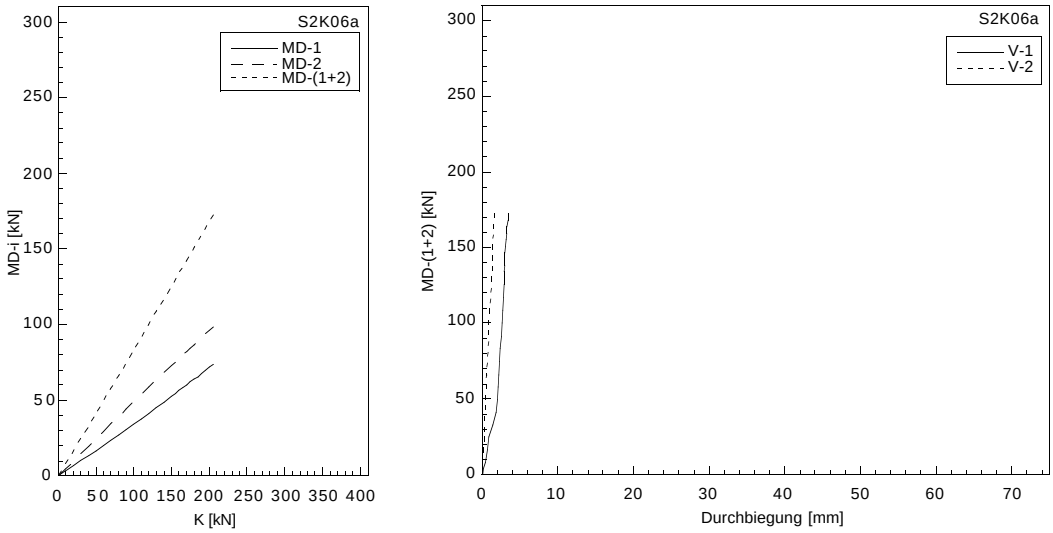


Abb. 4.107 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

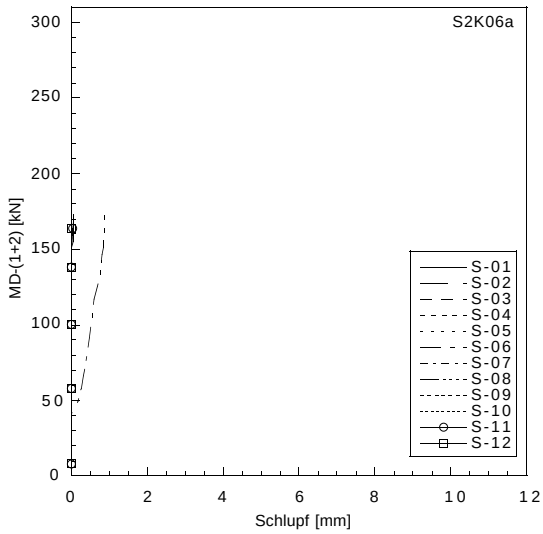


Abb. 4.108 Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

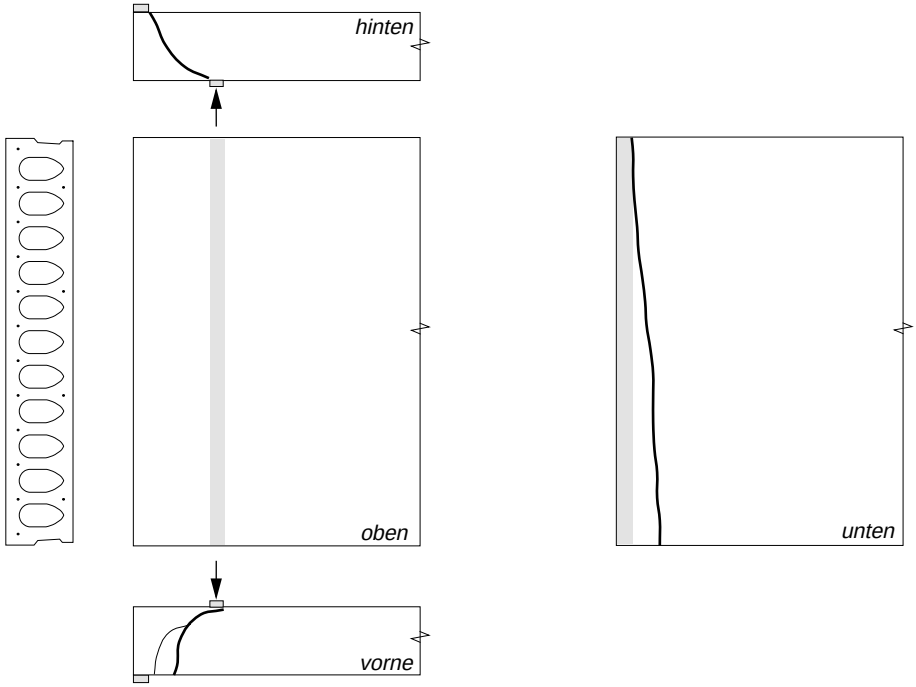


Abb. 4.109 Bruchbild

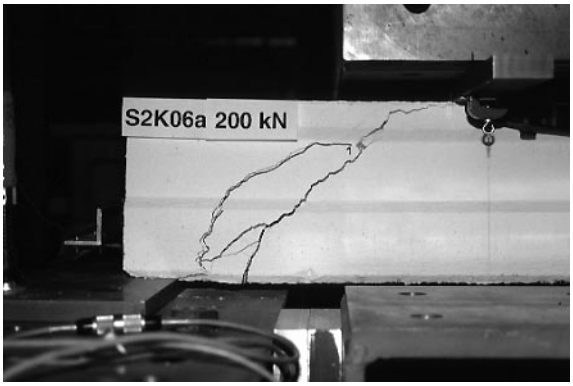


Abb. 4.110 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Platte leicht verdrillt, MD-1 und MD-2 sind unterschiedlich
Riss in Steg 1 bei K=185 kN (vgl. Anhang C.1)
Bruchart (SL)/A

Tab. 4.33 Versuchsresultate S2K06b

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	165.8	-	-	-	-
f_{Km} [mm]	2.0	-	-	-	-

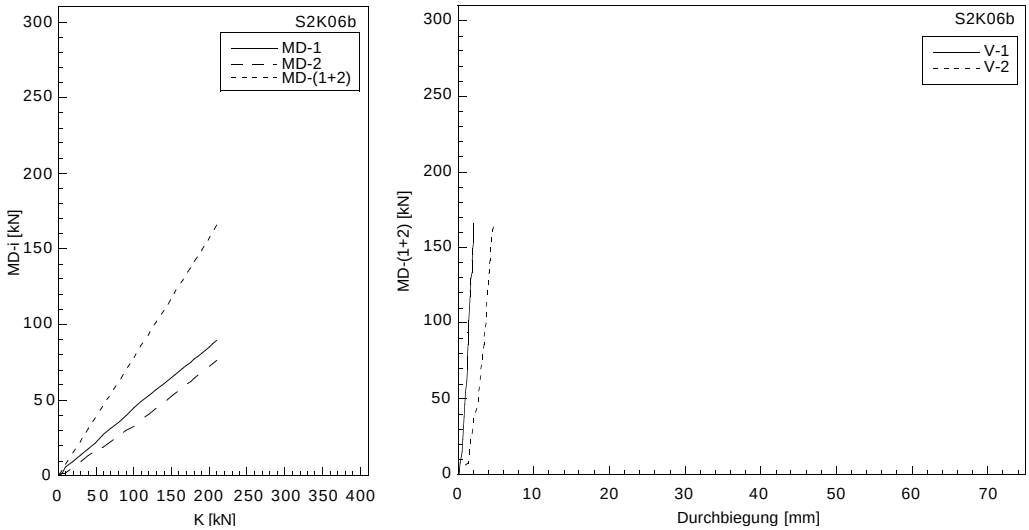


Abb. 4.111 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

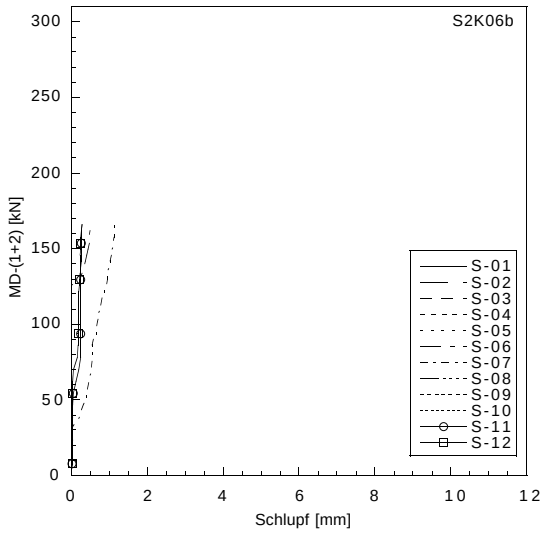


Abb. 4.112 Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

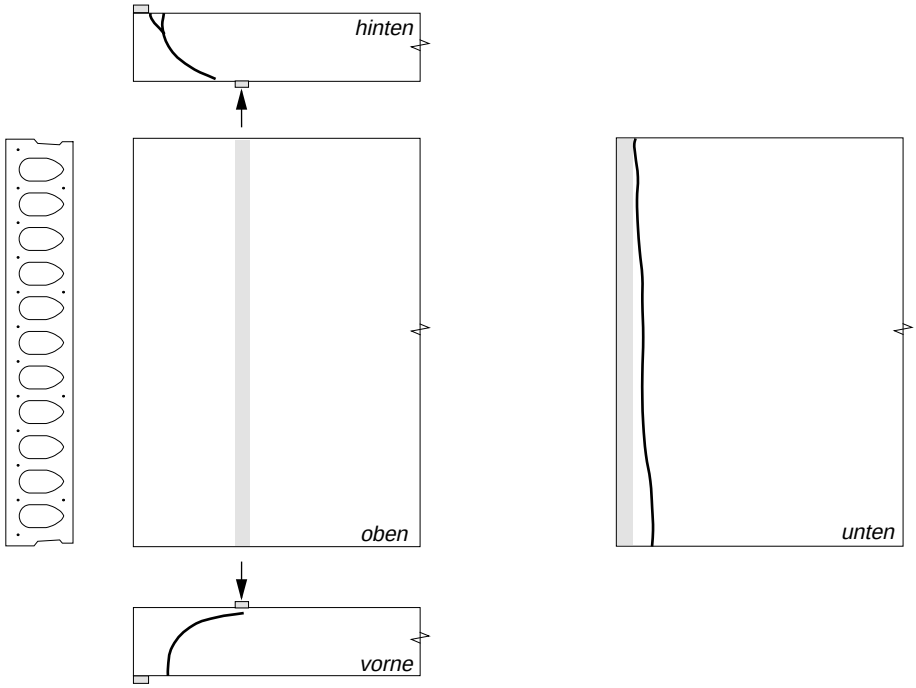


Abb. 4.113 Bruchbild

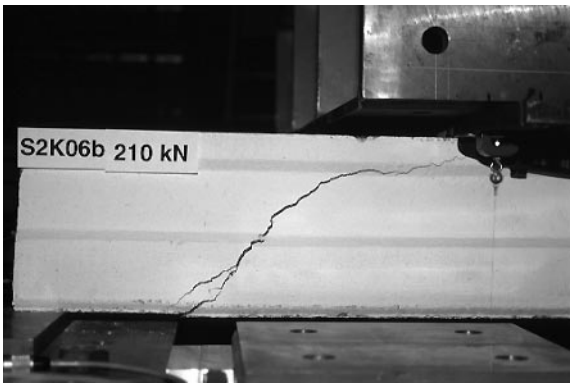


Abb. 4.114 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Risse an der Ecke hinten bei K=5 kN
Bruchart (SL)/A-SC (A: nur Steg 12)

Tab. 4.34 Versuchsresultate S2K07a

	Bruch	Riss	Schlupf	Dec-	Dec+
MD-(1+2) [kN]	235.8	-	235.8	-	-
f_{Km} [mm]	2.6	-	2.6	-	-

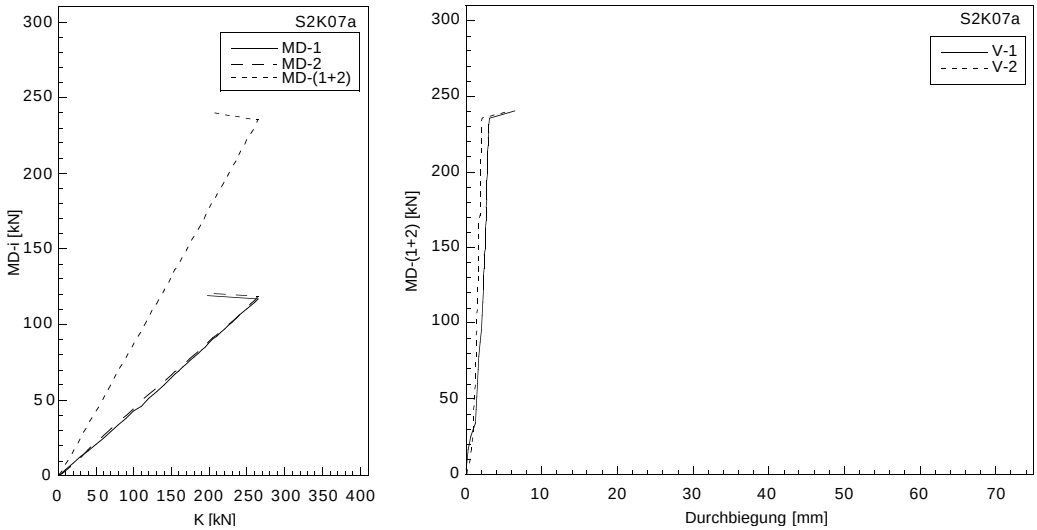


Abb. 4.115 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

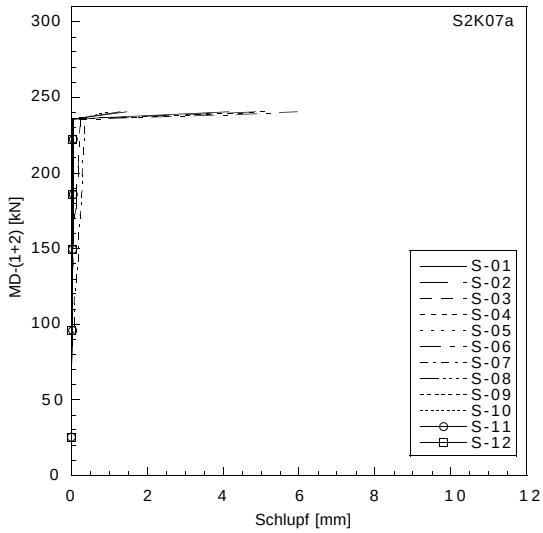


Abb. 4.116 Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

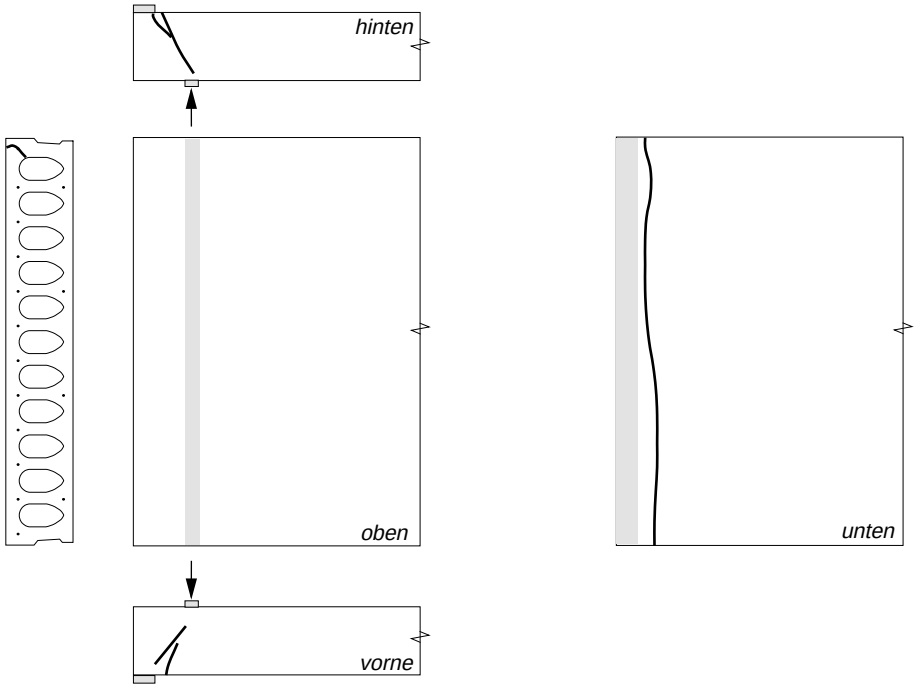


Abb. 4.117 Bruchbild

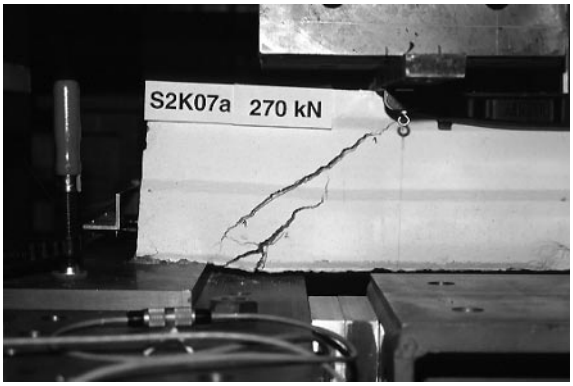


Abb. 4.118 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Schubzugriss in Steg 1 bei K=110 kN (vgl. Anhang C.1)
Bruchart ST/(SL)/A

Tab. 4.35 Versuchsresultate S2K07b

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	162.0	109.3	134.2	68.4	106.2
f_{Km} [mm]	63.8	4.0	7.1	2.6	3.9

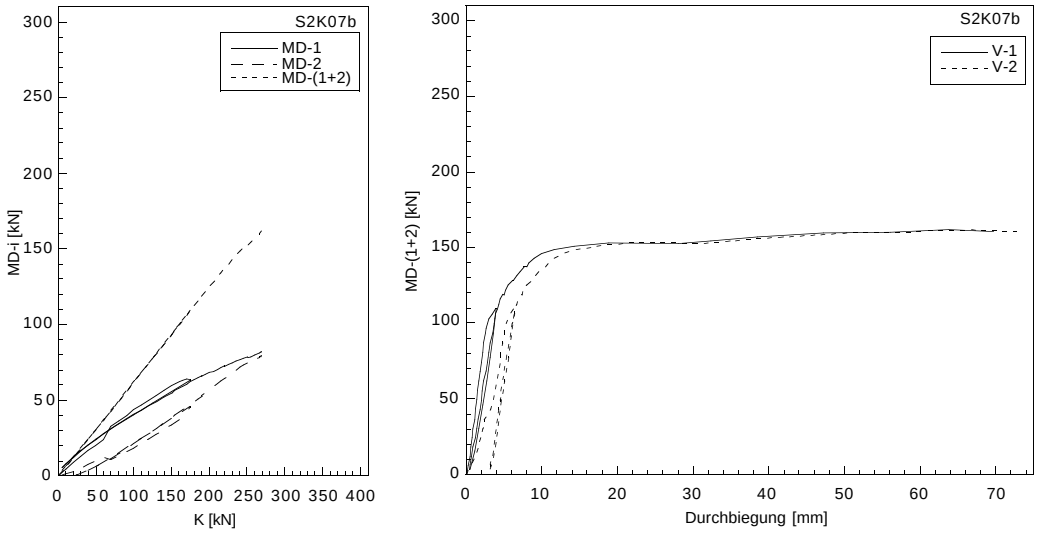


Abb. 4.119 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

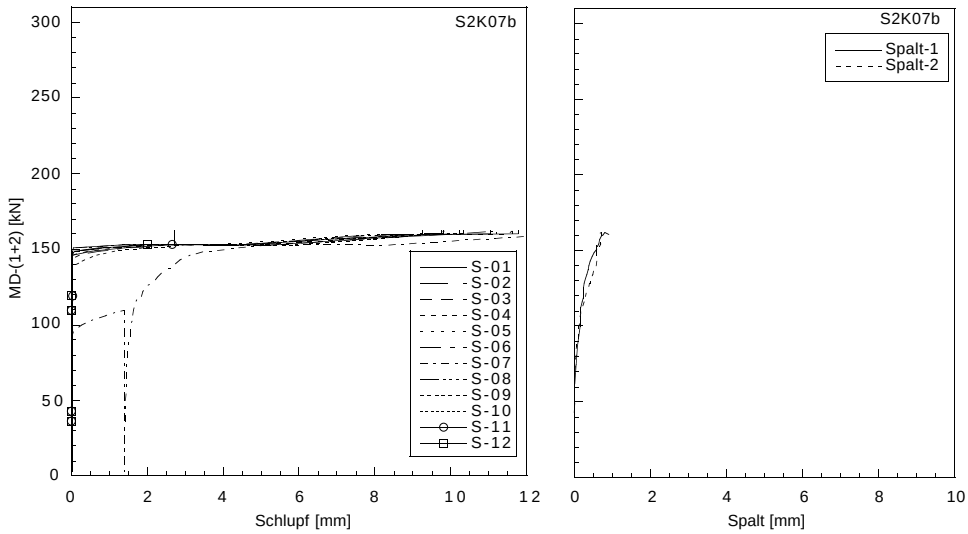


Abb. 4.120 Schlupf- und Spaltmessungen (vgl. Anhang C.1)

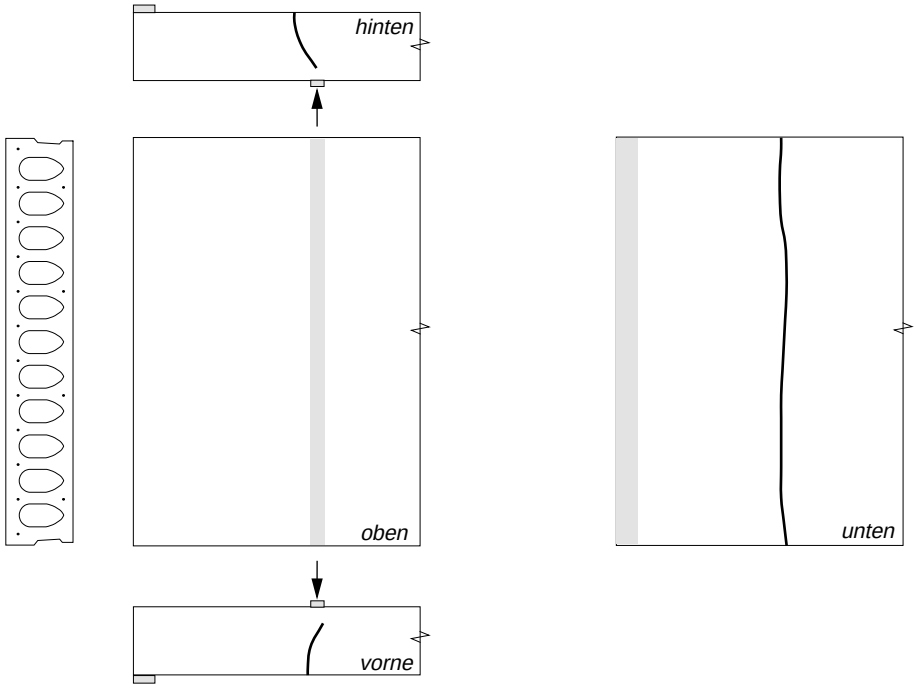


Abb. 4.121 Bruchbild

Abb. 4.122 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Abplatzungen an der Ecke hinten bei K=65 kN
Versuch wegen zu grossen Durchbiegungen abgebrochen
Bruchart SL

Tab. 4.36 Versuchsresultate S2K08a

	Bruch	Riss	Schlupf	Dec-	Dec+
MD-(1+2) [kN]	206.9	-	-	-	-
f_{Km} [mm]	1.8	-	-	-	-

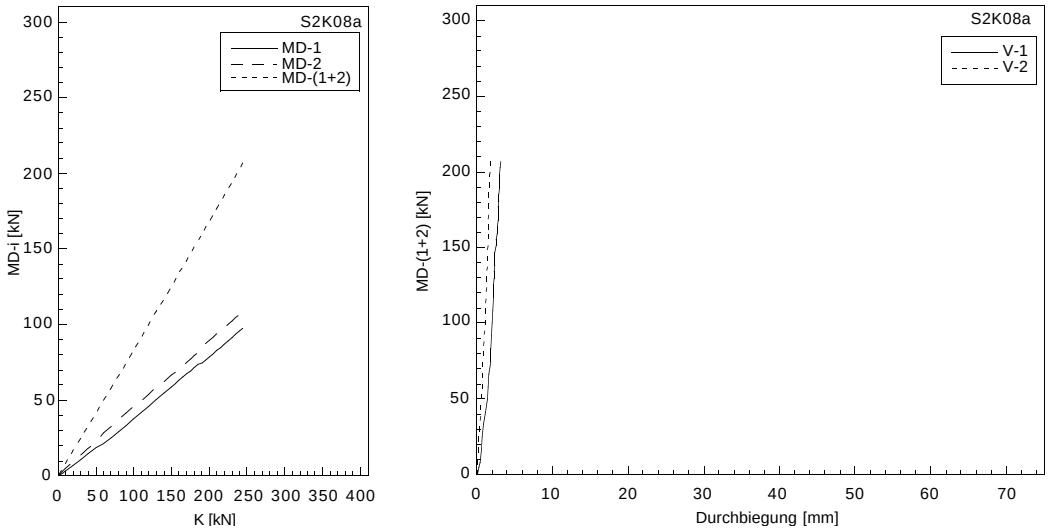


Abb. 4.123 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

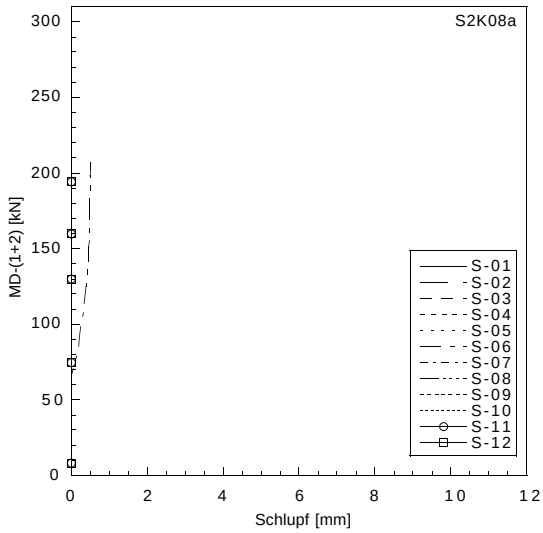


Abb. 4.124 Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

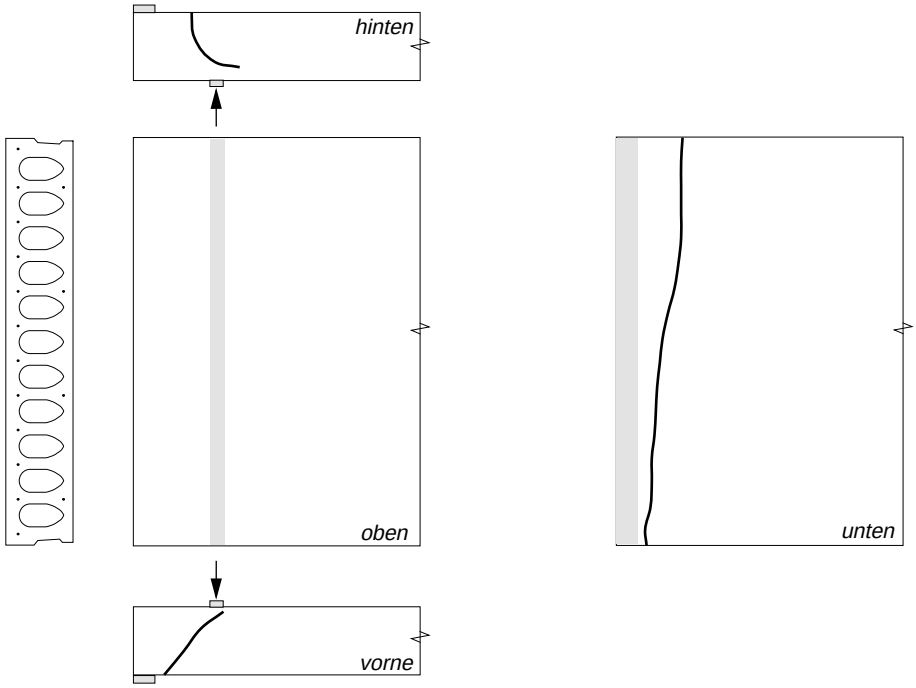


Abb. 4.125 Bruchbild

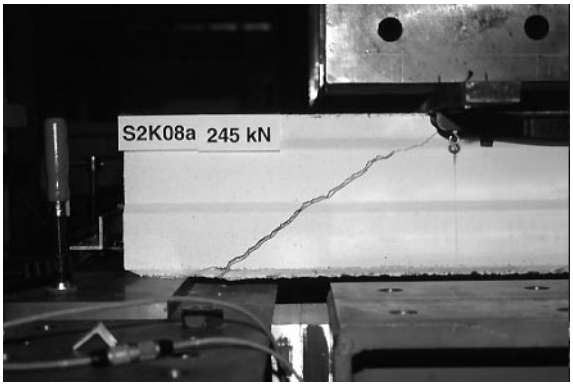


Abb. 4.126 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Diagonalriss in Steg 1 bei K=190 kN (vgl. Anhang C.1)
Bruchart (SL)/A-SC

Tab. 4.37 Versuchsresultate S2K08b

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	205.1	202.3	202.3	-	-
f_{Km} [mm]	18.9	4.5	4.5	-	-

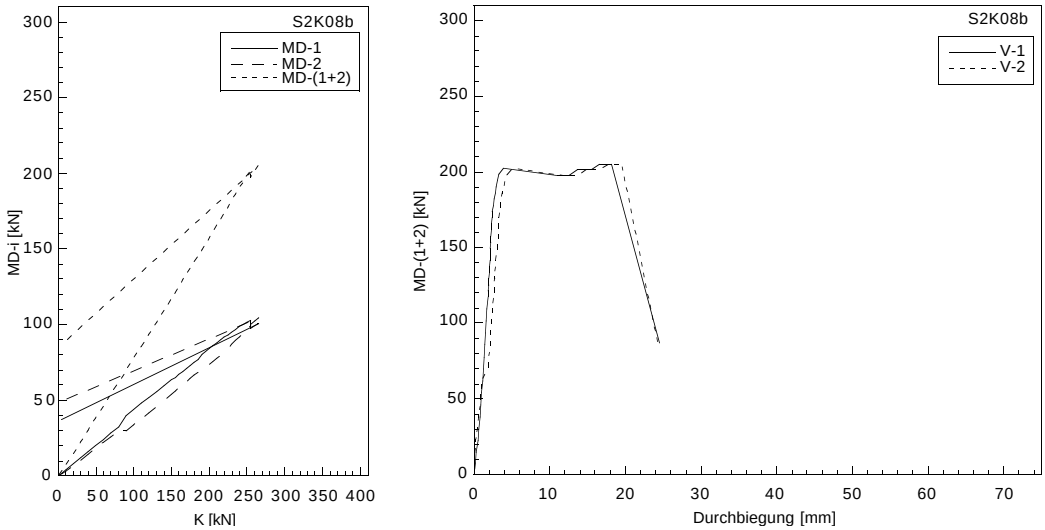


Abb. 4.127 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

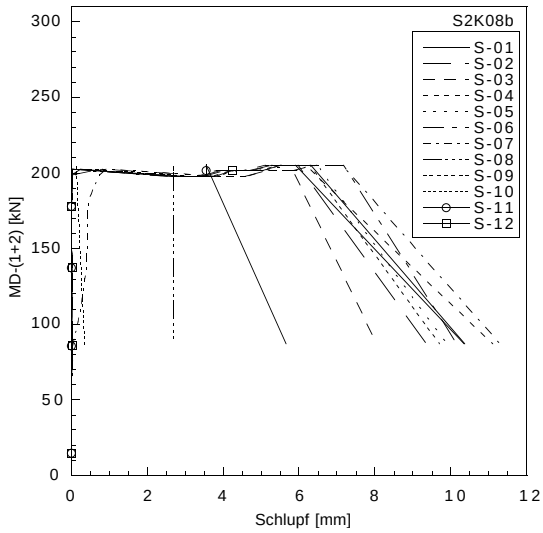


Abb. 4.128 Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

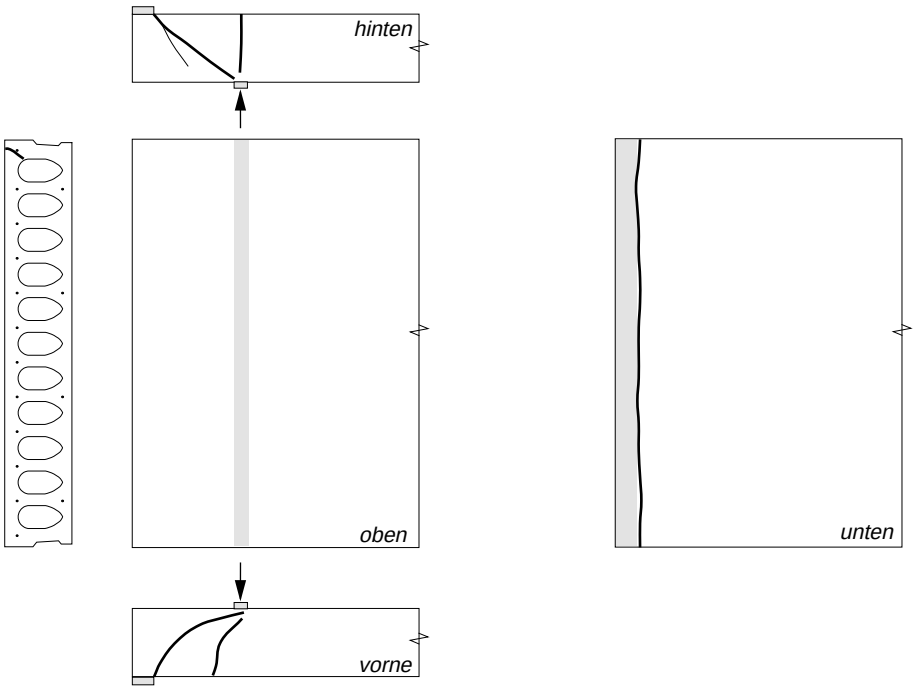


Abb. 4.129 Bruchbild

Abb. 4.130 Bruchzustand von hinten

Bemerkung: Abplatzungen an Ecke hinten bei K=80 kN
Diagonalriss in Steg 12 bei K=185 kN (vgl. Anhang C.1)
Bruchart SL/A

Tab. 4.38 Versuchsresultate S2K09a

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	128.3	-	-	-	-
f_{Km} [mm]	1.8	-	-	-	-

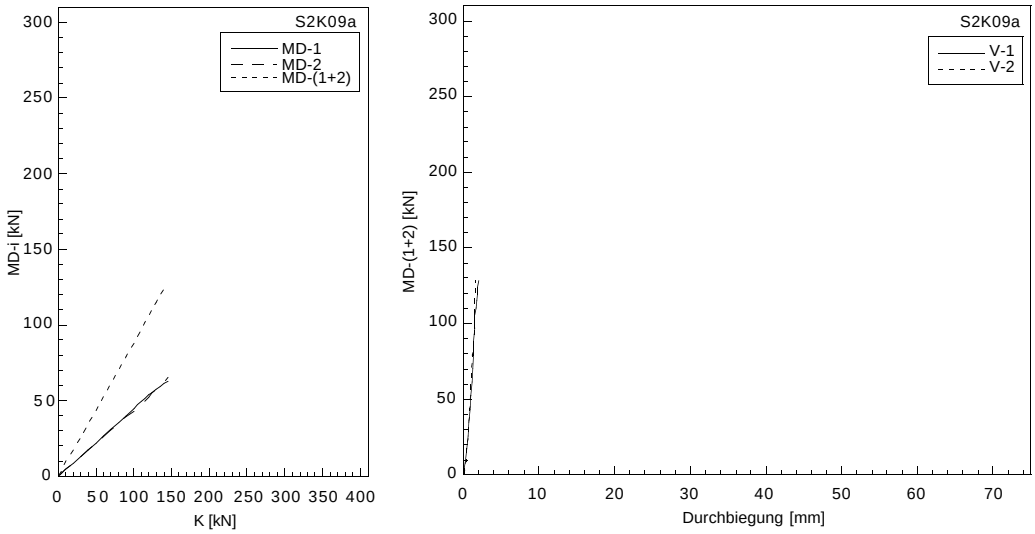


Abb. 4.131 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

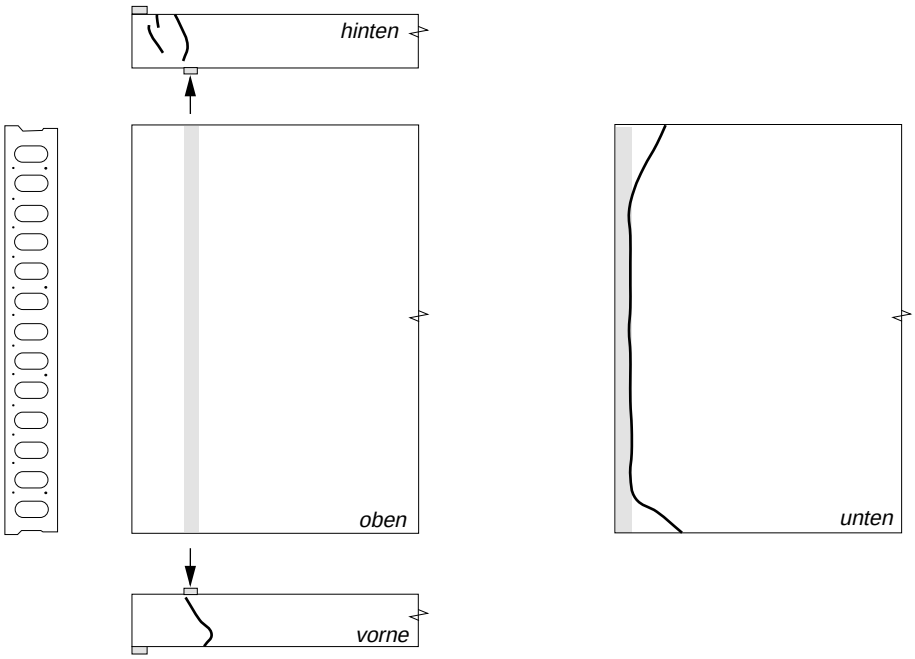


Abb. 4.132 Bruchbild

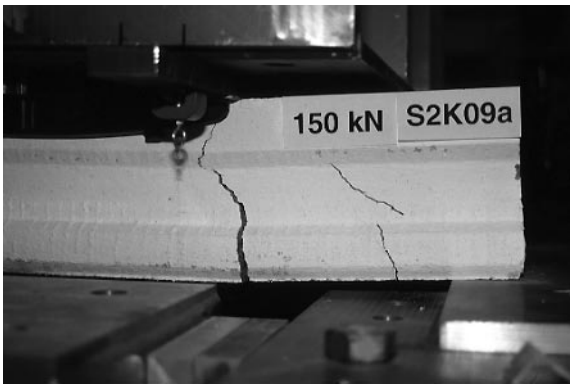


Abb. 4.133 Bruchzustand von hinten

Bemerkung: Schubzugriss im Steg 14 bei K=100 kN (vgl. Anhang C.1)
Bruchart ST/A

Tab. 4.39 Versuchsresultate S2K09b

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	118.4	86.5	-	61.7	74.2
f_{Km} [mm]	19.8	5.6	-	4.2	4.9

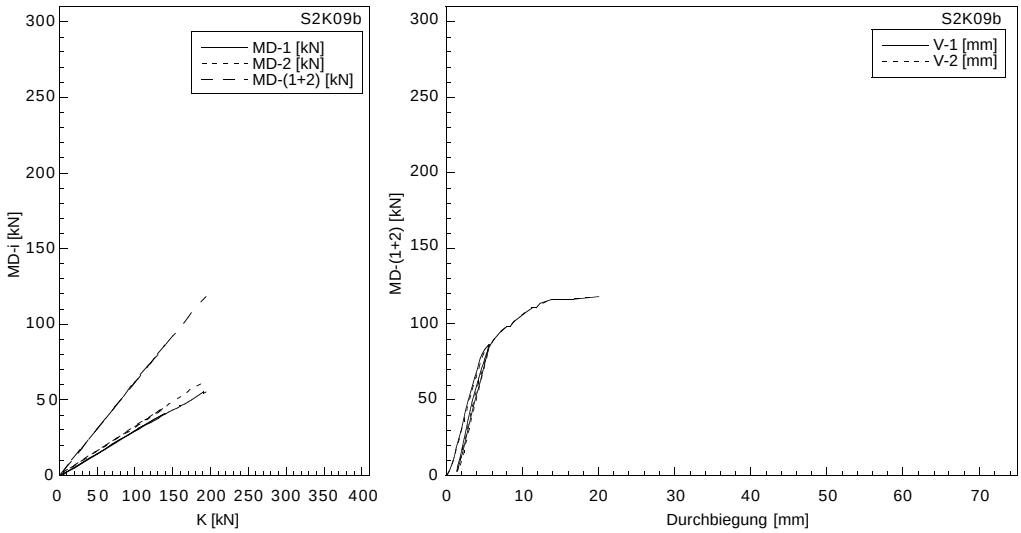


Abb. 4.134 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

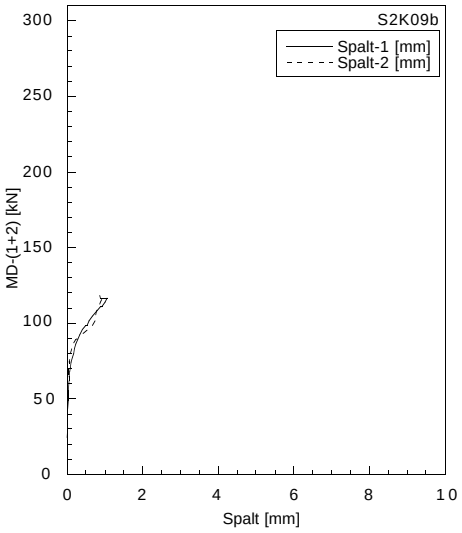


Abb. 4.135 Spaltmessung (vgl. Anhang C.1)

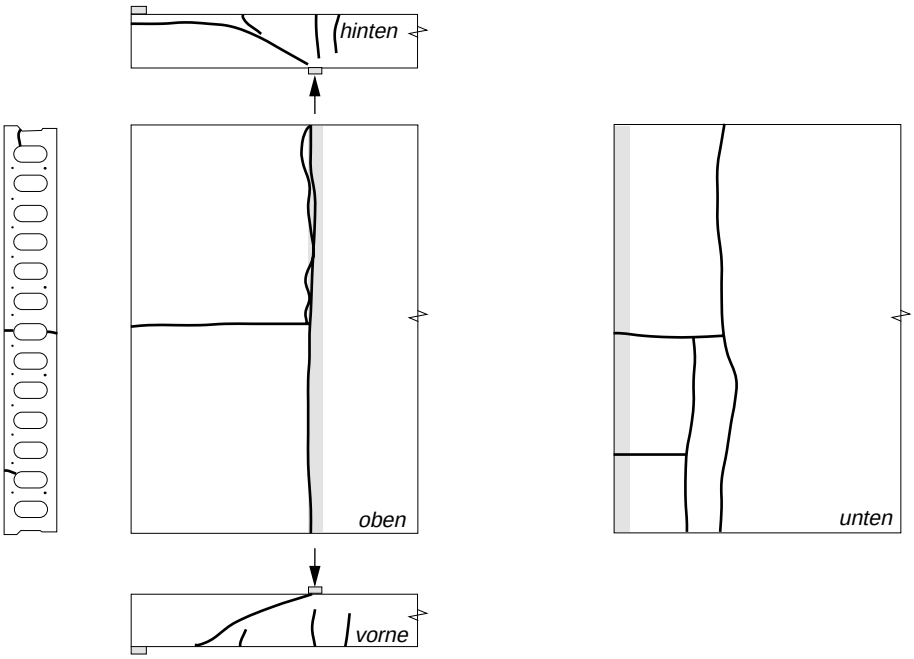


Abb. 4.136 Bruchbild

Abb. 4.137 Bruchzustand von hinten

Bemerkung: Schubzugriss im Steg 14 bei K=180 kN (vgl. Anhang C.1)
Bruchart ST/SL/A-LWS-SC

Tab. 4.40 Versuchsresultate S2K10a

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	138.2	-	-	-	-
f_{Km} [mm]	2.8	-	-	-	-

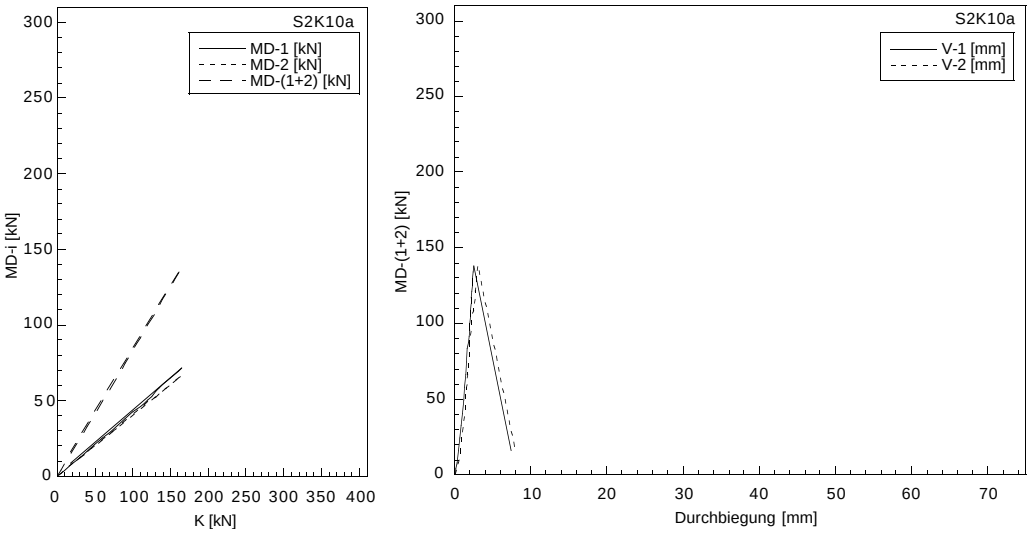


Abb. 4.138 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

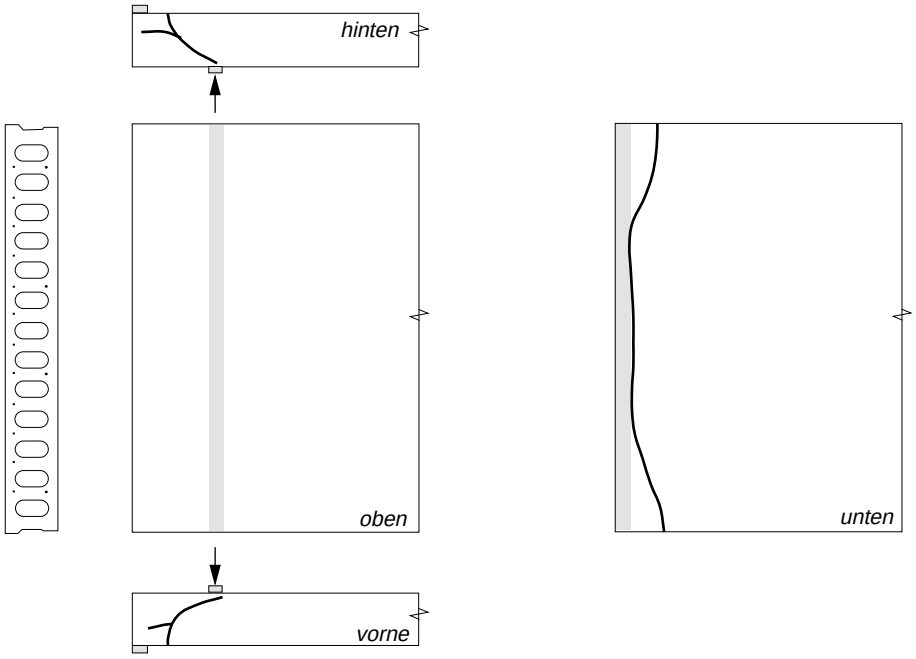


Abb. 4.139 Bruchbild

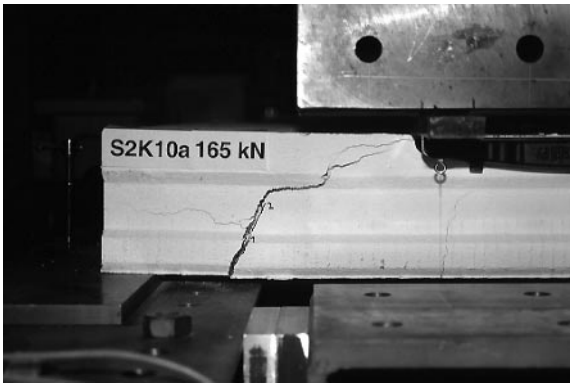


Abb. 4.140 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Bruchart (SL)/SC

Tab. 4.41 Versuchsresultate S2K10b

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	151.1	-	-	-	-
f_{Km} [mm]	7.3	-	-	-	-

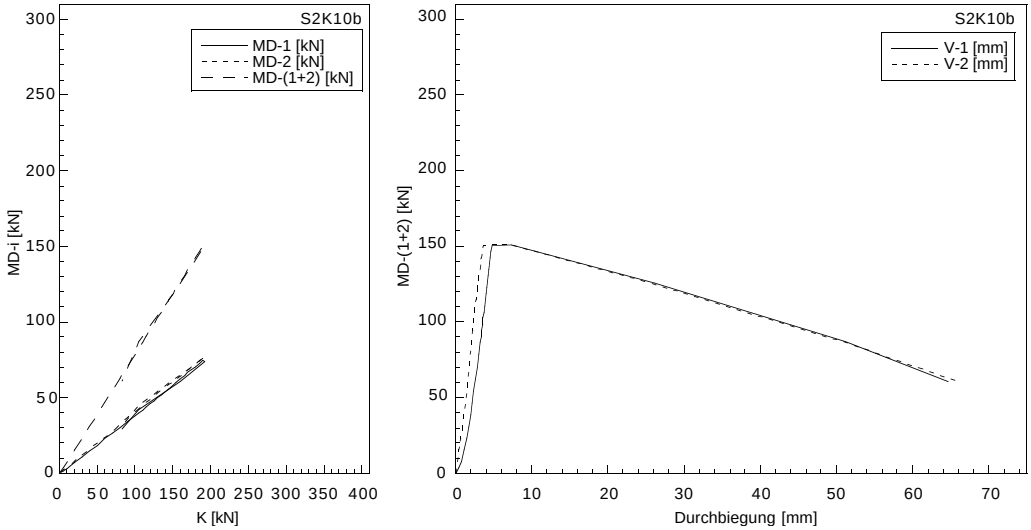


Abb. 4.141 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

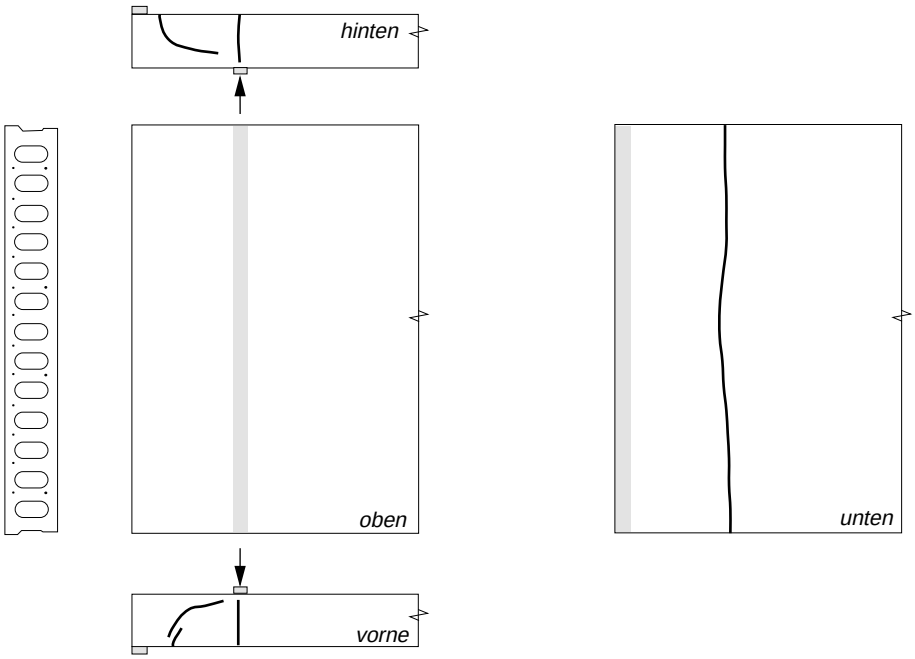


Abb. 4.142 Bruchbild

Abb. 4.143 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Diagonalrisse vorne und hinten bei K=80 kN
Versuch wegen zu grossen Durchbiegungen abgebrochen
Bruchart SL

Tab. 4.42 Versuchsresultate S2K11a

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	173.6	-	-	-	-
f_{Km} [mm]	2.2	-	-	-	-

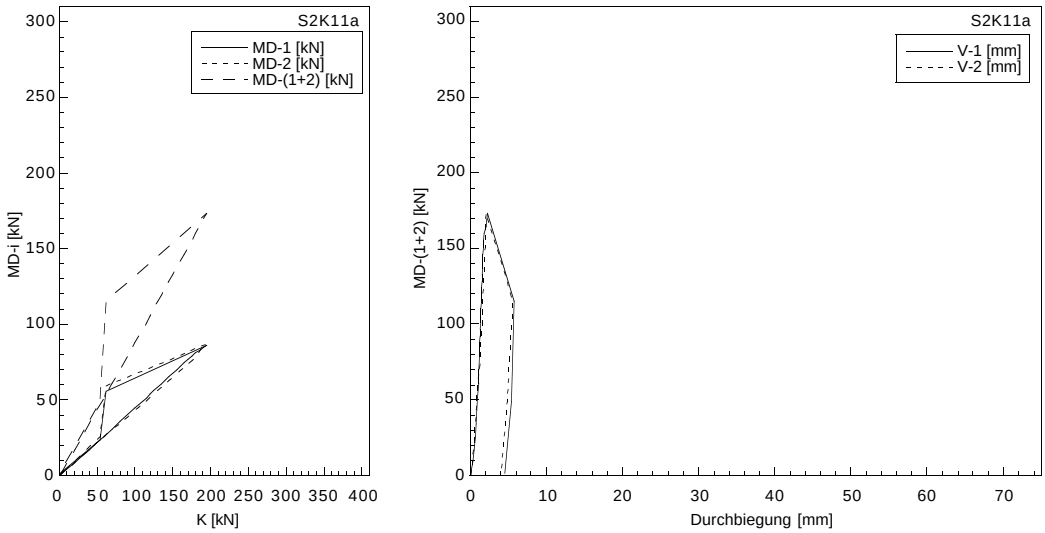


Abb. 4.144 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

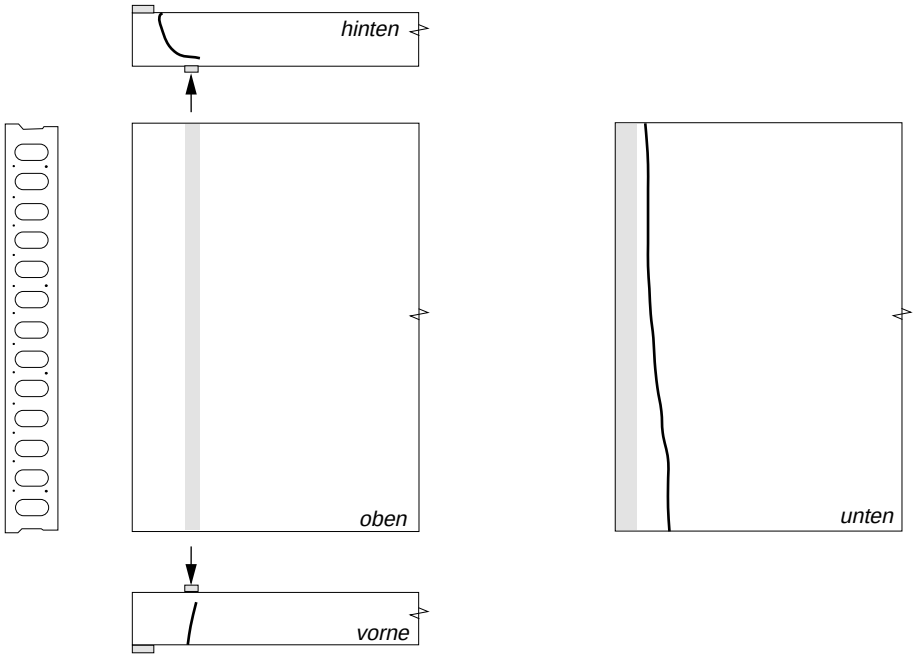


Abb. 4.145 Bruchbild

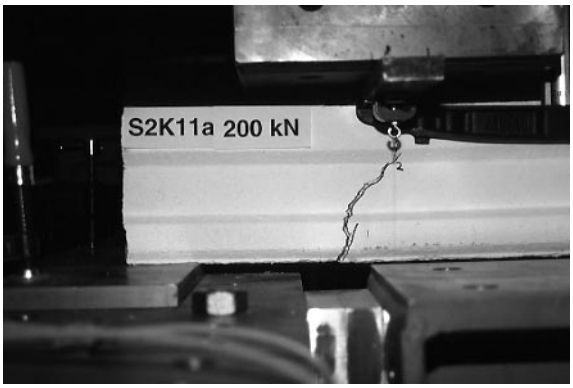


Abb. 4.146 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Bruchart (SL)/A-SC

Tab. 4.43 Versuchsresultate S2K11b

	Bruch	Riss	Schlupf	Dec-	Dec+
MD-(1+2) [kN]	126.5	89.7	-	61.8	74.5
f_{Km} [mm]	21.0	4.6	-	3.4	4.1

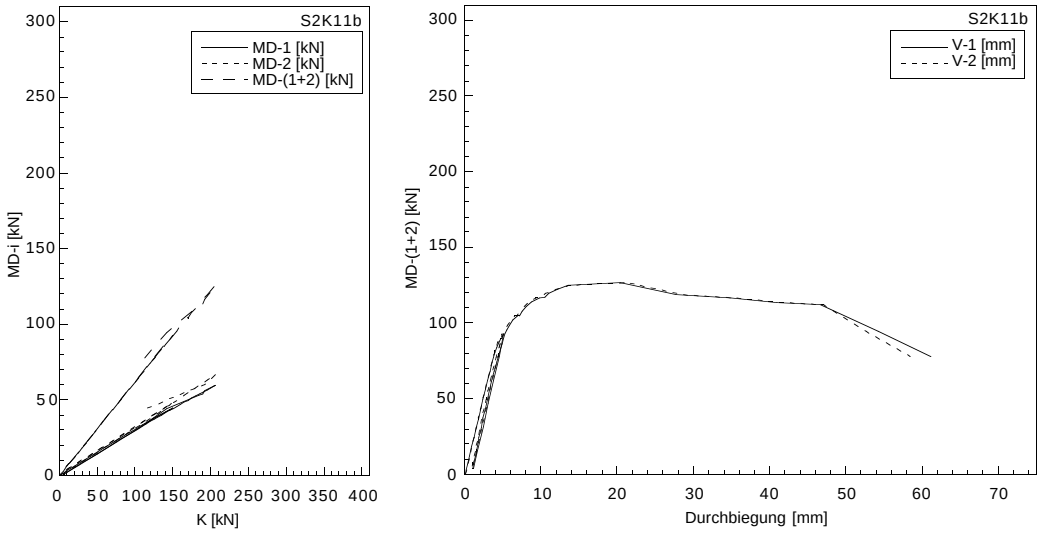


Abb. 4.147 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

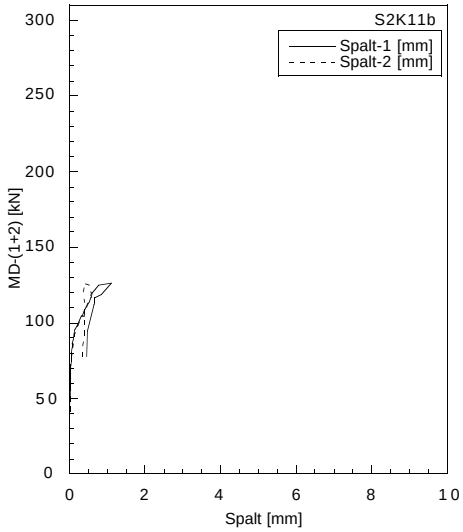


Abb. 4.148 Spaltmessungen (vgl. Anhang C.1)

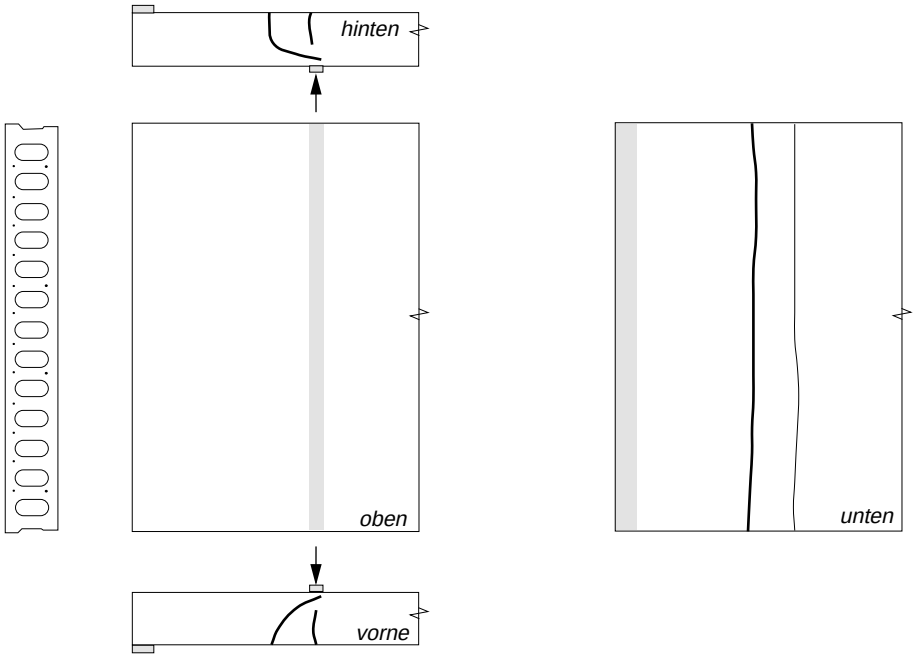


Abb. 4.149 Bruchbild

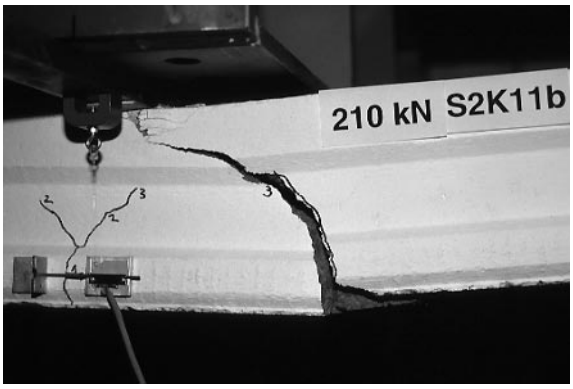


Abb. 4.150 Bruchzustand von hinten

Bemerkung: Bruchart SL/SC

Tab. 4.44 Versuchsresultate S2K12a

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	163.5	-	-	-	-
f_{Km} [mm]	3.0	-	-	-	-

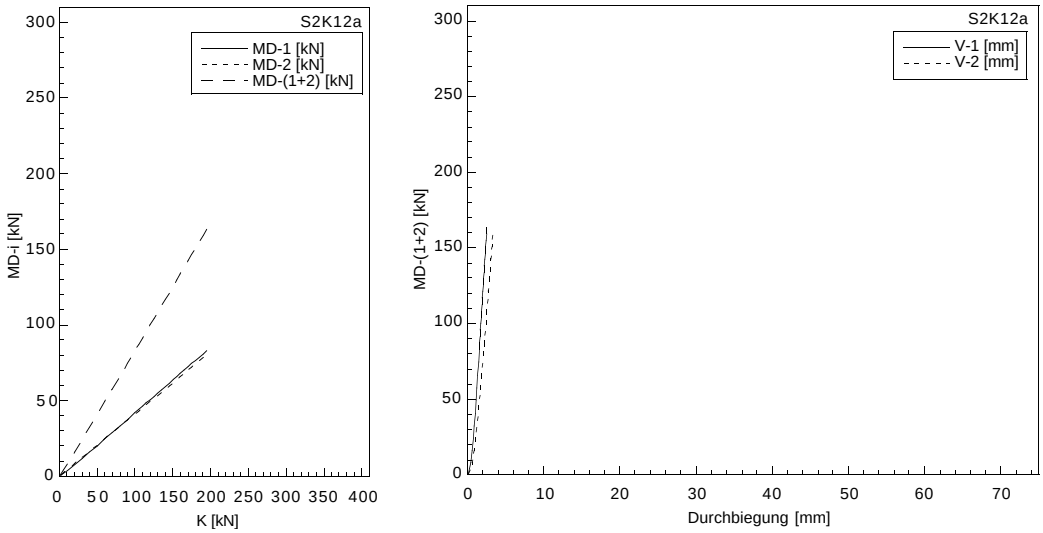


Abb. 4.151 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

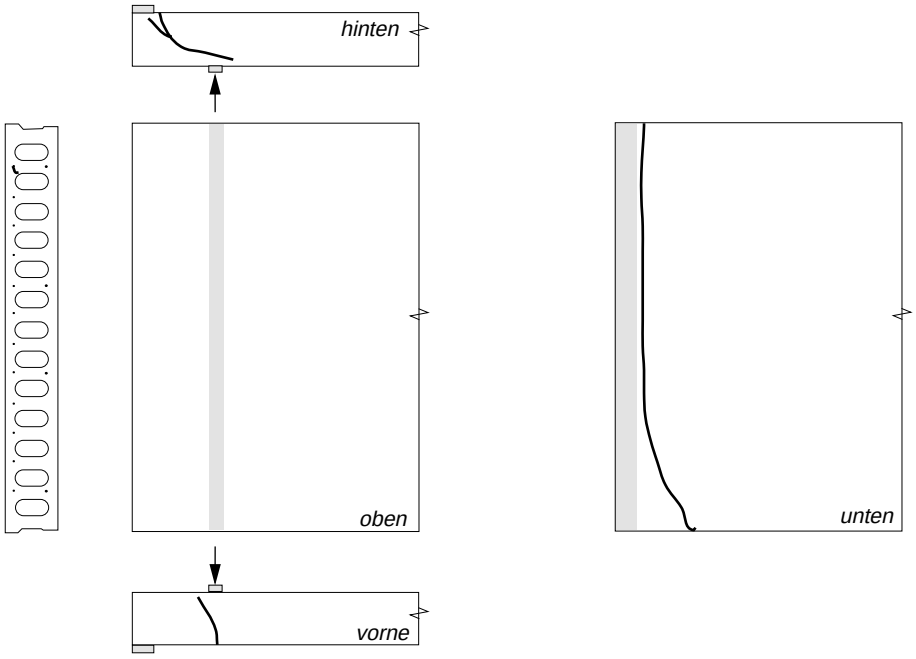


Abb. 4.152 Bruchbild

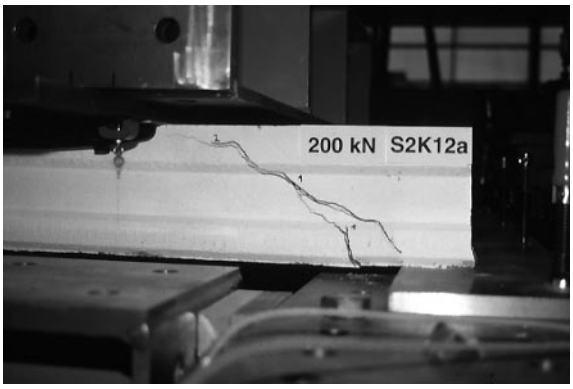


Abb. 4.153 Bruchzustand von hinten

Bemerkung: Schubzugriss in Stegen 13 u. 14 bei K=90 kN (vgl. Anhang C.1)
Bruchart ST/(SL)/A-SC

Tab. 4.45 Versuchsresultate S2K12b

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	149.5	-	-	-	-
f_{Km} [mm]	4.5	-	-	-	-

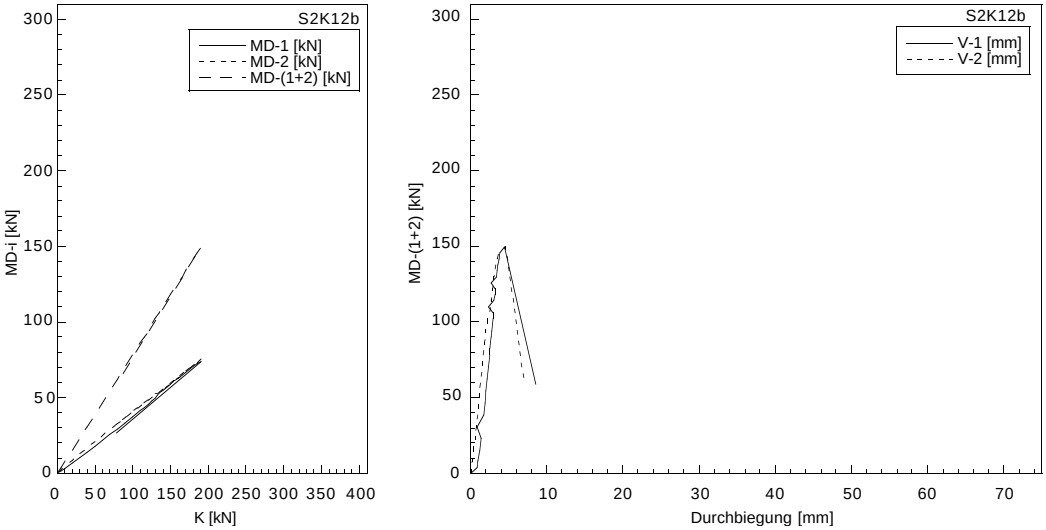


Abb. 4.154 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

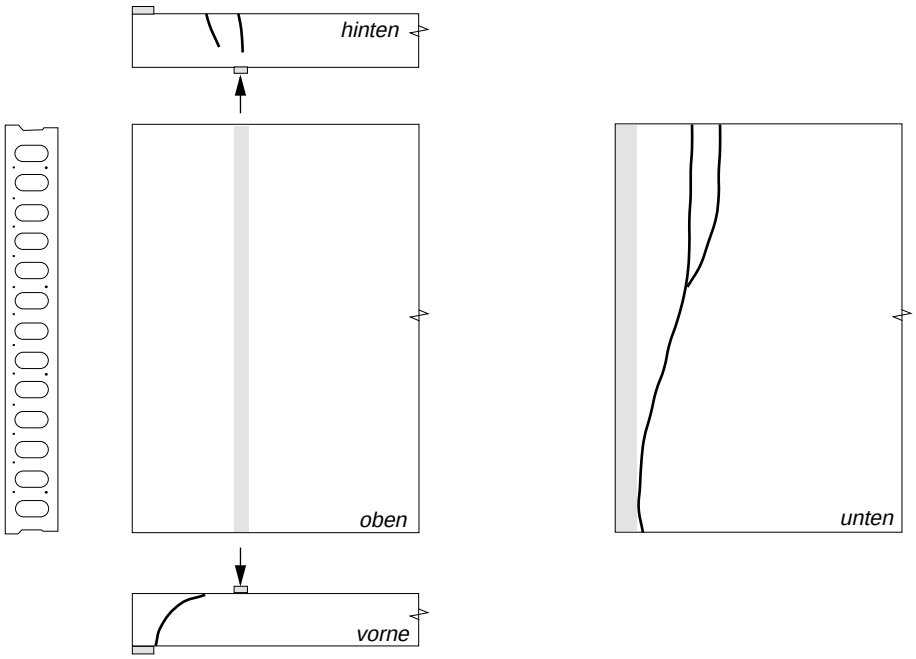


Abb. 4.155 Bruchbild

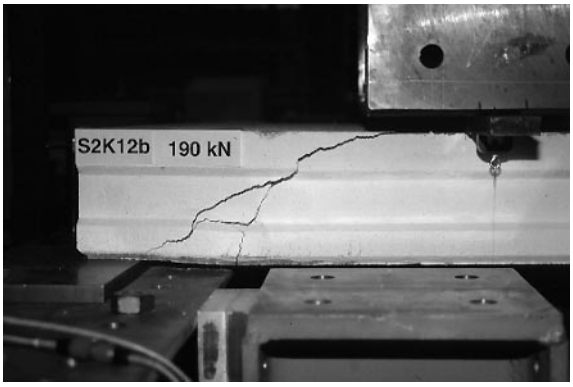


Abb. 4.156 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Schubzugriss in Steg 14 bei K=135 kN (vgl. Anhang C.1)
Bruchart ST/(SL)/A-SC

Tab. 4.46 Versuchsresultate S2K13a

	Bruch	Riss	Schlupf	Dec-	Dec+
MD-(1+2) [kN]	221.7	-	221.7	-	-
f_{Km} [mm]	2.0	-	2.0	-	-

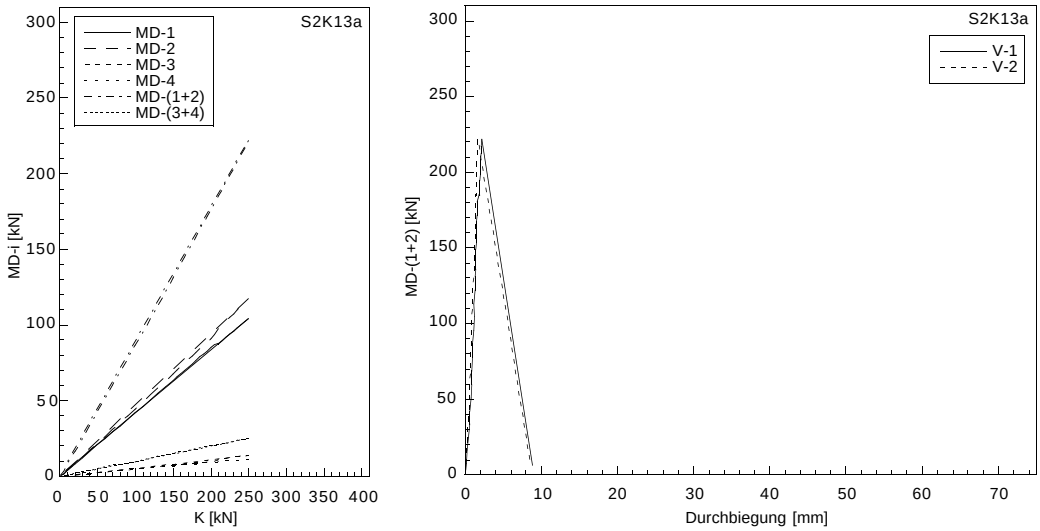


Abb. 4.157 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

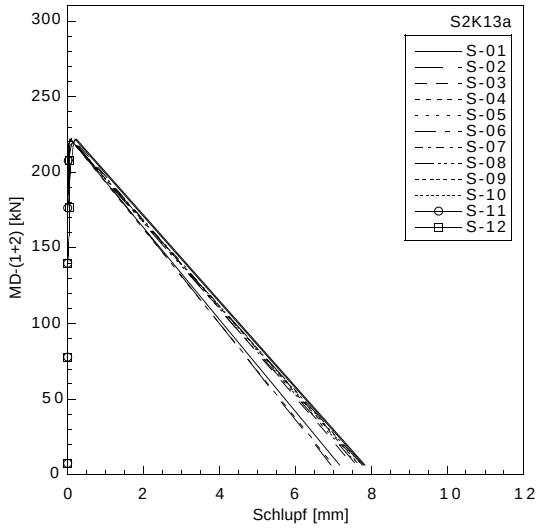


Abb. 4.158 Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

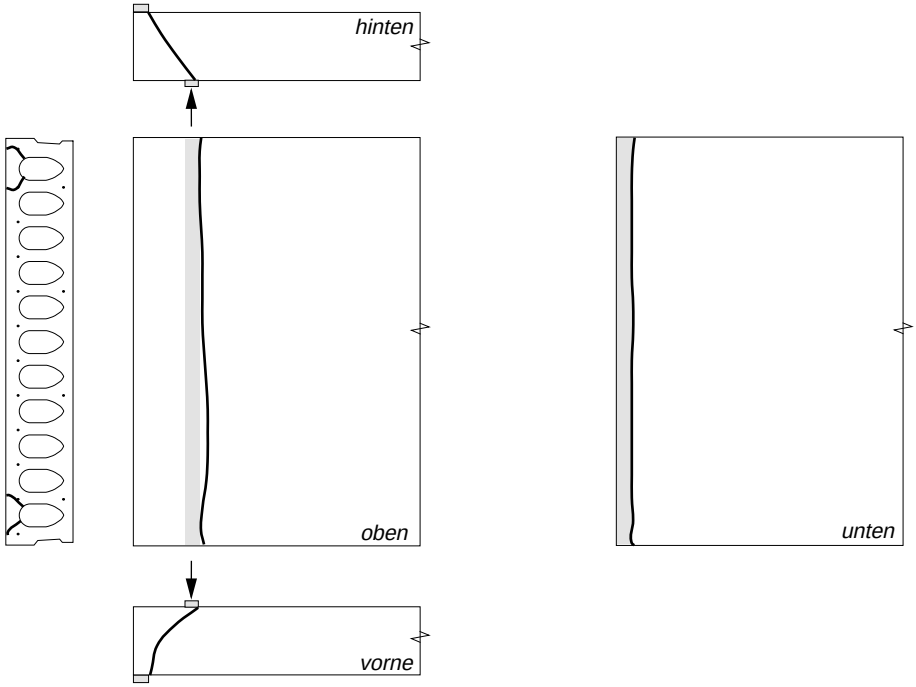


Abb. 4.159 Bruchbild

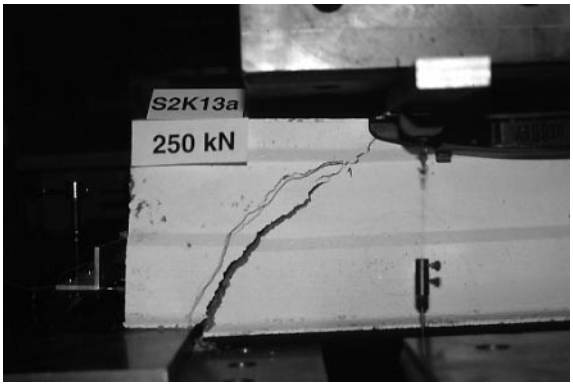


Abb. 4.160 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Diagonalriss im Steg 1 bei K=200 kN (vgl. Anhang C.1)
Bruchart (SL)/A

Tab. 4.47 Versuchsresultate S2K13b

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	190.1	105.8	-	91.7	97.6
f_{Km} [mm]	19.7	3.9	-	3.6	3.8

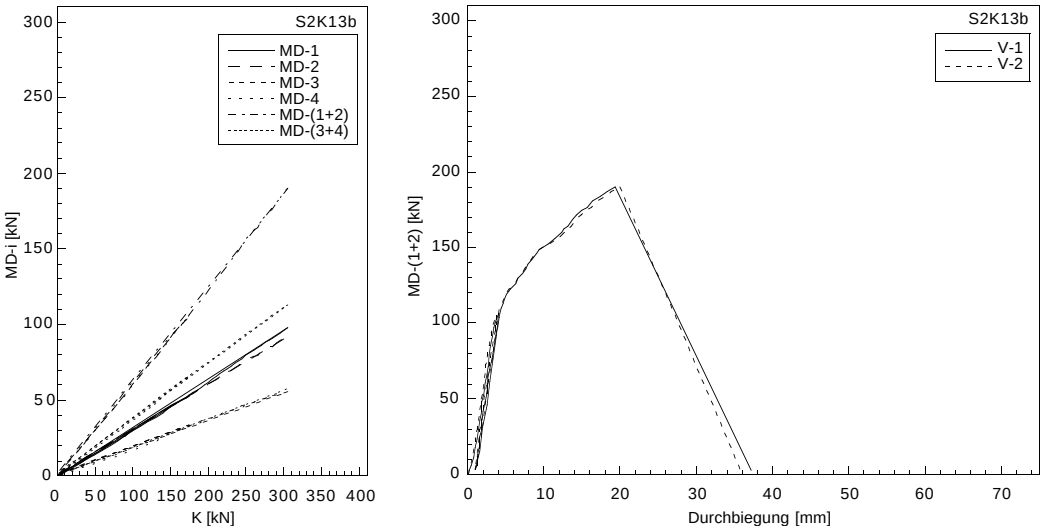


Abb. 4.161 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

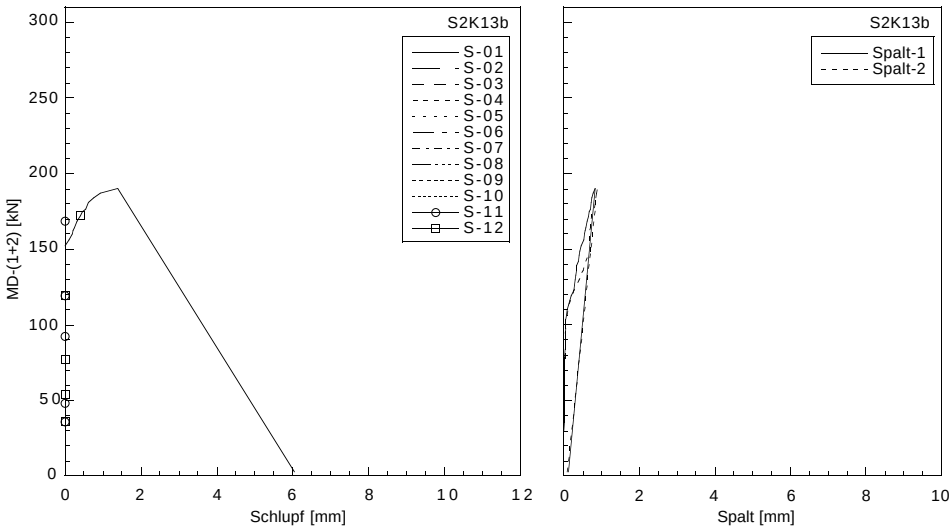


Abb. 4.162 Spalt- und Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

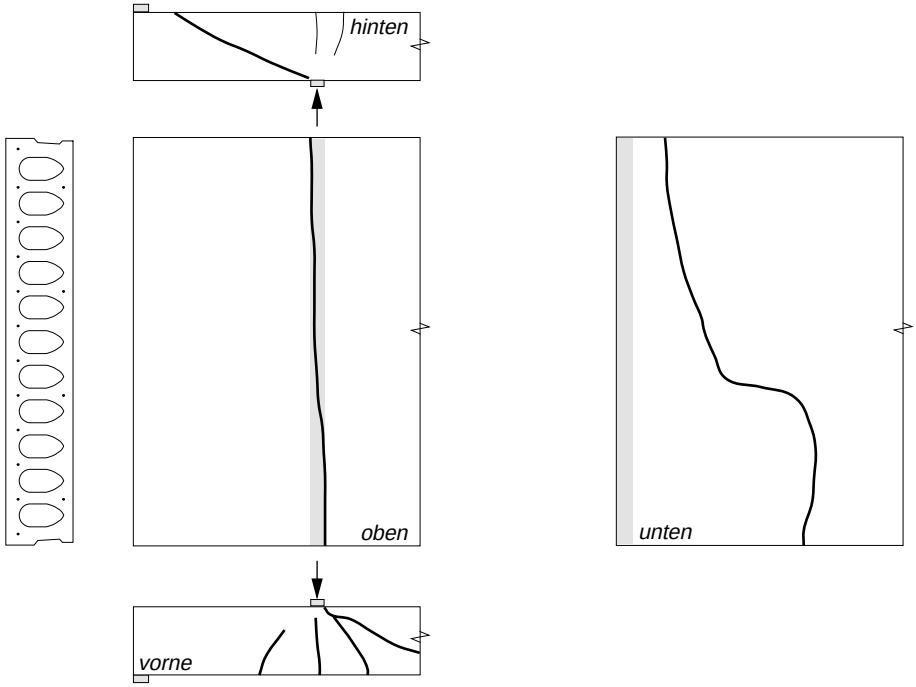


Abb. 4.163 Bruchbild

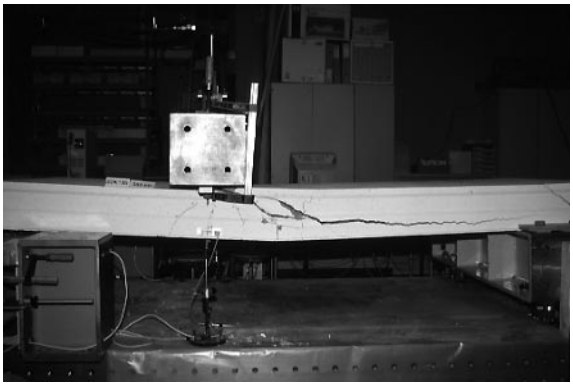


Abb. 4.164 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Bruchart SC-LWS

Tab. 4.48 Versuchsresultate S2K14a

	Bruch	Riss	Schlupf	Dec-	Dec+
MD-(1+2) [kN]	247.6	238.3	247.6	-	-
f_{Km} [mm]	2.9	2.8	2.9	-	-

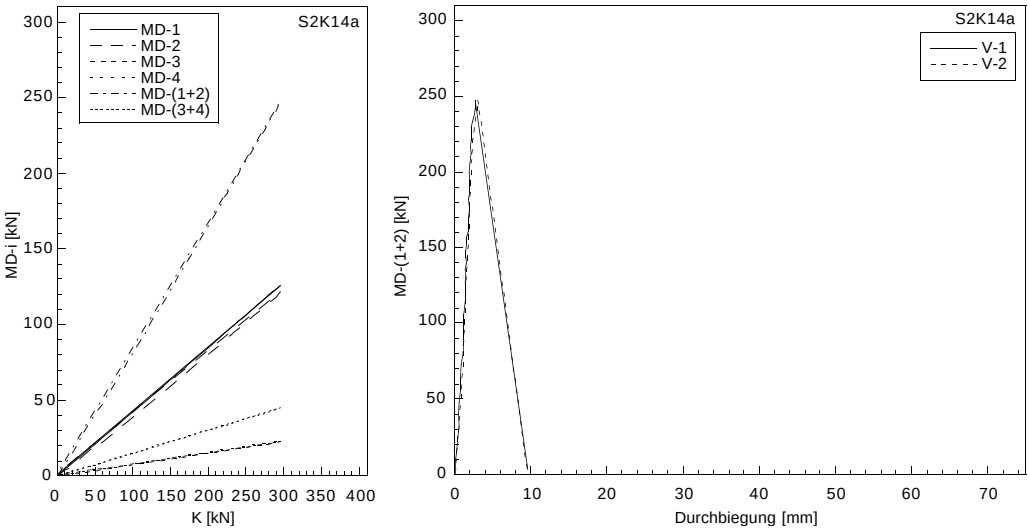


Abb. 4.165 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

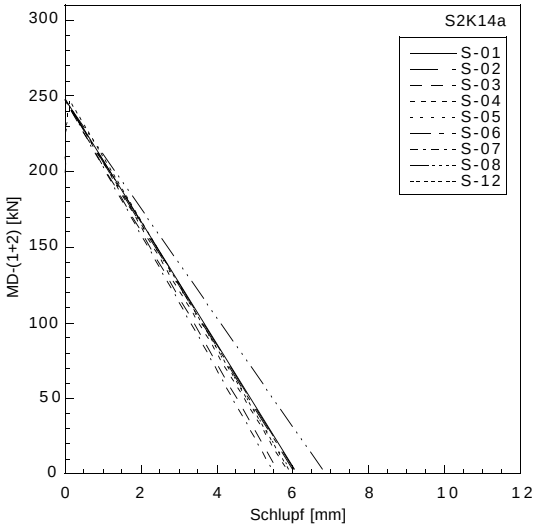


Abb. 4.166 Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

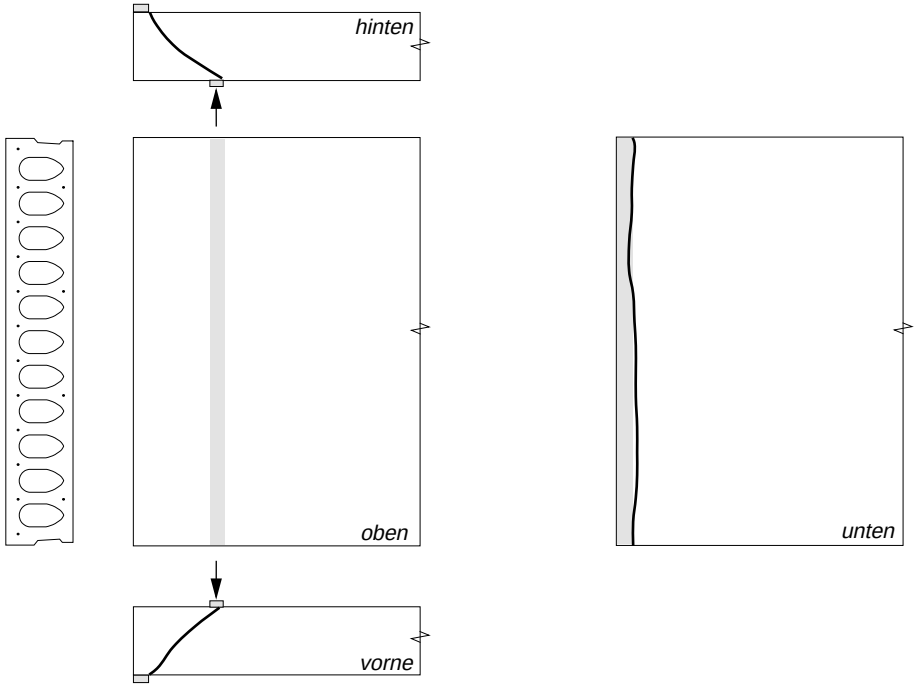


Abb. 4.167 Bruchbild

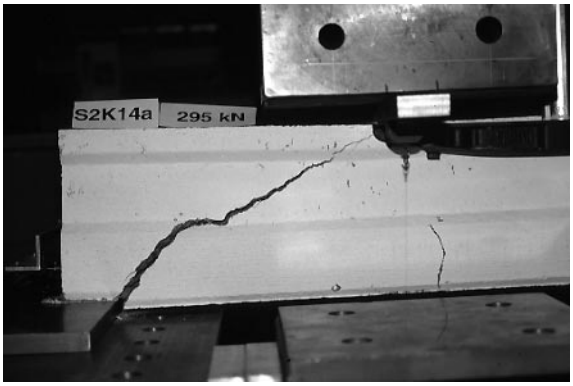


Abb. 4.168 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Bruchart A

Tab. 4.49 Versuchsresultate S2K14b

	Bruch	Riss	Schlupf	Dec-	Dec+
MD-(1+2) [kN]	211.2	177.9	211.2	-	-
f_{Km} [mm]	4.3	2.8	4.3	-	-

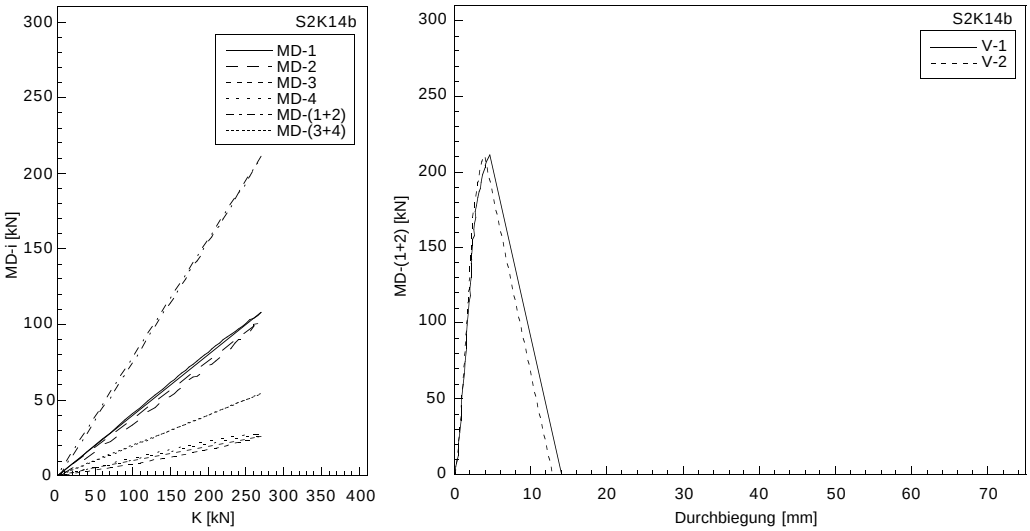


Abb. 4.169 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

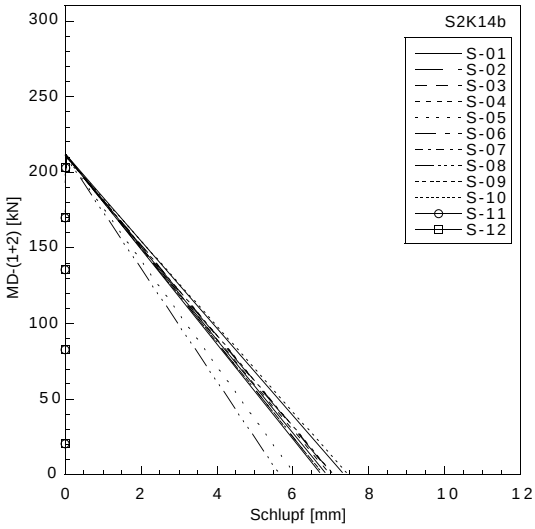


Abb. 4.170 Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

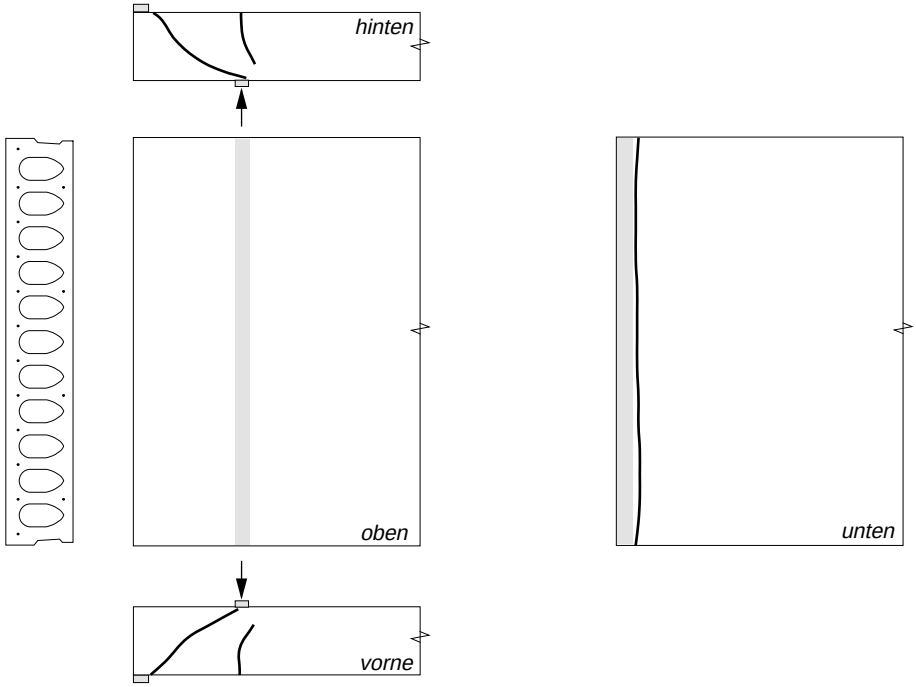


Abb. 4.171 Bruchbild

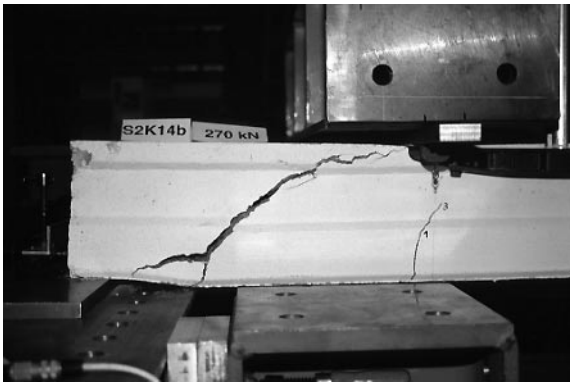


Abb. 4.172 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Bruchart A

Tab. 4.50 Versuchsresultate S2K15a

	Bruch	Riss	Schlupf	Dec-	Dec+
MD-(1+2) [kN]	288.6	-	288.6	-	-
f_{Km} [mm]	1.7	-	1.7	-	-

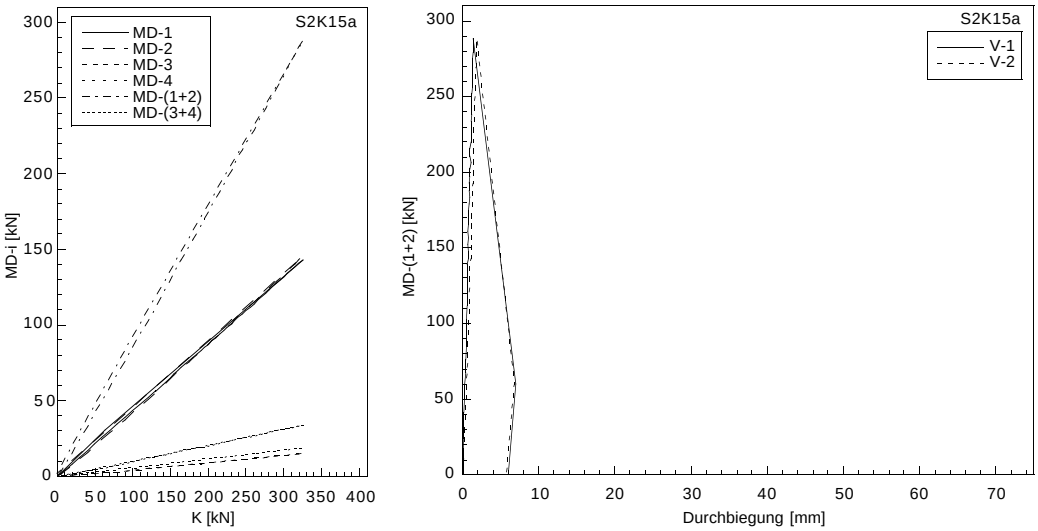


Abb. 4.173 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

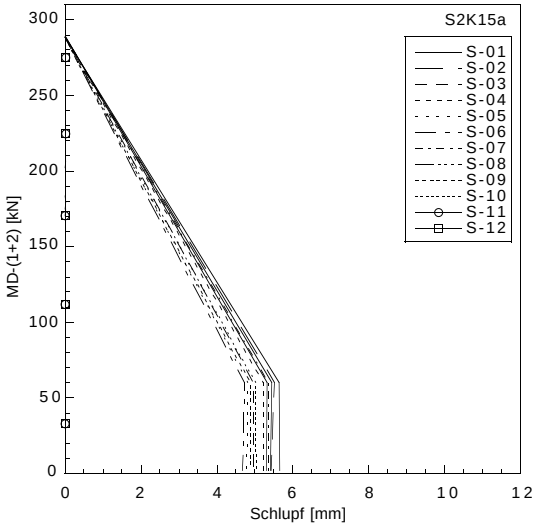


Abb. 4.174 Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

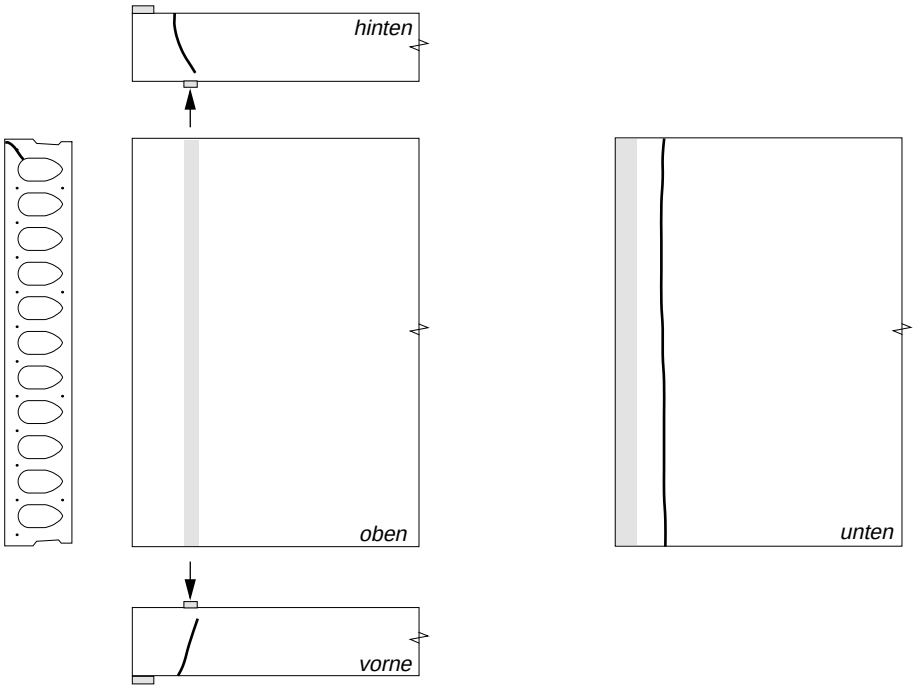


Abb. 4.175 Bruchbild

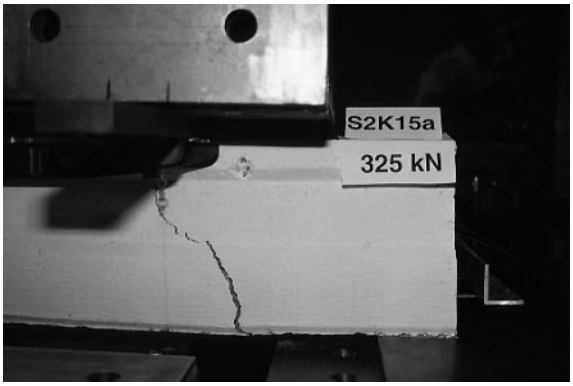


Abb. 4.176 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Bruchart A

Tab. 4.51 Versuchsresultate S2K15b

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	168.9	99.9	168.9	47.9	72.3
f_{Km} [mm]	19.2	4.6	19.2	2.4	3.3

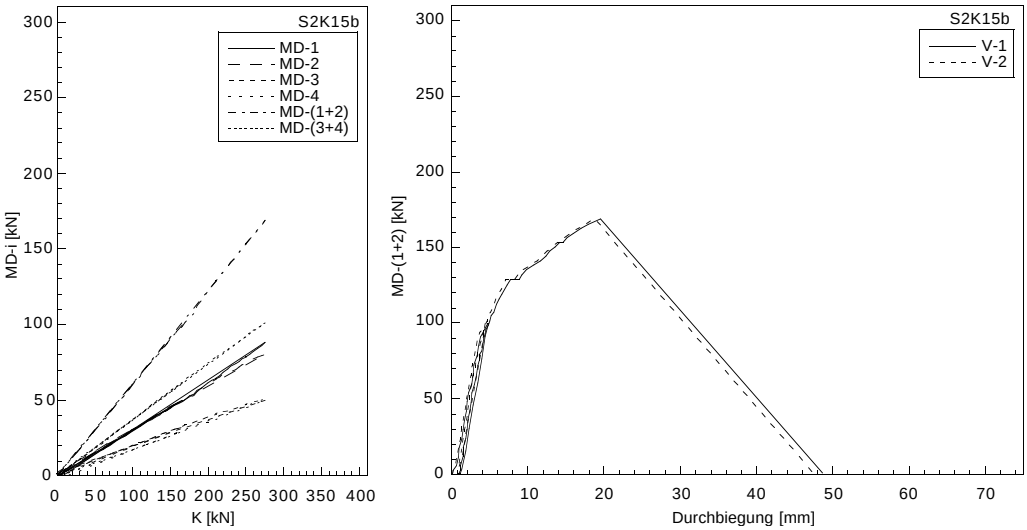


Abb. 4.177 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

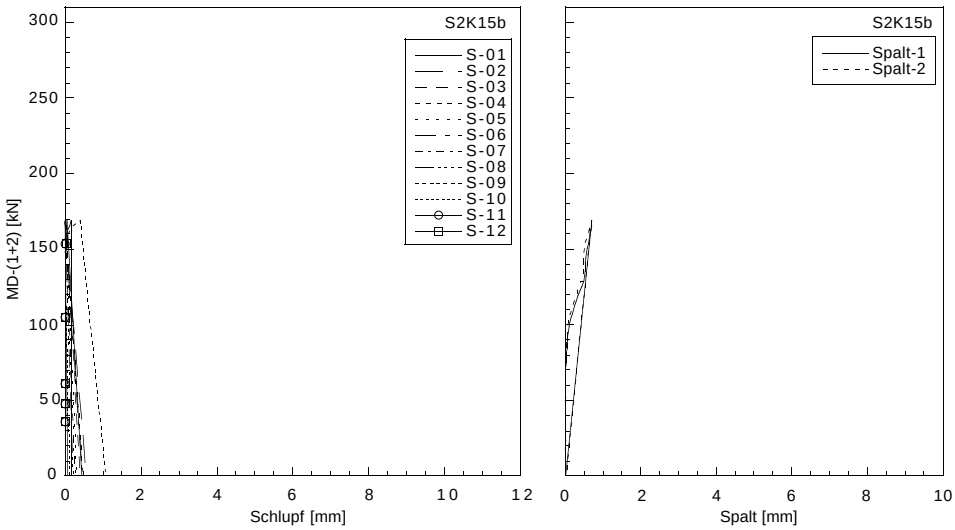


Abb. 4.178 Schlupf- und Spaltmessungen (vgl. Anhang C.1)

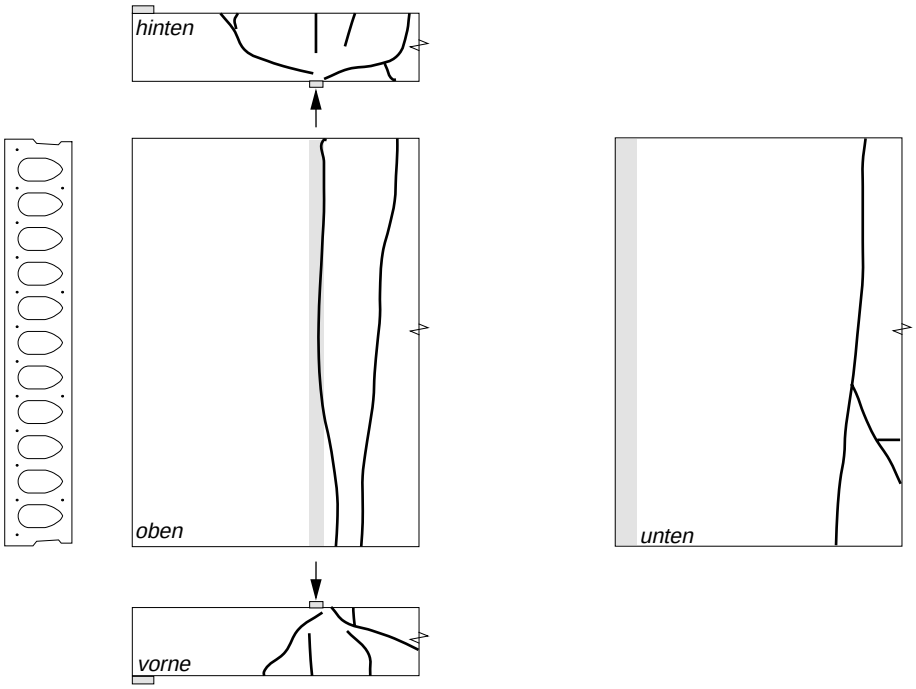


Abb. 4.179 Bruchbild

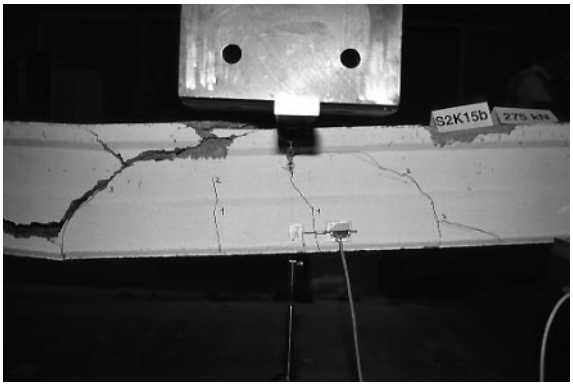


Abb. 4.180 Bruchzustand von hinten

Bemerkung: Bruchart LWS-SC

Tab. 4.52 Versuchsresultate S2K16a

	Bruch	Riss	Schlupf	Dec-	Dec+
MD-(1+2) [kN]	244.9	-	244.9	-	-
f_{Km} [mm]	2.5	-	2.5	-	-

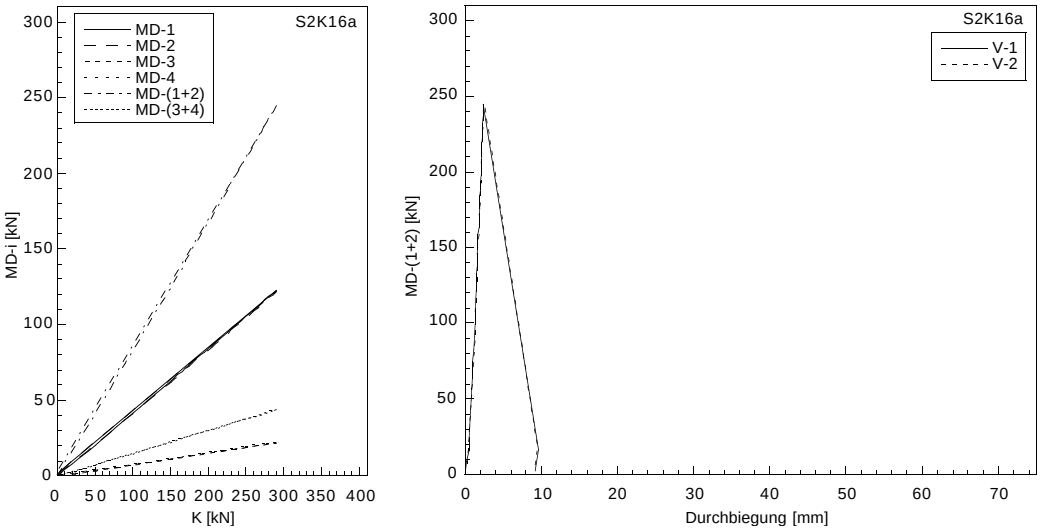


Abb. 4.181 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

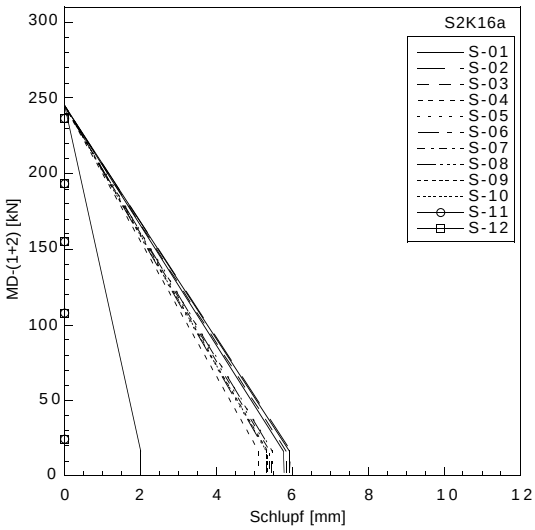


Abb. 4.182 Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.1)

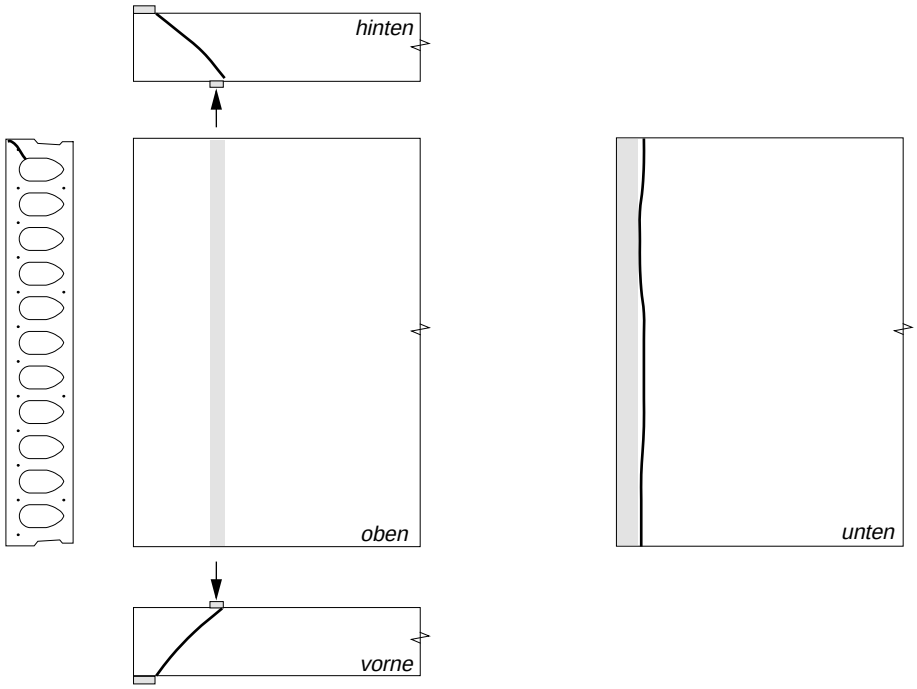


Abb. 4.183 Bruchbild

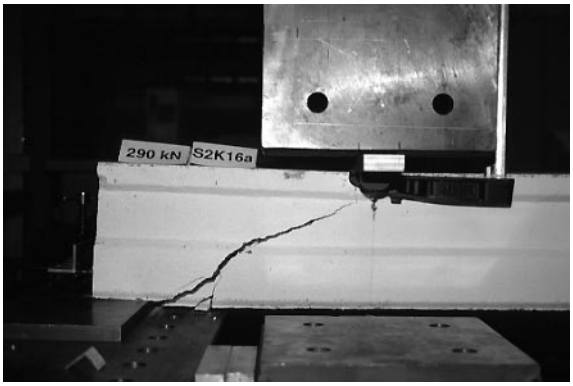


Abb. 4.184 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Bruchart A

Tab. 4.53 Versuchsresultate S2K16b

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	259.9	196.4	259.9	76.8	116.3
f_{Km} [mm]	6.6	3.2	6.6	1.8	2.2

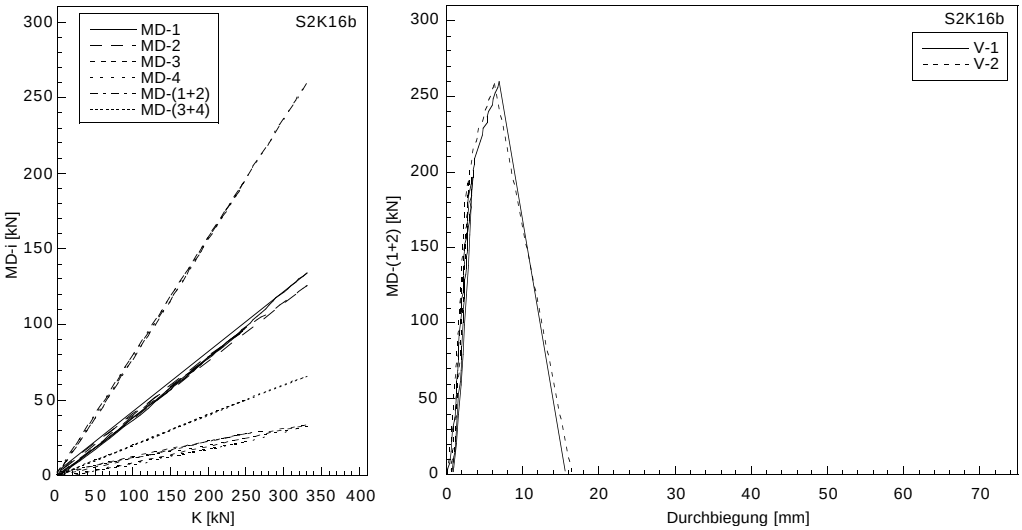


Abb. 4.185 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.1)

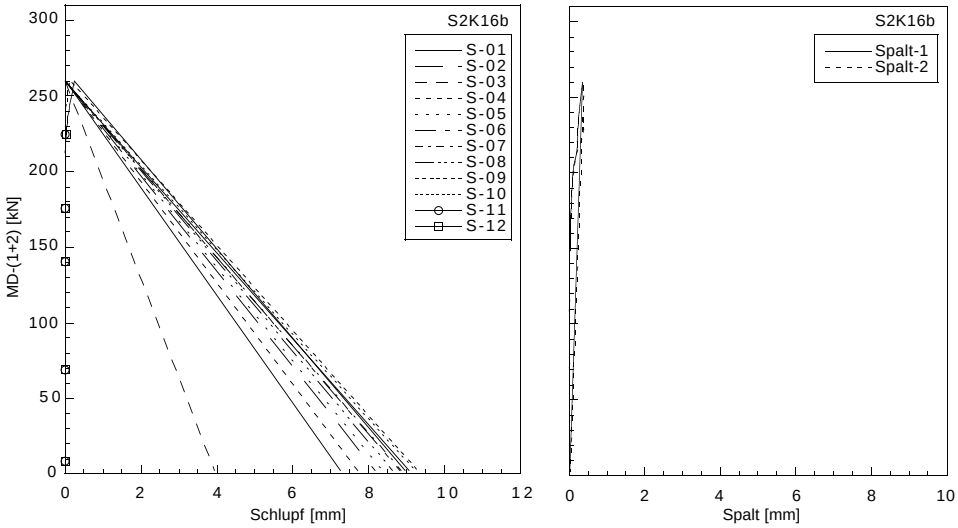


Abb. 4.186 Schlupf- und Spaltmessungen (vgl. Anhang C.1)

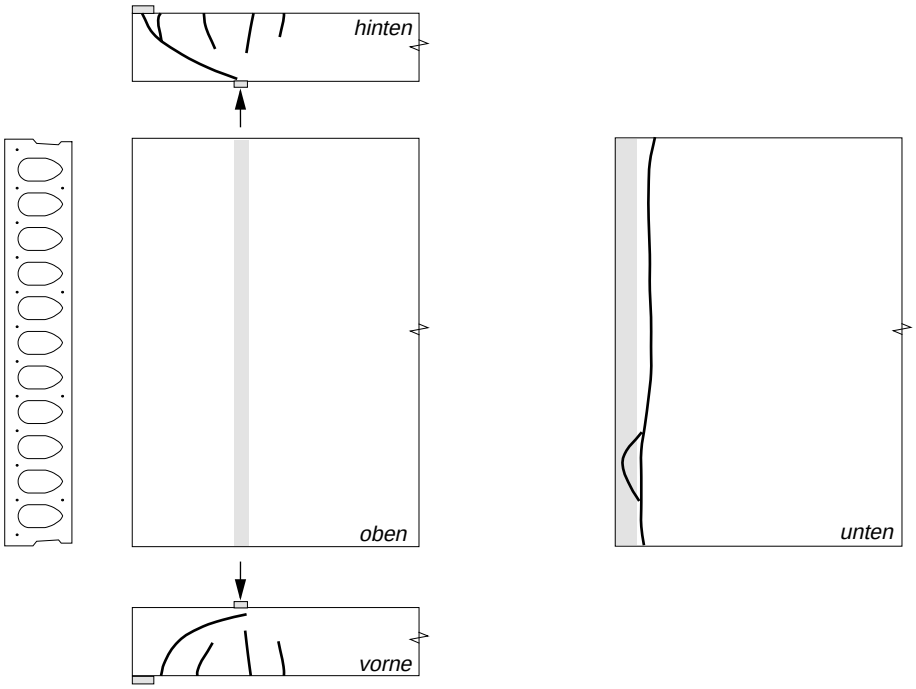


Abb. 4.187 Bruchbild

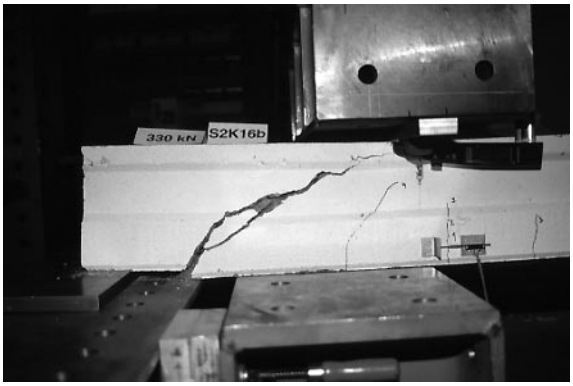


Abb. 4.188 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Bruchart A

Tab. 4.54 Versuchsresultate S3K1a

	Bruch	**Riss**	**Dec-**	**Dec+**
V_B [kN]	116.2	106.1	-	-
f_{Km} [mm]	5.2	3.8	-	-

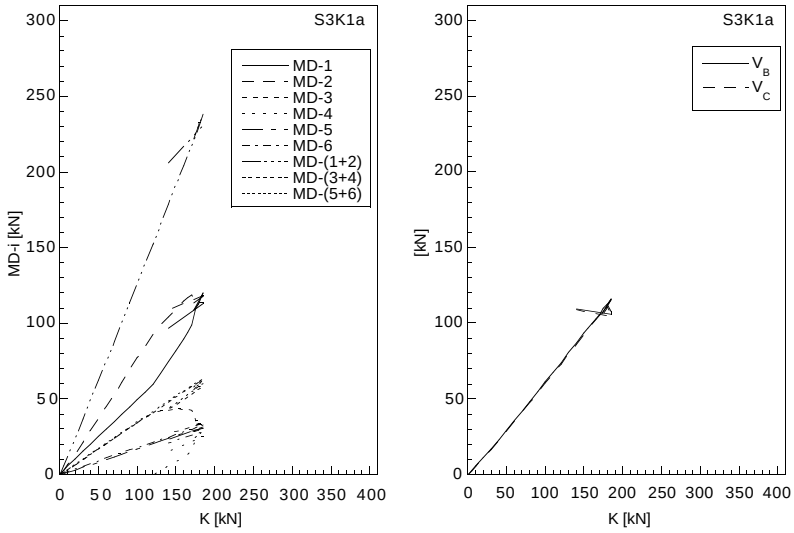


Abb. 4.189 Pressen-, Auflager- und Querkräfte (vgl. Abb. 4.10 und Anhang C.2)

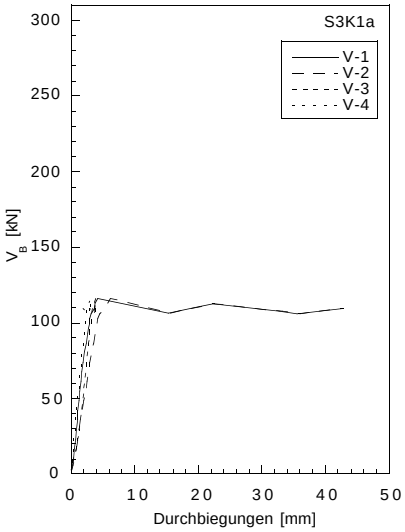


Abb. 4.190 Durchbiegungen (vgl. Abb. 4.10 und Anhang C.2)

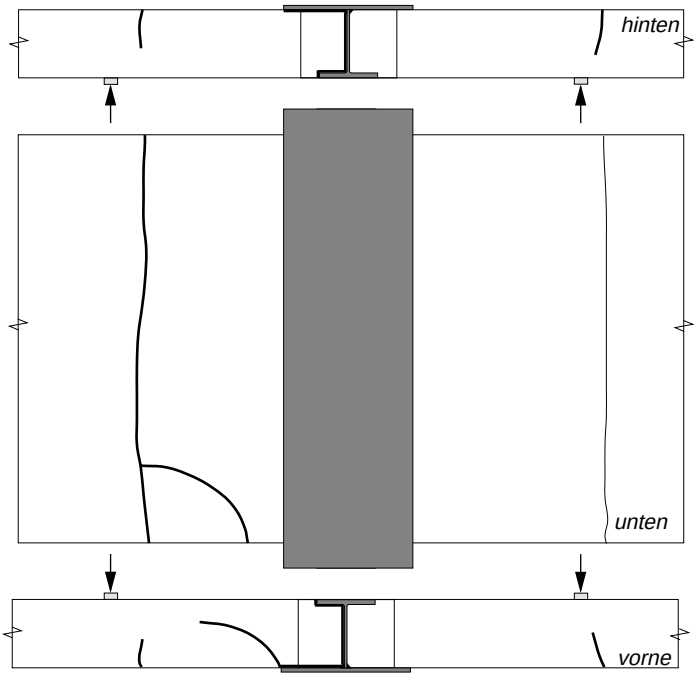


Abb. 4.191 Bruchbild

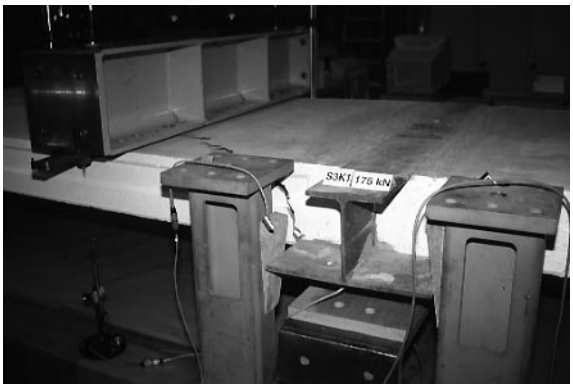


Abb. 4.192 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Platte Seite Brunnen leicht verdrillt
Bruchart E-SC

Tab. 4.55 Versuchsresultate S3K1b

	Bruch	**Riss**	**Dec-**	**Dec+**
V_C [kN]	161.8	112.5	67	86.6
f_{Km} [mm]	45.8	3.3	2.0	2.5

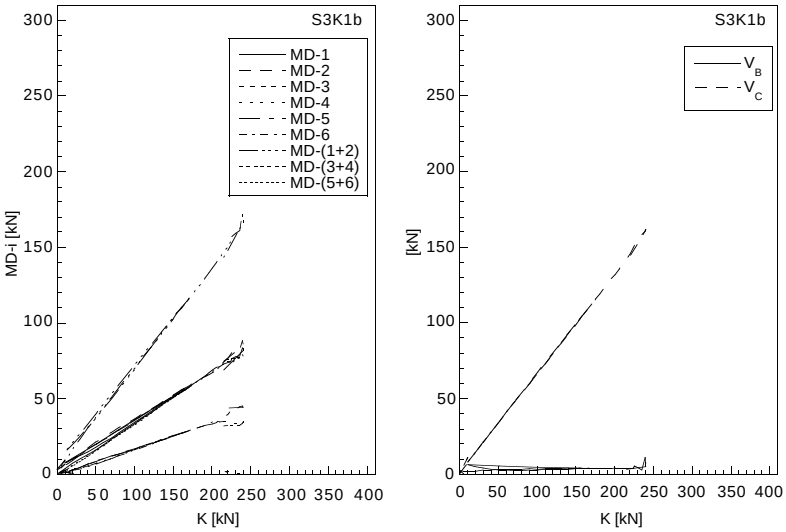


Abb. 4.193 Pressen-, Auflager- und Querkräfte (vgl. Abb. 4.10 und Anhang C.2)

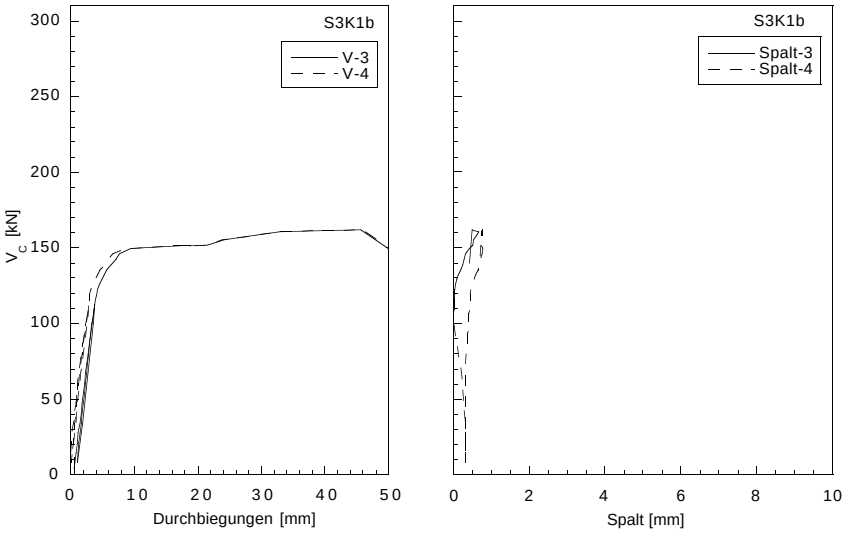


Abb. 4.194 Durchbiegungen und Spaltmessungen (vgl. Abb. 4.10 und Anhang C.2)

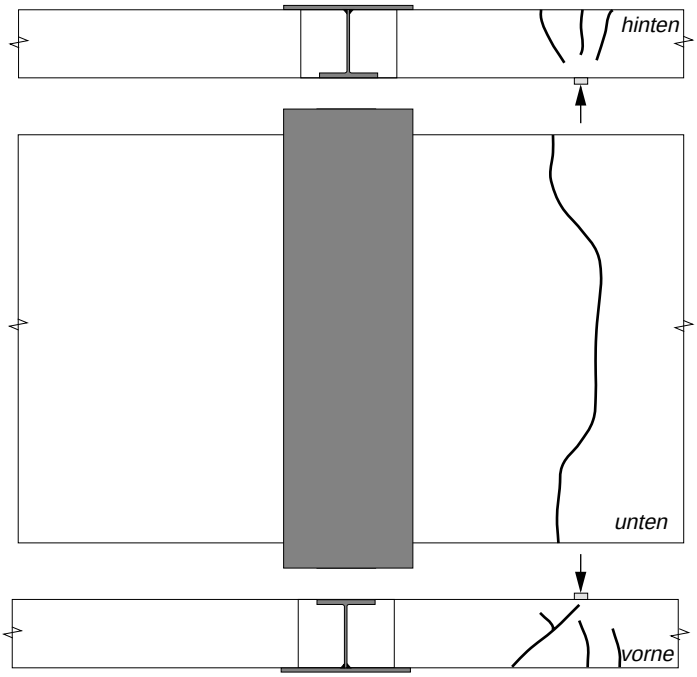


Abb. 4.195 Bruchbild

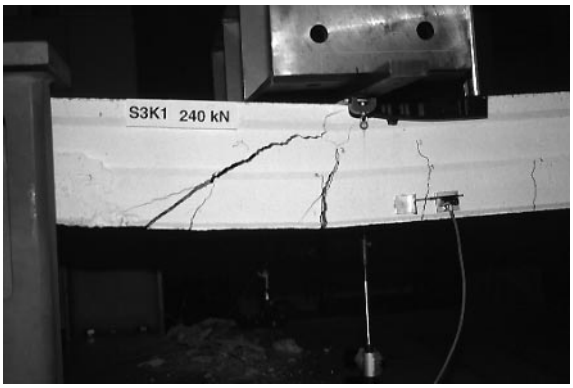


Abb. 4.196 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Bruchart SL/SC

Tab. 4.56 Versuchsresultate S3K2a

	Bruch	**Riss**	**Dec-**	**Dec+**
V_C [kN]	126.4	111.7	-	-
f_{Km} [mm]	25.9	3.4	-	-

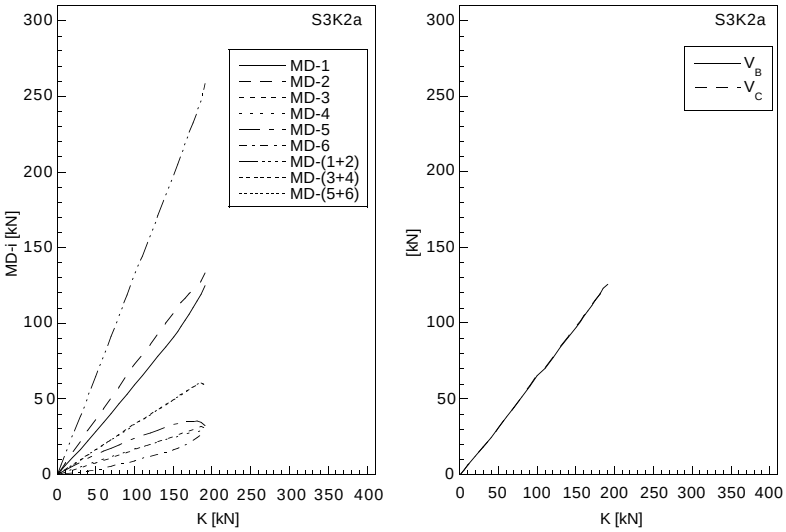


Abb. 4.197 Pressen-, Auflager- und Querkräfte (vgl. Abb. 4.10 und Anhang C.2)

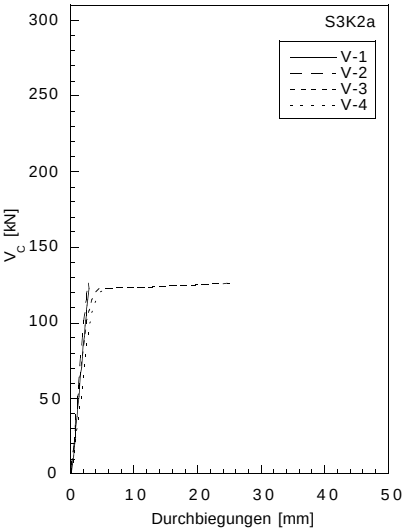


Abb. 4.198 Durchbiegungen (vgl. Abb. 4.10 und Anhang C.2)

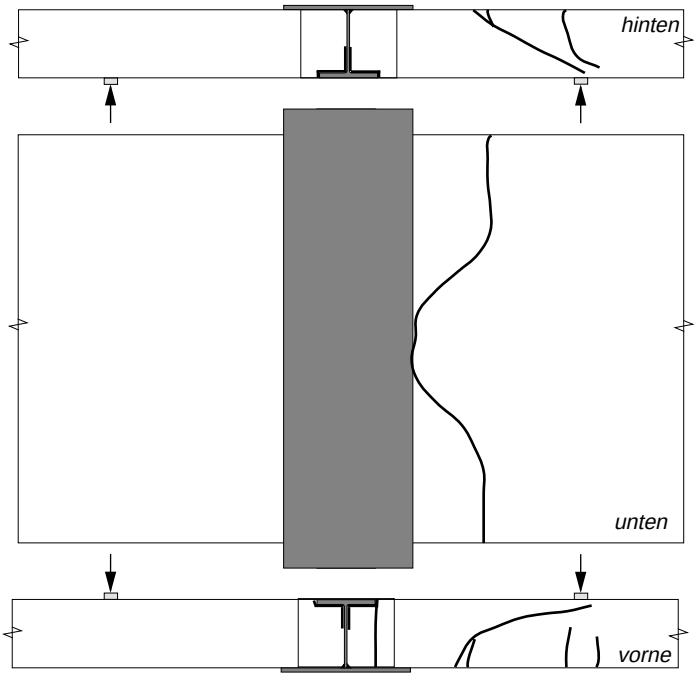


Abb. 4.199 Bruchbild

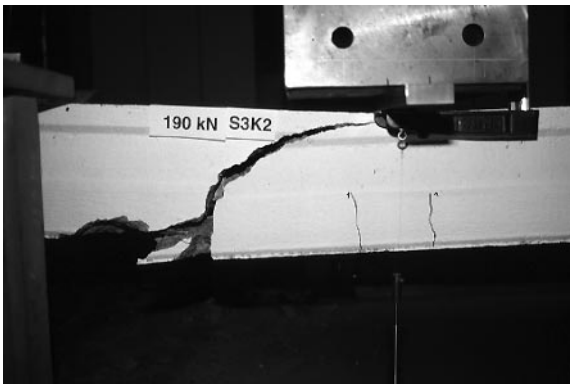


Abb. 4.200 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Platte Seite Fenster leicht verdrillt
Bruchart SL/A-SC

Tab. 4.57 Versuchsresultate S3K2b

	Bruch	**Riss**	**Dec-**	**Dec+**
V_B [kN]	163.1	117.2	58.1	97.6
f_{Km} [mm]	9.4	3.1	1.6	2.7

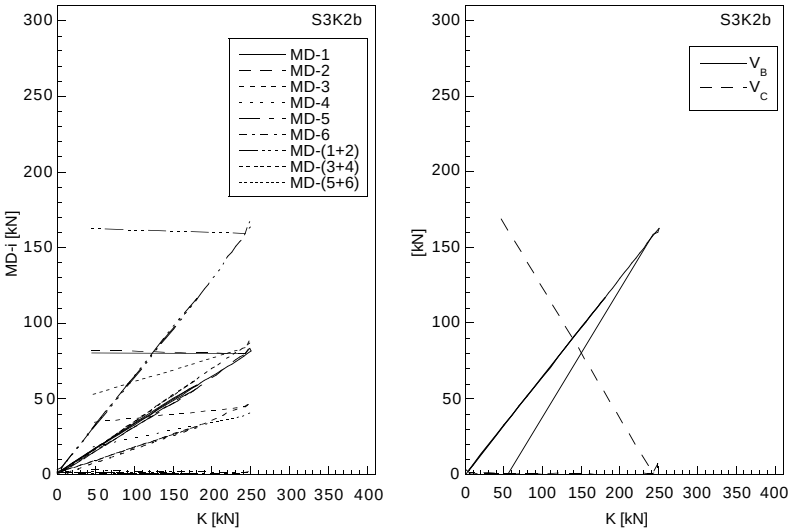


Abb. 4.201 Pressen-, Auflager- und Querkräfte (vgl. Abb. 4.10 und Anhang C.2)

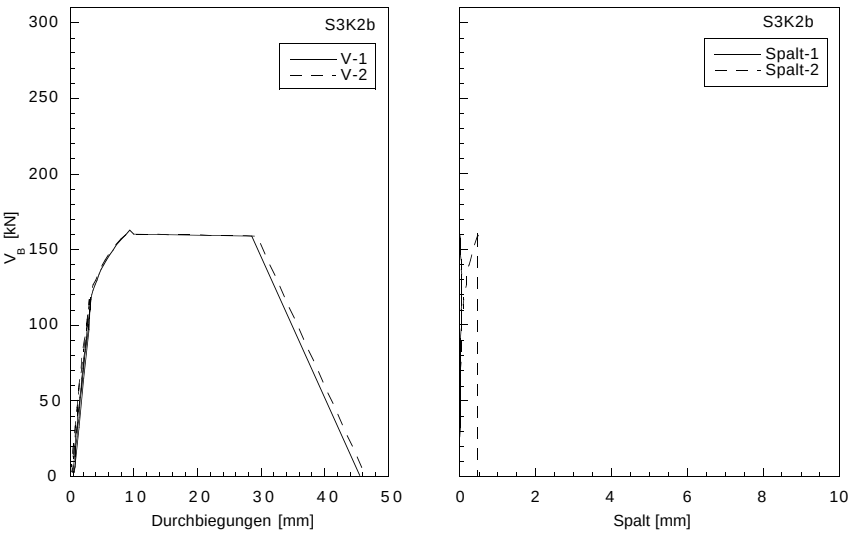


Abb. 4.202 Durchbiegungen (vgl. Abb. 4.10 und Anhang C.2)

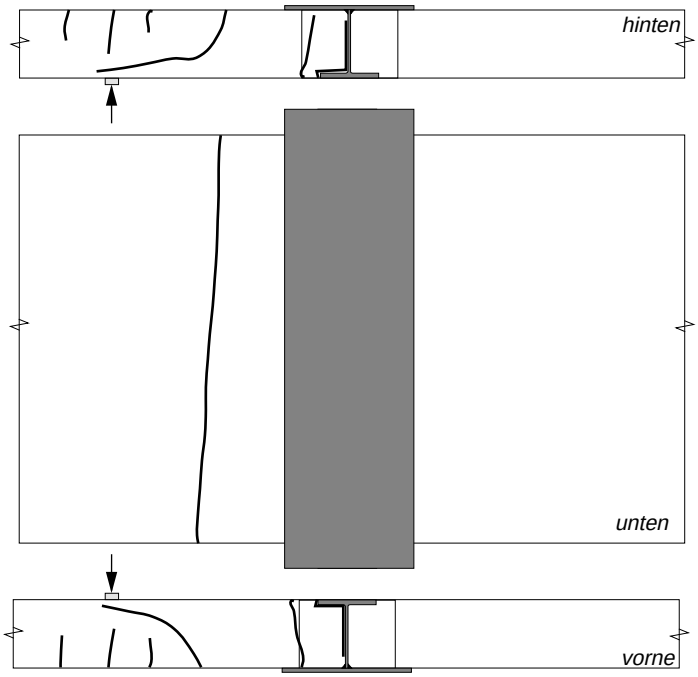


Abb. 4.203 Bruchbild

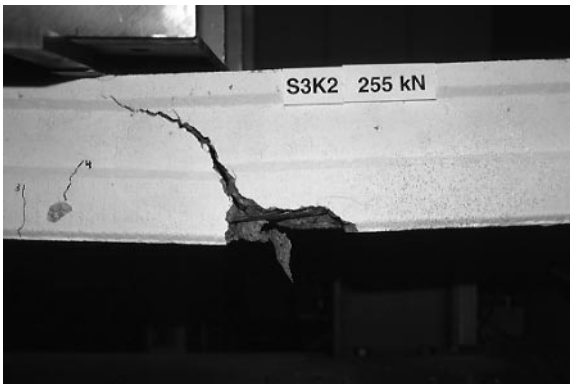


Abb. 4.204 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Bruchart SL/SC

Tab. 4.58 Versuchsresultate S3K3

	Bruch	**Riss**	**Dec-**	**Dec+**
V_C [kN]	216.8	156.4	65.3	101.8
f_{Km} [mm]	7.9	3.1	2.3	3.0

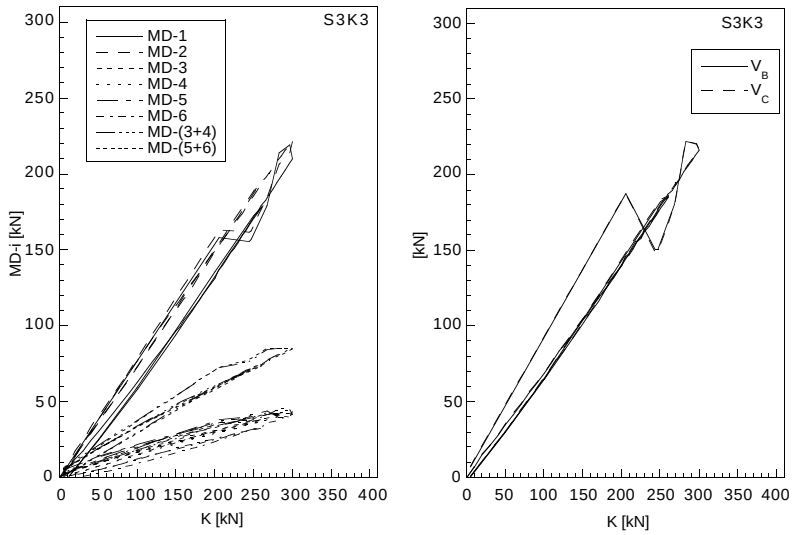


Abb. 4.205 Pressen-, Auflager- und Querkräfte (vgl. Abb. 4.10 und Anhang C.2)

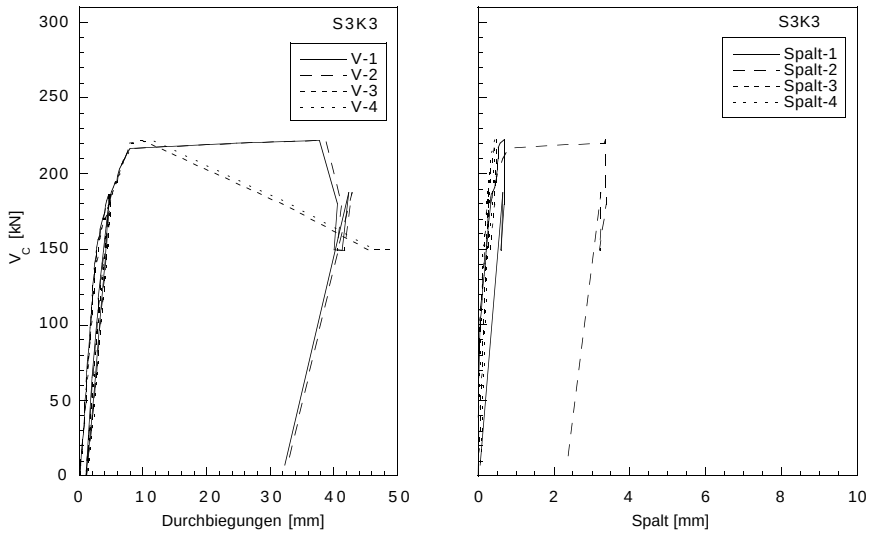


Abb. 4.206 Durchbiegungen und Spaltmessungen (vgl. Abb. 4.10 und Anhang C.2)

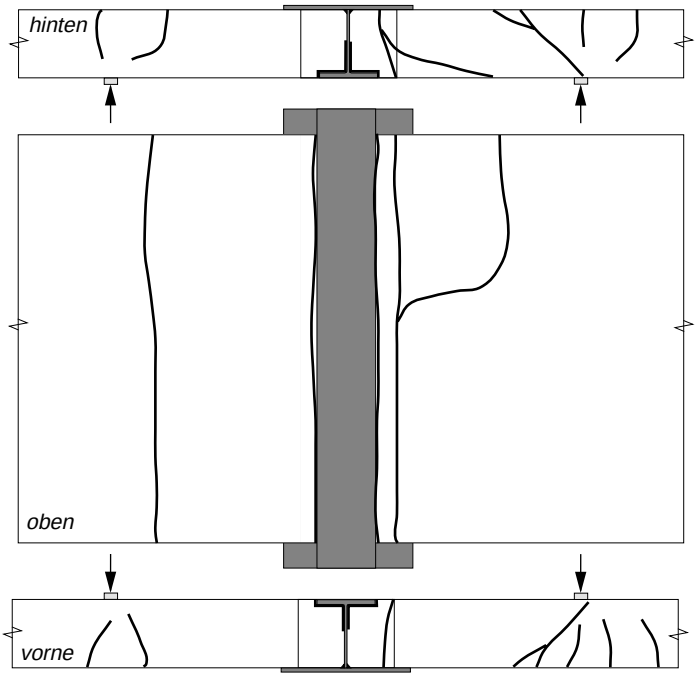


Abb. 4.207 Bruchbild

Abb. 4.208 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Bruchart SC-ST (Fliessen der abgebogenen Zugbewehrung)

Tab. 4.59 Versuchsresultate S3K4

	Bruch	**Riss**	**Dec-**	**Dec+**
V_C [kN]	301.7	156.2	-	-
f_{Km} [mm]	8.2	3.3	-	-

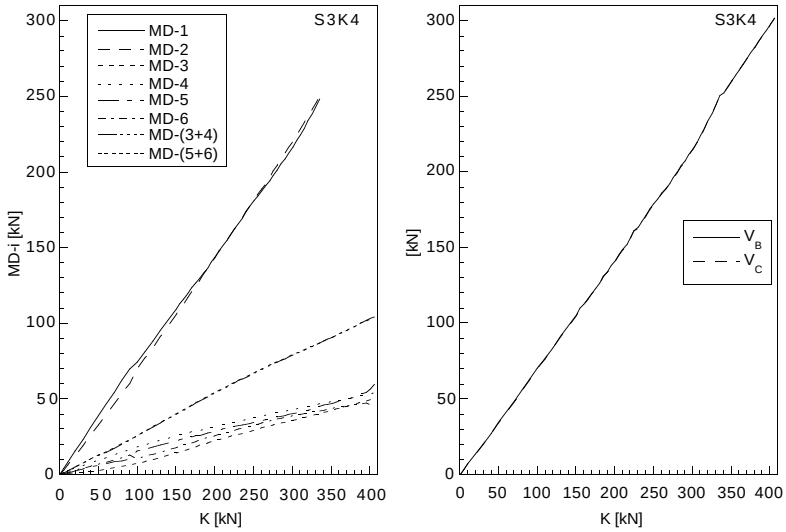


Abb. 4.209 Pressen-, Auflager- und Querkräfte (vgl. Abb. 4.10 und Anhang C.2)

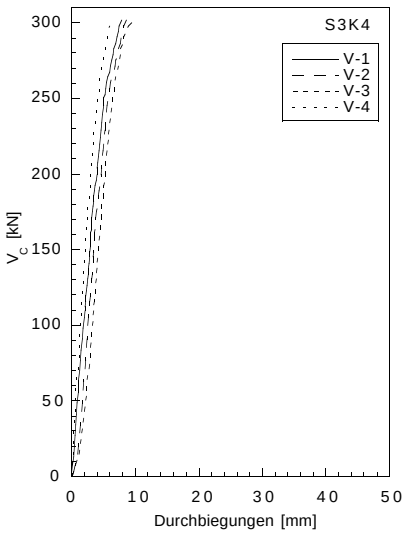


Abb. 4.210 Durchbiegungen (vgl. Abb. 4.10 und Anhang C.2)

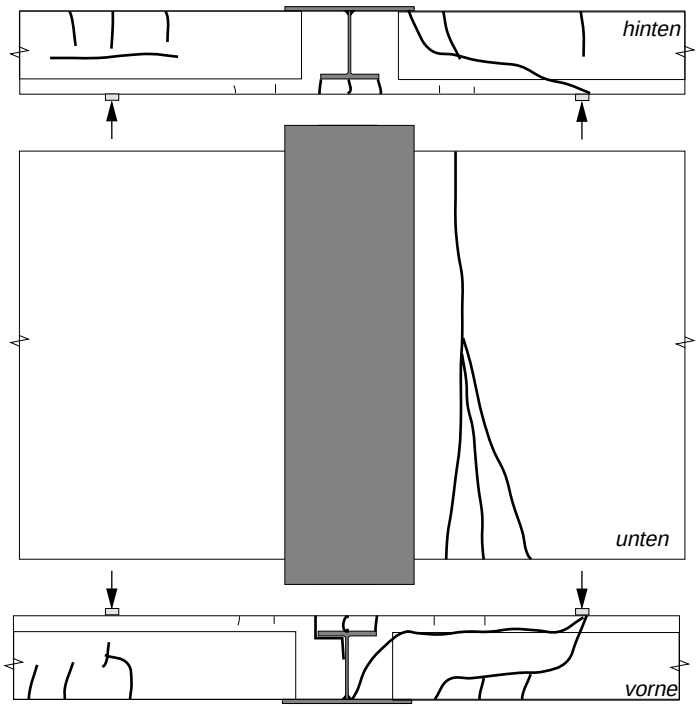


Abb. 4.211 Bruchbild

Abb. 4.212 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Bruchart S

Tab. 4.60 Versuchsresultate S4K1

	Bruch	**Riss**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	111.8	56.2	19.6	32.6
f_m [mm]	138.9	14.4	4.5	8.6
f_{Km} [mm]	116.1	12.2	4.1	7.6

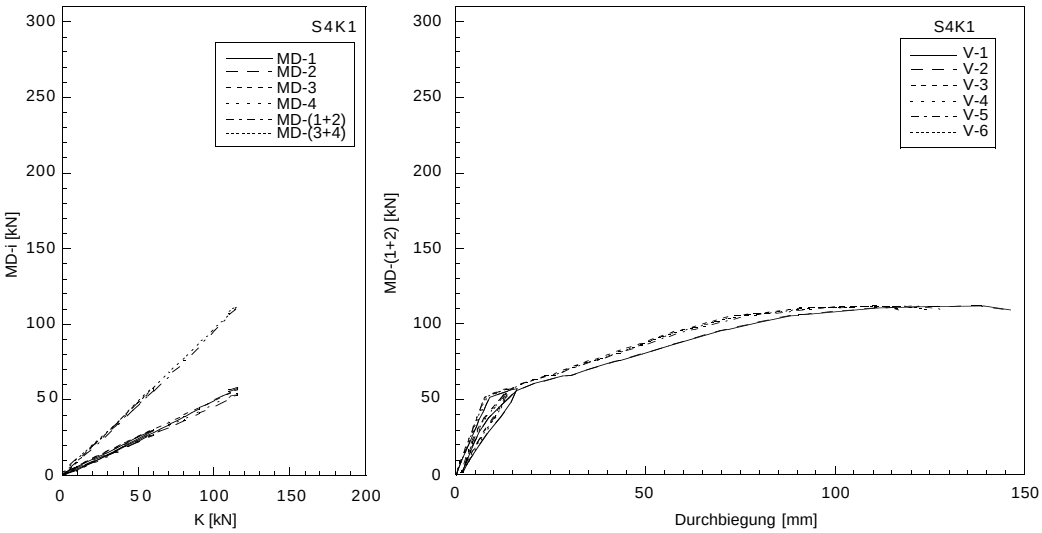


Abb. 4.213 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.3)

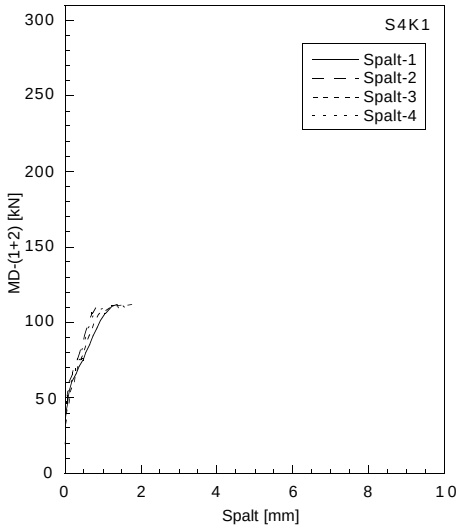


Abb. 4.214 Spaltmessungen (vgl. Anhang C.3)

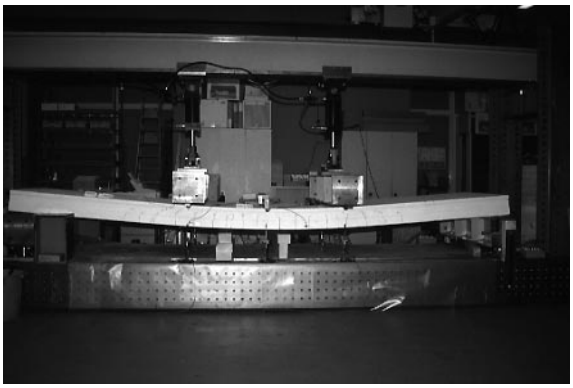


Abb. 4.215 Versuch S4K1 bei K=115 kN (unmittelbar vor dem Bruch)

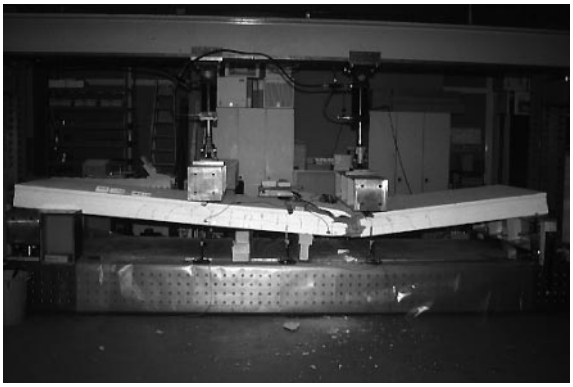


Abb. 4.216 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Bruchart FC

Tab. 4.61 Versuchsresultate S4K2

	Bruch	**Riss**	**Dec-**	**Dec+**
MD-(1+2) [kN]	169.0	74.9	38.0	52.0
f_m [mm]	123.8	6.1	4.3	6.1
f_{Km} [mm]	106.5	6.6	5.0	6.6

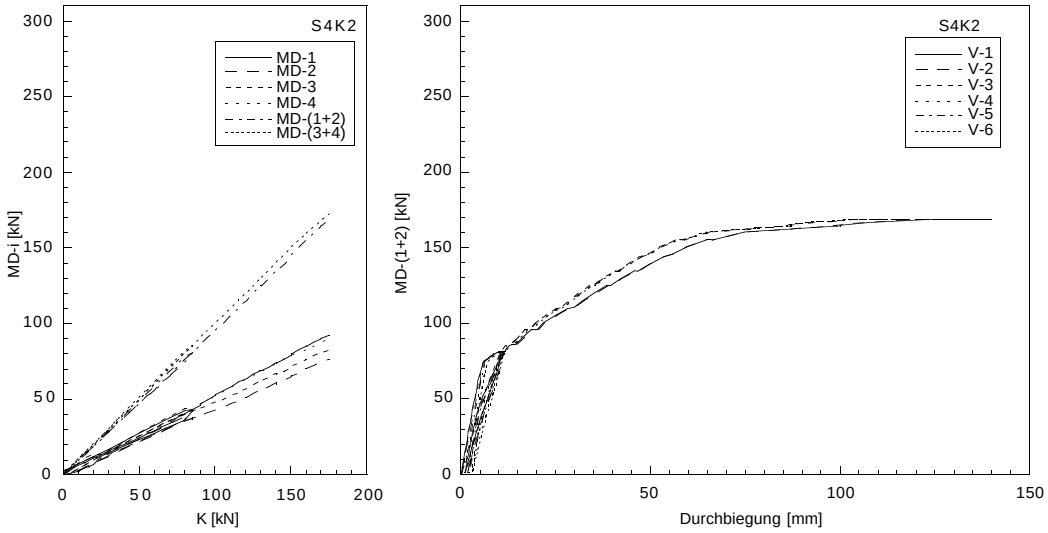


Abb. 4.217 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.3)

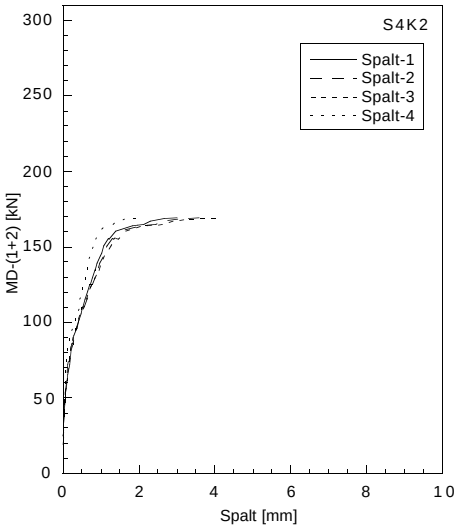


Abb. 4.218 Spaltmessungen (vgl. Anhang C.3)

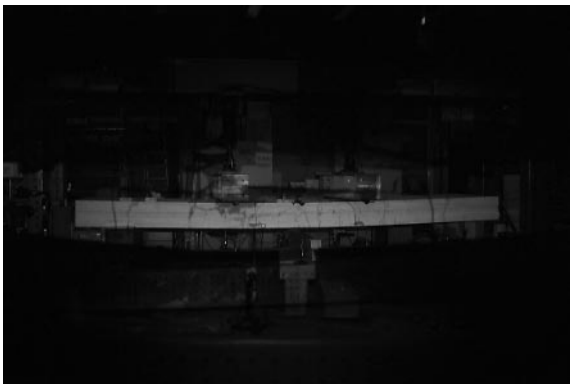


Abb. 4.219 Versuch S4K2 bei K=145 kN

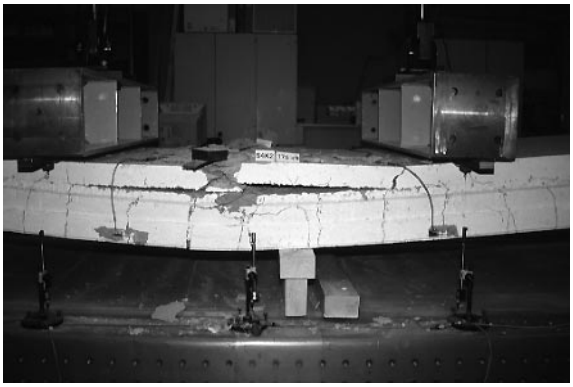


Abb. 4.220 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Messungenauigkeit bei den Durchbiegungen in den tiefen Belastungsbereichen Bruchart FC

Tab. 4.62 Versuchsresultate S5K1

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**
MD-(1+2) [kN]	247.9	130.4	-
f_{Km} [mm]	27.4	4.3	-

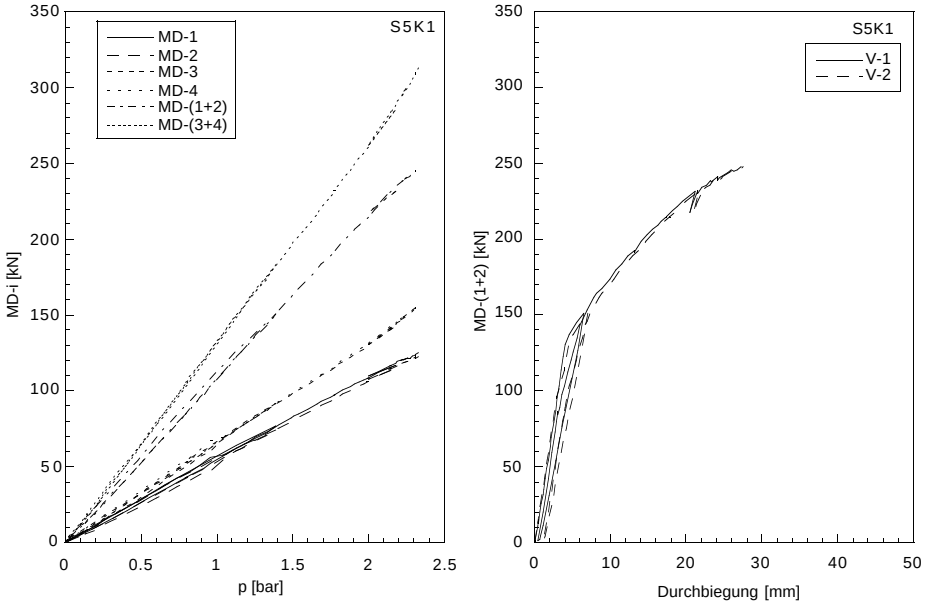


Abb. 4.221 Druck, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.4)

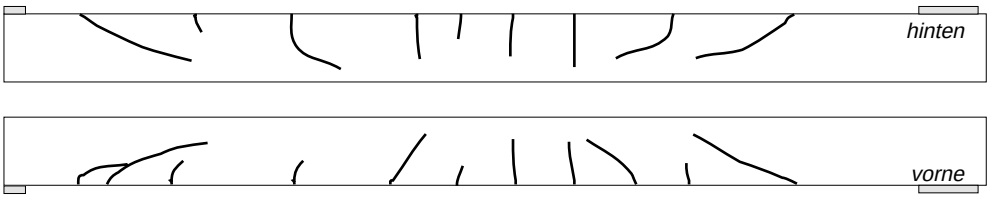


Abb. 4.222 Bruchbild

Abb. 4.223 Luftkissen für die Belastung

Abb. 4.224 Versuchskörper (gerissen) kurz vor dem Bruch von vorne

Bemerkung: Bruchart A-SC

Tab. 4.63 Versuchsresultate S6K1

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**
MD-(1+2) [kN]	147.6	100.5	147.6
f_{Km} [mm]	17.4	6.1	17.4
ΔBieg [mm]	1.9	1.1	1.9

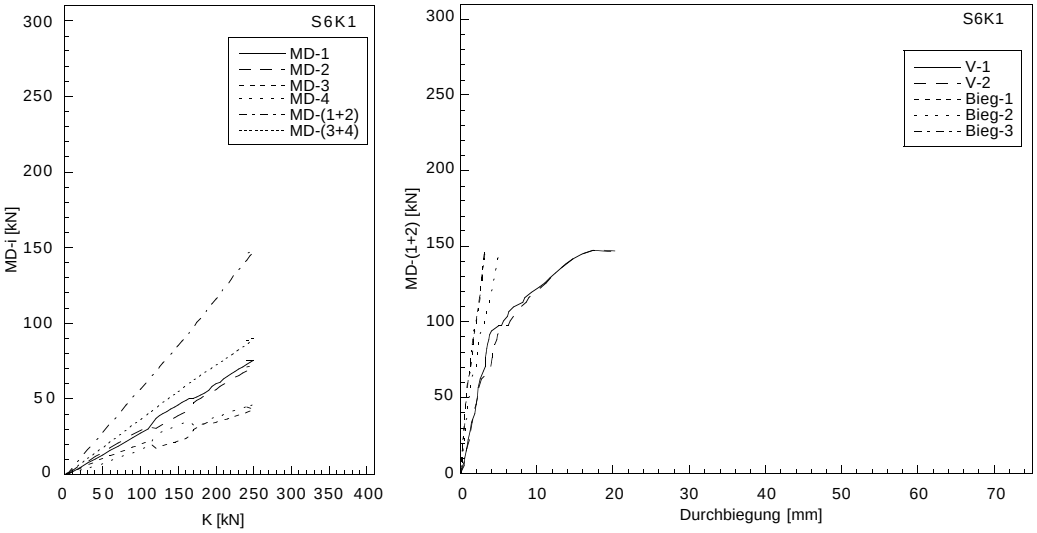


Abb. 4.225 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.5)

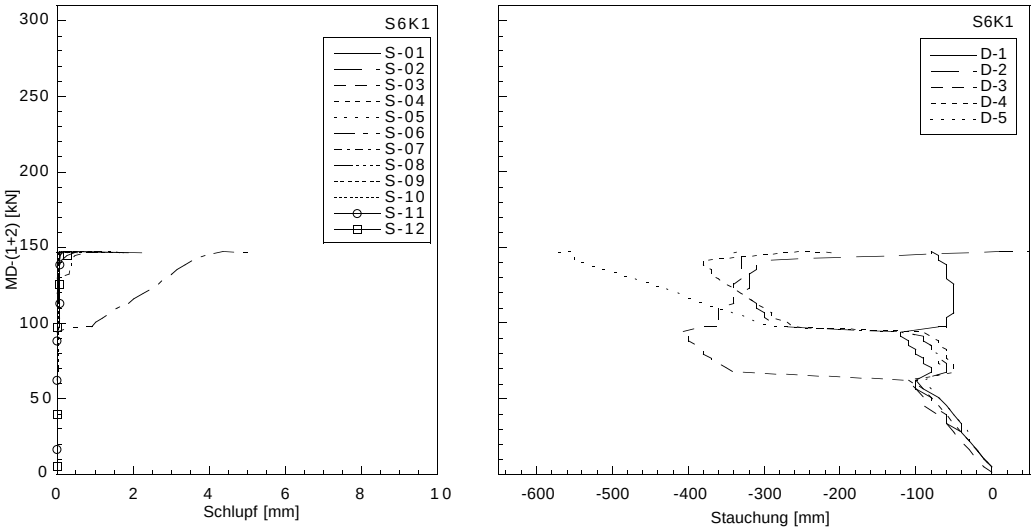


Abb. 4.226 Schlupfmessungen und Stauchungen (vgl. Anhang C.5)

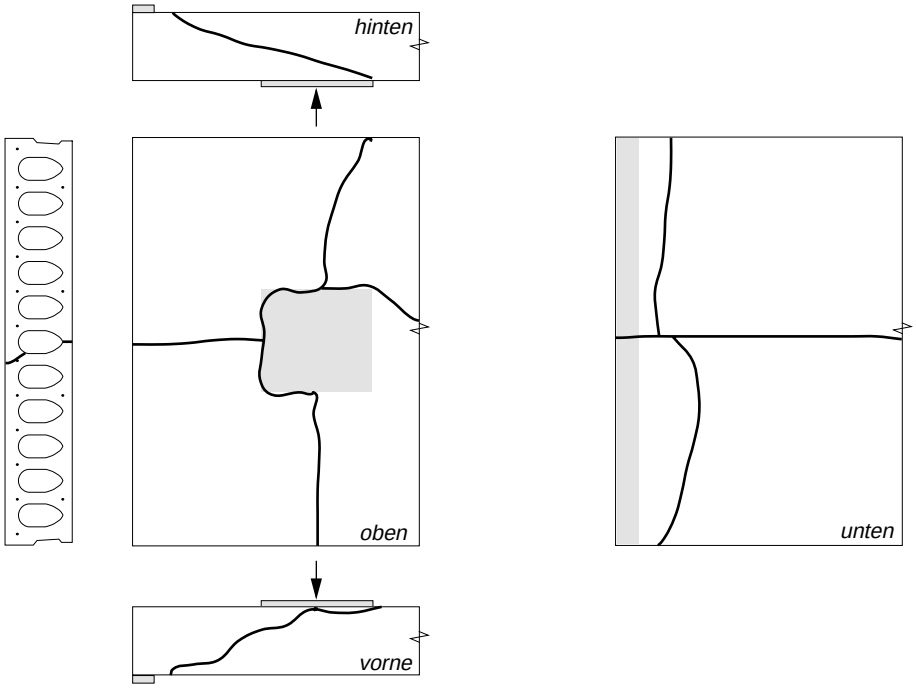


Abb. 4.227 Bruchbild

Abb. 4.228 Bruchzustand von hinten

Bemerkung: Riss in Ecke hinten bei K=110 kN
Riss entlang der Litze 6 bei K=170 kN (vgl. Anhang C.1)
Ecke hinten bricht bei K=200 kN
Bruchart (SL)/A-SC

Tab. 4.64 Versuchsresultate S6K2

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**
MD-(1+2) [kN]	128.9	99.8	-
f_{Km} [mm]	12.7	6.7	-
ΔBieg [mm]	1.6	1.2	-

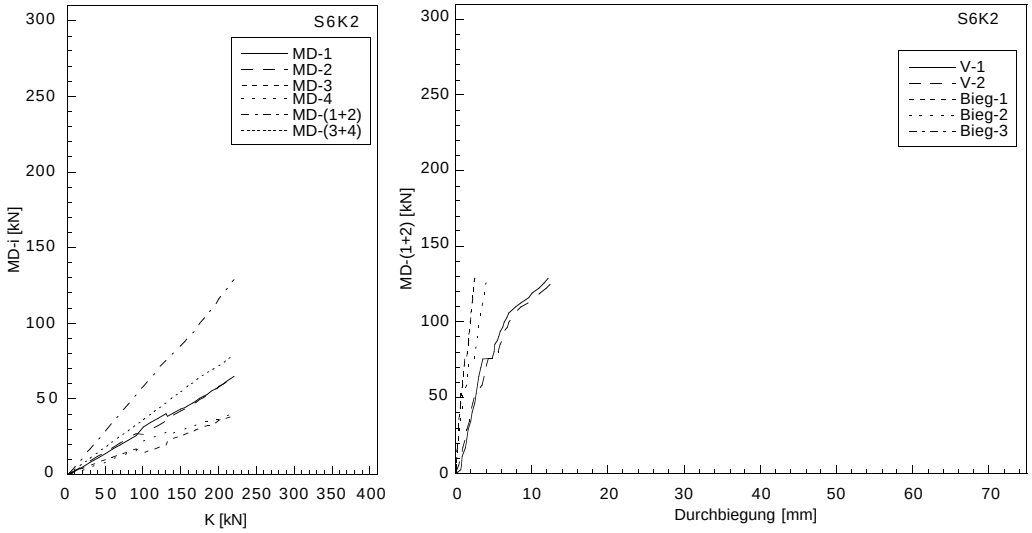


Abb. 4.229 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.5)

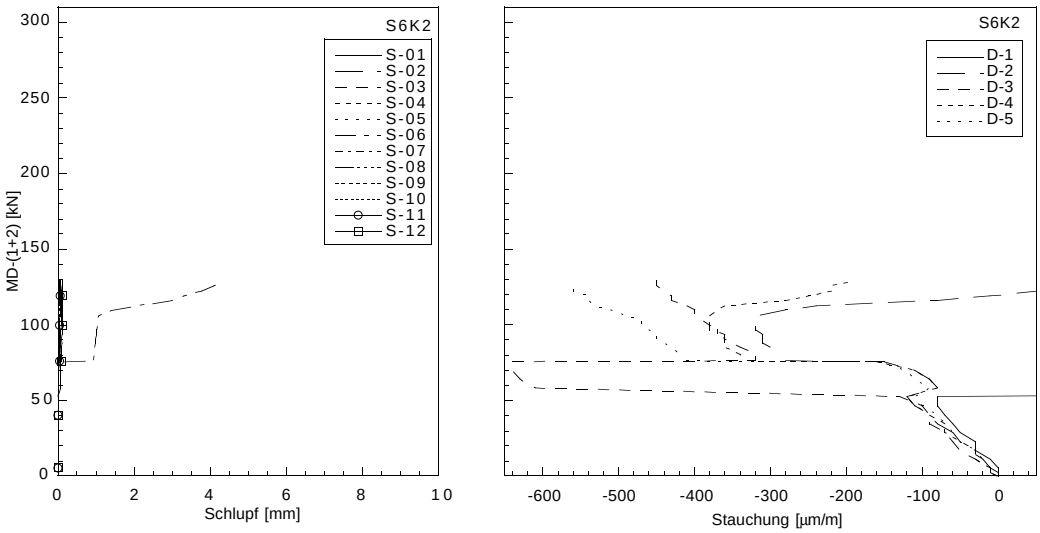


Abb. 4.230 Schlupfmessungen und Stauchungen (vgl. Anhang C.5)

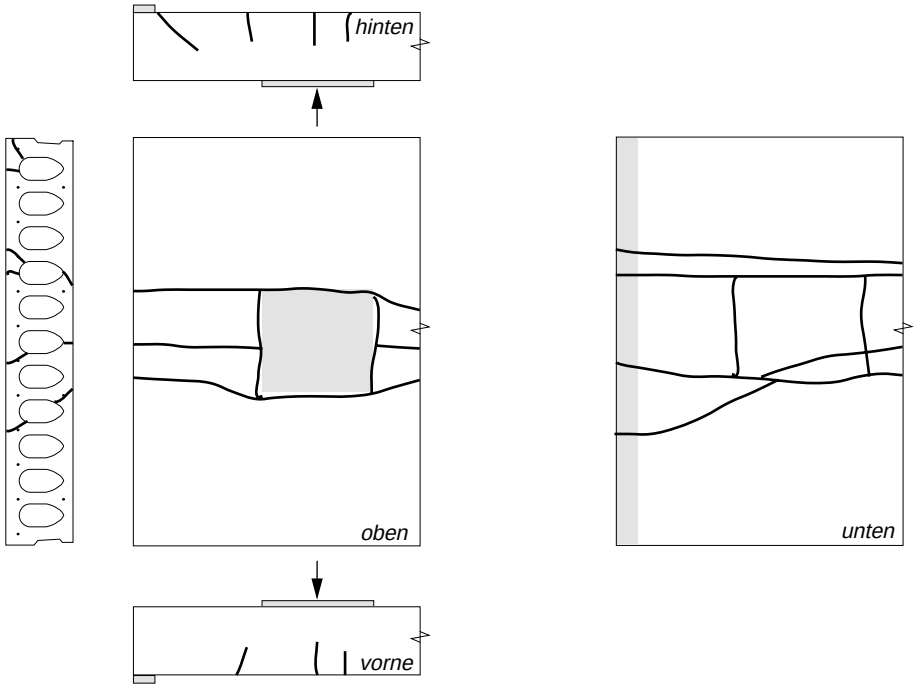


Abb. 4.231 Bruchbild

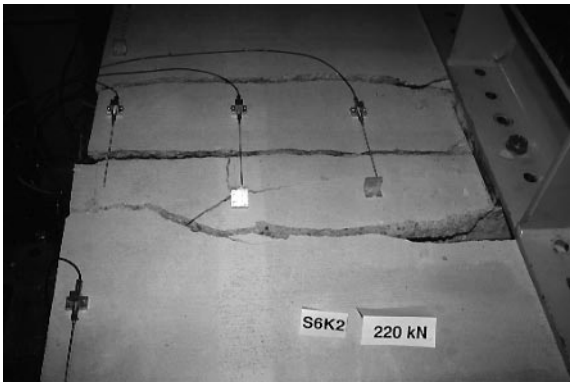


Abb. 4.232 Bruchzustand von vorne oben

Bemerkung: Diagonalriss in Steg 12 bei K=97 kN (vgl. Anhang C.1)
Längsriss entlang der Litze 6 bei K=132 kN
Bruchart P

Tab. 4.65 Versuchsresultate S6K3

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**
MD-(1+2) [kN]	176.6	101.4	157.5
f_{Km} [mm]	38.0	5.0	18.3
ΔBieg [mm]	1.8	1.0	1.5

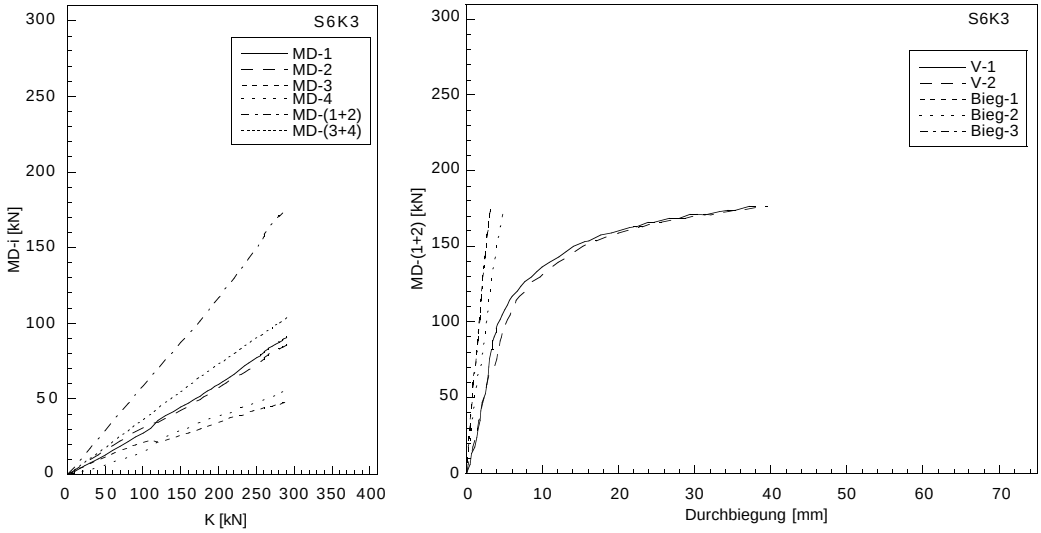


Abb. 4.233 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.5)

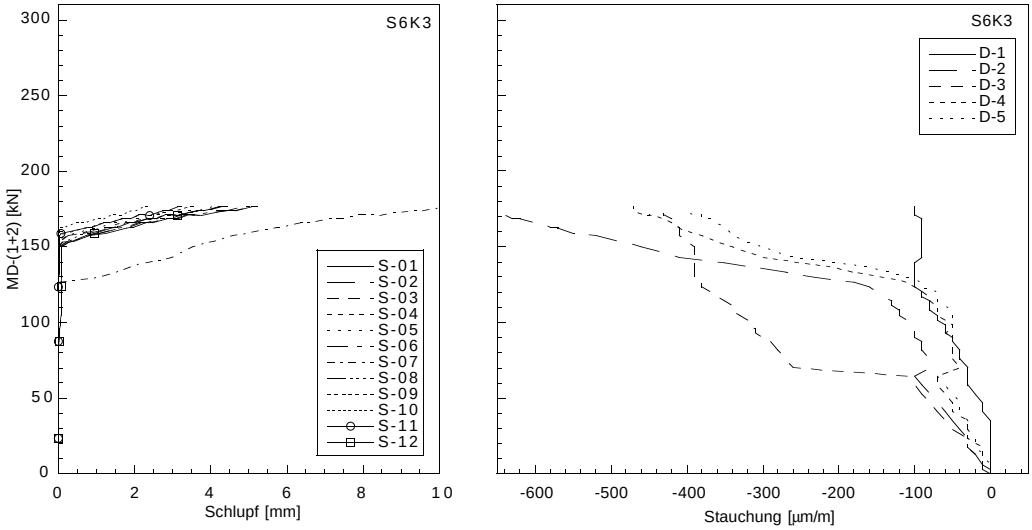


Abb. 4.234 Schlupfmessungen und Stauchungen (vgl. Anhang C.5)

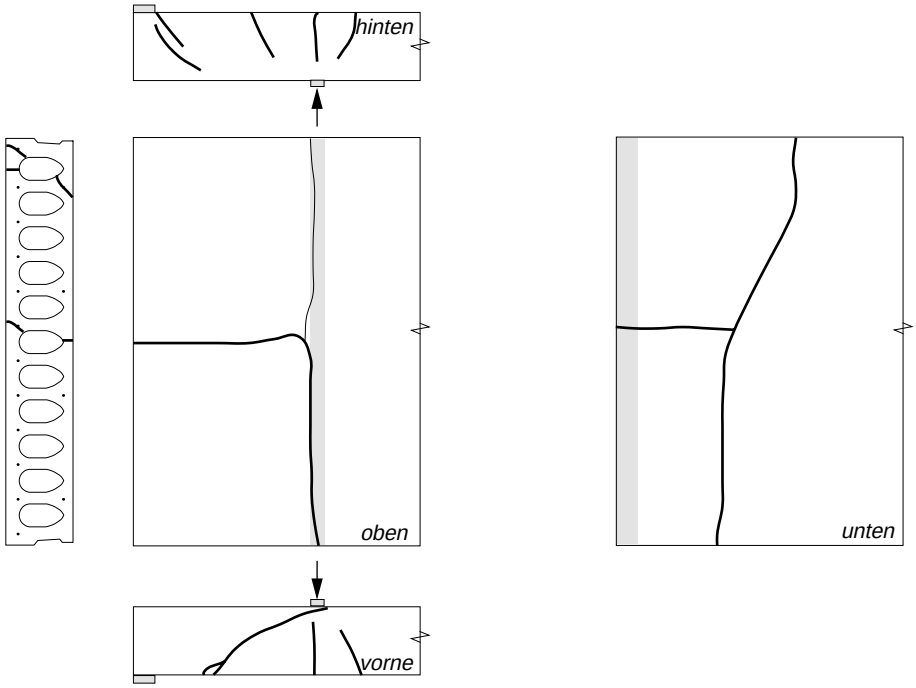


Abb. 4.235 Bruchbild

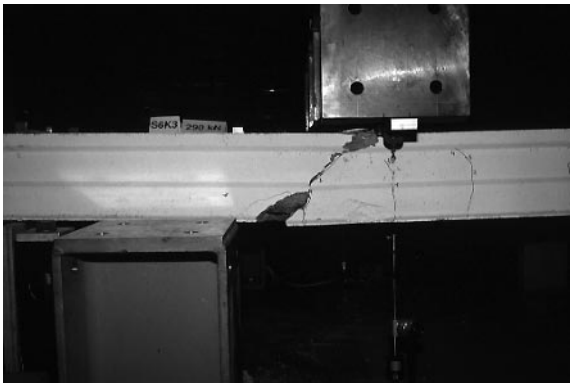


Abb. 4.236 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Schubzugriss in Steg 12 bei K=118 kN (vgl. Anhang C.1)
Längsriss entlang Litze 7 bei K=275 kN
Bruchart ST/SL/A-SC

Tab. 4.66 Versuchsresultate S6K4

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**
MD-(1+2) [kN]	150.8	98.6	135.6
f_{Km} [mm]	14.5	5.7	11.6
ΔBieg [mm]	1.6	1.0	1.4

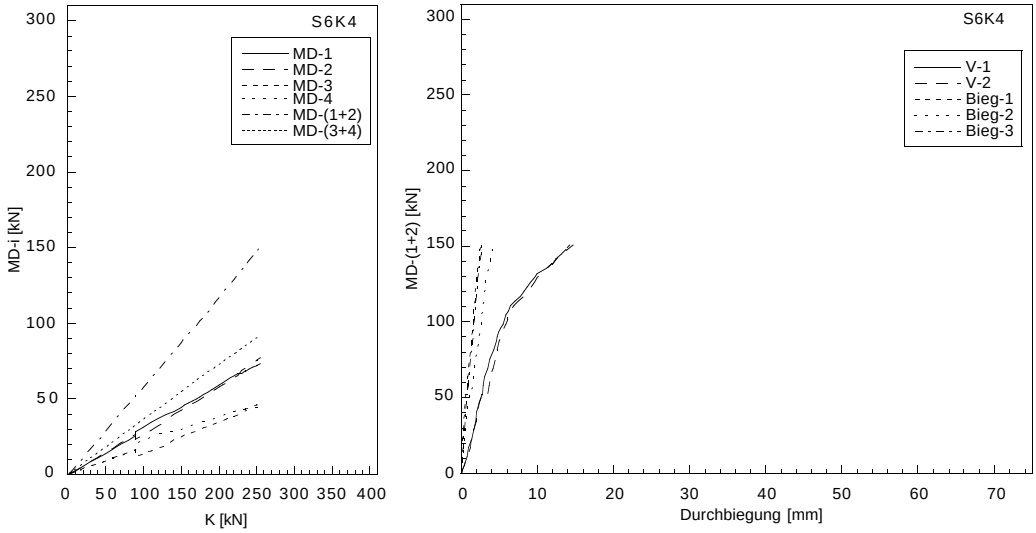


Abb. 4.237 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.5)

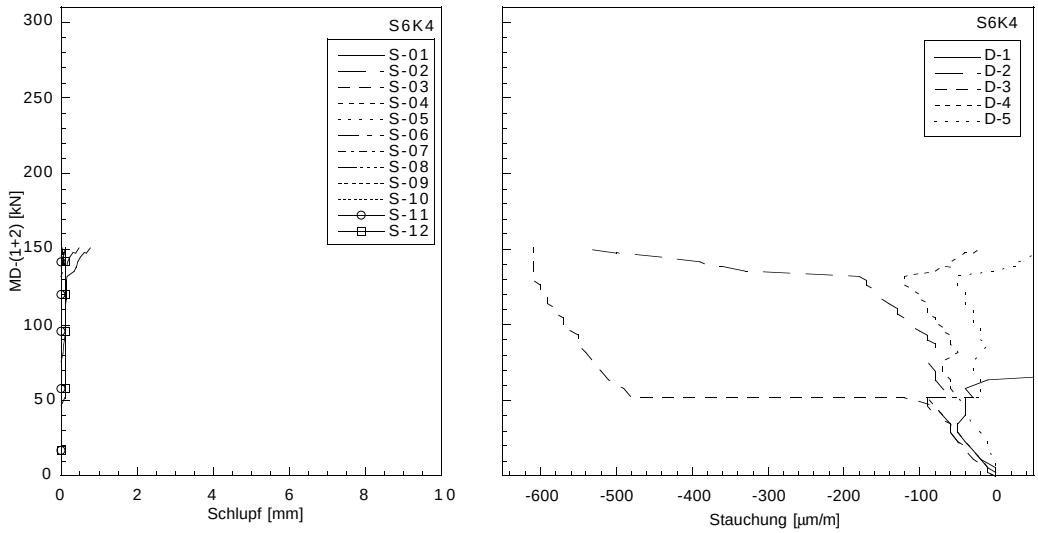


Abb. 4.238 Schlupfmessungen und Stauchungen (vgl. Anhang C.5)

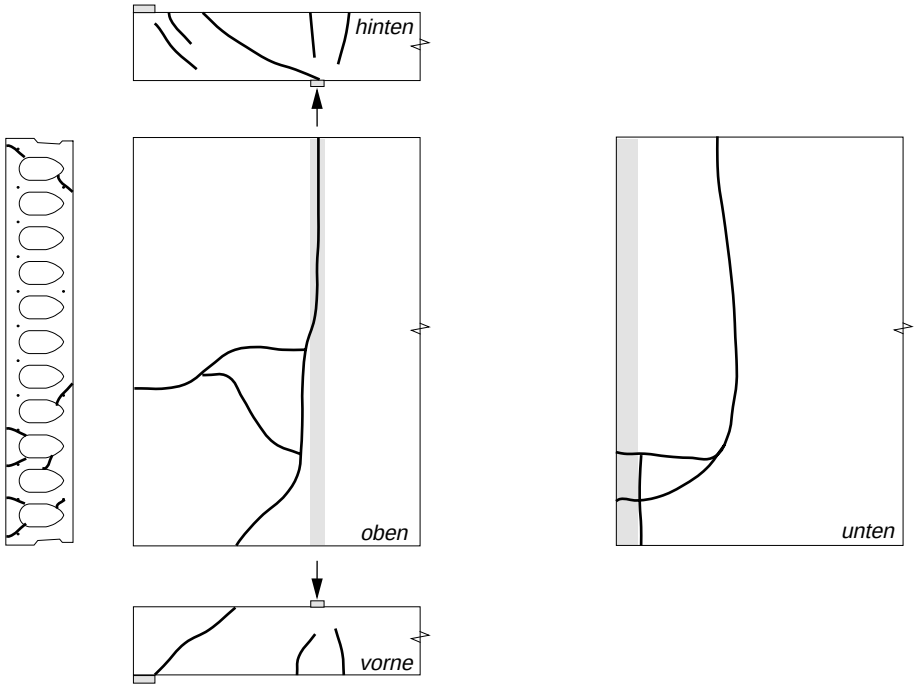


Abb. 4.239 Bruchbild

Abb. 4.240 Bruchzustand von hinten

Bemerkung: Schubzugriss in Steg 12 bei K=140 kN (vgl. Anhang C.1)
Diagonalriss in Steg 1 bei K=150 kN
Längsriss entlang Litze 2 bei K=245 kN
Bruchart ST/(SL)/SC

Tab. 4.67 Versuchsresultate S6K5

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**
MD-(1+2) [kN]	174.6	106.9	159.9
f_{Km} [mm]	37.9	5.1	14.1
ΔBieg [mm]	1.8	0.9	1.5

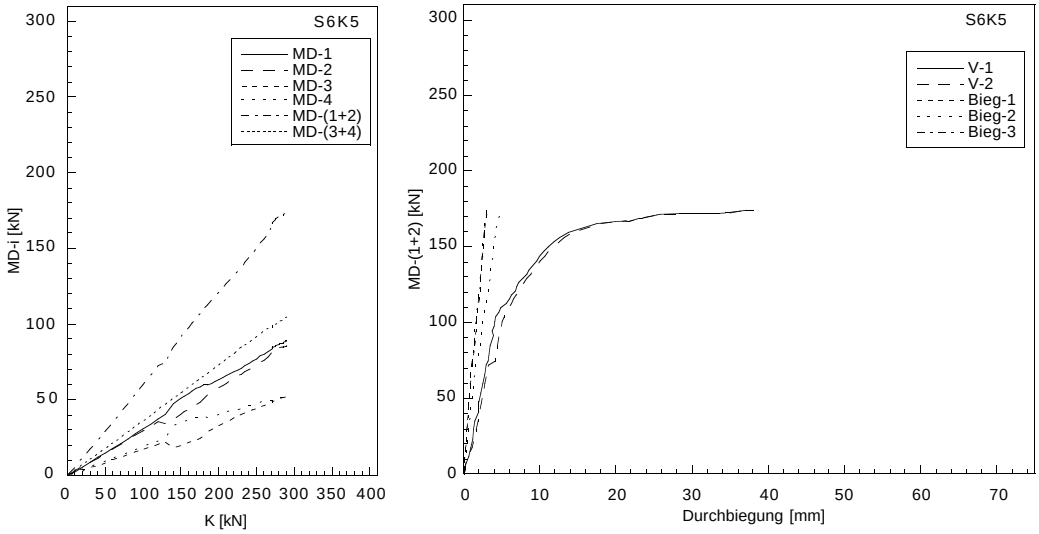


Abb. 4.241 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.5)

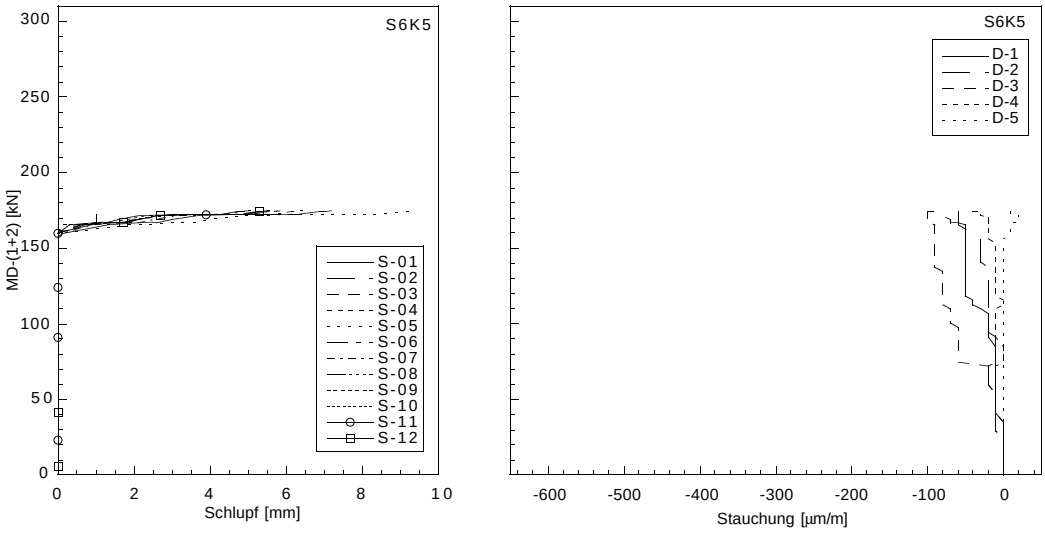


Abb. 4.242 Schlupfmessungen und Stauchungen (vgl. Anhang C.5)

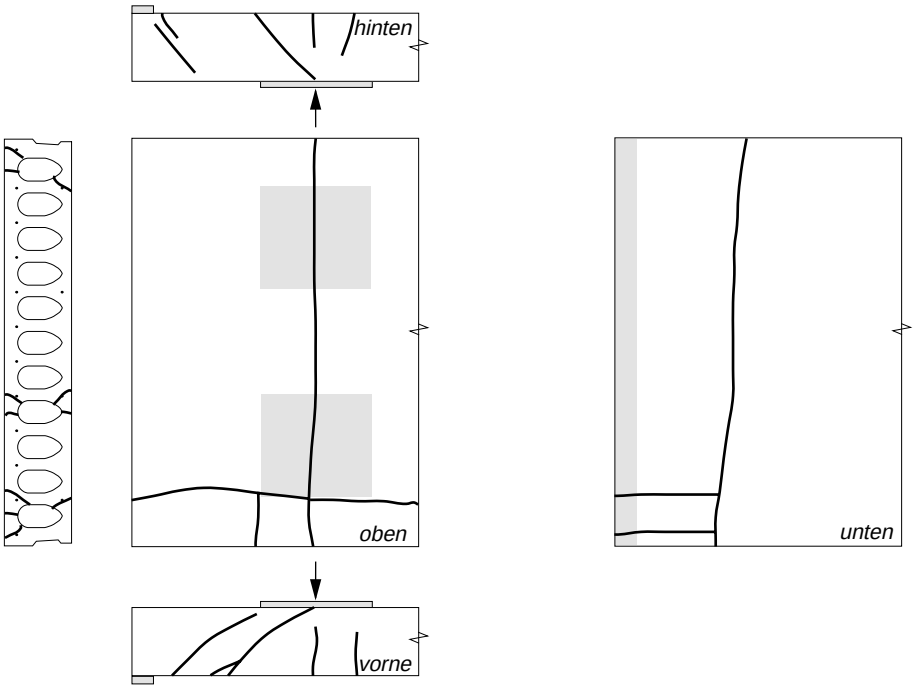


Abb. 4.243 Bruchbild

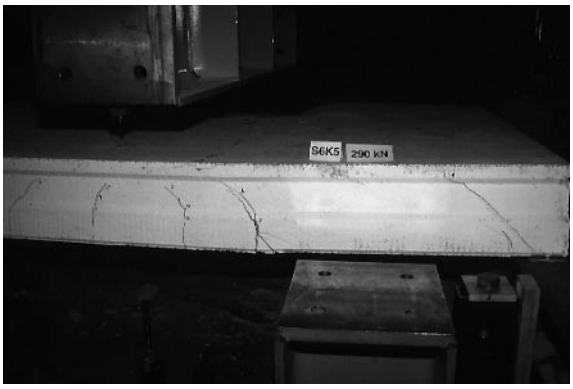


Abb. 4.244 Bruchzustand von hinten

Bemerkung: Schubzugriss in Steg 12 bei K=130 kN (vgl. Anhang C.1)
Schubzugriss in Steg 1 bei K=185 kN
Bruchart ST/SL/SC

Tab. 4.68 Versuchsresultate S6K6

	Bruch	Riss	Schlupf
MD-(1+2) [kN]	161.1	99.9	-
f_{Km} [mm]	14.5	5.3	-
ΔBieg [mm]	1.54	0.9	-

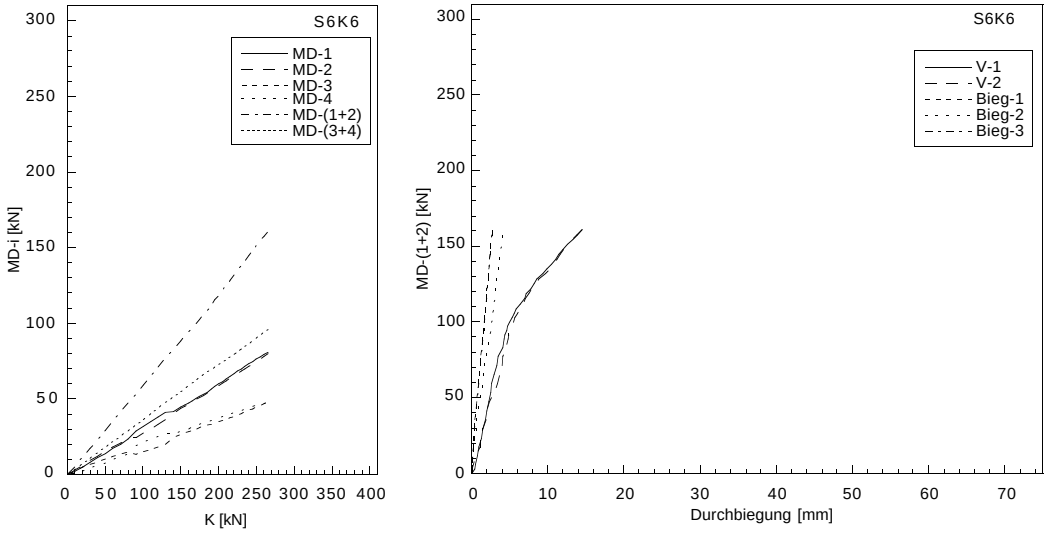


Abb. 4.245 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.5)

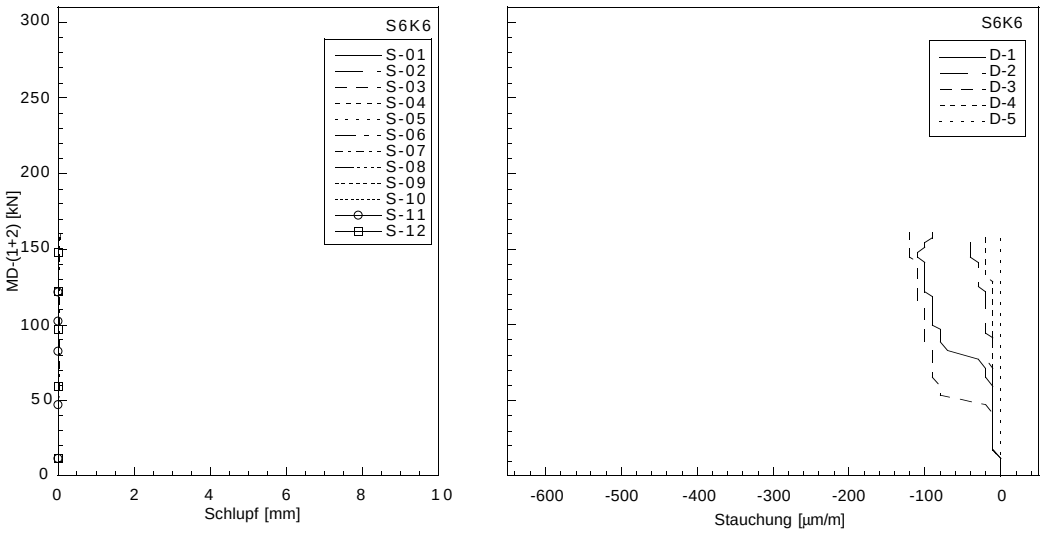


Abb. 4.246 Schlupfmessungen und Stauchungen (vgl. Anhang C.5)

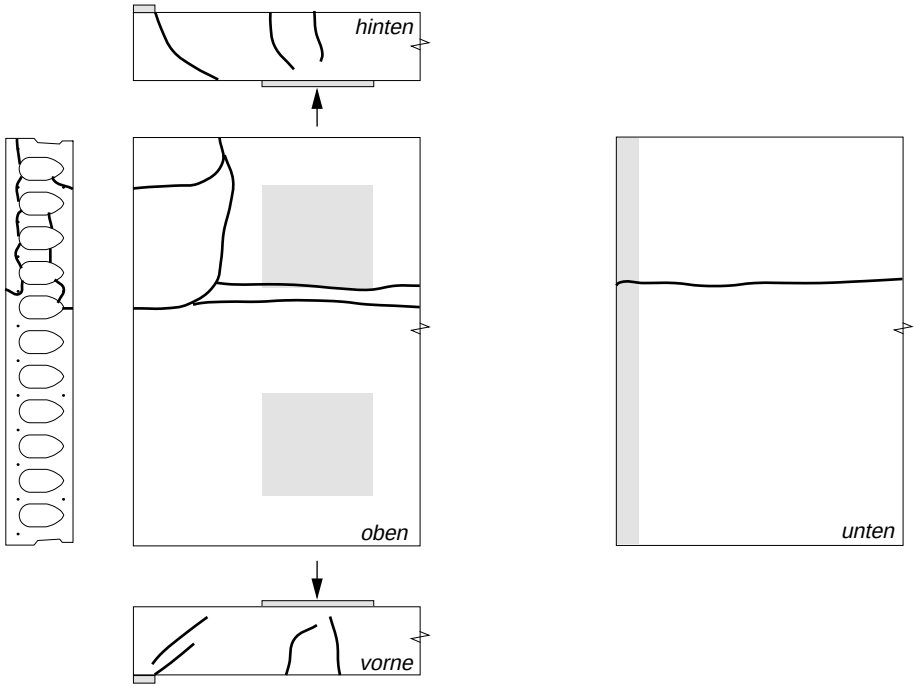


Abb. 4.247 Bruchbild

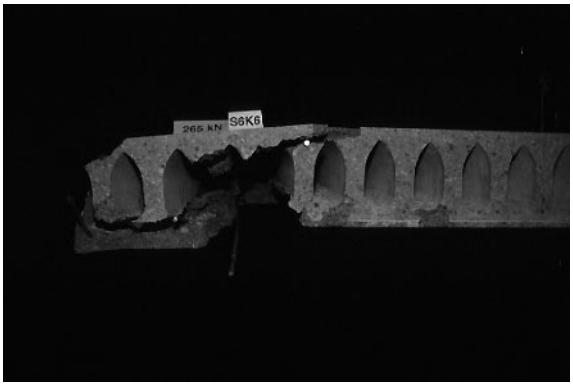


Abb. 4.248 Bruchzustand von der Seite Brunnen

Bemerkung: Schubzugriss in Steg 12 bei K=85 kN (vgl. Anhang C.1)
Schubzugriss in Steg 1 bei K=140 kN
Bruchart ST/LWS-SC

Tab. 4.69 Versuchsresultate S6K7

	Bruch	**Riss**	**Schlupf**
MD-(1+2) [kN]	207.2	114.4	188.8
f_{Km} [mm]	25.9	2.9	16.2

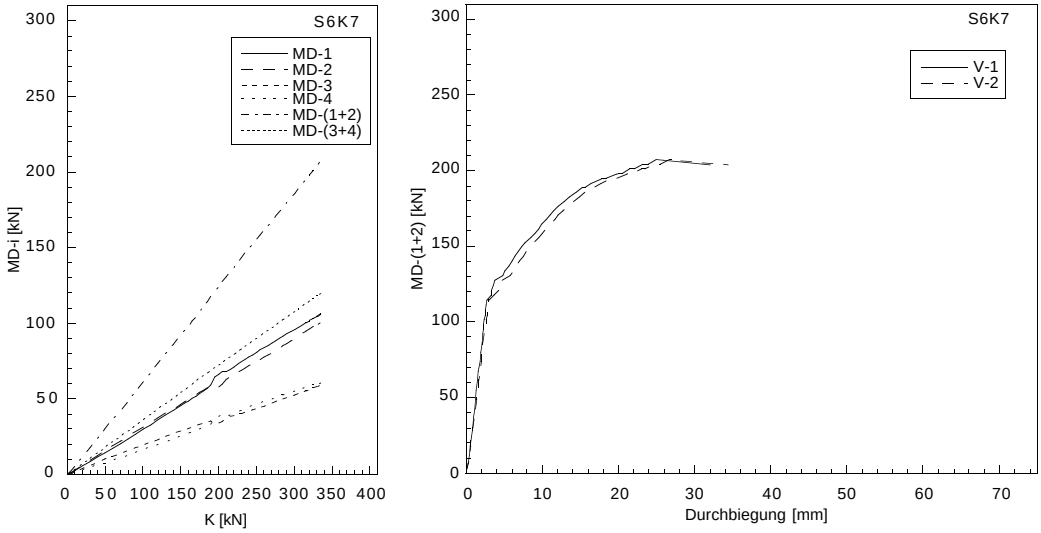


Abb. 4.249 Pressen-, Auflagerkräfte und Durchbiegungen (vgl. Anhang C.5 bzw. C.1)

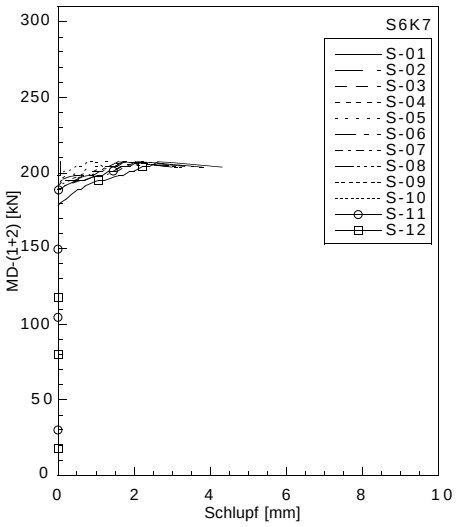


Abb. 4.250 Schlupfmessungen (vgl. Anhang C.5 bzw. C.1)

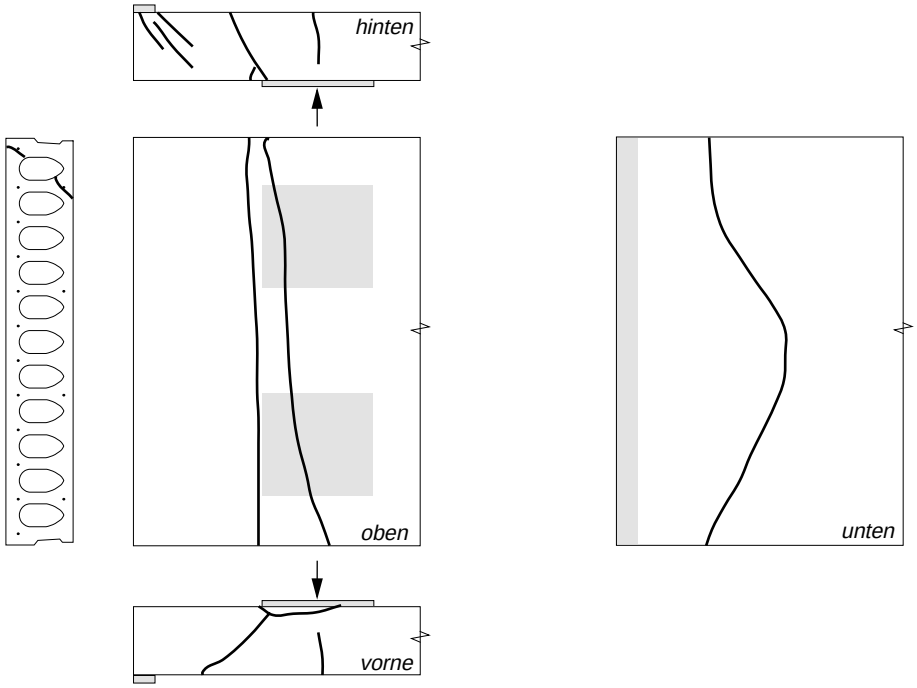


Abb. 4.251 Bruchbild

Abb. 4.252 Bruchzustand von vorne

Bemerkung: Schubzugriss in Steg 12 bei K=210 kN (vgl. Anhang C.1)
Längsriss entlang Litze 16 bei K=280 kN
Bruchart ST/SL/SC

4.7 Zusammenfassung der Kaltversuche

Die folgenden Diagramme und Tabellen fassen die wichtigsten Resultate der Kaltversuche zusammen. Die Schubwiderstände in den Diagrammen sind in Abhängigkeit des Kraftabstandes a aufgetragen. Für jeden Auflagertyp wird ein anderes Symbol verwendet.

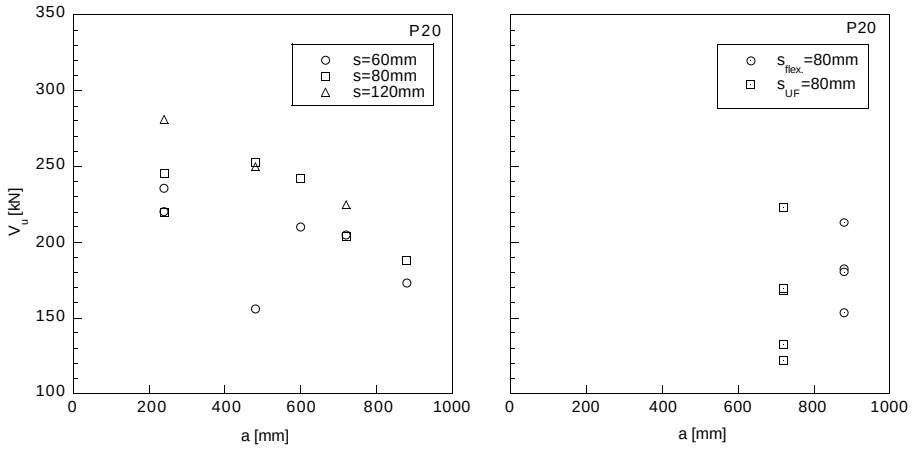


Abb. 4.253 Schubwiderstände der Hohlplatten aus der Charge P20 (mit glatten Litzen) gemäss Tab. 4.70 - Einfluss der Auflagerbreite s und der flexiblen Lagerung ($s_{flex.}$) und der Lagerung auf dem Unterflansch eines Slim Floor Trägers (s_{UF})

Tab. 4.70 Schubwiderstände V [kN] und max. Momente M [kNm] der Hohlplatten aus der Charge P20 - Variation der Auflagerbreite s und des Kraftabstandes a (vgl. Anhang C.1)

Versuch	Bruchart	V_K	V_g	V_{LE}	V_u	M_K	M_g	M_{LE}	M_{max}
S1K01	SL/(SC)	199.1	4.7	1.2	205.0	143.4	2.4	0.9	146.6
S1K02a	A	150.1	4.7	1.4	156.1	72.0	1.8	0.7	74.5
S1K02b	A	214.1	4.7	1.5	220.3	51.4	1.0	0.4	52.8
S1K03a	ST/SL/A	275.0	4.7	1.5	281.2	66.0	1.0	0.4	67.4
S1K03b	SL/A	239.0	4.7	1.5	245.2	57.4	1.0	0.4	58.7
S1K04	SL/A	246.3	4.7	1.4	252.3	118.2	1.8	0.7	120.7
S1K05	ST/SL/E	243.7	4.7	1.4	249.7	117.0	1.8	0.7	119.4
S1K06	SL/SC	197.8	4.7	1.2	203.7	142.4	2.4	0.9	145.6
S1K07	SL/(FT-SC)	218.9	4.7	1.2	224.8	157.6	2.4	0.9	160.8
S1K08	SL/(FT-SC)	182.2	4.7	1.1	188.0	160.3	2.6	0.9	163.9
S1K09	SL/SC	167.3	4.7	1.1	173.1	147.2	2.6	0.9	150.8
S1K10a	A	229.4	4.7	1.5	235.6	55.1	1.0	0.4	56.4
S1K10b	SL/SC-A	204.2	4.7	1.3	210.2	122.5	2.1	0.8	125.4
S1K11a	SL/A	213.5	4.7	1.5	219.7	51.2	1.0	0.4	52.6
S1K11b	SL/SC-A	236.2	4.7	1.3	242.2	141.7	2.1	0.8	144.6
S3K1a	E-SC	116.2	4.8	1.2	122.2	93.5	2.2	0.9	96.6
S3K1b	SL/SC	161.8	4.8	1.2	167.8	124.7	2.2	0.9	127.8
S3K2a	SL/A-SC	126.4	4.8	1.2	132.4	94.0	2.2	0.9	97.1

Tab. 4.70 Schubwiderstände V [kN] und max. Momente M [kNm] der Hohlplatten aus der Charge P20 - Variation der Auflagerbreite s und des Kraftabstandes a (vgl. Anhang C.1)

Versuch	Bruchart	V_K	V_g	V_{LE}	V_u	M_K	M_g	M_{LE}	M_{max}
S3K2b	SL/SC	163.1	4.8	1.2	169.1	139.0	2.2	0.9	142.1
S3K3	SC-ST	216.8	4.8	1.2	222.8	134.7	2.2	0.9	137.8
S6K1	(SL)/A-SC	147.6	4.7	1.1	153.4	129.9	2.6	0.9	133.4
S6K3	ST/SL/A-SC	176.6	4.7	1.1	182.4	155.4	2.6	0.9	159.0
S6K5	ST/SL/SC	174.6	4.7	1.1	180.4	153.6	2.6	0.9	157.2
S6K7	ST/SL/SC	207.2	4.7	1.1	213.0	182.3	2.6	0.9	185.9

V_K: Schub aus der Pressenkraft K
V_g: Schub aus Eigengewicht
V_{LE}: Schub aus dem Träger für die Lasteinleitung der Pressenkraft K
V_u: $V_u=V_K+V_g+V_{LE}$
M_K: Feldmoment aus der Pressenkraft K
M_g: Feldmoment aus Eigengewicht
M_{LE}: Feldmoment aus dem Träger für die Lasteinleitung der Pressenkraft K
M_{max}: $M_{max}=M_K+M_g+M_{LE}$

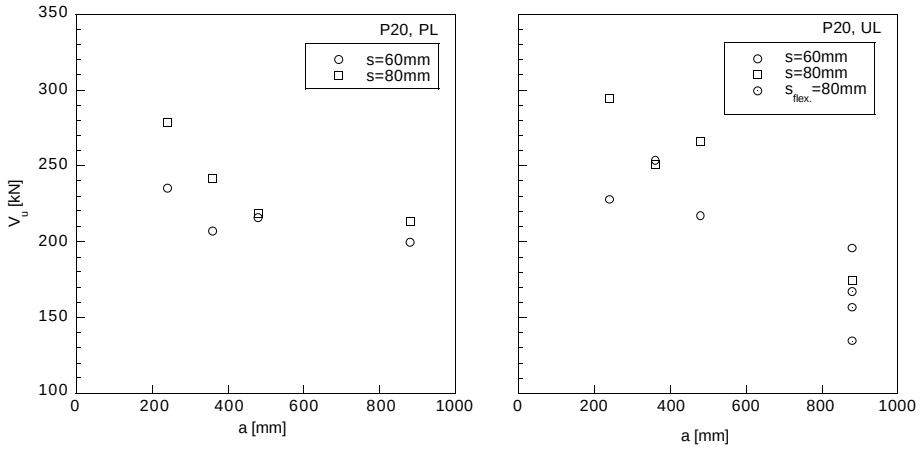


Abb. 4.254 Schubwiderstände der Hohlplatten aus den Chargen P20, PL (mit profilierten Litzen) und P20, UL (mit Litzen aus tordierten Drähten) gemäss Tab. 4.71 und 4.72 - Einfluss der Auflagerbreite s und der flexiblen Lagerung ($s_{flex.}$)

Tab. 4.71 Schubwiderstände V [kN] und max. Momente M [kNm] der Hohlplatten aus der Charge P20, PL - Variation der Auflagerbreite s und des Kraftabstandes a (vgl. Anhang C.1)

Versuch	Bruchart	V_K	V_g	V_{LE}	V_u	M_K	M_g	M_{LE}	M_{max}
S2K01a	A	229.0	4.7	1.5	235.2	55.0	1.0	0.4	56.3
S2K01b	LWS	193.8	4.7	1.1	199.6	170.5	2.6	0.9	174.1
S2K02a	A	200.7	4.7	1.4	206.8	72.3	1.4	0.5	74.2
S2K02b	A	210.0	4.7	1.4	216.0	100.8	1.8	0.7	103.2
S2K03a	A	272.7	4.7	1.5	278.9	65.4	1.0	0.4	66.8
S2K03b	(SL)/A(-SC)	207.2	4.7	1.1	213.0	182.3	2.6	0.9	185.9

Tab. 4.71 Schubwiderstände V [kN] und max. Momente M [kNm] der Hohlplatten aus der Charge P20, PL - Variation der Auflagerbreite s und des Kraftabstandes a (vgl. Anhang C.1)

Versuch	Bruchart	V_K	V_g	V_{LE}	V_u	M_K	M_g	M_{LE}	M_{max}
S2K01a	A	229.0	4.7	1.5	235.2	55.0	1.0	0.4	56.3
S2K04a	(SL)/A	235.5	4.7	1.4	241.6	84.8	1.4	0.5	86.7
S2K04b	(SL)/A	212.4	4.7	1.4	218.4	102.0	1.8	0.7	104.4

Tab. 4.72 Schubwiderstände V [kN] und max. Momente M [kNm] der Hohlplatten aus der Charge P20, UL - Variation der Auflagerbreite s und des Kraftabstandes a (vgl. Anhang C.1)

Versuch	Bruchart	V_K	V_g	V_{LE}	V_u	M_K	M_g	M_{LE}	M_{max}
S2K13a	(SL)/A	221.7	4.7	1.5	227.9	53.2	1.0	0.4	54.6
S2K13b	SC-LWS	190.1	4.7	1.1	195.9	167.3	2.6	0.9	170.8
S2K14a	A	247.6	4.7	1.4	253.7	89.1	1.4	0.5	91.1
S2K14b	A	211.2	4.7	1.4	217.2	101.4	1.8	0.7	103.8
S2K15a	A	288.6	4.7	1.5	294.8	69.3	1.0	0.4	70.6
S2K15b	LWS-SC	168.9	4.7	1.1	174.7	148.6	2.6	0.9	152.2
S2K16a	A	244.9	4.7	1.4	251.0	88.2	1.4	0.5	90.1
S2K16b	A	259.9	4.7	1.4	265.9	124.8	1.8	0.7	127.2
S5K1	A-SC	247.9	4.7	0.0	252.6	148.7	2.8	0.0	151.5
S6K2	P	128.9	4.7	1.1	134.7	113.4	2.6	0.9	117.0
S6K4	ST/(SL)/SC	150.8	4.7	1.1	156.6	132.7	2.6	0.9	136.3
S6K6	ST/LWS-SC	161.1	4.7	1.1	166.9	141.8	2.6	0.9	145.3

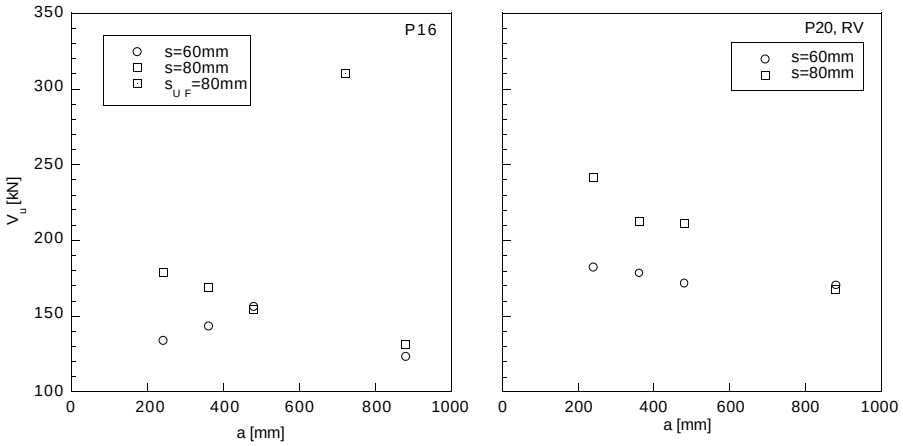


Abb. 4.255 Schubwiderstände der Hohlplatten aus den Chargen P16 (mit glatten Litzen) und P20, RV (mit reduzierter Vorspannung) gemäss Tab. 4.73 und 4.74 - Einfluss der Auflagerbreite s

Tab. 4.73 Schubwiderstände [kN] und max. Momente [kNm] der Hohlplatten aus der Charge P16 - Variation der Auflagerbreite s und des Kraftabstandes a (vgl. Anhang C.1)

Versuch	Bruchart	V_K	V_g	V_{LE}	V_u	M_K	M_g	M_{LE}	M_{max}
S2K09a	ST/A	128.3	3.9	1.5	133.7	30.8	0.8	0.4	32.0
S2K09b	ST/SL/A-LWS-SC	118.4	3.9	1.1	123.4	104.2	1.9	0.9	107.1
S2K10a	(SL)/SC	138.2	3.9	1.4	143.5	49.8	1.1	0.5	51.4
S2K10b	SL	151.1	3.9	1.4	156.3	72.5	1.4	0.7	74.6
S2K11a	SL/A-SC	173.6	3.9	1.5	179.0	41.7	0.8	0.4	42.9
S2K11b	SL/SC	126.5	3.9	1.1	131.5	111.3	1.9	0.9	114.2
S2K12a	ST/(SL)/A-SC	163.5	3.9	1.4	168.8	58.9	1.1	0.5	60.5
S2K12b	ST/(SL)/A-SC	149.5	3.9	1.4	154.7	71.8	1.4	0.7	73.8
S3K4	S	301.7	7.1	1.2	310.0	165.5	2.7	0.9	169.1

Tab. 4.74 Schubwiderstände V [kN] und max. Momente M [kNm] der Hohlplatten aus der Charge P20, RV - Variation der Auflagerbreite s und des Kraftabstandes a (vgl. Anhang C.1)

Versuch	Bruchart	V_K	V_g	V_{LE}	V_u	M_K	M_g	M_{LE}	M_{max}
S2K05a	ST/SL/A	176.2	4.7	1.5	182.4	42.3	1.0	0.4	43.7
S2K05b	SL/SC	164.9	4.7	1.1	170.7	145.1	2.6	0.9	148.7
S2K06a	SL/A	172.5	4.7	1.4	178.6	62.1	1.4	0.5	64.1
S2K06b	SL/A-SC	165.8	4.7	1.4	171.8	79.6	1.8	0.7	82.0
S2K07a	ST/(SL)/A	235.8	4.7	1.5	242.0	56.6	1.0	0.4	58.0
S2K07b	SL	162.0	4.7	1.1	167.8	142.6	2.6	0.9	146.1
S2K08a	(SL)/A-SC	206.9	4.7	1.4	213.0	74.5	1.4	0.5	76.4
S2K08b	SL/A	205.1	4.7	1.4	211.1	98.4	1.8	0.7	100.9

Tab. 4.75 Max. Schubkräfte V [kN] und Bruchmomente M [kNm] der Hohlplatten aus der Charge P20 (Biegeversuche) - Einfluss des Überbetons

Versuch	Bruchart	V_K	V_g	V_{LE}	V_{max}	M_K	M_g	M_{LE}	M_u
S4K1	FC	111.8	9.2	1.7	122.7	178.9	10.9	2.7	192.5
S4K2	FC	169.0	15.1	1.7	185.8	270.4	17.9	2.7	291.0

5 Brandversuche

5.1 Baustoffe

Als Ausgangswerte der Festigkeiten bei Raumtemperatur können diejenigen der Kaltversuche (Kap. 4.1) benutzt werden, weil die geprüften Platten aus den gleichen Chargen wie bei den Kaltversuchen stammen. Die nachfolgenden Baustoffuntersuchungen sind Restfestikeitsprüfungen. Für die Prüfart gelten dieselben Bemerkungen wie in erwähntem Kapitel. Es ist bei den jeweiligen Versuchen die Branddauer und die entsprechende Temperatur der Proben zu berücksichtigen.

5.1.1 Beton

Aus der Versuchsdecke wurden nach dem Brandversuch Bohrkerne für die Hohlplatte aus dem Stegoberteil mit Durchmesser 38 mm und für den Kammerbeton mit Durchmesser 35 mm entnommen. Je nach Länge der Bohrkerne konnten daraus mehrere Zylinder der Länge 38 mm bzw. 35 mm gefräst werden. Die Hohlplatten stammen aus der Charge P20. Der Kammerbeton ist derselbe wie aus der Serie S3K. Die Kennwerte der urprünglichen Festigkeiten sind in der Tab. 4.2 dargestellt.

Tab. 5.1 Kennwerte der Zylinderproben des Versuchs B2-1 nach dem Brandversuch

Charge	Max. Temp. [°C]	Anzahl Proben	f_{cm} [N/mm^2]	x_s [N/mm^2]	ρ_m [kg/m^3]
P20	100	8	24.5	4.1	2185
KB	100	8	46.0	3.0	2323

f_{cm}: Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit
x_s: Standardabweichung der Zylinderdruckfestigkeit
ρ_m: Mittelwert der Dichten der Druckzylinder

5.1.2 Bewehrungsstahl

Spannstahl

Die erwärmten Litzen erfahren gegenüber den nicht erwärmten Litzen (vgl. Tab. 4.3) einen markanten Festigkeitsverlust. Die Kennwerte sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tab. 5.2 Kennwerte der Spannlitzen

Probe (Charge)	Max. Temp. [°C]	$f_{py,0.2}$ [N/mm^2]	f_{pt} [N/mm^2]	E_p [kN/mm^2]
L3 (B2-1)	650	-	898	208

Tab. 5.2 Kennwerte der Spannlitzen

Probe (Charge)	Max. Temp. [°C]	$f_{py,0.2}$ [N/mm^2]	f_{pt} [N/mm^2]	E_p [kN/mm^2]
L4 (B2-1)	650	-	927	-
L5 (B2-1)	650	1149	1161	-

$f_{py,0.2}$: 0.2%-Dehngrenze des Spannstahls
f_{pt}: Zugfestigkeit des Spannstahls
E_p: Elastizitätsmodul des Spannstahls

Schlaffe Bewehrung

Von der schlaffen Bewehrung wurden nach den Brandversuchen keine Proben entnommen, da es zu keinem Versagen des kammerbetonierten Trägers kam. Als Vergleichswert für die Restfestigkeit von schlaffer Armierung bei gleichen Trägerquerschnitten sei auf den Brandversuch an einer Slim Floor Decke von Borgogno und Fontana (1995) verwiesen.

5.1.3 Baustahl

Die Probenentnahmestellen und -formen sind in Kap. 4.1 dargestellt. Zu den Festigkeitswerten des nichterwärmten Baustahls (vgl. Tab. 4.5) sind in der folgenden Tabelle keine signifikanten Unterschiede feststellbar.

Tab. 5.3 Kennwerte des Baustahls

Probe (Versuch)	Max. Temp. [°C]	t·b [mm]	f_{ay} [N/mm^2]	f_{at} [N/mm^2]	$\varepsilon_{u,5}$ [%]
FO3 (B2-1)	140	13.0·25.0	297	437	32
FU3 (B2-1)*	-	12.3·25.0	293	424	31
FU4 (B2-1)*	-	12.3·25.0	289	421	30
FU5 (B2-1)	680	12.3·25.0	263	407	35
FU6 (B2-1)	680	12.3·25.0	260	406	35
Steg1 (B2-1)	520	8.3·19.9	312	433	16
Steg2 (B2-1)	520	8.4·19.9	297	431	17

*: Zugversuch vor dem Brandversuch
f_{at}: Zugfestigkeit des Baustahls
f_{ay}: Fliessgrenze des Baustahls
$\varepsilon_{u,5}$: Bruchdehnung

5.2 Versuchskörper

Die Versuchsdecken der Serie B2 (vgl. Anhang A.5) bestanden jeweils aus einem Mittelträger (Slim Floor Träger) und aus zwei Randträgern, auf deren Unterflanschen die 6 Hohlplatten (vgl. auch Kapitel 4.2) lagen. Die zwei Mittelplatten waren 1.20 m breit, die 4 Randplatten waren halbierte Hohlplatten mit einer Breite von 0.60 m. Die Versuchsdecke der Serie B3 (vgl. Anhang A.6) hatte die gleiche Anordnung der Betonhohlplatten wie Serie B2. Der Mittelträger im Versuch B3

bestand jedoch aus einem massigen Betonquerschnitt (vgl. Abb. 5.1), der zusätzlich durch 25 mm dicke Brandschutzplatten geschützt war. Damit konnte ein steifes Mittelauflager für die Hohlplatten simuliert werden. In Tab. 5.4 sind die Querschnitte der Slim Floor Träger der Brandveruche denjenigen der Kaltversuche gegenübergestellt. Die Hohlkörper der Betonhohlplatten sind alle ca. 100 mm mit Beton gefüllt. Im Versuch B2-3 sind die Löcher mit abgebogener Zugarmierung ca. 500mm gefüllt.

Tab. 5.4 Mittelträgerquerschnitte der Serie B2

Brandversuche Serie B2		**Kaltversuche Serie S3K**	
Querschnitt	**Platten (vgl. Anhang A.1)**	**Querschnitt (vgl. Abb. 4.3)**	**Platten**
B2-1	P20	S3K1	P20
B2-2	P20	S3K2	P20
B2-3	P20	S3K3	P20
B2-4	P20, PL	S3K2	P20

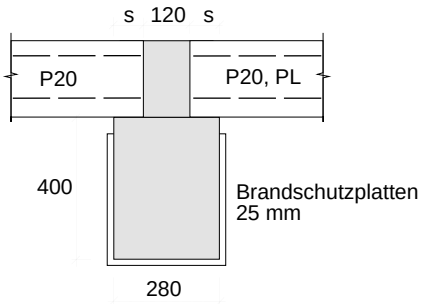


Abb. 5.1 Mittelträgerquerschnitt der Serie B3

5.3 Versuchseinrichtung

5.3.1 Ofen

Die Innenabmessungen des Ofens betragen 2.35 m · 4.85 m (vgl. Anhang B.3). Er wird von zehn Ölbrennern beheizt. Die Mauern sind aus Schamottstein, die Mauerdicke beträgt 53 cm. Durch zwei Beobachtungsfenster kann in die Ofenkammer und damit an die Prüfdeckenunterseite gesehen werden (vgl. Abb. 5.2).

5.3.2 Versuchsrahmen

Der Versuchskörper wird auf einen Versuchsrahmen (vgl. Anhänge B.3 und B.4) gelegt. Dieser hat unten vier Stützen. Auf dem Rahmen sind an aufgeschweissten Schienen die Joche angeschraubt, an welchen die Pressen befestigt sind. Der ganze Versuchsrahmen kann mit einem Kran über den Ofen gehoben werden. So ist es möglich, den ganzen Versuch vorzubereiten, und erst ca. 1 Tag vor dem Versuch über den Ofen zu heben. Zudem ist es möglich, zerstörungsfreie Vorversuche (im elastischen Bereich) bei Raumtemperatur durchzuführen.

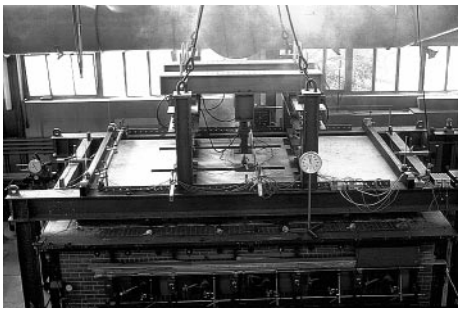


Abb. 5.2 Brandofen mit Versuchskörper der Serie B2 an der EMPA

5.3.3 Auflager

Die Hohlplatten lagen in der Mitte (Slim Floor Träger) und am Rand auf Stahlträgern auf, die am Ende an Zugstangen aufgehängt wurden. Diese Zugstangen wurden über Querträger aus RHS-Profilen an die Kraftmessdosen angeschlossen (vgl. Abb. 5.3 und 5.4). Auf diese Weise konnten die Auflagerkräfte der Versuchsdecke während des Versuches laufend gemessen werden.

Randlauflager der Brandversuche

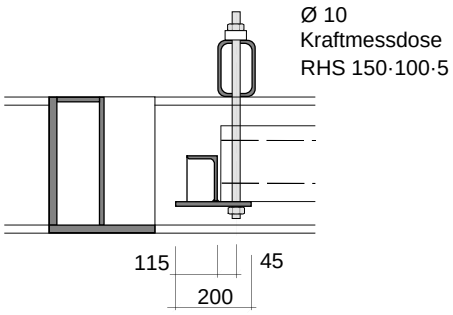


Abb. 5.3 Aufhängung für die Randauflager

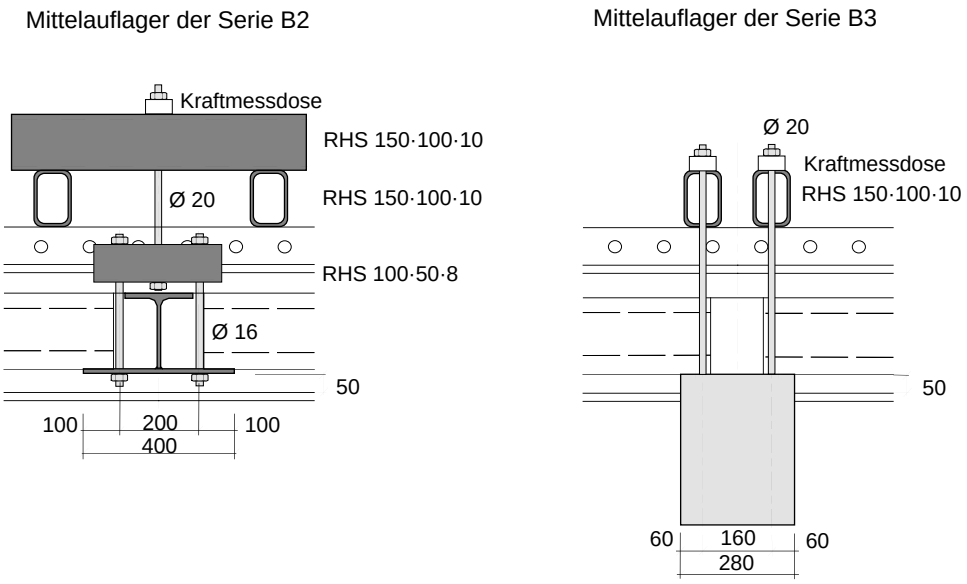


Abb. 5.4 Aufhängungen für die Mittelauflager

Der Mittelträger der Serie B3 wurde an insgesamt 4 Zugstangen, die im Betonträger einbetoniert waren, aufgehängt. Damit war es möglich, beide Plattenhälften unabhängig voneinander zu belasten. Auch die Randträgerenden wurden an einer Zugstange aufgehängt (vgl. Abb. 5.3).

5.3.4 Belastung

Pressen

Die Kraft für die Belastung auf die Mittelträger der Serie B2 wurde von 2 ölhydraulischen Pressen (Parker, Bohrung 82.6 mm, Hub 200 mm) mit einer max. möglichen Druckkraft von 187 kN (Abk. B) aufgebracht. Auf die Hohlplatten wurde die Kraft von 4 ölhydraulischen Pressen (Parker, Bohrung 63.5 mm, Hub 200 mm) mit einer max. möglichen Druckkraft von 111 kN aufgebracht. Die Belastung mit Pendelmanometern (Amsler) wurde kraftgesteuert aufgebracht.

Brandbelastung

Bei den Versuchen wurde im Ofen die Temperaturzeitkurve des umgebenden Gases (5.1) gemäss ISO 834 festgelegt.

$$\Theta_t - \Theta_0 = 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1) \qquad (5.1)$$

Allfällige Abweichungen wurden laufend ausgeglichen, sodass bei allen Versuchen die zulässigen Streuungen gemäss ISO 834 eingehalten werden konnten.

5.4 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdecken wurden durch einen Transportrahmen stabilisiert und an die EMPA, Dübendorf geliefert. Dort wurden die Decken auf den Versuchsrahmen aufgelegt. Der Versuchsrahmen stand zu diesem Zeitpunkt noch nicht über dem Ofen. Die Belastungseinrichtungen konnnten

montiert werden. Anschliessend wurden Vorversuche bei Raumtemperatur im elastischen Bereich durchgeführt. Nach Abschluss der Vorversuche wurde der Versuchsrahmen mit der Versuchsdecke über den Ofen gehoben. Allfällige Luftspälte zwischen Ofen und Decke wurden isoliert. Der Ofen wurde bis zum Auftreten eines Bruches der Versuchsdecken beheizt, maximal jedoch zwei Stunden lang.

5.5 Messungen

Die Pressen bei den Vorversuchen wurden von Hand gesteuert. Die Pressen B und O bzw. N und P waren entkoppelt (vgl. Abb. 5.5). Es wurden Durchbiegungen, Horizontalverschiebungen, Öldruck der Pressen, Schlupf und Auflagerkräfte gemessen (vgl. Anhänge C.6 bis C.12). Die Messungen wurden bei jeder Laststufe durchgeführt.

Bei den Brandversuchen wurden die Messungen zeitgesteuert jede Minute durchgeführt. Gemessen wurde ausser dem Schlupf dasselbe wie bei den Vorversuchen, zusätzlich noch Temperaturen an verschiedenen Stellen.

Die Genauigkeit der Messinstrumente ist in Tab. 4.6 dargestellt. Für die Temperaturmessungen gilt eine Genauigkeit von ca. 3 °C und bei der DMS-Messung eine von ca. 5 µm/m.

5.6 Versuchsresultate

Vor jedem Brandversuch wurden Vorversuche durchgeführt (Zusatzbezeichnung: -VV). Die Versuchskörper wurden von jeder der zwei unabhängig gesteuerten Pressengruppe einmal belastet. Zusätzlich wurde auch ein Vorversuch mit beiden Pressengruppen gleichzeitig wirkend durchgeführt, sodass sich insgesamt je drei Vorversuche pro Versuchskörper ergaben.

Im Titel jedes Vor- bzw. Brandversuches wird neben der Versuchsbezeichnung (z.B. B2-1) auch der Versuchstyp beschrieben. Der Typ wird durch die Eigenschaften und die Belastungsart definiert: Spannweite (l), den Kraftabstand (a), die Auflagerbreite (s), den Plattentyp (P20/PL), den Auflagertyp (starr, UF) und die Art der Lasteinleitung (ZL) definiert.

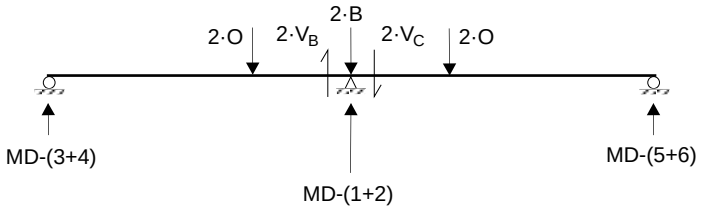
Bei den Messwerten ist das Eigengewicht und das Gewicht der Lasteinleitungskonstruktion nicht enthalten. In der Zusammenstellung der Resultate der Brandversuche in Kap. 5.7 wird dieser Anteil berücksichtigt.

In den Bruchbildern sind die grössten und für den Bruch massgebenden Risse eingezeichnet. Dünn gezeichnete Risse spielen eine untergeordnete Rolle; wegen der Übersichtlichkeit wurden kleine Risse weggelassen.

Die Versuchsfotos sind jeweils mit der Versuchsbezeichnung und mit der Branddauer t [min] gekennzeichnet.

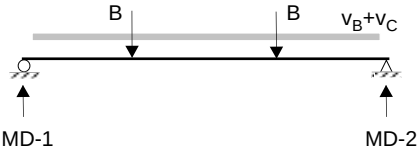
Die Versuchskörper der Serien B2 und B3 waren statisch unbestimmt gelagert. Die massgebenden Querkräfte und Trägermomente wurden gemäss folgender Abbildung bestimmt.

Stat. Modelle für
Serie B2



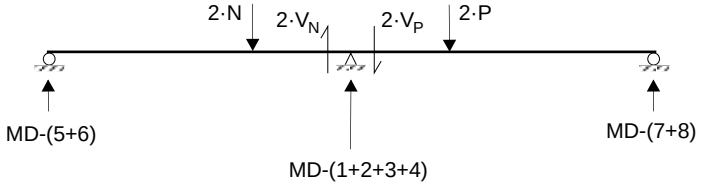
$V_B = V_C = 0.5 \cdot (0.5 \cdot MD\text{-}(1+2) - B)$ [kN]

Slim Floor Träger:



$M_{Tr} = 0.785 \cdot B + 0.744 \cdot (v_B + v_C)$ [kNm]

Stat. Modell für
Serie B3



$V_N = 0.5 \cdot MD\text{-}(1+2+3+4) - P + 0.5 \cdot MD\text{-}(7+8)$ [kN]
$V_P = 0.5 \cdot MD\text{-}(1+2+3+4) - N + 0.5 \cdot MD\text{-}(5+6)$ [kN]

Abb. 5.5 Querkräfte und Biegemoment der Vor- und Brandversuche

Tab. 5.5 Versuchsresultate B2-1-VVa

B [kN]	O [kN]	V_B=V_C [kN]	M_{Tr} [kNm]	ΔV_{Tr} [mm]
60	0	-4	42	0.7
70	0	-4	49	0.9

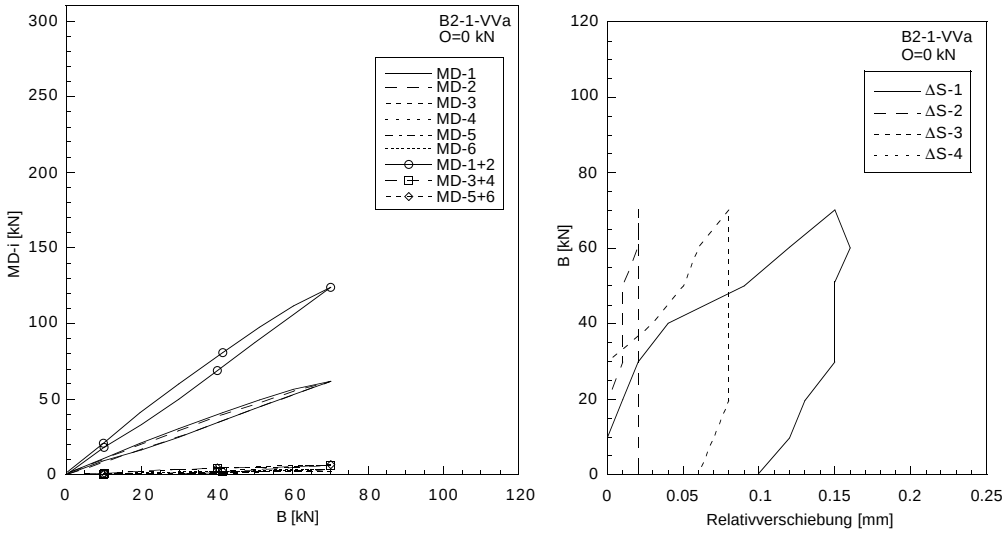


Abb. 5.6 Pressen-, Auflagerkräfte und Relativverschiebungen (vgl. Anhang C.6 und C.10)

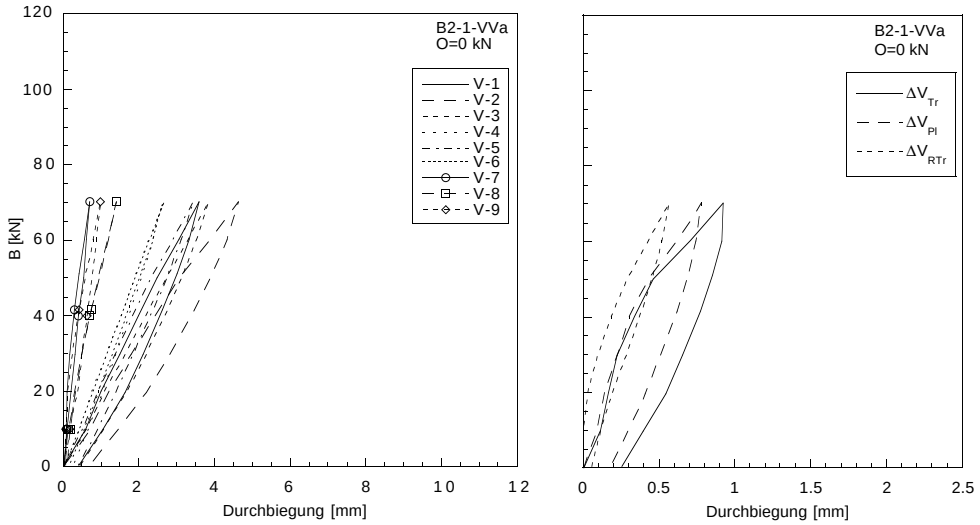


Abb. 5.7 Durchbiegungen (vgl. Anhang C.6)

Bemerkung: ΔS-1 und ΔS-3 haben irreversible Verschiebungen (vgl. Anhang C.10)

Tab. 5.6 Versuchsresultate B2-1-VVb

B [kN]	O [kN]	V_B=V_C [kN]	M_{Tr} [kNm]	ΔV_{Tr} [mm]
0	40	25	37	0.7
0	60	39	57	1.2

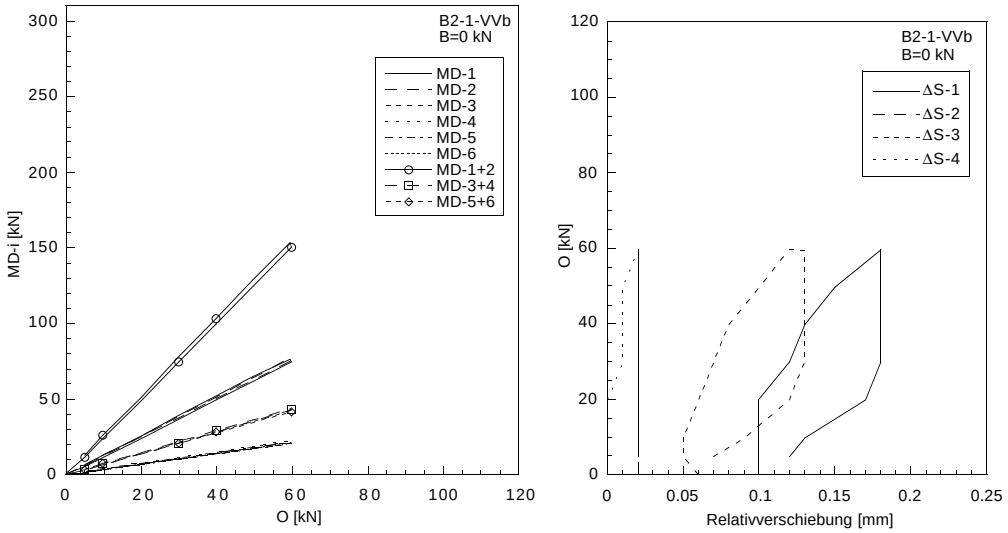


Abb. 5.8 Pressen-, Auflagerkräfte und Relativverschiebungen (vgl. Anhang C.6 und C.10)

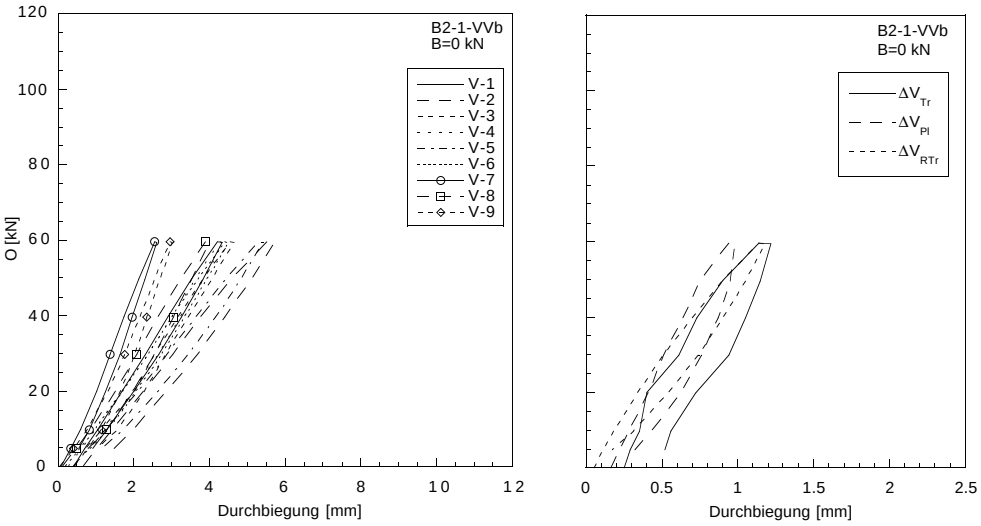


Abb. 5.9 Durchbiegungen (vgl. Anhang C.6)

Bemerkung: keine

Tab. 5.7 Versuchsresultate B2-1-VVc

B [kN]	O [kN]	V_B=V_C [kN]	M_{Tr} [kNm]	ΔV_{Tr} [mm]
40	40	25	69	1.5

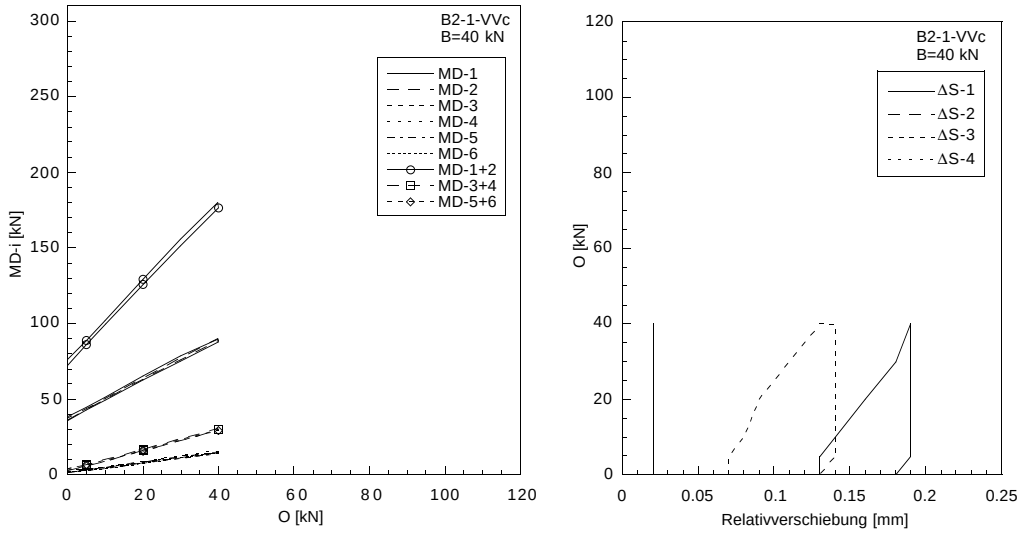


Abb. 5.10 Pressen-, Auflagerkräfte und Relativverschiebungen (vgl. Anhang C.6 und C.10)

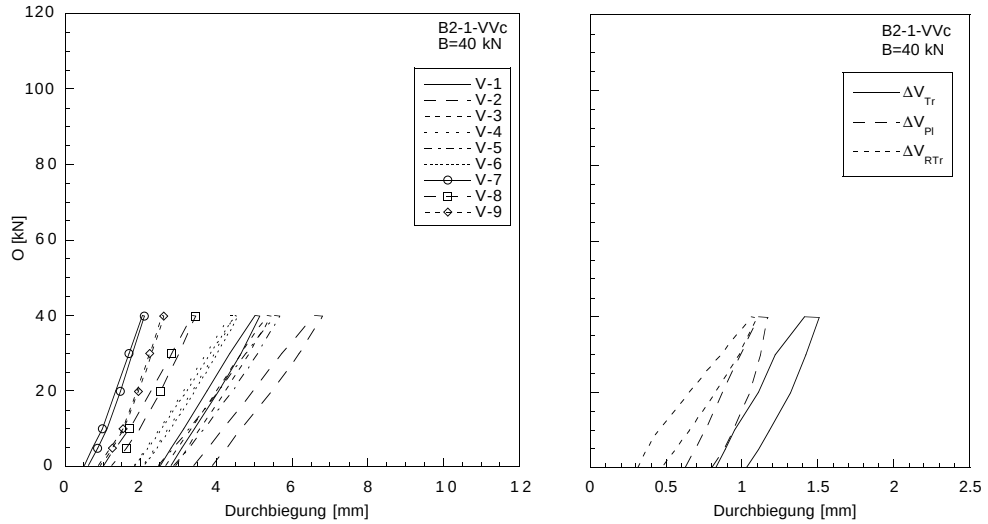


Abb. 5.11 Durchbiegungen (vgl. Anhang C.6)

Bemerkung: ΔS-1 und ΔS-3 haben irreversible Verschiebungen (vgl. Anhang C.10)

Tab. 5.8 Versuchsresultate B2-1

t [min]	B [kN]	O [kN]	V_B=V_C [kN]	M_{Tr} [kNm]	Δv_{Tr} [mm]	H3+H4 [mm]
0	0	40.1	25.8	38.3	0.8	-0.6
15	0	40.0	26.5	39.4	15.0	-2.3
30	0	39.9	26.4	39.1	24.5	-2.3
45	0	39.9	26.0	38.6	31.3	-3.0
60	0	40.0	26.0	38.5	36.4	-3.7
75	0	40.0	25.5	37.9	40.9	-4.4
90	0	40.0	25.1	37.2	46.5	-5.1
105	0	40.0	24.7	36.7	52.7	-5.8
120	0	40.0	22.9	34.0	60.0	-6.7
122	0	39.9	22.5	33.4	58.0	-5.9

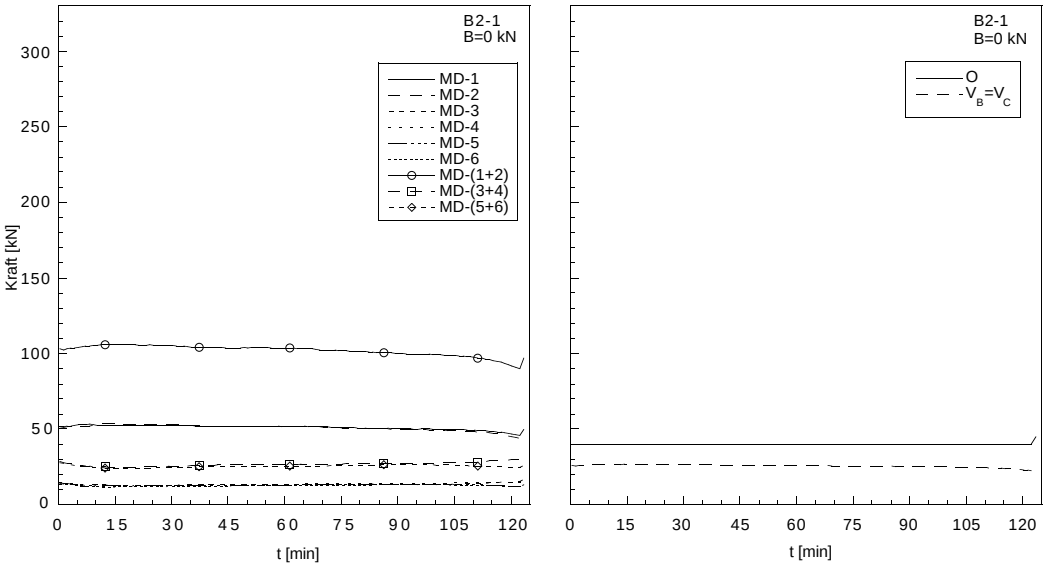


Abb. 5.12 Auflager-, Pressen- und Querkräfte (vgl. Anhang C.6 und Abb. 5.5)

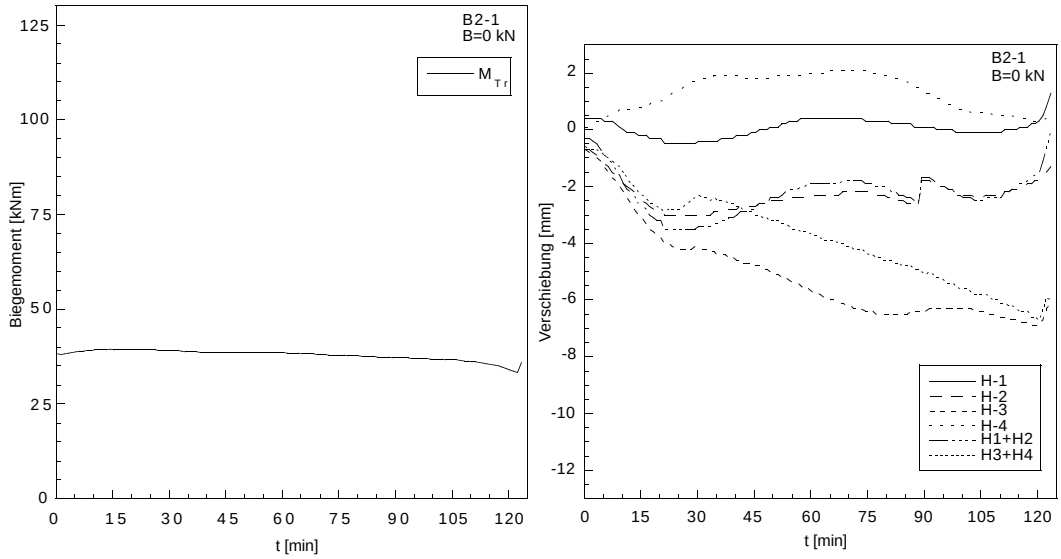


Abb. 5.13 Biegemoment und Horizontalverschiebungen (vgl. Anhang C.6)

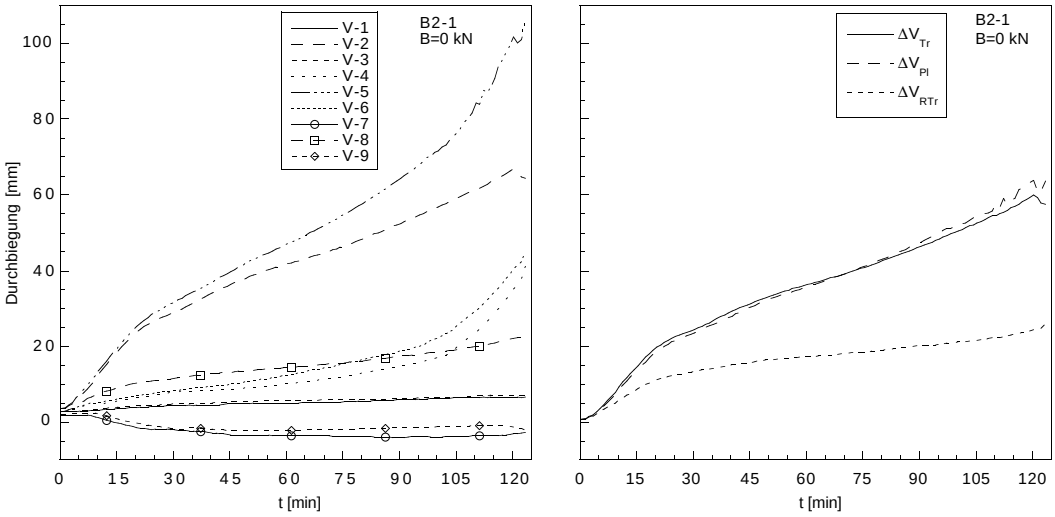


Abb. 5.14 Durchbiegungen (vgl. Anhang C.6)

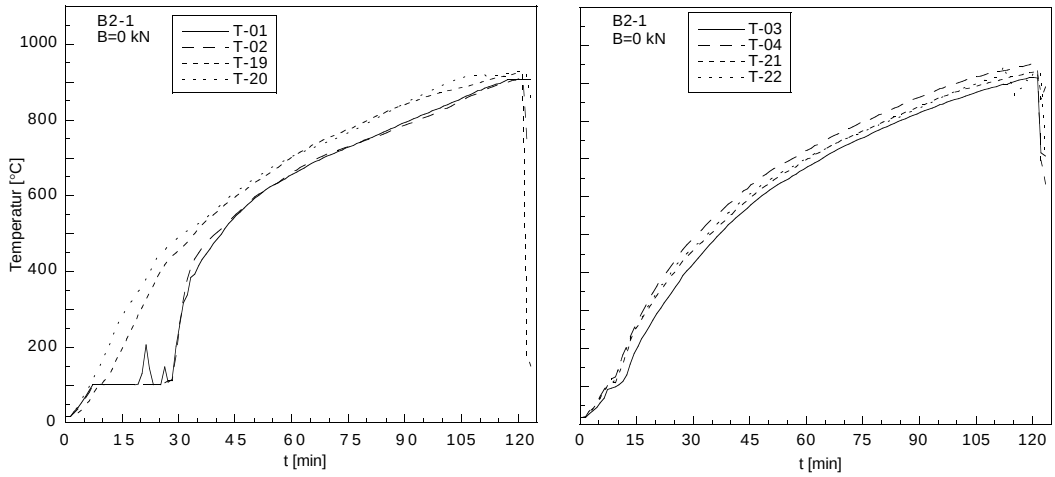


Abb. 5.15 Temperaturen am Unterflansch (vgl. Anhang C.9)

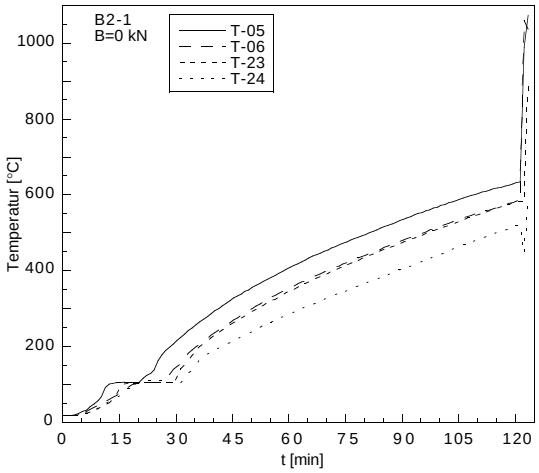


Abb. 5.16 Temperaturen an den Litzen (vgl. Anhang C.9)

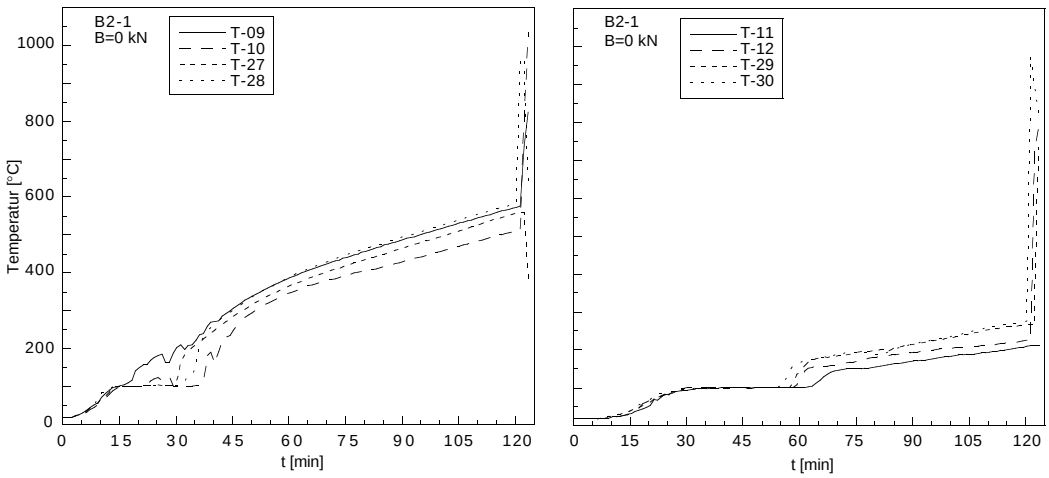


Abb. 5.17 Temperaturen am Trägersteg unten und oben (vgl. Anhang C.9)

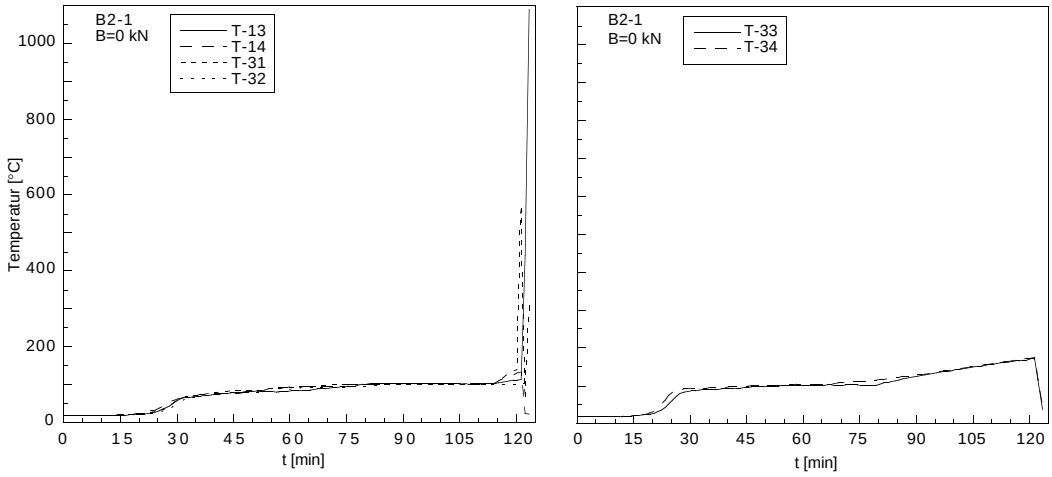


Abb. 5.18 Temperaturen am Oberflansch auf der Unterseite und an der Oberseite (vgl. Anhang C.9 und C.7

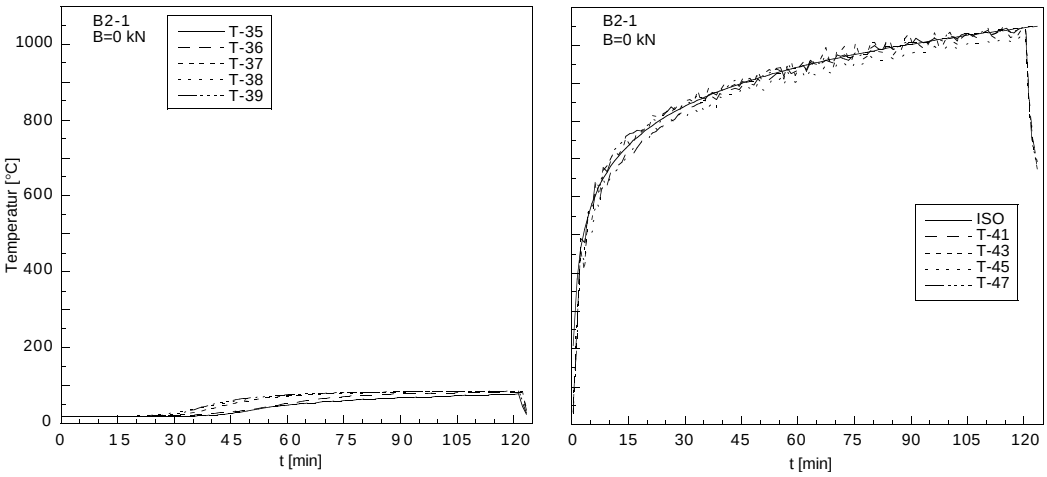


Abb. 5.19 Temperaturen an der Betonoberfläche und im Ofen (vgl. Anhang C.7 und B.3)

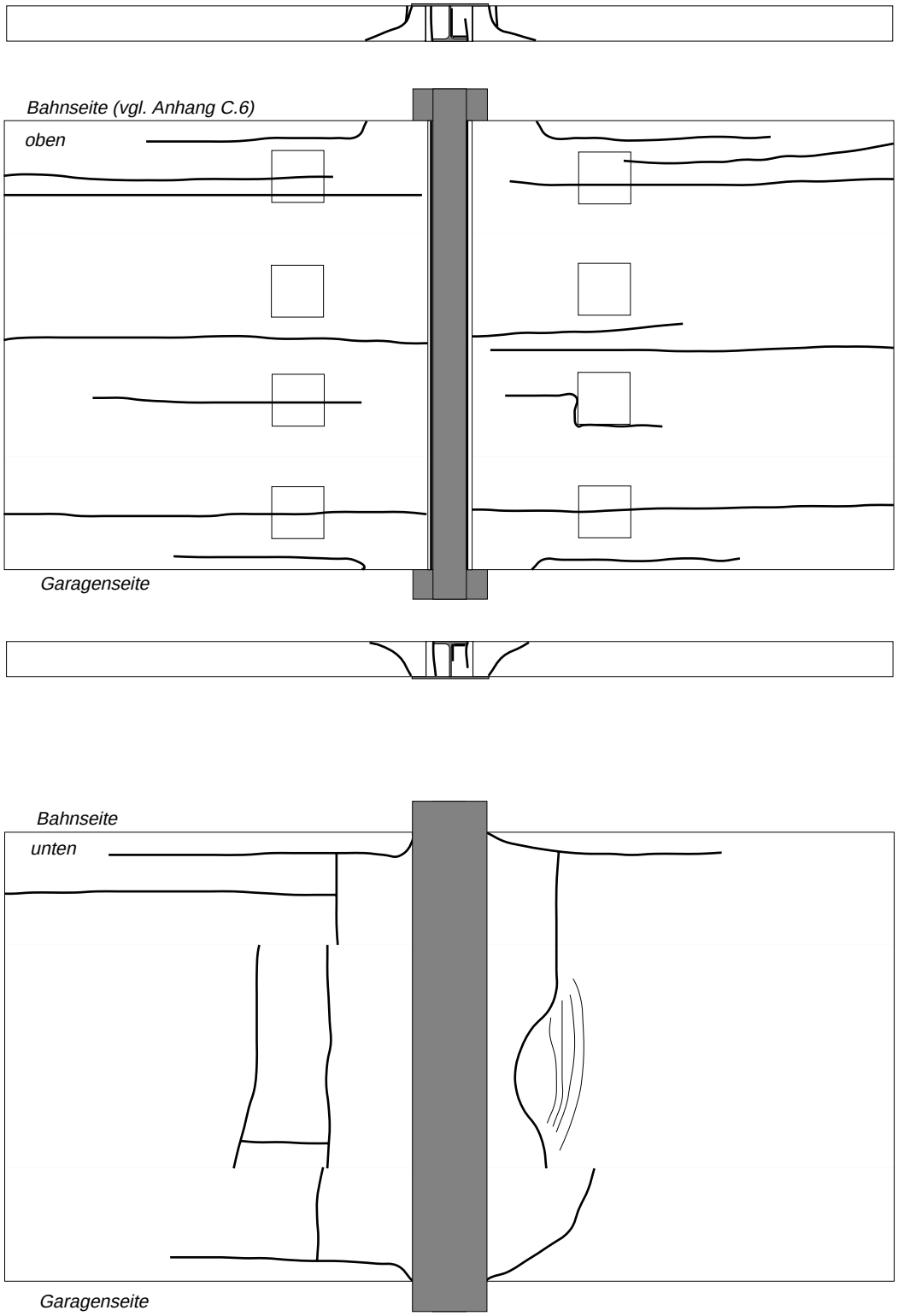


Abb. 5.20 Bruchbild des Brandversuchs B2-1

Abb. 5.21 Schubriss in der Hohlplatte beim Trägerauflager nach 60 min (B2-1)

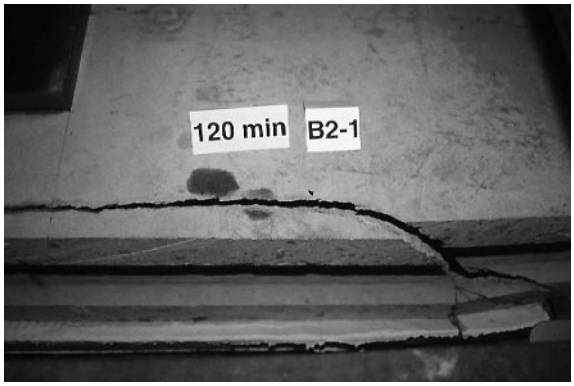


Abb. 5.22 Schubriss in der Hohlplatte beim Trägerauflager nach 120 min (B2-1)

Abb. 5.23 Unterseite des Mittelträgers nach dem Ausschalten der Brenner (B2-1)

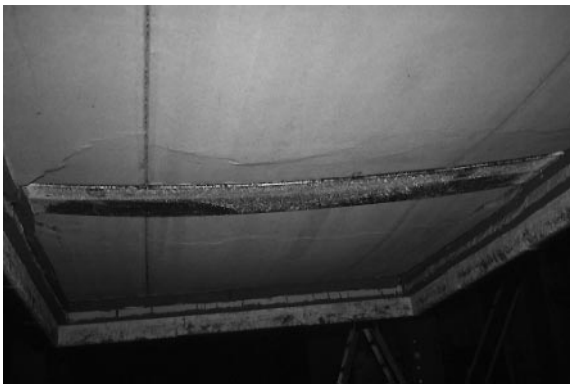


Abb. 5.24 Risse an der Deckenunterseite nach dem Brandversuch (B2-1)

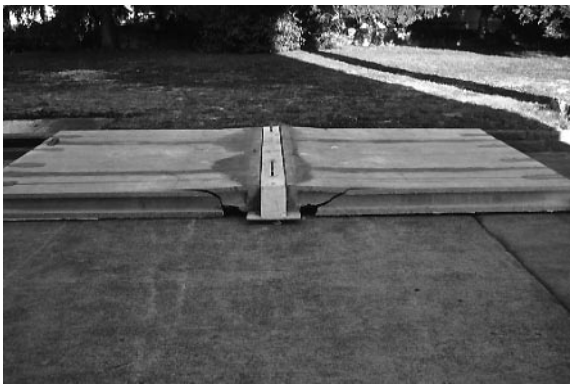


Abb. 5.25 Schubriss in der Hohlplatte beim Trägerauflager nach dem Brandversuch (B2-1)

Bemerkung: Wasseraustritt an der Betonoberfläche schon nach 10 min
Nach 122 min Branddauer und gleichbleibender Belastung noch kein Versagen
t_u>122 min

Tab. 5.9 Versuchsresultate B2-2-VVa

B [kN]	O [kN]	V_B=V_C [kN]	M_{Tr} [kNm]	ΔV_{Tr} [mm]
60	0	-2	44	1.5
110	0	-3	83	2.0

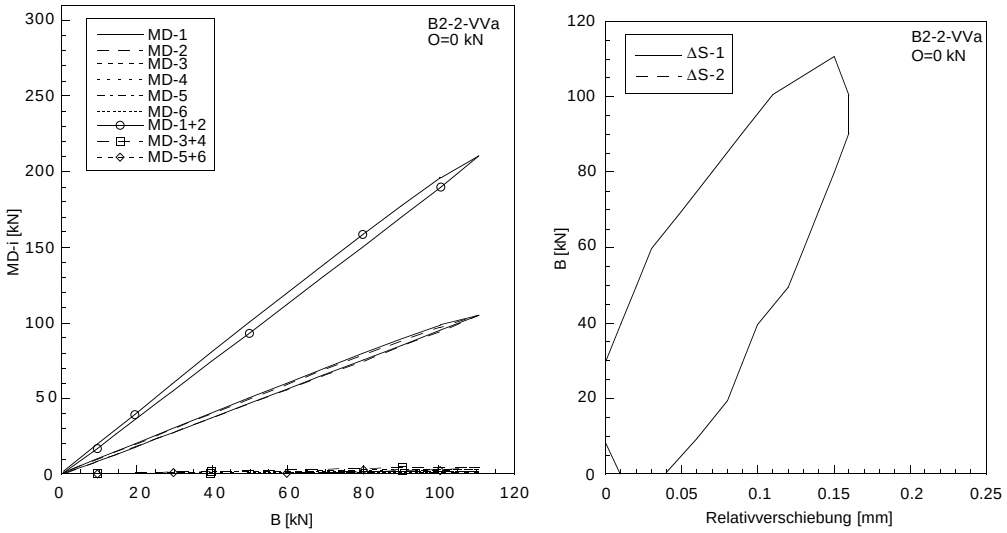


Abb. 5.26 Pressen-, Auflagerkräfte und Relativverschiebungen (vgl. Anhang C.6 und C.10)

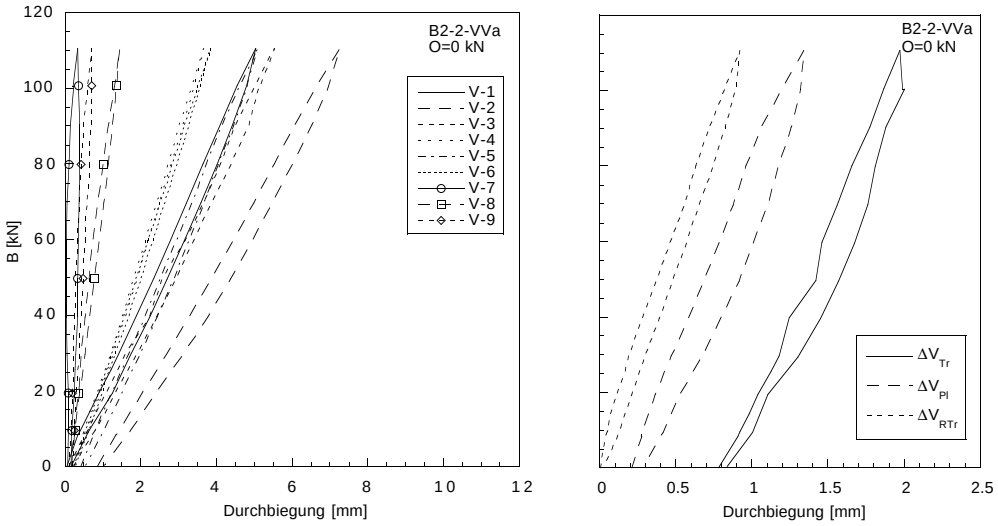


Abb. 5.27 Durchbiegungen (vgl. Anhang C.6)

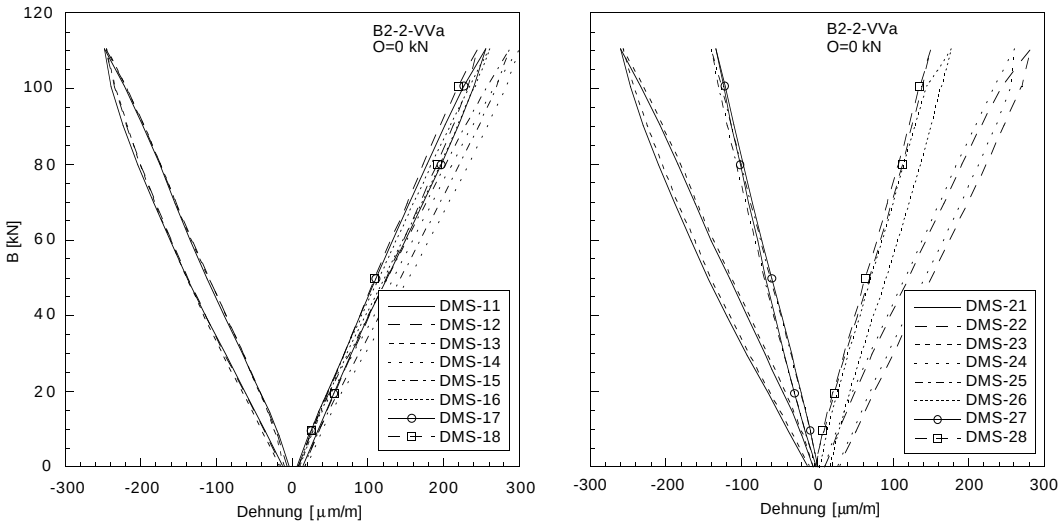


Abb. 5.28 Dehnungen der Schnitte 1 und 2 (vgl. Anhang C.10)

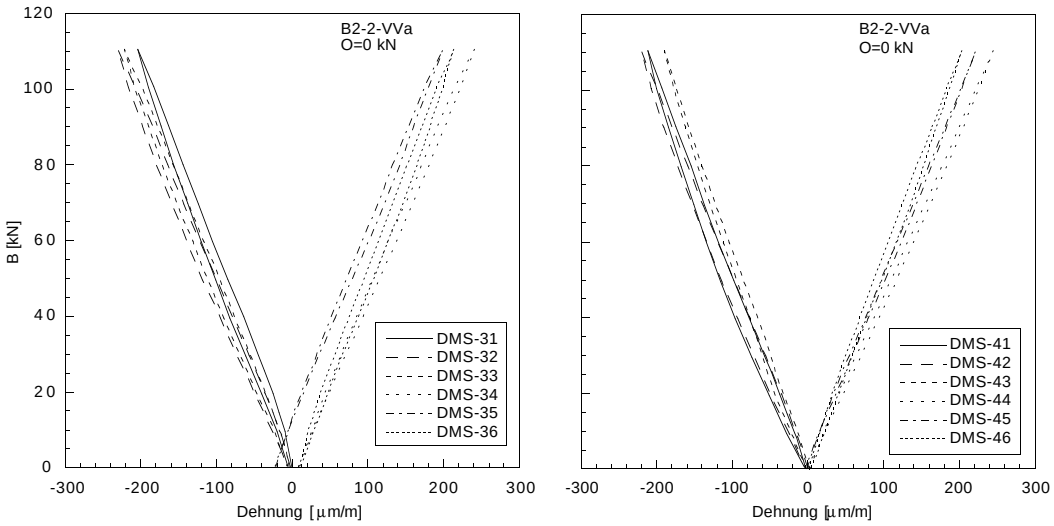


Abb. 5.29 Dehnungen der Schnitte 3 (vgl. Anhang C.10)

Bemerkung: ΔS-1 hat irreversible Verschiebung (vgl. Anhang C.10)

B2-2-VVb (Vorversuch kalt) l=2.20 m, a=740 mm, s=80 mm, P20, UF, ZL

Tab. 5.10 Versuchsresultate B2-2-VVb

B [kN]	O [kN]	V_B=V_C [kN]	M_{Tr} [kNm]	ΔV_{Tr} [mm]
0	60	38	56	1.7
0	80	51	75	1.8

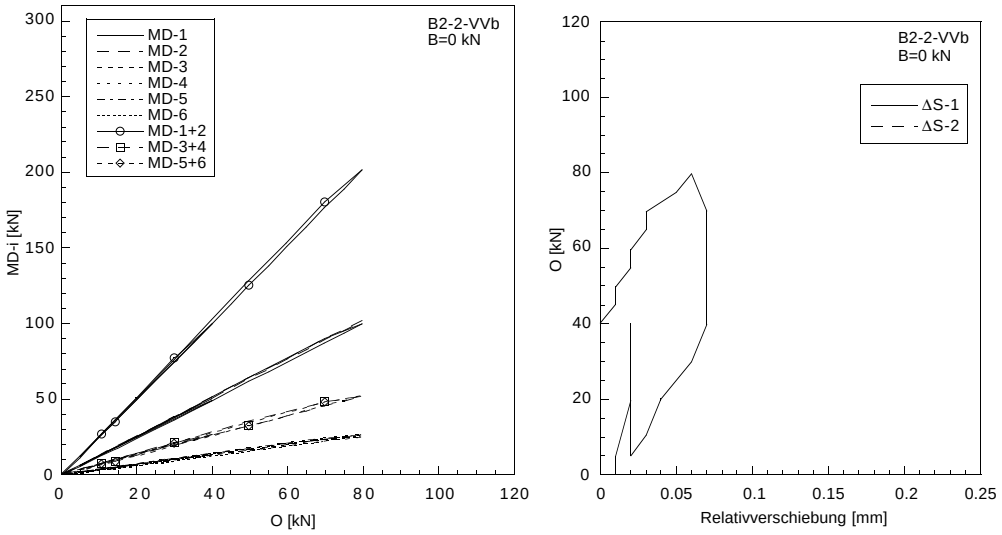


Abb. 5.30 Pressen-, Auflagerkräfte und Relativverschiebungen (vgl. Anhang C.6 und C.10)

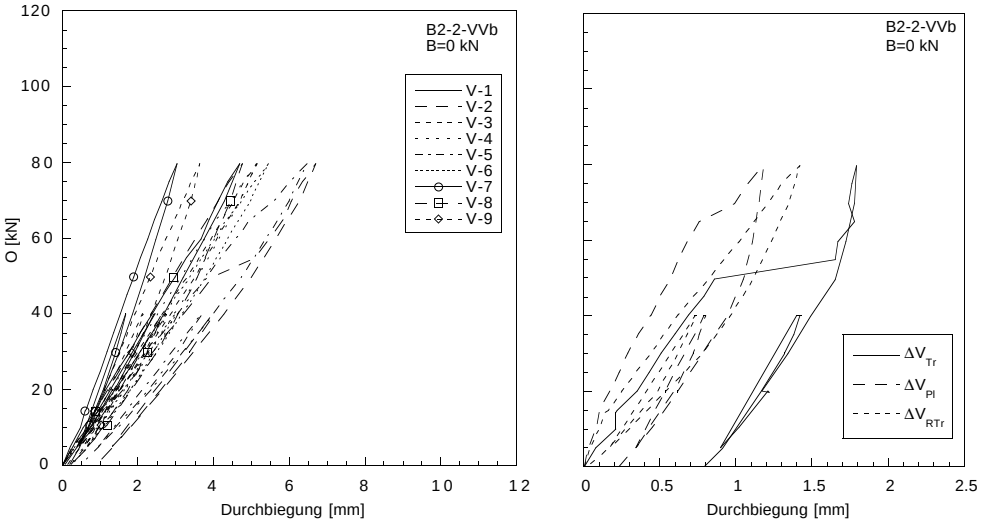


Abb. 5.31 Durchbiegungen (vgl. Anhang C.6)

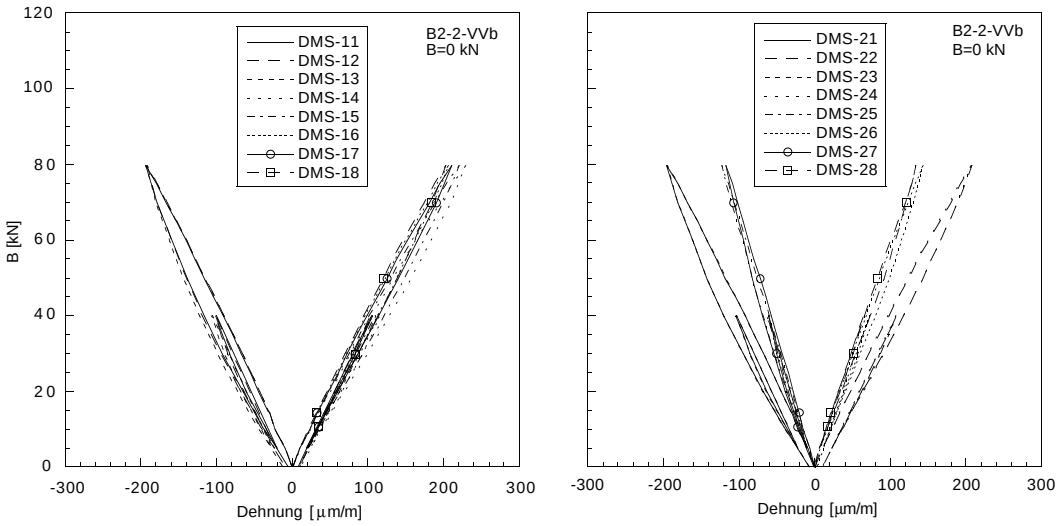


Abb. 5.32 Dehnungen der Schnitte 1 und 2 (vgl. Anhang C.10)

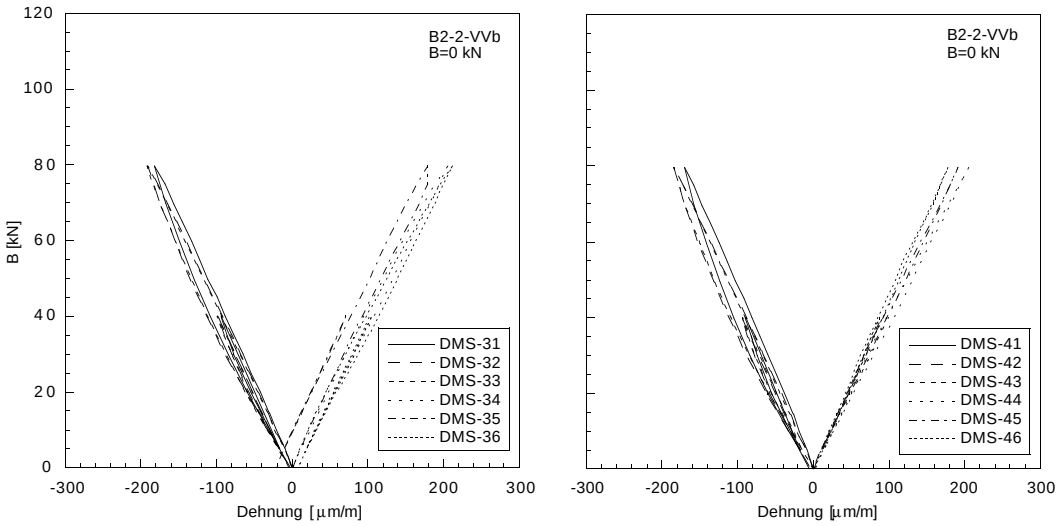


Abb. 5.33 Dehnungen der Schnitte 3 (vgl. Anhang C.10)

Bemerkung: keine

B2-2-VVc (Vorversuch kalt) l=2.20 m, a=740 mm, s=80 mm, P20, UF, ZL

Tab. 5.11 Versuchsresultate B2-2-VVc

B [kN]	O [kN]	V_B=V_C [kN]	M_{Tr} [kNm]	ΔV_{Tr} [mm]
60	60	37	101	2.6
60	70	43	110	2.8

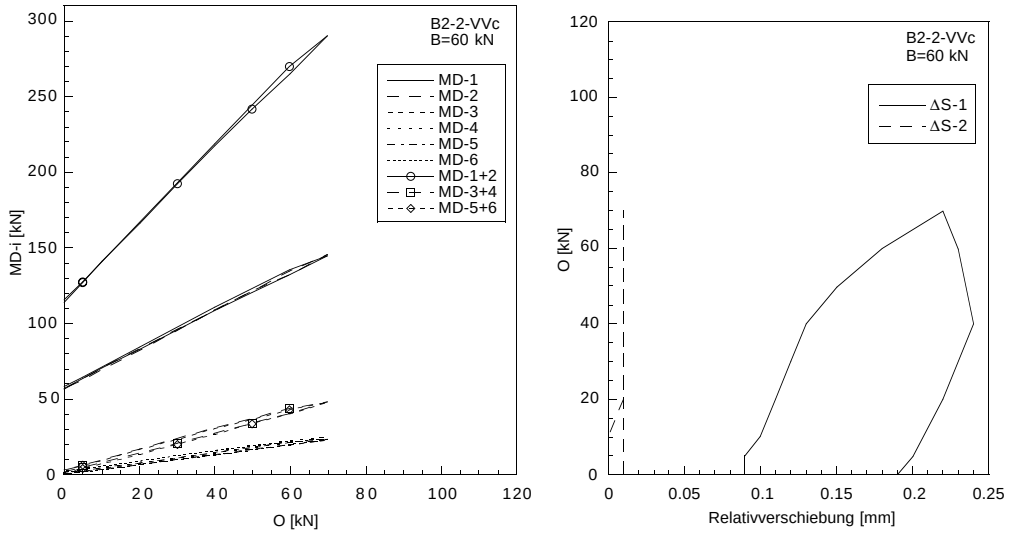


Abb. 5.34 Pressen-, Auflagerkräfte und Relativverschiebungen (vgl. Anhang C.6 und C.10)

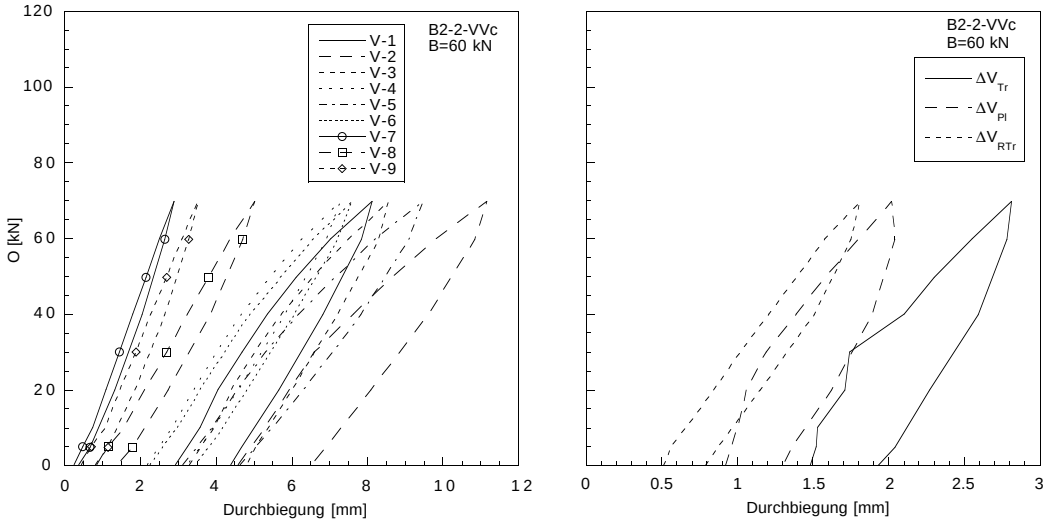


Abb. 5.35 Durchbiegungen (vgl. Anhang C.6)

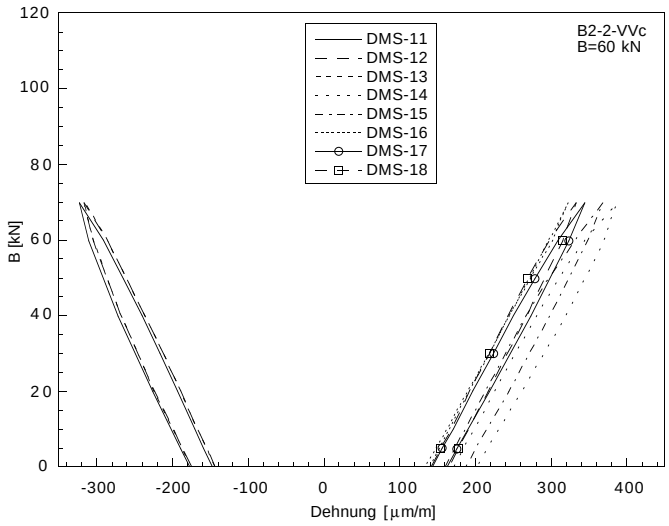


Abb. 5.36 Dehnungen des Schnittes 1 (vgl. Anhang C.10)

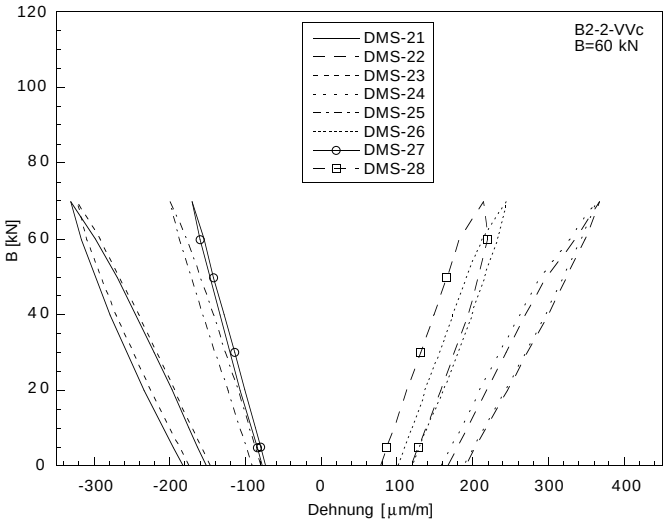


Abb. 5.37 Dehnungen der Schnitte 2 (vgl. Anhang C.10)

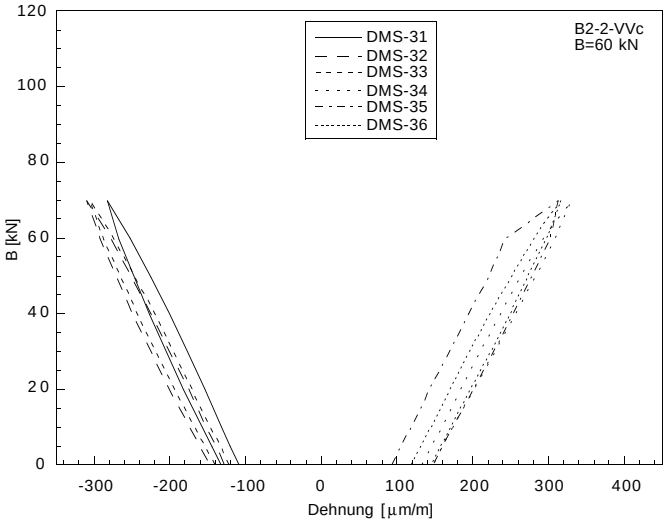


Abb. 5.38 Dehnungen des Schnittes 3a (vgl. Anhang C.10)

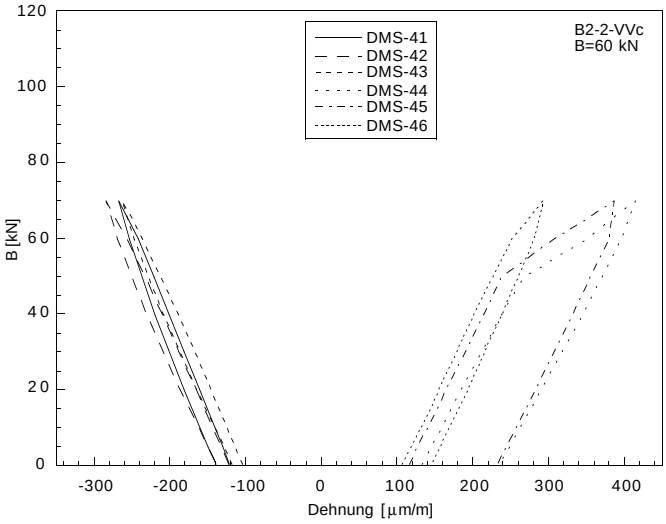


Abb. 5.39 Dehnungen des Schnittes 3b (vgl. Anhang C.10)

Bemerkung: ΔS-1 hat irreversible Verschiebung (vgl. Anhang C.10)

B2-2 (Brandversuch) l=2.20 m, a=740 mm, s=80 mm, P20, UF, ZL

Tab. 5.12 Versuchsresultate B2-2

t [min]	B [kN]	O [kN]	V_B=V_C [kN]	M_{Tr} [kNm]	ΔV_{Tr} [mm]	H3+H4 [mm]
0	59.7	59.8	38.2	103.7	2.2	-1.8
15	59.7	59.9	39.3	105.3	14.6	-4.1
30	59.5	60.1	38.9	104.6	25.8	-6.0

Tab. 5.12 Versuchsresultate B2-2

t [min]	B [kN]	O [kN]	V_B=V_C [kN]	M_{Tr} [kNm]	ΔV_{Tr} [mm]	H3+H4 [mm]
45	59.5	59.9	38.4	103.9	32.9	-6.8
49	59.4	59.7	38.2	103.6	34.7	-7.0

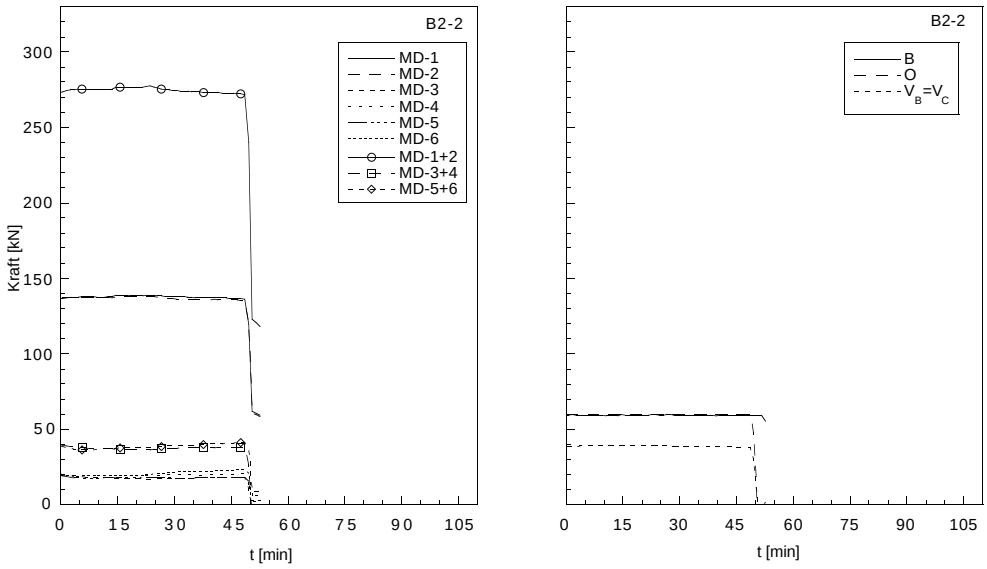


Abb. 5.40 Auflager-, Pressen- und Querkräfte (vgl. Anhang C.6 und Abb. 5.5)

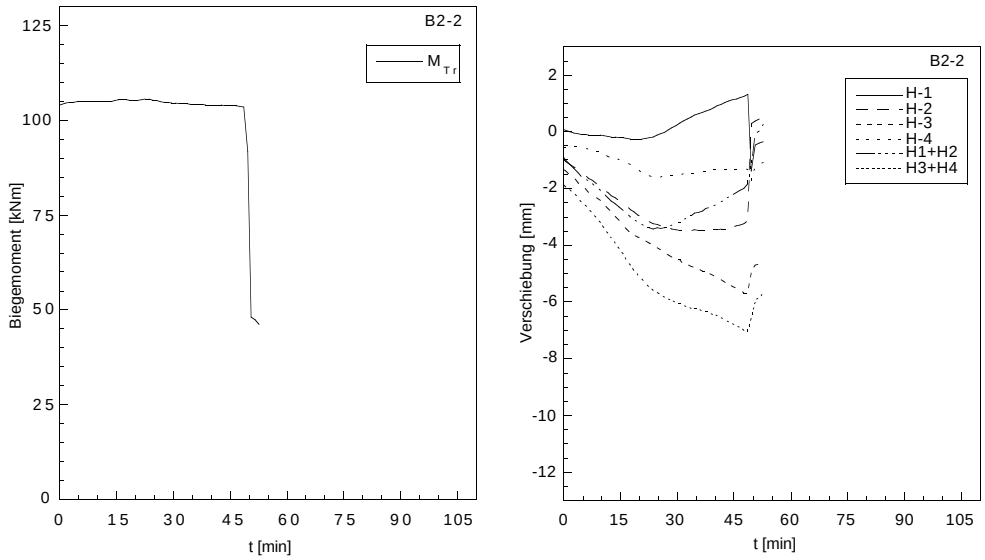


Abb. 5.41 Biegemoment und Horizontalverschiebungen (vgl. Anhang C.6)

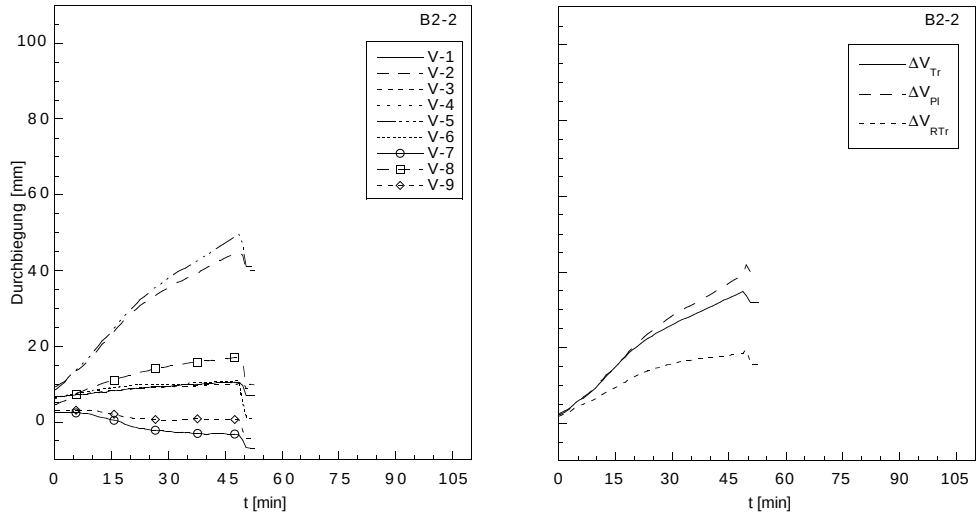


Abb. 5.42 Durchbiegungen (vgl. Anhang C.6)

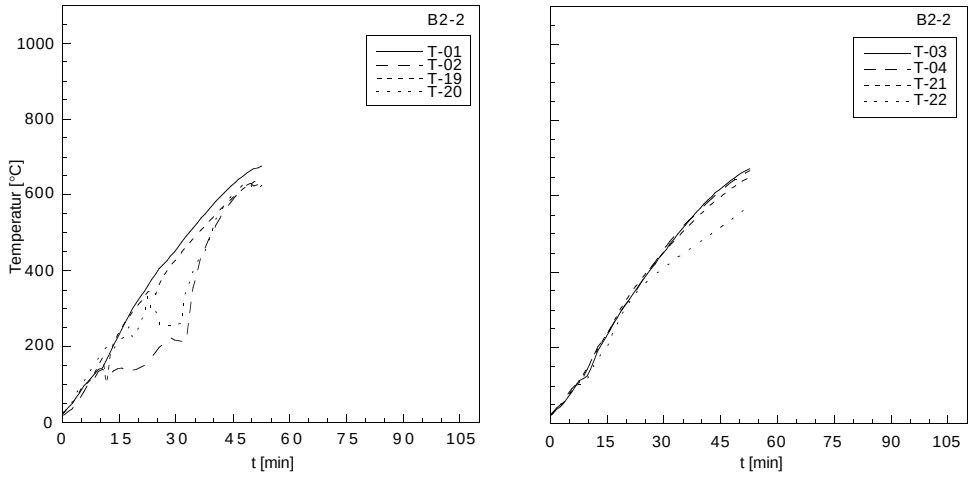


Abb. 5.43 Temperaturen am Unterflansch (vgl. Anhang C.9)

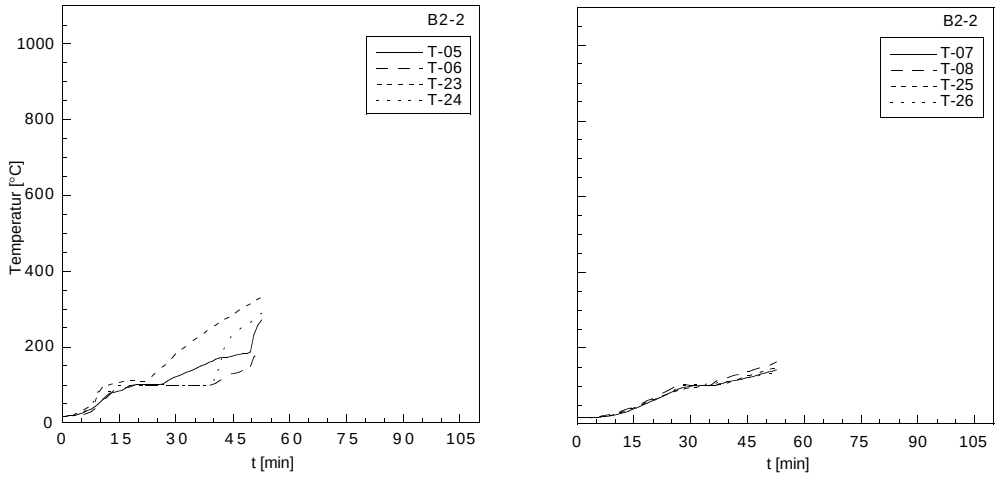


Abb. 5.44 Temperaturen an den Litzen und an der Trägerarmierung (vgl. Anhang C.9)

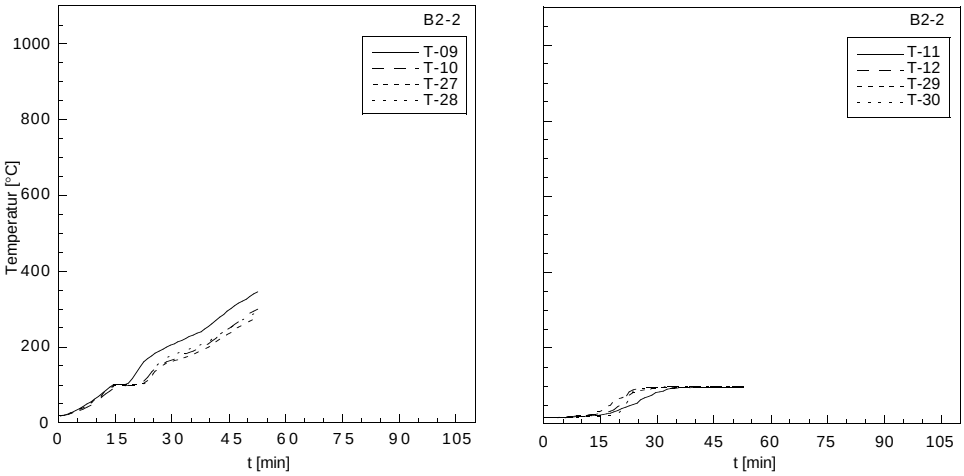


Abb. 5.45 Temperaturen an den Kopfbolzendübeln und am Trägersteg (vgl. Anhang C.9)

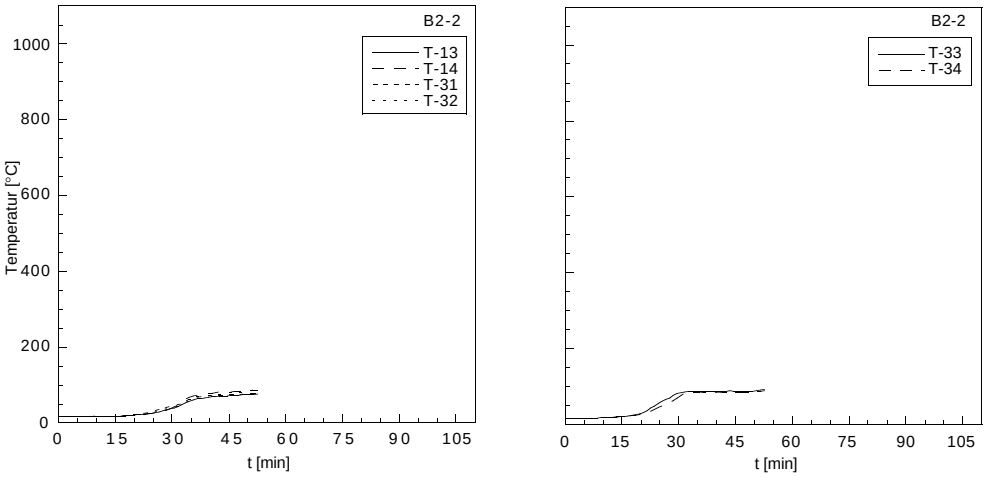


Abb. 5.46 Temperaturen am Oberflansch auf der Unterseite und an der Oberseite (vgl. Anhang C.6 und C.7)

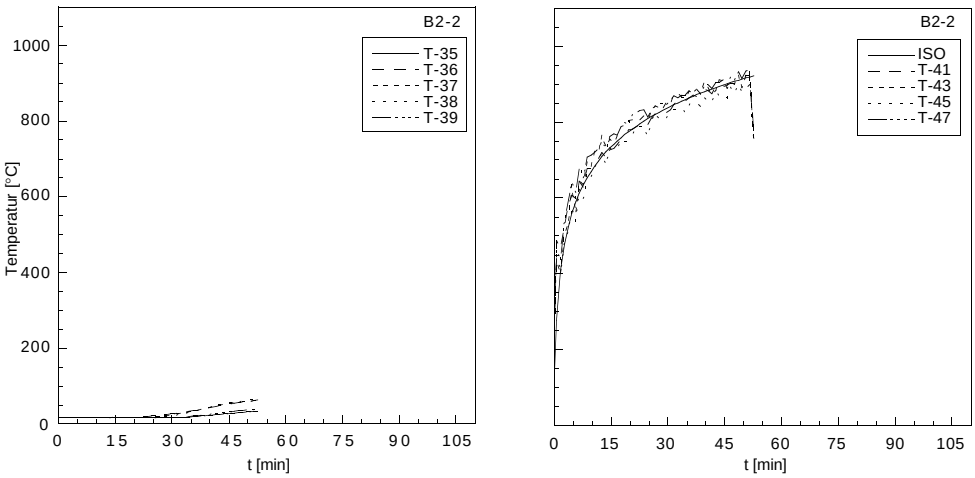


Abb. 5.47 Temperaturen an der Betonoberfläche und im Ofen (vgl. Anhang C.7 und B.3)

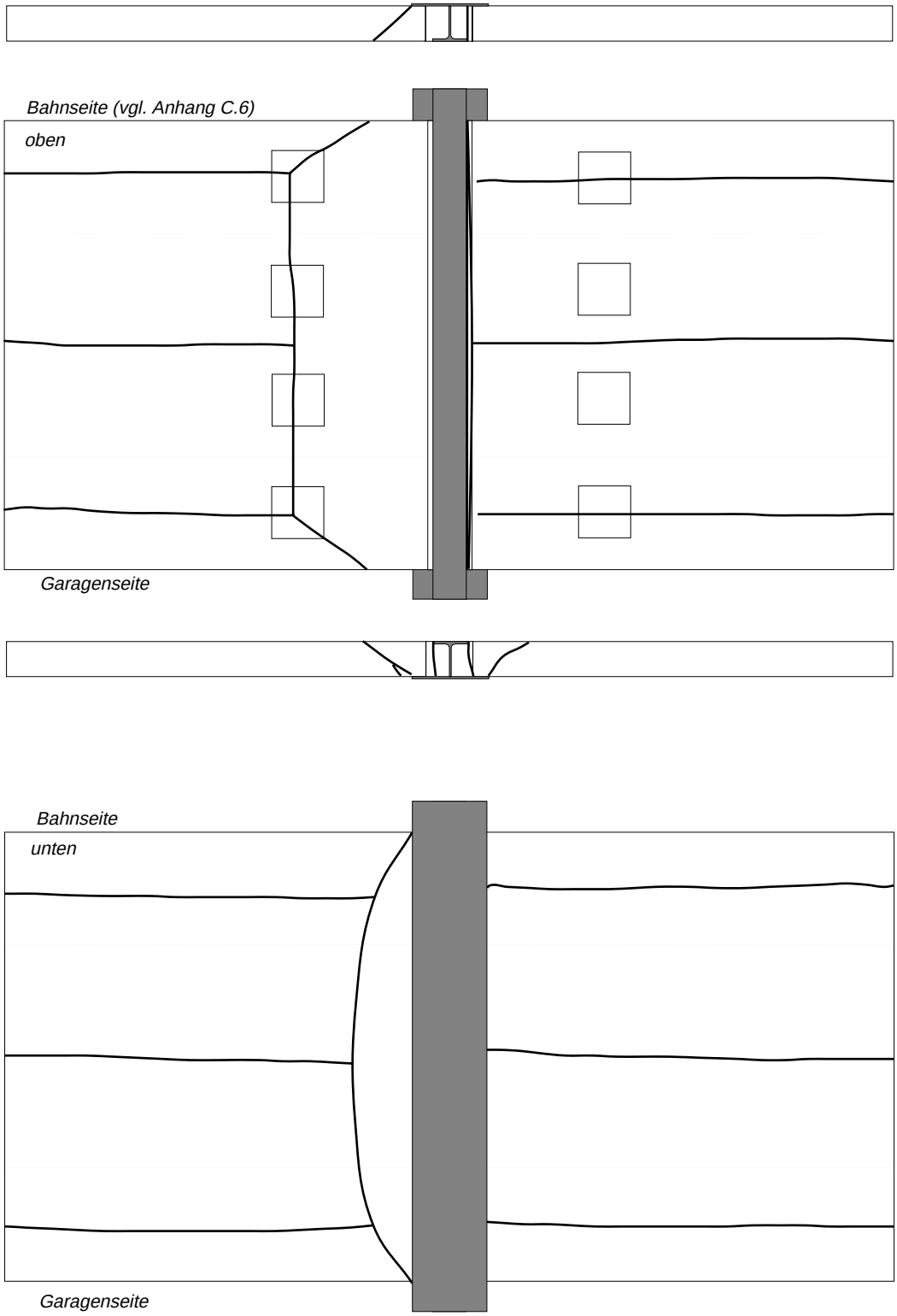


Abb. 5.48 Bruchbild des Brandversuchs B2-2

Abb. 5.49 Schubriss in der Hohlplatte beim Trägerauflager nach 30 min (B2-2)

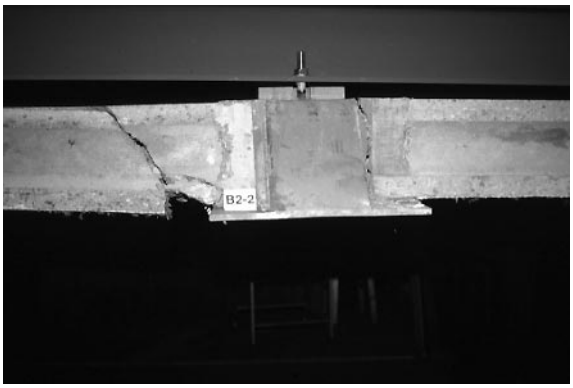


Abb. 5.50 Schubbruch in der Hohlplatte beim Trägerauflager auf der Garagenseite nach dem Brandversuch (B2-2)

Abb. 5.51 Schubriss von unten in der Hohlplatte beim Trägerauflager nach dem Brandversuch (B2-2)

Bemerkung: Wasseraustritt schon nach 10 min
Bruchart A, t_u=49 min
Litzenschlupf nach dem Brandversuche ca. 6 mm

Tab. 5.13 Versuchsresultate B2-3-VVa

B [kN]	O [kN]	V_B=V_C [kN]	M_{Tr} [kNm]	ΔV_{Tr} [mm]
60	0	-6	39	1.0
110	0	-2	84	1.8

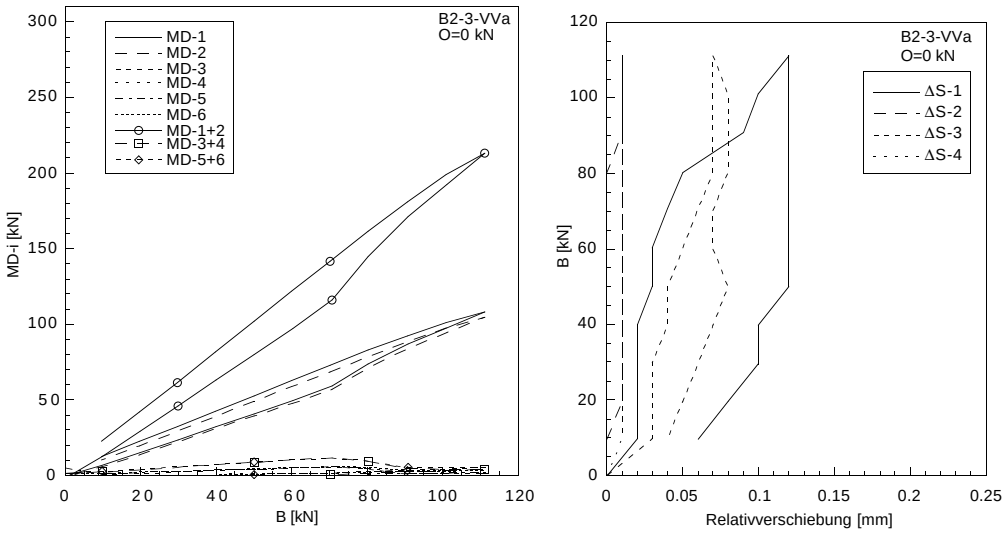


Abb. 5.52 Pressen-, Auflagerkräfte und Relativverschiebungen (vgl. Anhang C.6 und C.10)

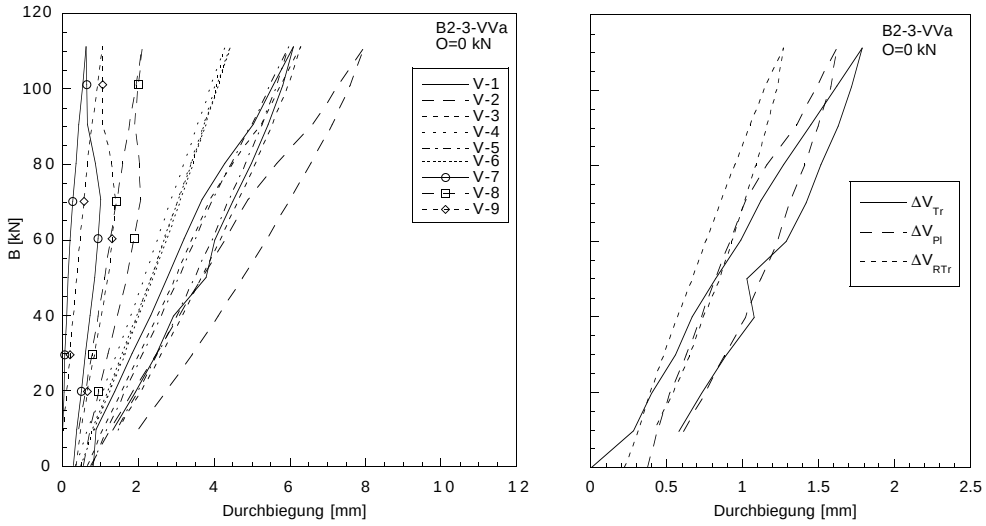


Abb. 5.53 Durchbiegungen (vgl. Anhang C.6)

Bemerkung: ΔS-1 hat irreversible Verschiebung (vgl. Anhang C.10)

Tab. 5.14 Versuchsresultate B2-3-VVb

B [kN]	O [kN]	V_B=V_C [kN]	M_{Tr} [kNm]	ΔV_{Tr} [mm]
0	60	39	58	0.8
0	80	52	78	1.2

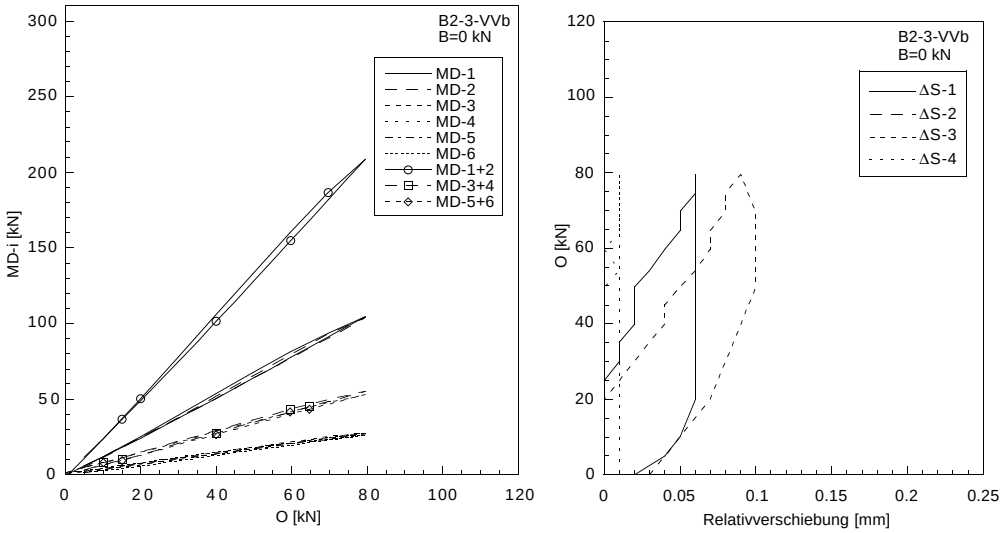


Abb. 5.54 Pressen-, Auflagerkräfte und Relativverschiebungen (vgl. Anhang C.6 und C.10)

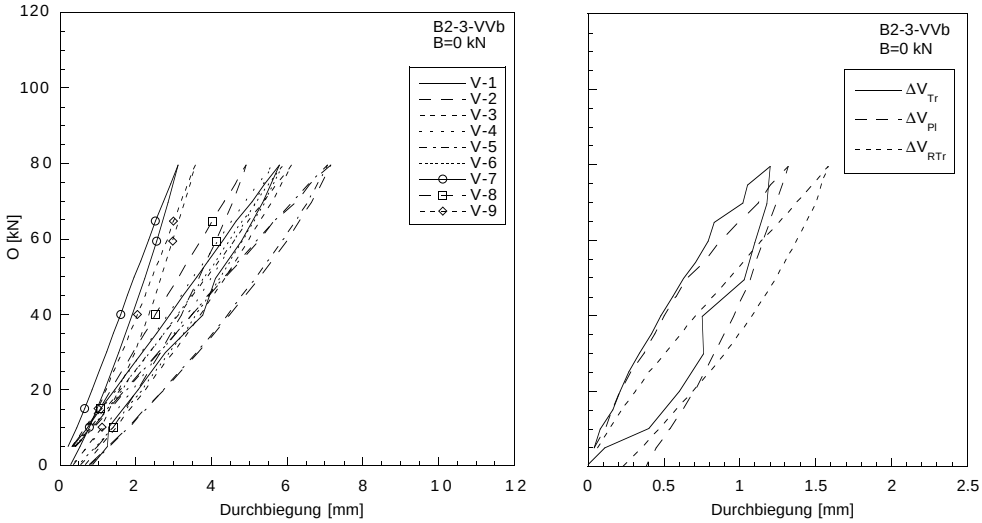


Abb. 5.55 Durchbiegungen (vgl. Anhang C.6)

Bemerkung: keine

Tab. 5.15 Versuchsresultate B2-3-VVc

B [kN]	O [kN]	V_B=V_C [kN]	M_{Tr} [kNm]	ΔV_{Tr} [mm]
60	60	40	106	2.1
60	70	46	115	2.3

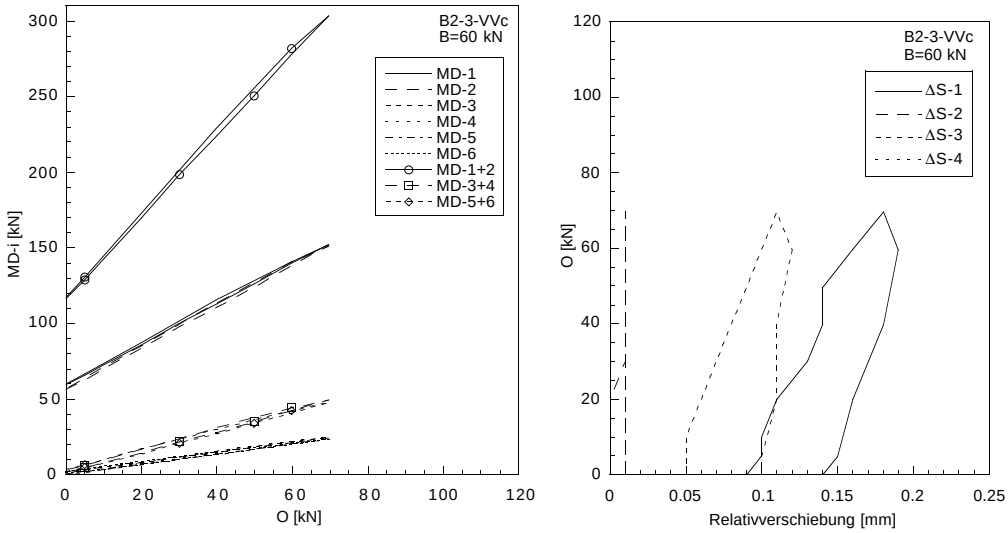


Abb. 5.56 Pressen-, Auflagerkräfte und Relativverschiebungen (vgl. Anhang C.6 und C.10)

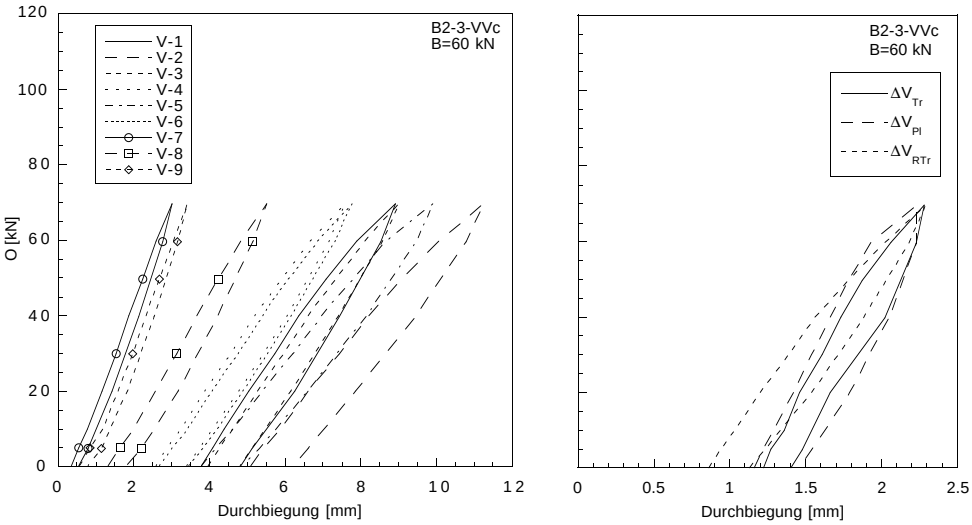


Abb. 5.57 Durchbiegungen (vgl. Anhang C.6)

Bemerkung: ΔS-1und ΔS-3 haben irreversible Verschiebungen (vgl. Anhang C.10)

Tab. 5.16 Versuchsresultate B2-3

t [min]	B [kN]	O [kN]	$V_B=V_C$ [kN]	M_{Tr} [kNm]	Δv_{Tr} [mm]	H3+H4 [mm]
0	60.3	60.0	39.4	106.0	2.1	-1.9
15	60.1	59.8	49.4	120.7	15.0	-4.5
30	60.2	59.8	49.2	120.4	27.8	-7.0
45	60.3	59.7	46.9	117.1	36.9	-8.3
60	60.3	59.7	45.8	115.5	41.9	-9.1
75	60.2	59.8	44.0	112.7	50.0	-10.7

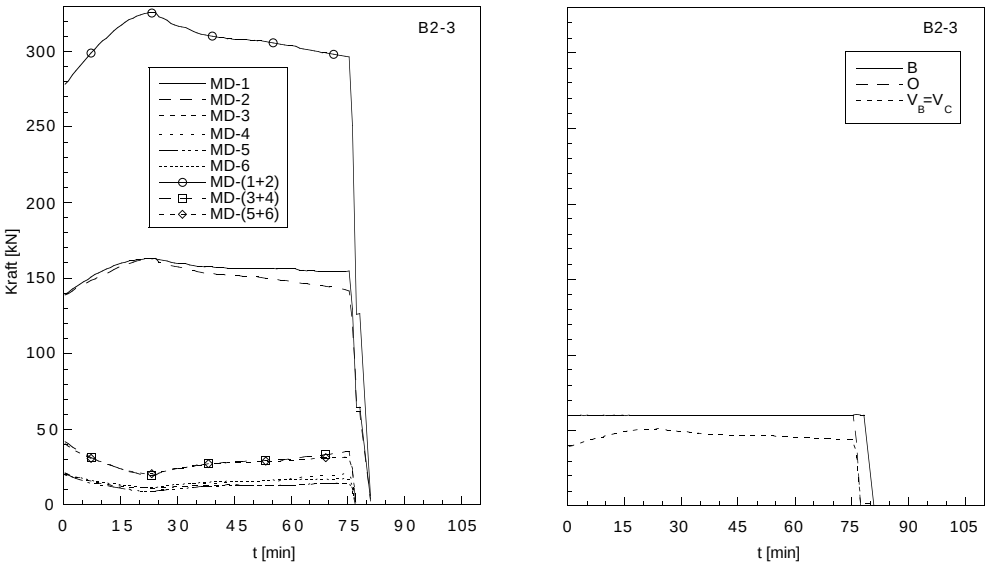


Abb. 5.58 Auflager-, Pressen- und Querkräfte (vgl. Anhang C.6 und Abb. 5.5)

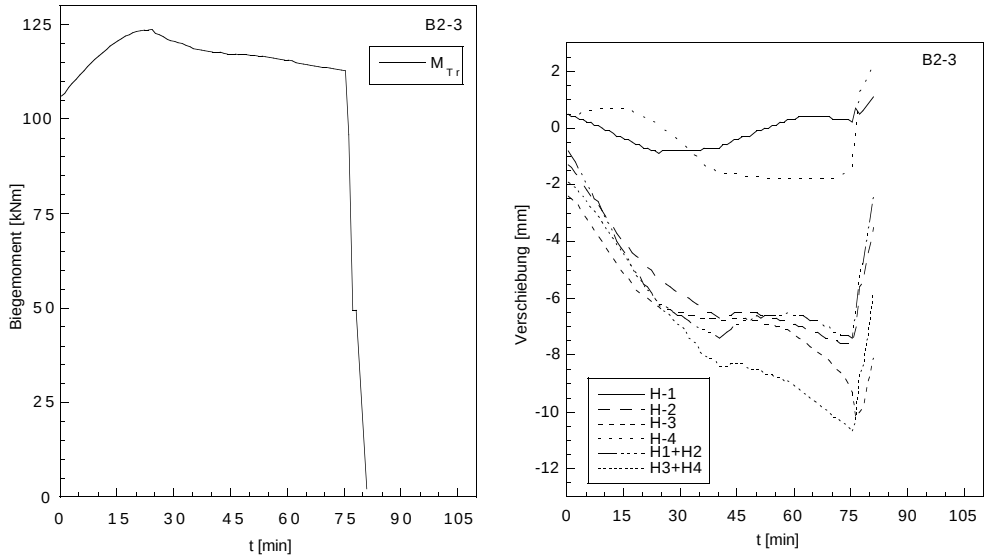


Abb. 5.59 Biegemoment und Horizontalverschiebungen (vgl. Anhang C.6)

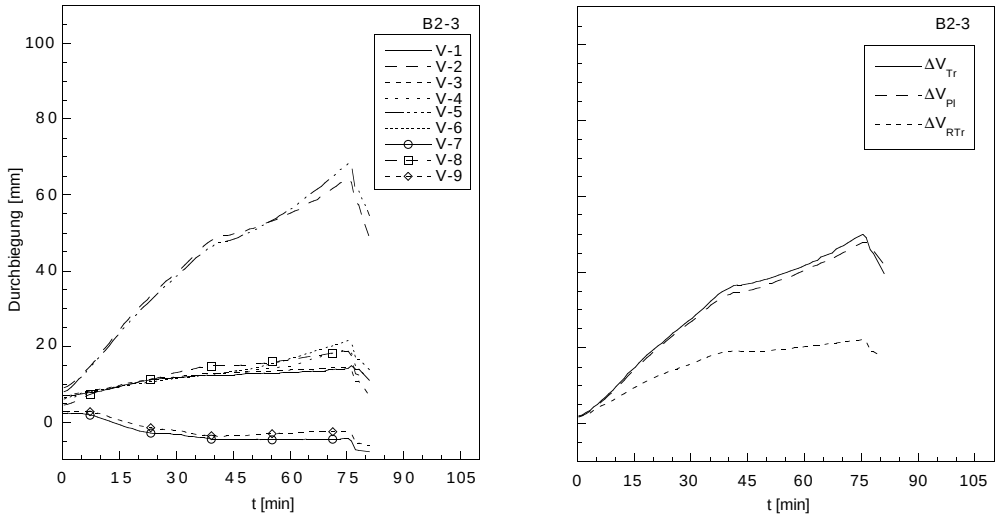


Abb. 5.60 Durchbiegungen (vgl. Anhang C.6)

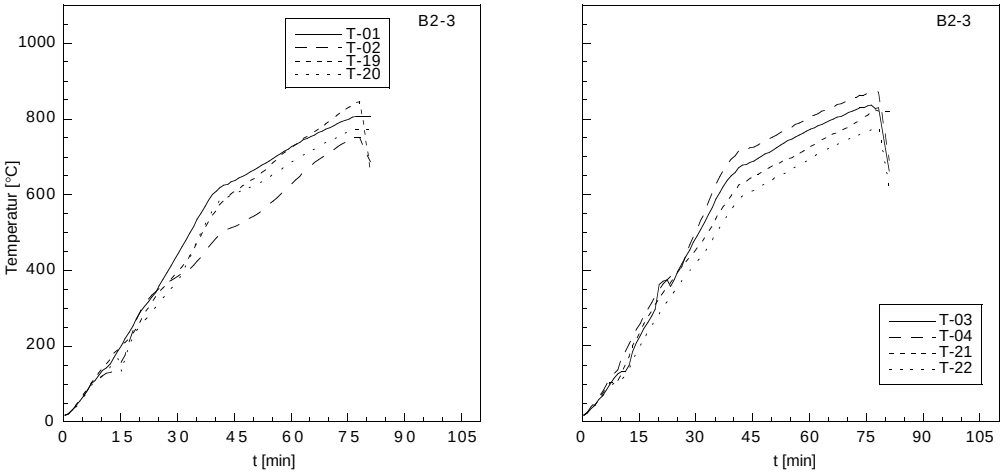


Abb. 5.61 Temperaturen am Unterflansch (vgl. Anhang C.9)

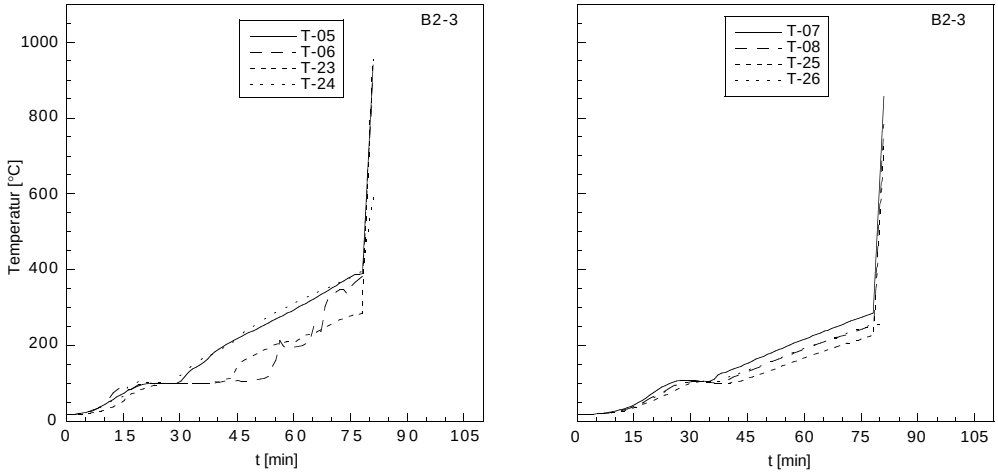


Abb. 5.62 Temperaturen an den Litzen und an der Trägerarmierung (vgl. Anhang C.9)

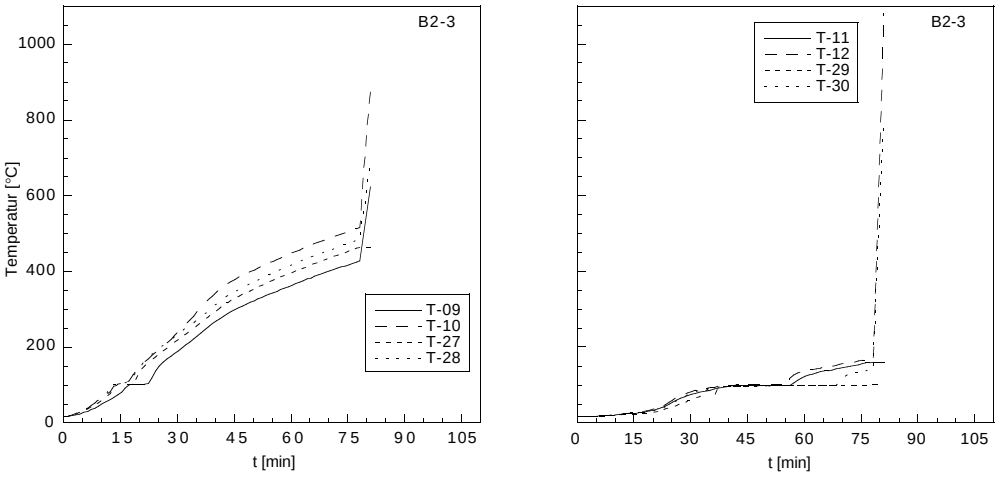


Abb. 5.63 Temperaturen an den Kopfbolzendübeln und am Trägersteg (vgl. Anhang C.9)

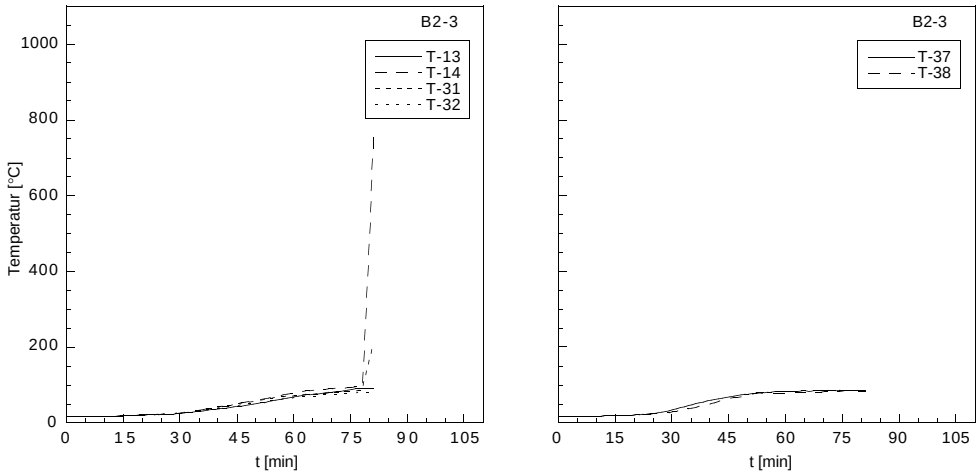


Abb. 5.64 Temperaturen am Oberflansch auf der Unterseite und an der Oberseite (vgl. Anhang C.9 und C.8)

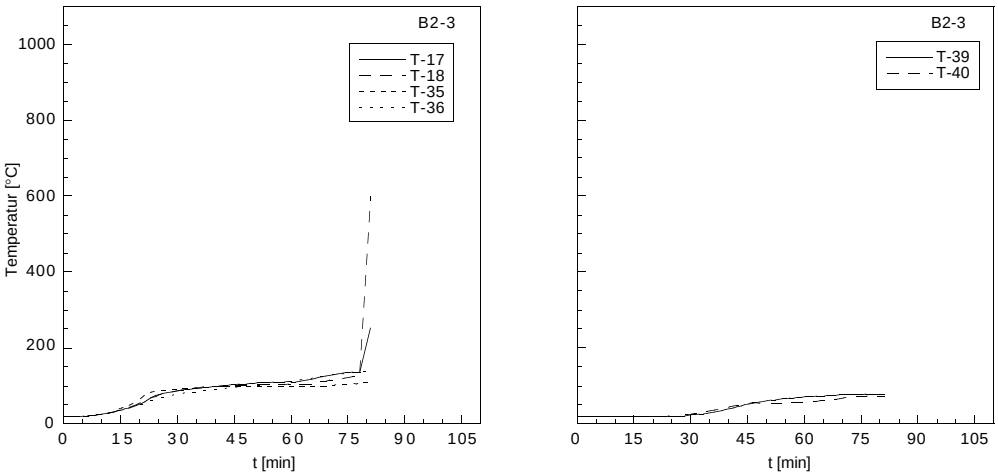


Abb. 5.65 Temperaturen an der Auflagerbewehrung und an der Betonoberfläche (vgl. Anhang C.9 und C.8)

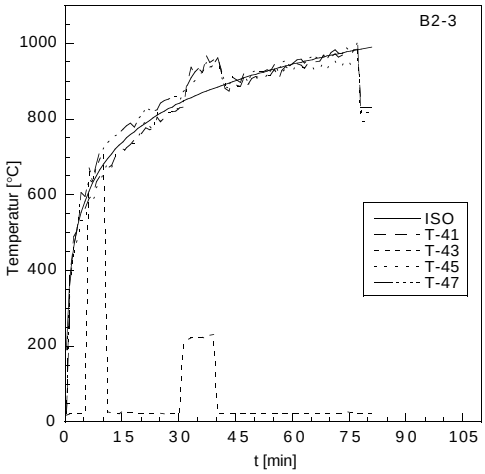


Abb. 5.66 Temperaturen im Ofen (vgl. Anhang B.3)

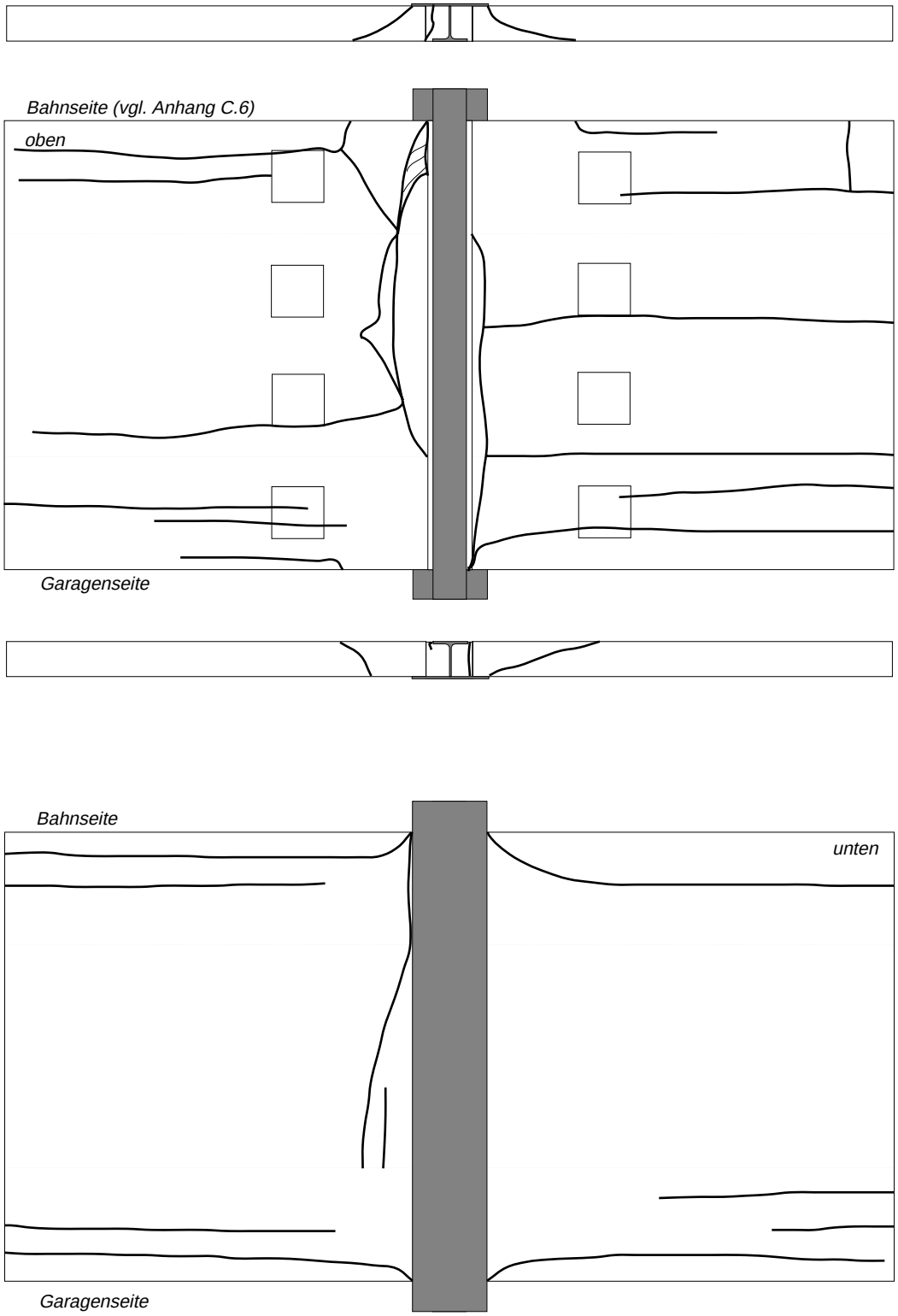


Abb. 5.67 Bruchbild des Brandversuchs B2-3

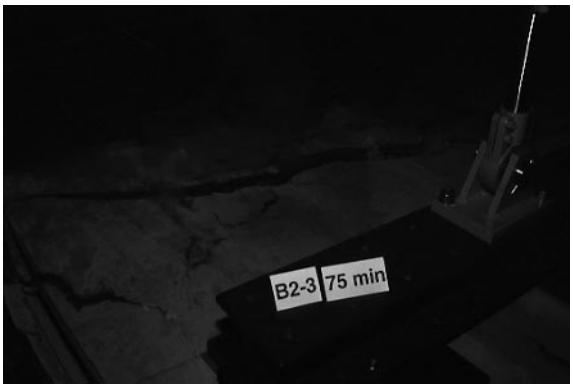


Abb. 5.68 Durchstanzen der Ecke (P) (B2-3)

Abb. 5.69 Freigelegte Armierung im Auflagerbereich (B2-3)

Bemerkung: Wasseraustritt nach 30 min zwischen Unterflansch und Betonplatten
Biegerisse unter der Presse nach 35 min
t_u=75 min, Risse in Ecke, Bruchart P
Litzenschlupf ca. 15 mm

Tab. 5.17 Versuchsresultate B2-4-VVa

B [kN]	O [kN]	V_B=V_C [kN]	M_{Tr} [kNm]	ΔV_{Tr} [mm]
60	0	-6	39	1.0
110	0	-8	74	1.7

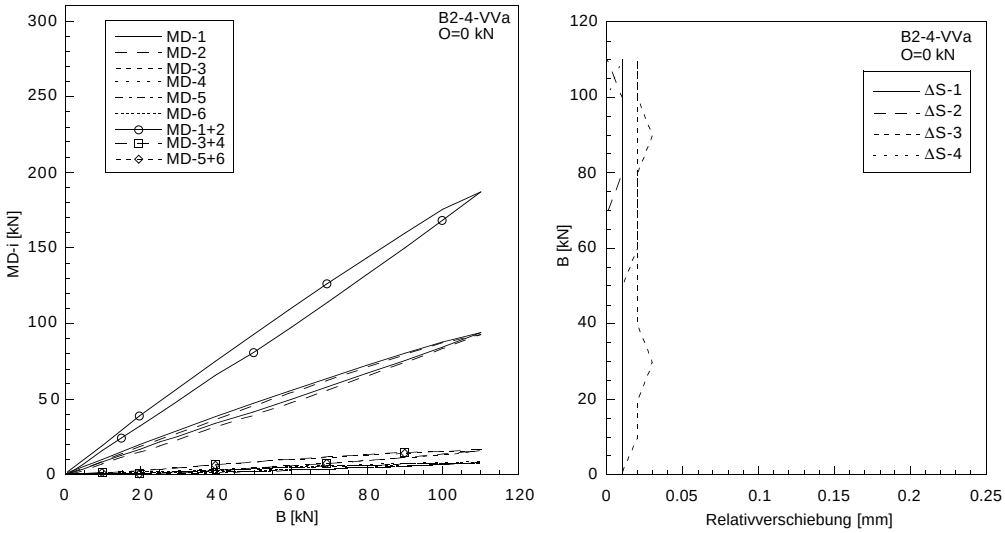


Abb. 5.70 Pressen-, Auflagerkräfte und Relativverschiebungen (vgl. Anhang C.6 und C.10)

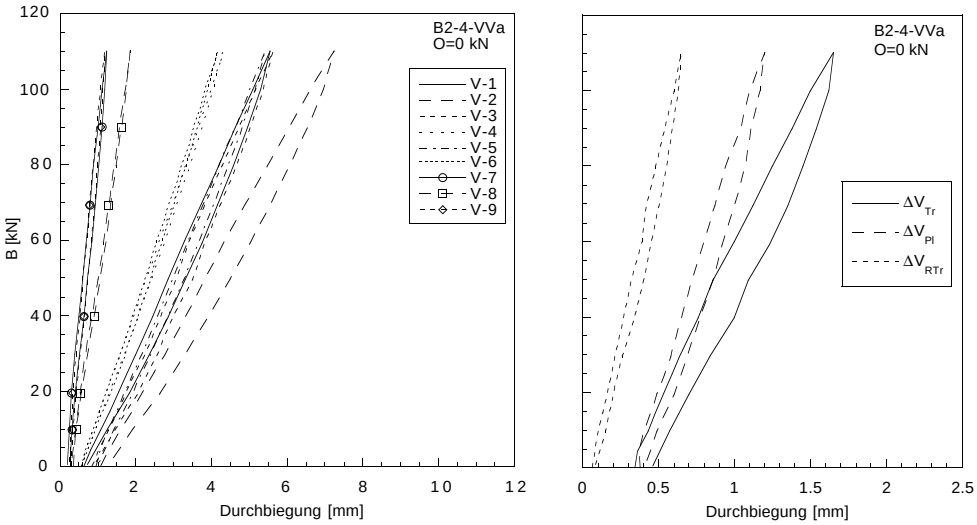


Abb. 5.71 Durchbiegungen (vgl. Anhang C.6)

Bemerkung: keine

Tab. 5.18 Versuchsresultate B2-4-VVb

B [kN]	O [kN]	V_B=V_C [kN]	M_{Tr} [kNm]	ΔV_{Tr} [mm]
0	60	38	57	0.9
0	80	52	77	1.2

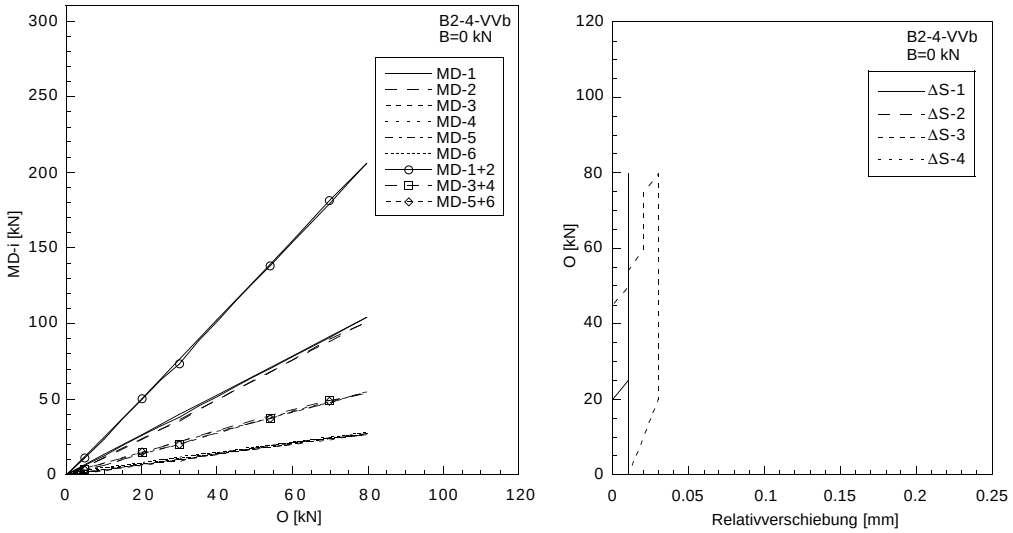


Abb. 5.72 Pressen-, Auflagerkräfte und Relativverschiebungen (vgl. Anhang C.6 und C.10)

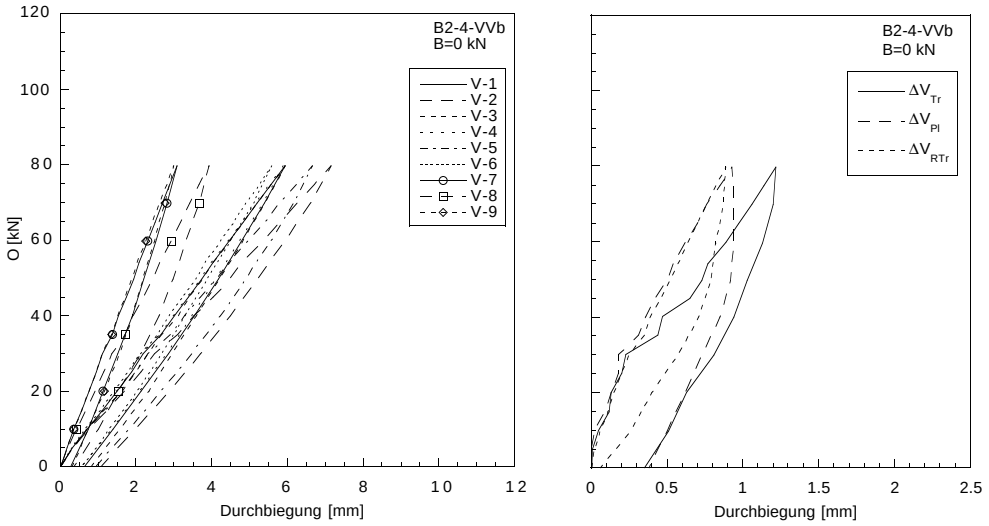


Abb. 5.73 Durchbiegungen (vgl. Anhang C.6)

Bemerkung: keine

Tab. 5.19 Versuchsresultate B2-4-VVc

B [kN]	O [kN]	V_B=V_C [kN]	M_{Tr} [kNm]	ΔV_{Tr} [mm]
60	60	35	100	1.9
60	70	43	111	2.2

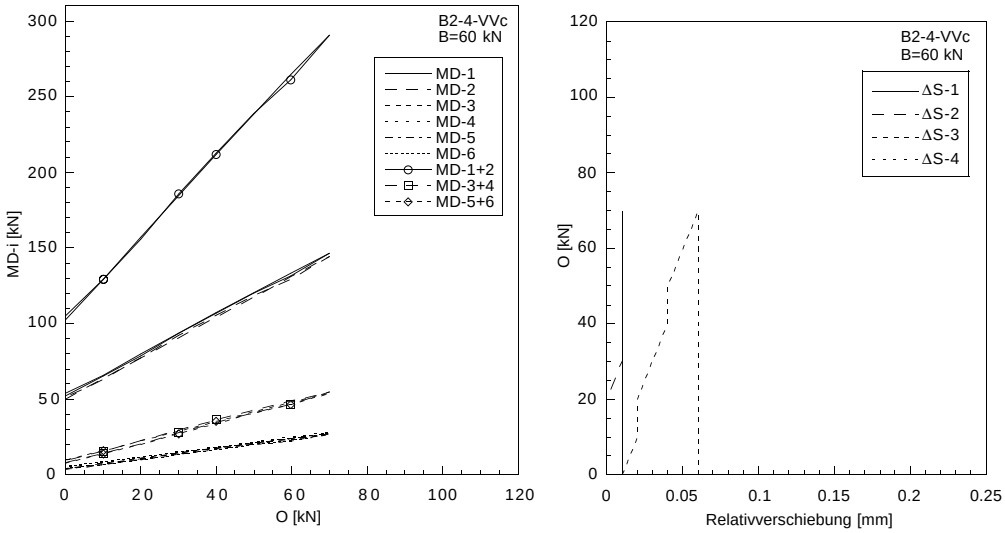


Abb. 5.74 Pressen-, Auflagerkräfte und Relativverschiebungen (vgl. Anhang C.6 und C.10)

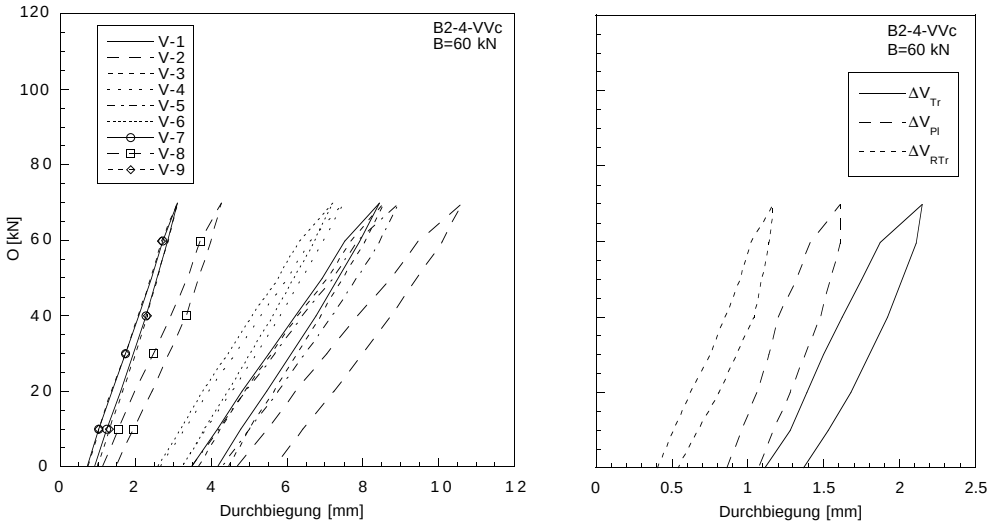


Abb. 5.75 Durchbiegungen (vgl. Anhang C.6)

Bemerkung: ΔS-3 hat irreversible Verschiebung (vgl. Anhang C.10)

Tab. 5.20 Versuchsresultate B2-1

t [min]	B [kN]	O [kN]	V_B=V_C [kN]	M_{Tr} [kNm]	ΔV_{Tr} [mm]	H3+H4 [mm]
0	61.8	60.7	35.2	100.9	2.0	-1.8
15	61.7	60.7	40.2	108.2	12.4	-4.0
30	61.7	60.7	39.9	107.8	24.5	-6.4
45	61.7	60.7	39.6	107.4	32.5	-7.7
60	61.7	60.7	38.4	105.5	40.3	-9.4
75	61.7	60.6	34.6	99.9	50.3	-12.5

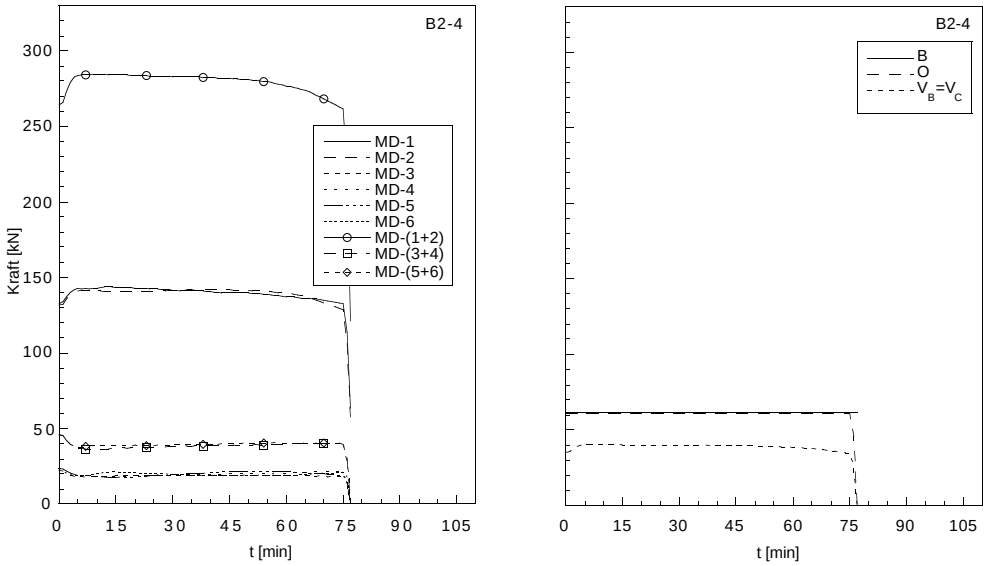


Abb. 5.76 Auflager-, Pressen- und Querkräfte (vgl. Anhang C.6 und Abb. 5.5)

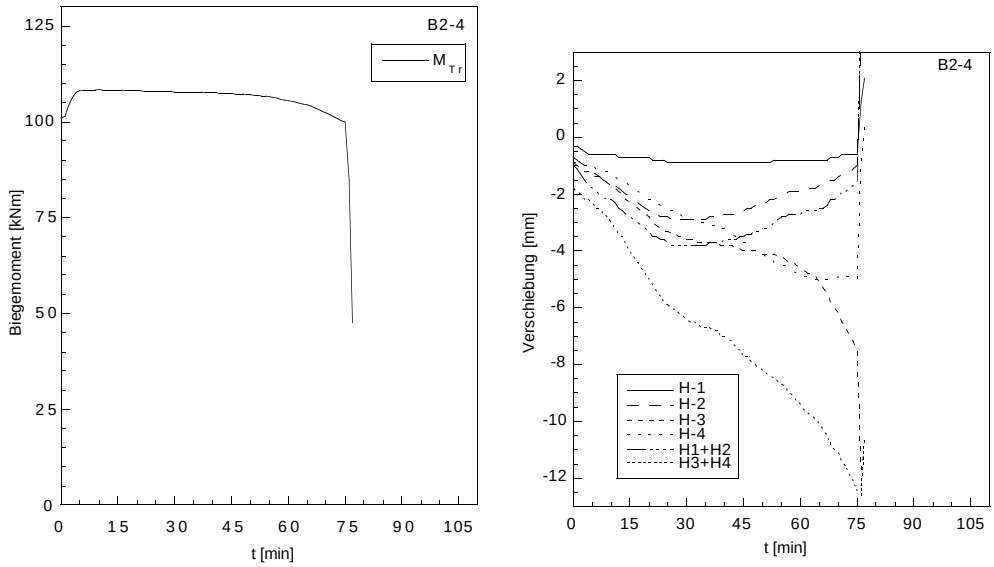


Abb. 5.77 Biegemoment und Horizontalverschiebungen (vgl. Anhang C.6)

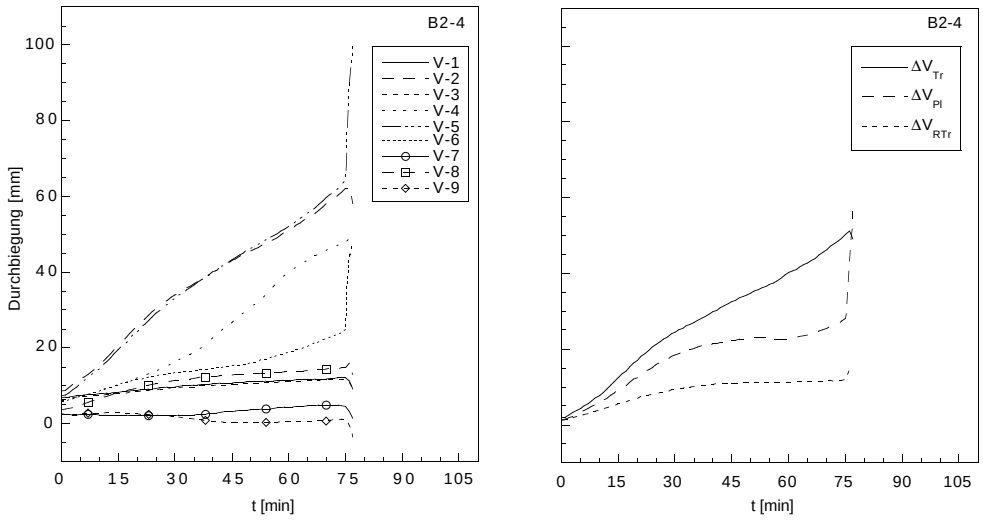


Abb. 5.78 Durchbiegungen (vgl. Anhang C.6)

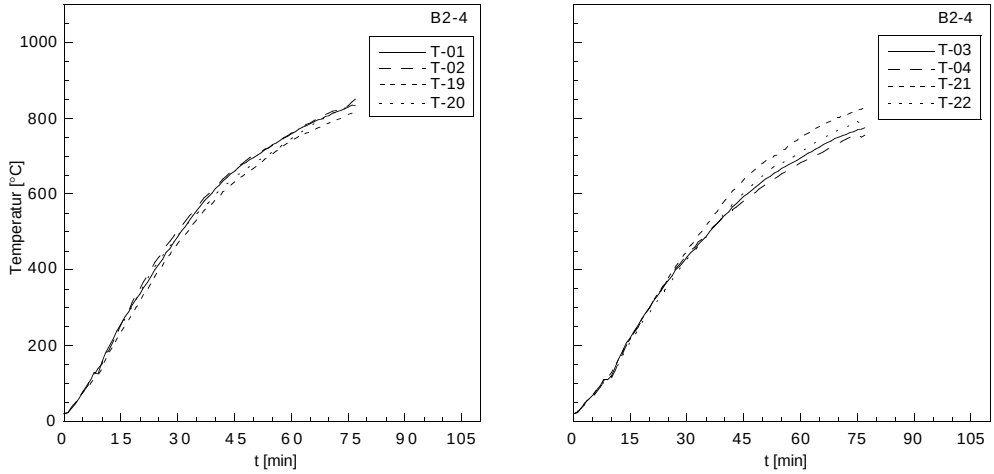


Abb. 5.79 Temperaturen am Unterflansch (vgl. Anhang C.9)

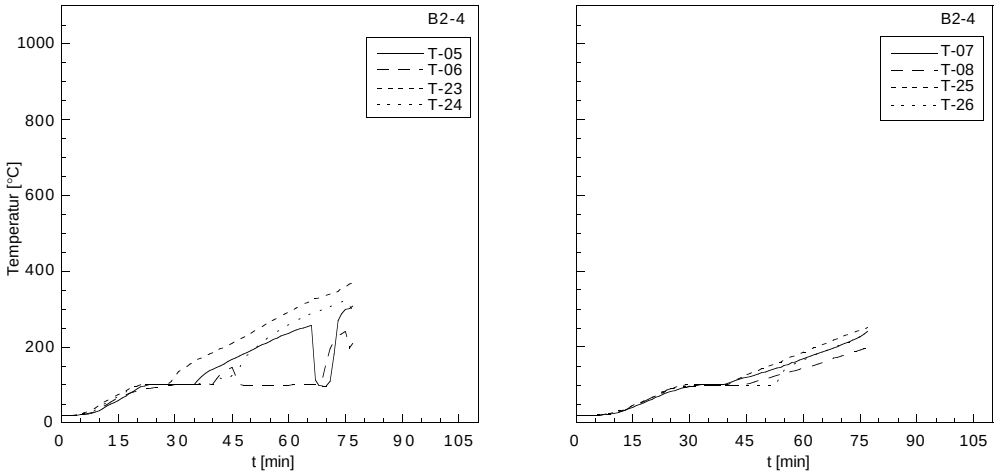


Abb. 5.80 Temperaturen an den Litzen und an der Trägerarmierung (vgl. Anhang C.9)

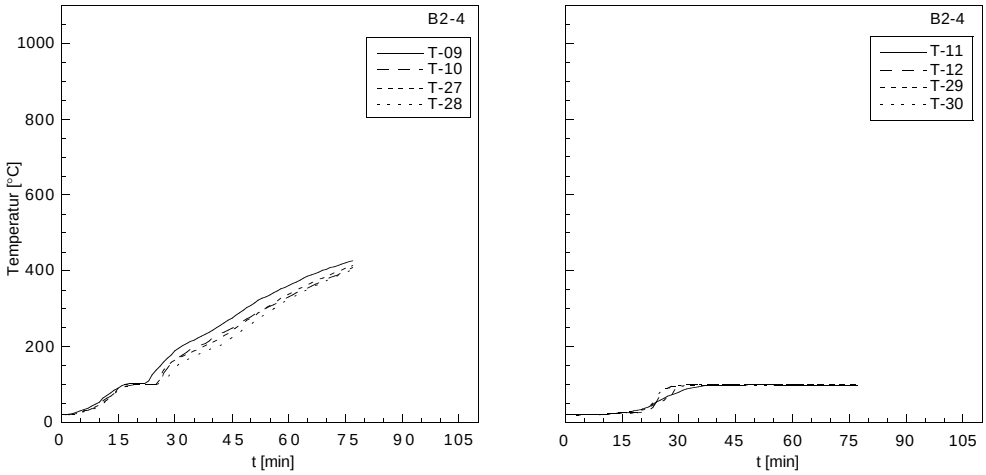


Abb. 5.81 Temperaturen an den Kopfbolzendübeln und am Trägersteg (vgl. Anhang C.9)

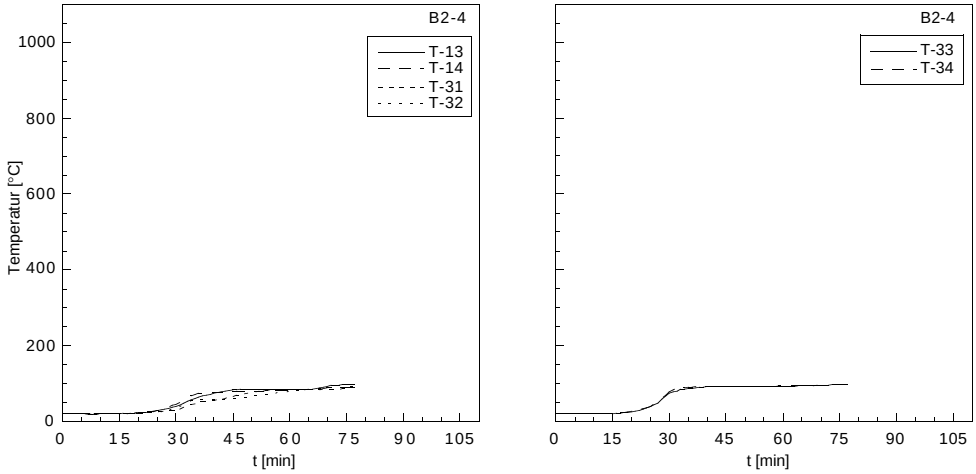


Abb. 5.82 Temperaturen am Oberflansch auf der Unterseite und an der Oberseite (vgl. Anhang C.6 und C.7)

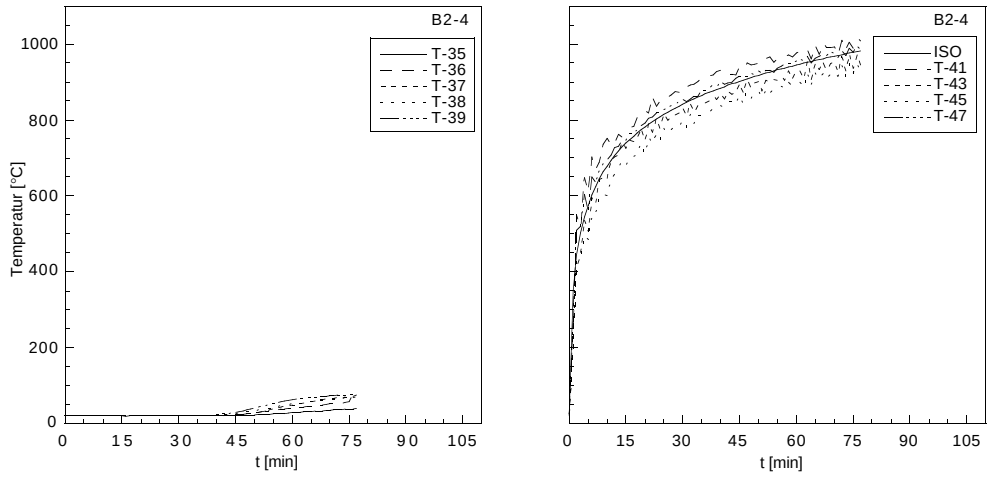


Abb. 5.83 Temperaturen an der Betonoberfläche und im Ofen (vgl. Anhang C.7 und B.3)

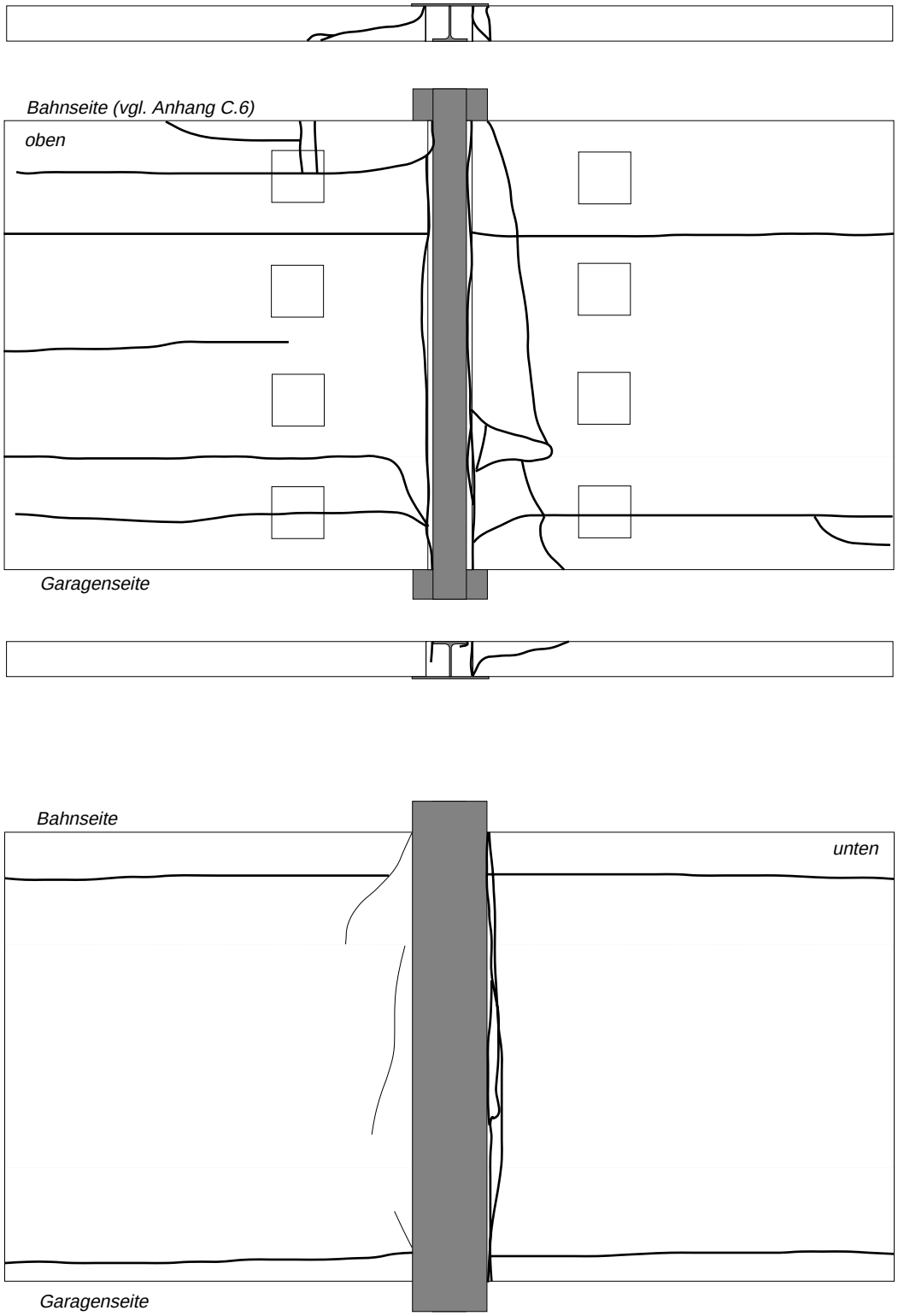


Abb. 5.84 Bruchbild des Brandversuchs B2-4

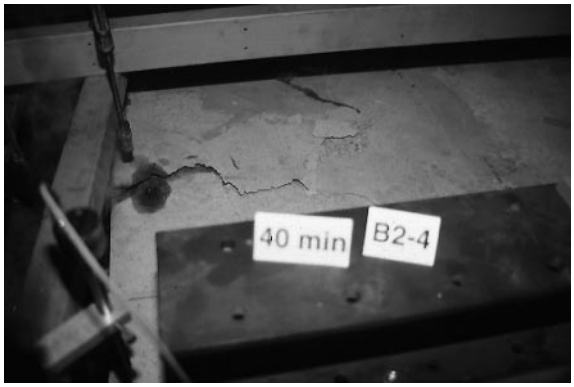


Abb. 5.85 Risse an der Oberseite im Eckauflagerbereich der Hohlplatten nach 40 min (B2-4)

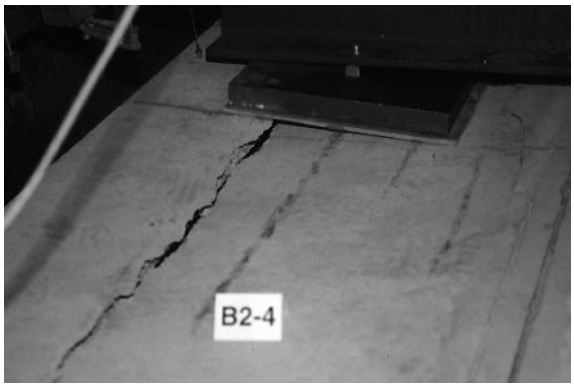


Abb. 5.86 Längsriss an der Oberseite einer Hohlplatte nach 70 min (B2-4)

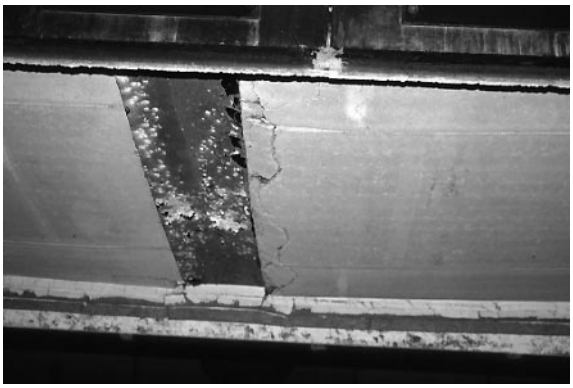


Abb. 5.87 Schubrisse von unten in der Hohlplatte beim Trägerauflager nach dem Brandversuch (B2-4)

Bemerkung: t_u=75 min, Bruchart A

Tab. 5.21 Versuchsresultate B3-1-VVN

N [kN]	P [kN]	V_N [kN]	V_P [kN]	f_N [mm]	f_P [mm]
60	0	40	3	1.6	-1.2
70	0	45	3	1.9	-1.5

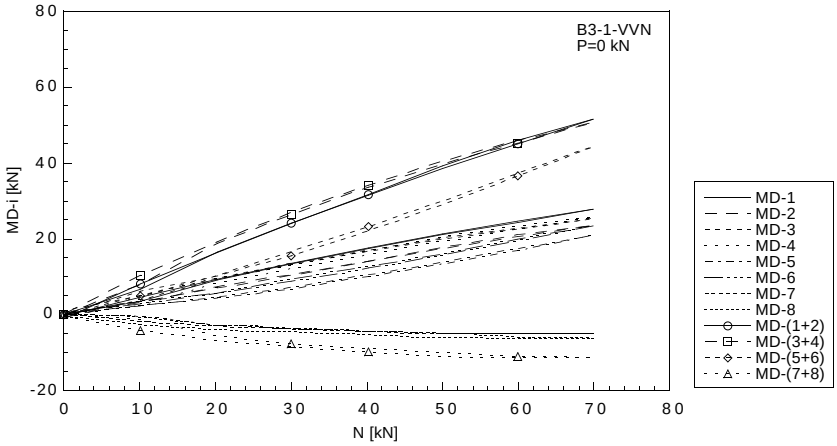


Abb. 5.88 Pressen- und Auflagerkräfte (vgl. Anhang C.11)

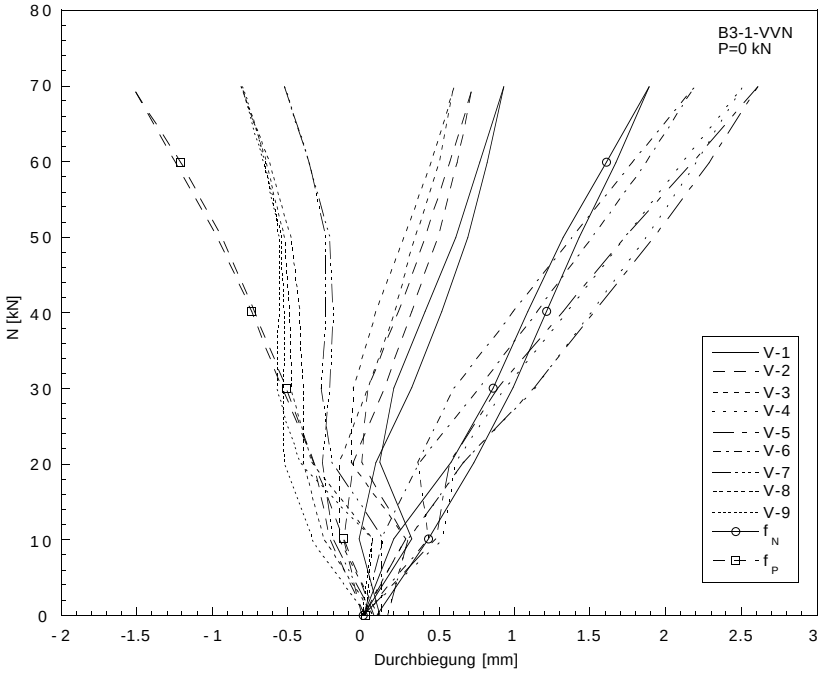


Abb. 5.89 Durchbiegungen (vgl. Anhang C.11)

Bemerkung: Negative Durchbiegung auf der Seite von P wegen leichtem Kippen des Mittelträgers (einseitige Belastung)

Tab. 5.22 Versuchsresultate B3-1-VVP

N [kN]	P [kN]	V_N [kN]	V_P [kN]	f_N [mm]	f_P [mm]
0	60	3	41	-1.2	1.6
0	70	3	47	-1.4	1.9

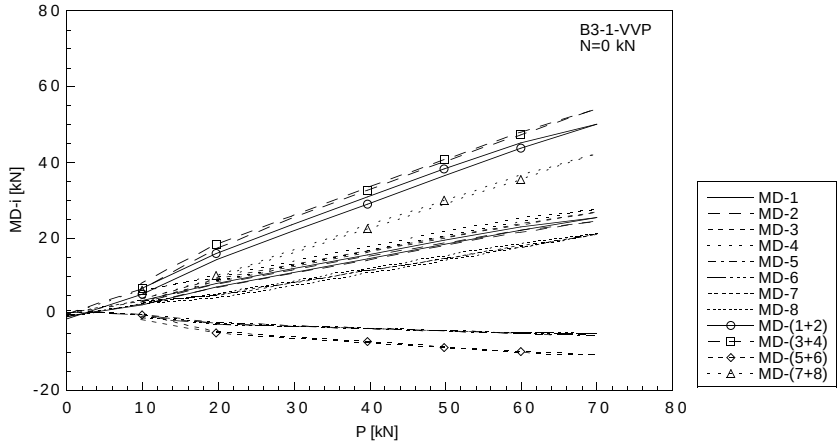


Abb. 5.90 Pressen- und Auflagerkräfte (vgl. Anhang C.11)

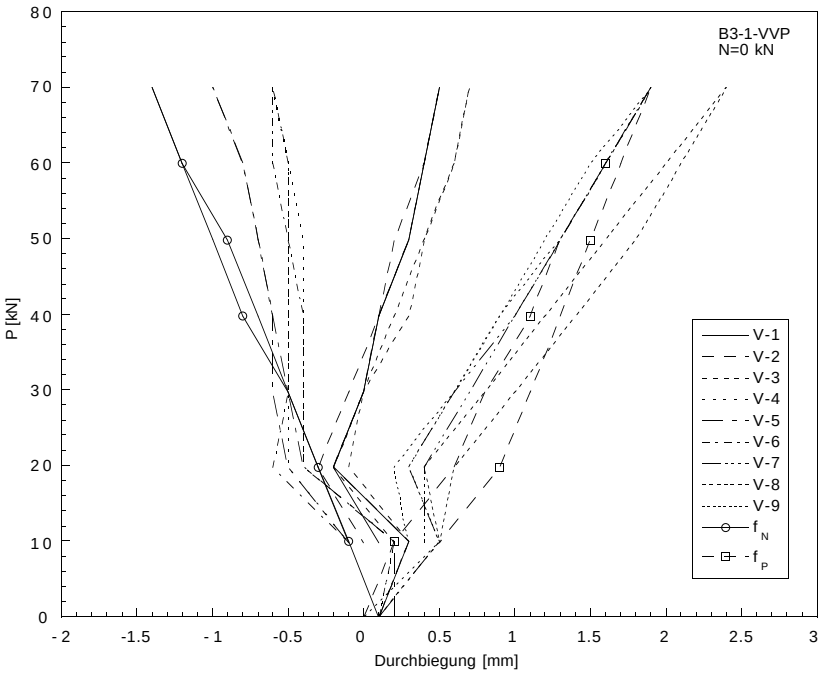


Abb. 5.91 Durchbiegungen (vgl. Anhang C.11)

Bemerkung: Negative Durchbiegung auf der Seite von N wegen leichtem Kippen des Mittelträgers (einseitige Belastung)

Tab. 5.23 Versuchsresultate B3-1-VVPN

N [kN]	P [kN]	V_N [kN]	V_P [kN]	f_N [mm]	f_P [mm]
60	60	34	34	2.1	1.9

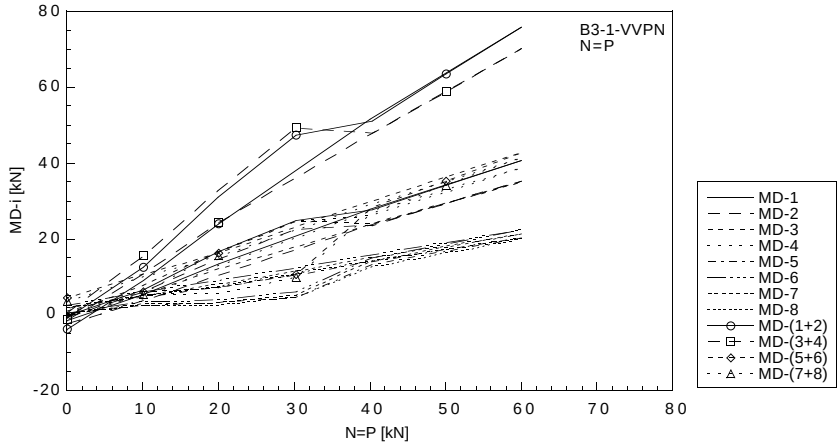


Abb. 5.92 Pressen- und Auflagerkräfte (vgl. Anhang C.11)

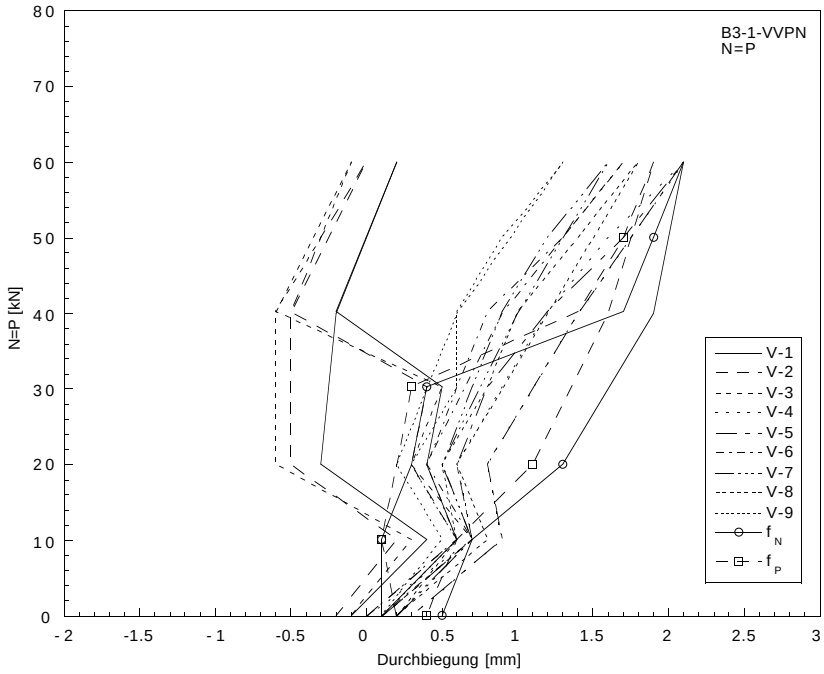


Abb. 5.93 Durchbiegungen (vgl. Anhang C.11)

Bemerkung: N und P sind unabhängig voneinander gesteuert. Wenn die Be- bzw. Entlastung beider Aggregate nicht exakt gleichzeitig stattfindet, dann kann der Mittelträger jeweils leicht kippen und es können Durchbiegungssprünge entstehen.

Tab. 5.24 Versuchsresultate B3-1

t [min]	N [kN]	P [kN]	V_N [kN]	V_P [kN]	f_N [mm]	f_P [mm]
0	59.7	60.1	34.4	34.1	1.7	1.6
15	59.7	60.0	34.8	33.6	10.0	6.9
30	59.7	60.0	34.8	32.9	17.3	11.4
45	59.6	60.0	34.8	32.8	21.3	14.2
60	59.6	60.0	32.9	31.1	25.7	18.4
75	59.6	60.0	33.6	32.2	33.1	23.6
90	59.5	60.0	31.4	30.0	-	-
97	59.2	60.0	22.7	19.7	-	-

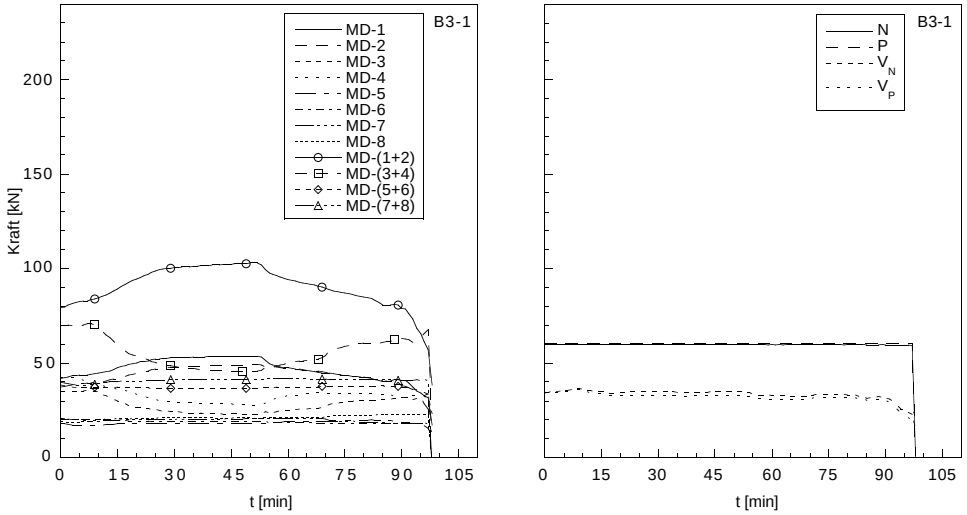


Abb. 5.94 Auflager-, Pressen- und Querkräfte (vgl. Anhang C.11)

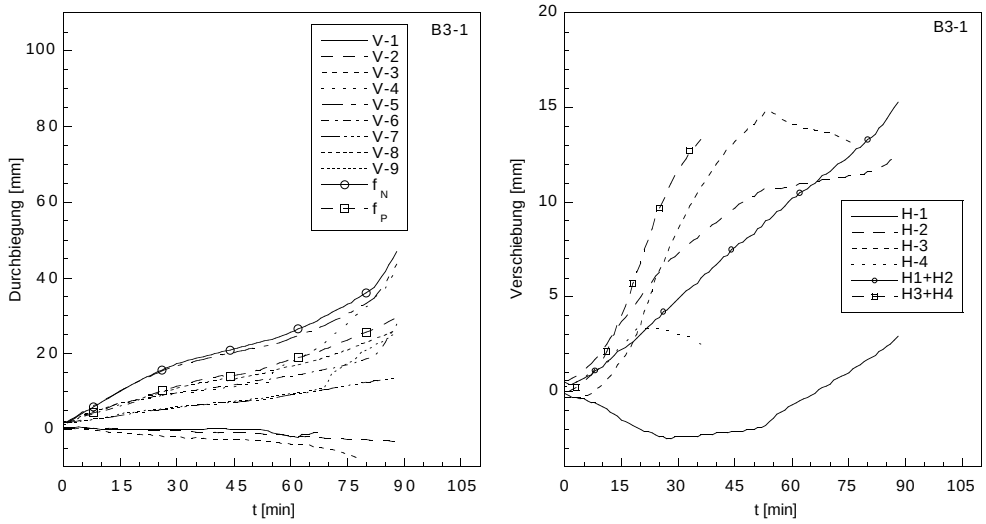


Abb. 5.95 Durchbiegungen und Horizontalverschiebungen (vgl. Anhang C.11)

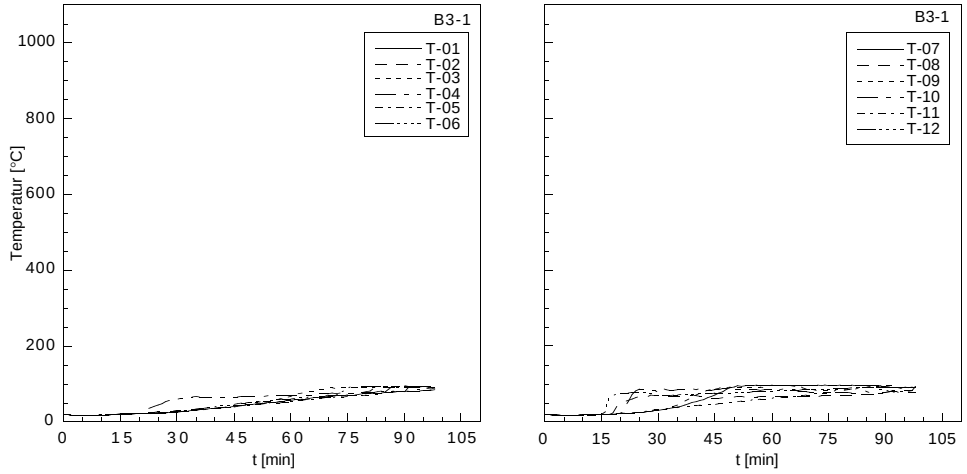


Abb. 5.96 Temperaturen an den Litzen beim Auflager (vgl. Anhang C.12)

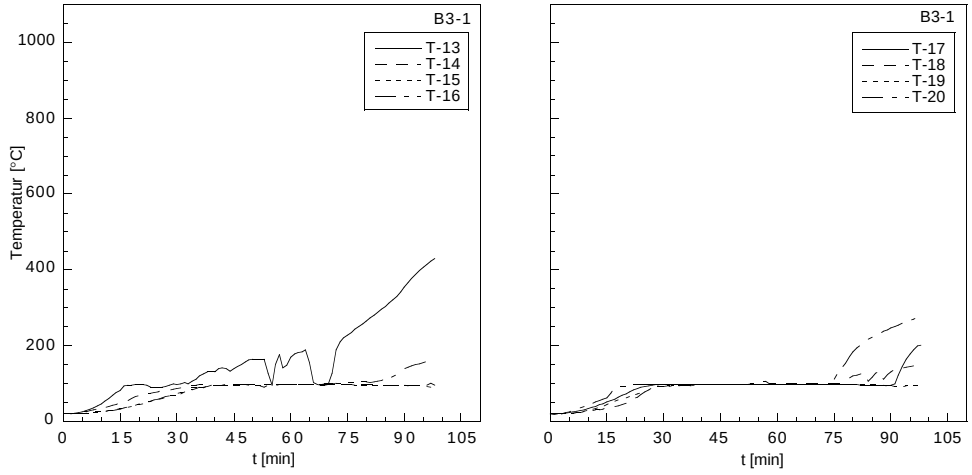


Abb. 5.97 Temperaturen unter den Hohlplatten beim Auflager (vgl. Anhang C.12)

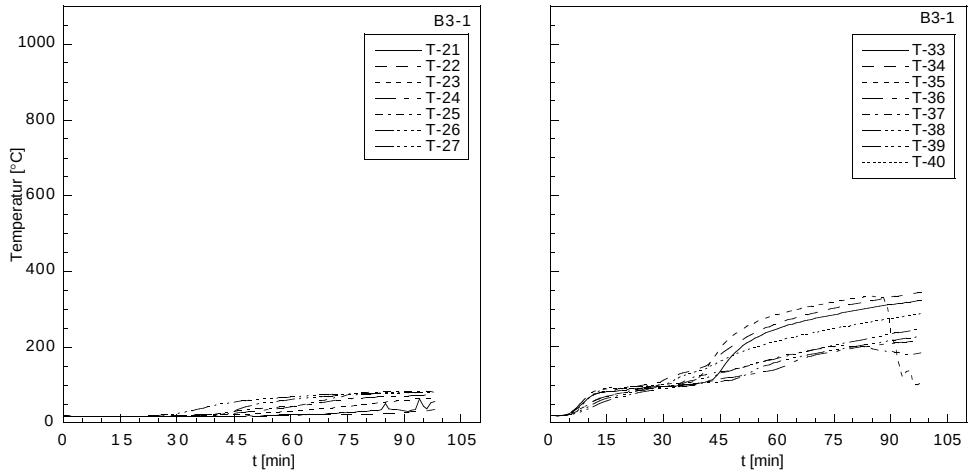


Abb. 5.98 Temperaturen an der Betonoberfläche und am Betonträger unter der Brandschutzverkleidung (vgl. Anhang C.12)

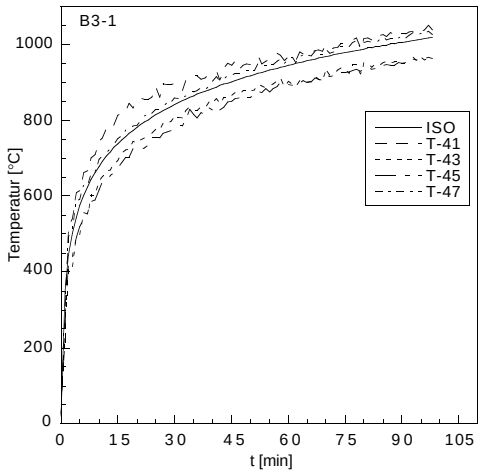


Abb. 5.99 Temperaturen im Ofen (vgl. Anhang B.3)

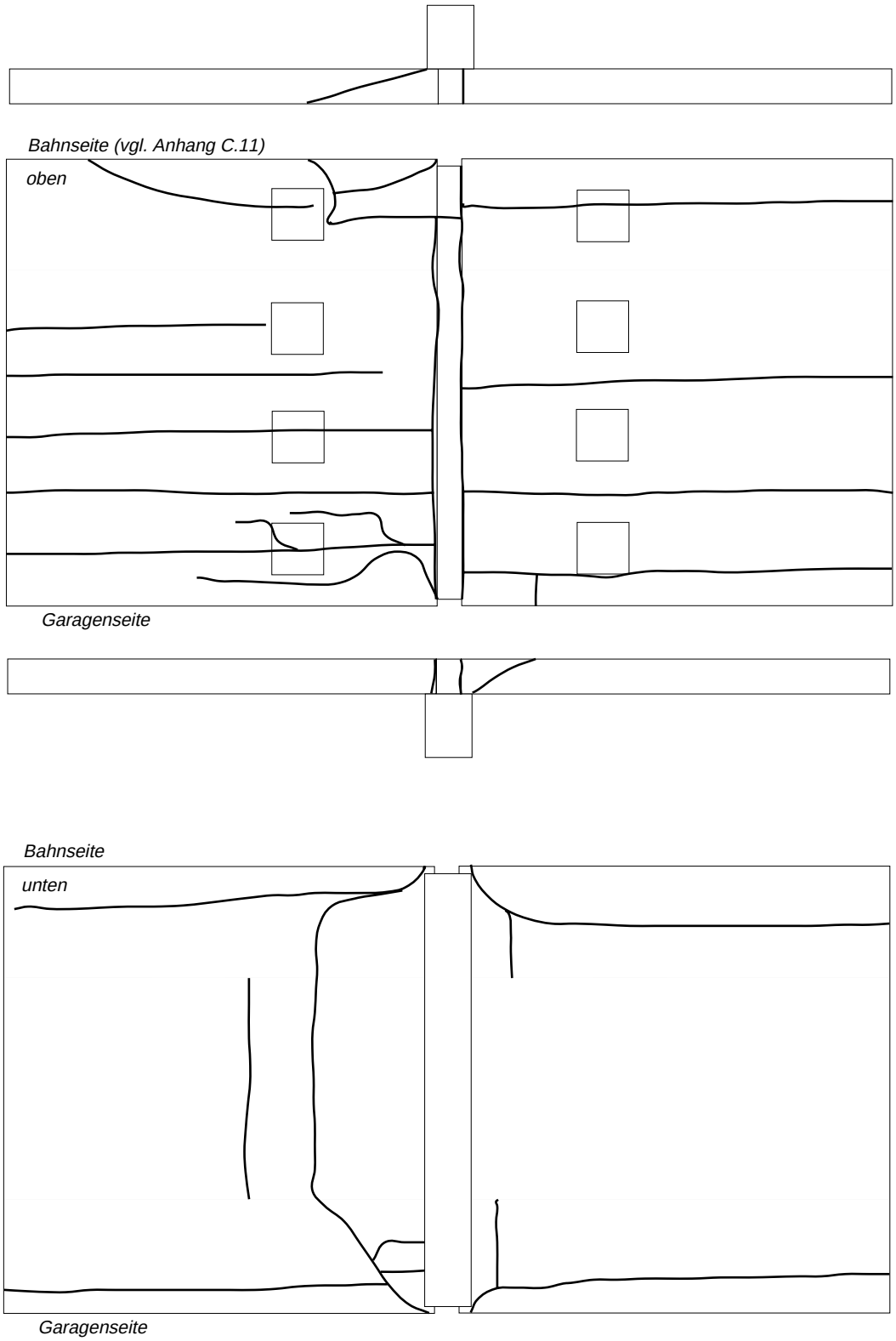


Abb. 5.100 Bruchbild des Brandversuchs B3-1

Abb. 5.101 Auflagerbereich der Hohlplatten P20, PL nach 35 min und nach 55 min (B3-1)

Abb. 5.102 Rissbild der Hohlplatten P20 von unten nach dem Brandversuch (B3-1)

Abb. 5.103 Verankerungsbruch der Hohlplatten P20 (links) von der Garagenseite her (B3-1)

Abb. 5.104 Verankerungsbruch der Hohlplatten P20 (rechts) von der Bahnseite her (B3-1)

Abb. 5.105 Schubrisse in der Hohlplatte P20, PL auf der Garagenseite (trägt weiter trotz gebrochenem Randsteg) (B3-1)

Bemerkung: Biegerisse nach 10 min
Lokale Längsrisse nach 15 min
Biegerisse unter den Pressen bei den Hohlplatten P20 sichtbar
t_u=97 min, für Hohlplatten P20 Bruchart A
t_u>97 min, Hohlplatten P20, PL (noch kein Bruch)

5.7 Zusammenfassung der Brandversuche

In den folgenden Tabellen sind die wichtigsten Resultate der Brandversuche zusammengefasst. Insbesondere sind der Schub pro Hohlplatte, das Moment im Träger (vgl. Abb. 5.3), die Bruchart und der Feuerwiderstand dargestellt. Als Beanspruchung werden jeweils die Werte am Anfang (t_0) und am Ende des Brandversuchs (t_u) benutzt.

Tab. 5.25 Versuchsresultate der Hohlplatten

Versuch	Plattentyp	Bruchart	V_g	V_K [kN]		V_u [kN]		Feuerwiderstand
			[kN]	t_0	t_u	t_0	t_u	t_u [min]
B2-1	P20	-	3.9	25.8	22.5	29.7	26.4	>122
B2-2	P20	A	3.9	38.2	38.2	42.1	42.1	49
B2-3	P20	P	3.9	39.4	44.0	43.3	48.1	75
B2-4	P20, PL	A	3.9	35.2	34.6	39.1	43.0	75
B3-1	P20	A	3.9	34.4	31.4*	38.3	34.3*	97
B3-1	P20, PL	-	3.9	34.1	30.0*	38.0	33.9*	>97

V_K: Schub aus der Pressenkraft auf den Hohlplatten
V_g: Schub aus Eigengewicht
V_u: $V_u=V_K+V_g$
*: t=90min (Bruch bei t_u=97min)

Tab. 5.26 Versuchsresultate des Trägers

Versuch	M_g [kNm]	M_B [kNm]		M_u [kNm]	
		t_0	t_u	t_0	t_u
B2-1	5.5	38.3	33.4	43.8	38.9
B2-2	5.5	103.7	103.6	109.2	109.1
B2-3	5.5	106.0	112.7	111.5	118.2
B2-4	5.5	100.9	99.9	106.4	105.4
B3-1	-	-	-	-	-

M_B: Moment aus der Pressenkraft B
M_g: Moment aus Eigengewicht
M_u: $M_u=M_B+M_g$

Zusammenfassung

Die Slim Floor Bauweise - in den hier beschriebenen Versuchen mit Betonhohlplatten, welche auf dem Unterflansch eines asymmetrischen Stahlträgers auflagern - ermöglicht kostengünstiges, resourcensparendes, industrielles Bauen. Die Bemessung von Betonhohlplatten wird jedoch in den Normen bisher nur für die speziellen Anwendungen auf starren Wandscheiben beschrieben. Wichtige Parameter, wie sie bei Slim Floors auftreten, werden somit nicht berücksichtigt. Insbesondere die flexible Auflagerung auf dem Stahlträger und die Querbiegung der Hohlplatte mindern deren Schubwiderstand markant ab. Die beschriebenen Versuche liefern eine Grundlage zur Erstellung und Überprüfung von erweiterten Berechnungsmodellen, die wichtige Einflussfaktoren in der Bemessung miteinbeziehen sollen.

Zunächst werden bereits vorliegende Versuche und Normen zusammengefasst, die für Slim Floor Decken mit Hohlplatten von Bedeutung sind. Zudem werden zur einfacheren Beschreibung der Versuchsresultate sämtliche bekannten Brucharten von Betonhohlplatten definiert.

Die Versuche sind in zwei Gruppen gegliedert: Schubversuche an Hohlplatten bei Raumtemperatur und Brandversuche an Deckenausschnitten. In den Versuchen bei Raumtemperatur (Kaltversuche) wurden v.a. die Betonhohlplatten untersucht. Es wurden Schubversuche durchgeführt, bei welchen das Schubspannweitenverhältnis (a/l), die Auflagerbreite (s), die Auflagerart (starr oder flexibel), die Lasteinleitungsart (Punkt- oder Linienlast), der Platten-, der Litzentyp und die Spannweite (l) variiert wurden. Dabei wurden unterschiedliche Schubwiderstände festgestellt. Mit besseren Verbundeigenschaften der Litzen konnten höhere Schubwiderstände erzielt werden. Dasselbe gilt auch für grösser werdende Auflagerbreiten und abnehmenden Kraftabstand (im geprüften Bereich).

In den Brandversuchen wurden übliche Belastungen und Spannweiten für Büro- und Gewerbebauten simuliert. Der als Auflager dienende Stahlträger war in den Versuchen nie Versagensursache, sondern es war immer der Schubwiderstand der Hohlplatten massgebend. Je nach Ausnutzungsgrad wurden Feuerwiderstände F30, F60, F90 oder F120 erreicht. Betonhohlplatten mit profilierten Litzen erreichten eine höhere Feuerwiderstandsdauer als solche mit normalen Litzen. Tieferes Lastniveau oder ein starres Auflager wirkten sich günstig aus. Das flexible Auflager beeinflusst den Feuerwiderstand von Hohlplatten deutlich.

Im Rahmen dieses Projektes sollen Modellvorschläge für Slim Floor Decken erarbeitet werden. Die Veröffentlichung dieser Arbeiten ist zu einem späteren Zeitpunkt geplant.

Résumé

Les dalles Slim Floors se composent d'éléments préfabriqués alvéolés en béton précontraint appuyés sur l'aile inférieure d'une poutre métallique. Elles constituent une méthode de construction industrialisée efficace et économique dans le domaine du bâtiment. Le dimensionnement de tels éléments est décrit par les normes actuelles uniquement dans le cadre de leur application sur des supports rigides. D'importants facteurs, tels que la flexibilité de l'appui sur la poutre métallique ou la flexion dans le sens transversal, ne sont pas considérés. D'autre part, ces facteurs réduisent d'une manière significative la résistance à l'effort tranchant des Slim Floors. Les essais décrits dans ce rapport, fournissent une base de développement de modèles de dimensionnement plus généraux prenant en compte tous les facteurs importants.

En premier lieu, des essais déjà publiés et des normes relatives au dimensionnement des Slim Floors sont résumés. Pour faciliter la description des résultats d'essais, une typologie des modes de rupture connus est définie.

Les essais sont divisés en deux groupes: résistance à l'effort tranchant à température ambiante des dalles alvéolées et résistance au feu des Slim Floors. Lors des essais de résistance à l'effort tranchant, les variables suivantes ont été admises: la position de la charge dans la travée (a/l), la largeur d'appui (s), la condition d'appui (rigide ou flexible), le mode d'introduction de la charge (ponctuelle ou linéaire), le type de dalle alvéolée, le type des torons et la portée (l). Les résultats ont mis en évidence des différences dans les résistances à l'effort tranchant obtenues. D'autre part, une amélioration de la qualité de l'adhérence entre les torons et le béton d'enrobage a permis d'augmenter la résistance à l'effort tranchant. Cette résistance croit également lorsque la largeur d'appui augmente et lorsque le rapport (a/l) diminue (dans la région examinée).

Dans les essais de résistance au feu on a essayé de simuler les charges et portées usuelles qu'on trouve dans les bâtiments administratifs et commerciaux. La poutre métallique servant d'appui n'a jamais provoqué la ruine, celle-ci ayant toujours été observée suite à une défaillance de la résistance à l'effort tranchant des dalles alvéolées. Selon le niveau de chargement, les résistances au feu exigées R30, R60, R90 ou R120 ont été satisfaites. Les dalles alvéolées contenant des torons profilés ont montré une plus longue durée de résistance au feu que celle observée avec des torons normaux. Un niveau de chargement faible ou un appui rigide ont un effet favorable. Un appui souple diminue sensiblement la résistance au feu des dalles alvéolées.

Le but final de ce projet est de développer des recommandations de dimensionnement pour les Slim Floors dont la publication est prévue pour une date ultérieure.

Summary

Slim Floors - in the described tests with hollow core slabs which are supported on the lower flange of an asymmetric steel beam - lead to cost efficient, economical and industrialised construction. The design rules in the standards are related to hollow core slabs supported on stiff walls. Important system effects that occur in Slim Floor constructions are not considered. In particular, a flexible support on a beam and the transverse bending of the hollow core slab decrease the shear resistance significantly. The described tests furnish a basis for developing and examining of more general calculation models, which include important parameters for the design.

Firstly already published tests are summarized together with standards related to the design of Slim Floors with hollow core slabs. For an easy description of the test results a typology of all known failure modes is defined.

The tests are separated into two groups: shear tests on hollow core slabs at room temperature and fire tests on Slim Floor elements. In the tests at room temperature first of all hollow core slabs were investigated. In the shear tests the following parameters were investigated: the shear span ratio (a/l), the width of the support (s), the support condition (stiff or flexible), the method of introducing the load (point or line load), the type of hollow core slab, the type of strands and the span (l). Different shear resistances were obtained. The better the bond characteristics of the strands the higher were the shear resistances. The same is valid also for increasing width of support and decreasing distance of load (in the investigated region).

In the fire tests it was attempted to simulate the loading conditions and spans for office and commercial buildings. The steel beam never failed in the tests. The shear resistance of the hollow core slabs was always decisive. Depending on the load level, fire resistances of R30, R60, R90 or R120 were reached. Hollow core slabs with profiled strands reached higher fire resistances than those with normal strands. A lower load level or a stiff support were favourable. The flexible support clearly influences the fire resistance of hollow core slabs.

It is the aim of the ongoing research project to develop design recommendations for Slim Floor slabs. The publication of these works is planned for a later date.

Bezeichnungen

A	Verankerungsbruch der Litzen	
A_a	Querschnittsfläche des Stahlprofils	[mm^2]
B	Kraft der blauen Pressen (Serie B2)	[kN]
Bieg-i	Durchbiegung i des flexiblen Trägers(HEM 140)	
CT	Biegeriss an der Plattenoberseite	
D	Unzulässige Durchbiegungen	
DLL	Doppellinienlast pro Feld	
DMS-i	Dehnung i des Stahlträgers	[µm/m]
D-i	Dehnung i der Betonhohlplattenoberseite	[mm/m]
E	Eckbruch	
EL	Eine Punktlast auf einer Hohlplatte	
E_p	Elastizitätsmodul des Spannstahls	[kN/mm^2]
F	Biegeriss	
FC	Betonbruch infolge Biegung	
FSC	Biegeschubrisse	
FT	Stahlbruch infolge Biegung	
GM	Gleichmässig verteilte Last	
H-i	Horizontalverschiebung	[mm]
I_a	Trägheitsmoment des Stahlprofils	[mm^4]
K	Kraft der Pressen bei den Kaltversuchen (Serie B2)	[kN]
KB	Kammerbeton	
LQ	Unteres Quartil	
M_B	Moment im Verbundträger aus den blauen Pressen (Serie B2)	[kNm]
MD-i	Kraftmessdose i	[kN]
M_g	Feldmoment aus Eigengewicht	[kNm]
M_K	Feldmoment aus Pressenkraft K	[kNm]
M_{LE}	Feldmoment aus Lasteinleitungsträger und Presseneigengewicht	[kNm]
M_u	Gesamtfeldmoment zum Zeitpunkt des Bruches	[kNm]
LL	Linienlast pro Feld	
LWS	Stegschublängsbruch	
N	Kraft der orangen Pressen auf Platten P20 (Serie B3)	[kN]
O	Kraft der orangen Pressen (Serie B2)	[kN]
P	Durchstanzen	
P	Kraft der orangen Pressen auf Platten P20,PL (Serie B3)	[kN]
PL	Profilierte Litzen	
RV	Reduzierte Vorspannung	
S	Schubbruch in der Fuge zwischen Überbeton und Betonhohlplatte	
SC	Biegeschubbruch	
SL	Litzenschlupf	
Spalt-i	Rissöffnung i	[mm]
ST	Schubzugbruch	
S-i	Schlupf der Litze i	[mm]
T-i	Temperatur des Thermoelementes i	[°C]
ÜB	Überbeton	
UF	Unterflansch eines Slim Floor Trägers	
UL	Litzen aus tordierten Drähten	
UQ	Oberes Quartil	
V_A	Querkraft beim Auflager A	[kN]
V_B	Querkraft beim Mittelträger (Serie S3K)	[kN]
V-i	Durchbiegung i	[mm]
V_c	Querkraft beim Mittelträger (Serie S3K)	[kN]

V_g	Querkraft aus Eigengewicht	[kN]
V_K	Querkraft aus der Pressenkraft K	[kN]
V_{LE}	Querkraft aus Lasteinleitungsträger und Presseneigengewicht	[kN]
V_N	Querkraft aus orangen Pressen bei den Hohlplatten P20	[kN]
V_P	Querkraft aus orangen Pressen bei den Hohlplatten P20, PL	[kN]
V_u	Gesamtquerkraft zum Zeitpunkt des Bruches	[kN]
W_a	Widerstandsmoment (elast.) auf die Aussenfaser des Stahlprofils bezogen	[mm^3]
WSC	Stegschubdruckbruch	
Z_a	Flächenmoment (plast.) des Stahlprofils	[mm^3]
ZL	Zwei nebeneinanderliegende Punktlasten auf einer Hohlplatte	
a	Kraftabstand	[mm]
b	Breite	[mm]
d	Stegbreite	[mm]
f_{at}	Zugfestigkeit des Baustahls	[N/mm^2]
f_{ay}	Fliessgrenze des Baustahls	[N/mm^2]
f_{cm}	Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit	[N/mm^2]
f_{Km}	Mittlere Durchbiegung unter der Pressenkraft K	[mm]
f_m	Durchbiegung in Feldmitte	[mm]
f_N	Mittlere Durchbiegung unter der Pressenkraft N	[mm]
f_P	Mittlere Durchbiegung unter der Pressenkraft P	[mm]
f_{pt}	Zugfestigkeit des Spannstahls	[N/mm^2]
$f_{py,0.2}$	0.2%-Dehngrenze des Spannstahls	[N/mm^2]
f_{st}	Zugfestigkeit des Bewehrungsstahls	[N/mm^2]
f_{sy}	Fliessgrenze des Bewehrungsstahls	[N/mm^2]
h	Höhe des Stahlprofils	[mm]
h	Höhe der Betonplatten	[mm]
l	Spannweite	[m]
n	Anzahl	[-]
p	Luftdruck	[bar]
s	Auflagerbreite	[mm]
t	Dicke	[mm]
t	Zeit	[min]
t_0	Brandbeginn	[min]
t_u	Zeit bei Abbruch des Brandversuches	[min]
v_B	Querkraft der Hohlplatten beim Mittelträger	[kN/m]
v_C	Querkraft der Hohlplatten beim Mittelträger	[kN/m]
$\bar{x}$	Mittelwert einer Stichprobe	[-]
$\tilde{x}$	Median einer Stichprobe	[-]
x_s	Standardabweichung einer Stichprobe	[-]
2c	Flanschbreite	[mm]
ΔBieg	Durchbiegung Auflagerträger	[mm]
ΔS-i	Relativverschiebung	[mm]
ΔV_{Pl}	Querbiegung der Hohlplatten (Serie B2)	[mm]
ΔV_{Tr}	Durchbiegung des Mittelträgers (Serie B2)	[mm]
ΔV_{RTr}	Durchbiegung des Randträgers (Serie B2)	[mm]
θ	Temperatur	[°C]
$\varepsilon_{u,5}$	Bruchdehnung	[%]
ρ_m	Mittelwert der Dichten	[kg/dm^3]

Literatur

Becker, R. J., Buettner, D. R.: Shear Tests of Extruded Hollow Core Slabs. PCI Journal, March/April, **1985**

Bode, H., Stengel, J.: Untersuchungen des Tragverhaltens bei Flachdeckensystemen (Slim Floor Konstruktionen) mit verschiedener Ausbildung der Platten und verschiedener Lage der Stahlträger. Universität Kaiserslautern, Fachgebiet Stahlbau, P 261, **1995**

Borgogno, W., Fontana, M.: Brandversuch an einer Slim Floor Decke. ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, Stahl- und Holzbau, Interner Bericht 95-1, **1995**

BS - British Steel: Summary of Data Obtained During Tests on Flange Plated Slim Floor Beams. BS476: Part 21 Fire Resistance Tests, Rotherham, **1993**

CEB: Shear and Torsion. Comité Euro-International du Béton, Bulletin d'Information No 126, **1978**

Crespo, P., Rui-Wamba, J.: Pavillon of Discoveries. New Steel Construction, October **1994**

EN 10002-1: Metallische Werkstoffe Zugversuch, Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur. Deutsches Institut für Normung, **1990**

FIP Recommendations: Precast Prestressed Hollow Core Floors. Fédération international de la précontrainte, Thomas Telford, **1982**

Fontana, M.: Verbundkonstruktionen und Brandschutz. SIA D 0704: Les structures mixtes acier-béton, Centre romand de la formation continue univeritaire de la SIA, Lausanne, **1996**

Fontana, M., Borgogno, W.: Brandverhalten von Slim Floor Verbunddecken. Stahlbau 64, Heft 6, **1995**

Girhammar, U. A.: Design Principles for Simply Supported Prestressed Hollow Core Slabs. Structural Engineering Review, Vol. 4, No.4, **1992**

Görhs, K.: Untersuchungen zu ausgewählten konstruktiven Problemen von Fertigteil-Hohlraumdecken im Brandfall. Technische Hochschule Leipzig, Fakultät Bauwesen, **1992**

ISO 834: Fire-Resistance Tests - Elements of Building Construction - Part 1: General Requirements. International Organization for Standardization, **1995**

Keuser, M., Mehlhorn, G.: Rechnerische Untersuchung des Verankerungsbereiches von Spannbetonhohlplatten mit Hilfe der FE-Methode. Gesamthochschule Kassel, Fachgebiet Massivbau, Nr. 15, **1990**

Kindmann, R., Hammer, W.: Forschungsprogramm Verbundelemente, Trägerversuche. Ruhr-Universität Bochum, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Bericht Nr. A-01/91-2, **1992**

Kruppa, J., Zhao, B.: Essai de Résistance au Feu d'un Plancher avec Dalles Alvéolées. CTICM, Saint-Rémy-Lès-Chevreuse, Mai, **1994**

Kruppa, J., Zhao, B.: Essai de Planchers avec Dalles Alvéolées et Poutres à Talon. CTICM, Saint-Rémy-Lès-Chevreuse, November, **1995**

Pajari, M.: Shear Resistance of Prestressed Hollow Core Slabs on Flexible Supports. VTT - Technical Research Centre of Finland, Nr. 228, Espoo, **1995**

Park, R.: A Perspective on the Seismic Design of Precast Concrete Structures in New Zealand. PCI Journal, May-June, **1995**

Pisanty, A.: The Shear Strength of Extruded Hollow Core Slabs. Materials and Structures, 25, **1992**

PrEN 1168: Vorgespannte vorgefertigte Hohlplattendecken. CEN - Europäisches Kommittee für Normung, **1993**

Richter, E.: Zur Berechnung der Biegetragfähigkeit brandbeanspruchter Spannbetonbauteile unter Berücksichtigung geeigneter Vereinfachungen für die Materialgesetze. Technische Universität Braunschweig, iBMB, Heft 80, **1987/1**

Richter, E.: Stannbetonbauteile unter Brandbeanspruchung - Versuche und theoretische Begleitung. Technische Universität Braunschweig, iBMB, Braunschweig, **1987/2**

Seekamp, H., Kordina, K., Becker, W., Struck, W., Wierig, H. J.: Verhalten von Stahlbeton und Spannbeton beim Brand. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 162, **1964**

SIA 162/1: Betonbauten Materialprüfung. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, **1989**

Spancrete: Floor or Roof Construction of Prestressed Concrete Slabs. Underwriters Laboratories Ins., **1958, 1961**

Walraven, J. C., Mercx, W. P. M.: The Bearing Capacity of Prestressed Hollow Core Slabs. Delft University of Technology, Heron Vol. 28, No. 3, **1983**

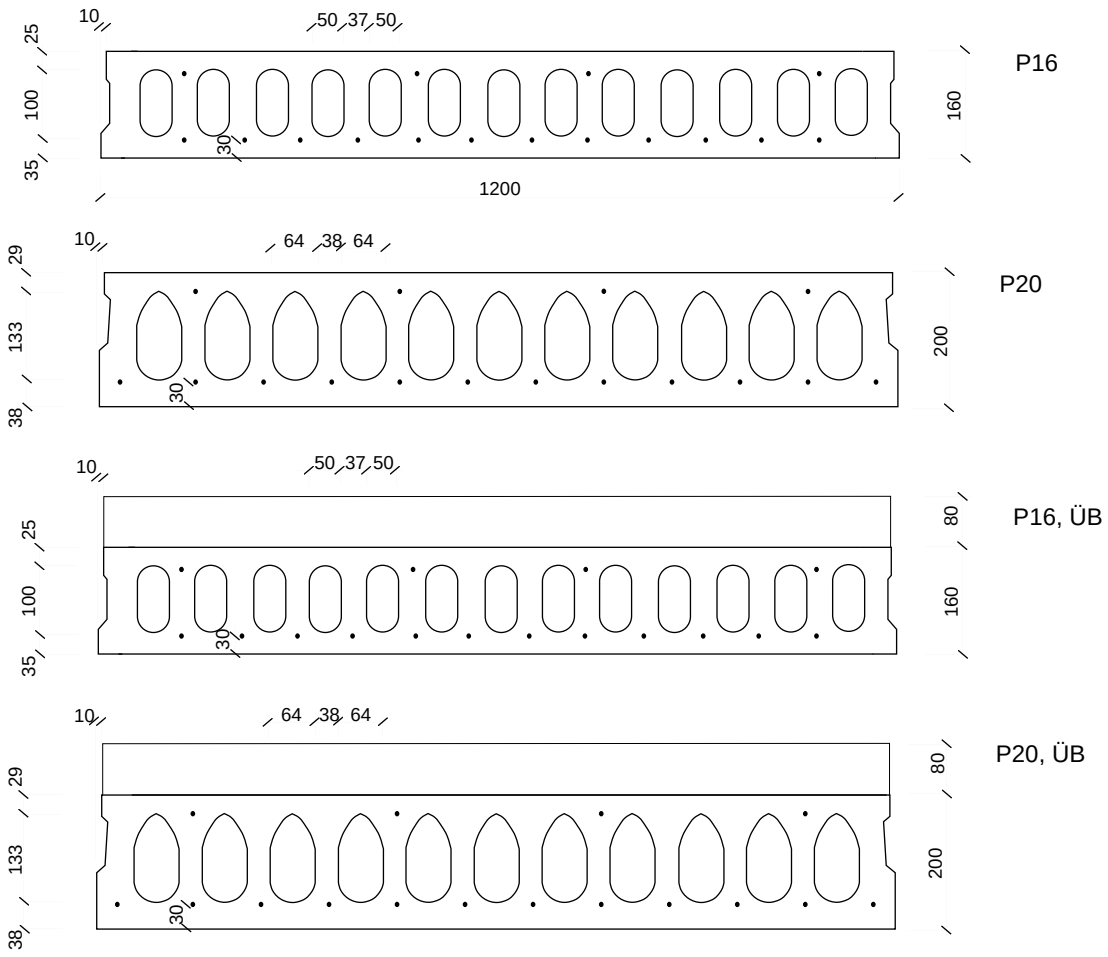
Weise, J.: Brandverhalten von Voll- und Hohldeckenplatten aus Spannbeton. Bauplanung-Bautechnik, Heft 2, **1978**

Yang, L.: Design of Prestressed Hollow Core Slabs with Reference to Web Shear Failure. ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No. 9, **1994**

Yang, L.: Effect on End Notch on Shear Capacity of Simply Supported Prestressed Hollow Core Slabs - Numerical Experiments. Structural Engineering Review, **1996**

Anhang A Versuchskörper

Anhang A.1 Untersuchte Hohlplattentypen



Tab. A.1 Querschnittswerte der verwendeten Hohlplatten

	P16	**P20**	**P16, ÜB**	**P20,ÜB**
Querschnitt A [mm^2]	132400	160500	228400	256500
Gewicht g [kg/m]	324	390	571	641
Totale Stegbreite b_w [mm]	530	476	530	476
Schwerpunkt y_{su} [mm]	78.0	100	130	153
Trägheitsmoment I_s [mm^4]	$3.64 \cdot 10^8$	$7.09 \cdot 10^8$	$12.40 \cdot 10^8$	$19.2 \cdot 10^8$
Widerstandsmoment W_{su} [mm^3]	$4.67 \cdot 10^6$	$7.09 \cdot 10^6$	$9.60 \cdot 10^6$	$12.50 \cdot 10^6$
Flächenmoment S [mm^3]	$3.14 \cdot 10^6$	$4.78 \cdot 10^6$	$7.30 \cdot 10^6$	$9.60 \cdot 10^6$
Litzen unten A_p (ausser P20, RV) [mm^2]	624	624	624	624
Netzbewehrung	-	-	Ø8/150	-

Tab. A.2 Vorspannung in den Hohlplatten

	Charge				
	P16	**P20**	**P20, PL**	**P20, RV**	**P20, UL**
Litzen unten	12·3/8”	12·3/8”	12·3/8”	6·3/8” 6·7/16”	12·3/8”
Litzen oben	4·3/8”	4·3/8”	4·3/8”	4·3/8”	4·3/8”
Vorspannkraft pro Litze* [kN]	56	56	56	6·3/8” à 47 6·7/16” à 64 4·3/8” à 56	56
Gesamte Vorspann-kraft unten** [kN]	672	672	672	666	672
Litzenfläche unten [kN]	624	624	624	720	624

*: Vorspannkraft unmittelbar nach dem Vorspannen

**: Die Vorspannkraft in den Litzen oben wird vernachlässigt, da bei der Herstellung im Gleitfertigerverfahren die Litzen oben bewegt werden und dadurch der Verbund z.T. ungenügend ist. Dies konnte auch bei der Messung des Anfangschlupfes festgestellt werden: Die Litzen oben hatten entweder keinen oder einen sehr grossen Anfangsschlupf (mehrere mm).

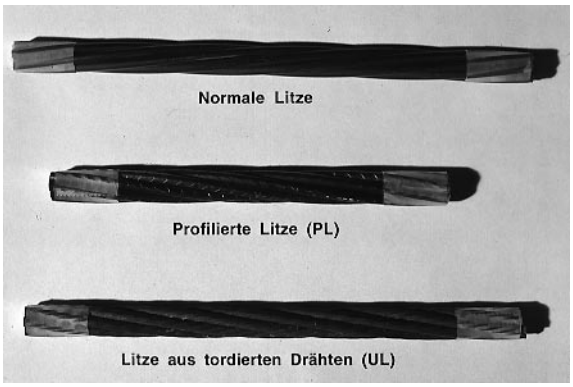


Abb. A.1 Verschiedene Litzen

Anhang A.2 Anfangsschlupf der Hohlplatten

In den folgenden Boxplots werden Median, oberes (UQ) und unteres Quartil (LQ) und Ausreisser dargestellt. Die Linien oberhalb und unterhalb der Box haben eine Länge von UQ+1.5·(UQ-LQ) bzw. LQ-1.5·(UQ-LQ). Alle Angaben in [mm].

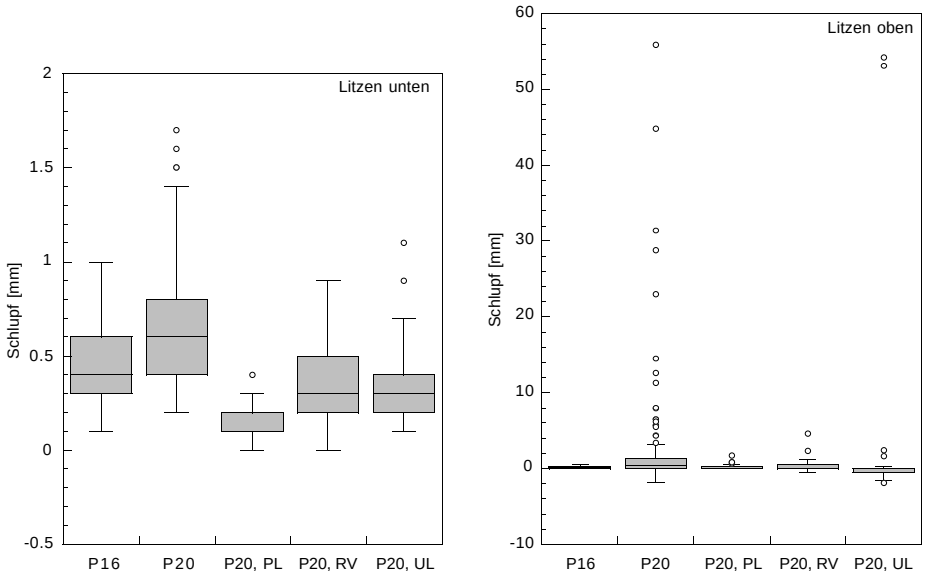


Abb. A.2 Anfangsschlupf von den geprüften Plattentypen

Tab. A.3 Kennwerte des Anfangsschlupfes der geprüften Plattentypen [mm]

	Litzen unten					**Litzen oben**				
	P16	P20	P20, PL	P20, RV	P20, UL	P16	P20	P20, PL	P20, RV	P20, UL
$\bar{x}$	0.44	0.62	0.15	0.31	0.30	0.16	2.89	0.17	0.43	2.22
$\tilde{x}$	0.4	0.6	0.1	0.3	0.3	0.1	0.4	0	0	0
x_s	0.20	0.28	0.10	0.19	0.17	0.18	8.22	0.37	1.01	11.38
n	96	355	96	96	144	32	112	32	27	44

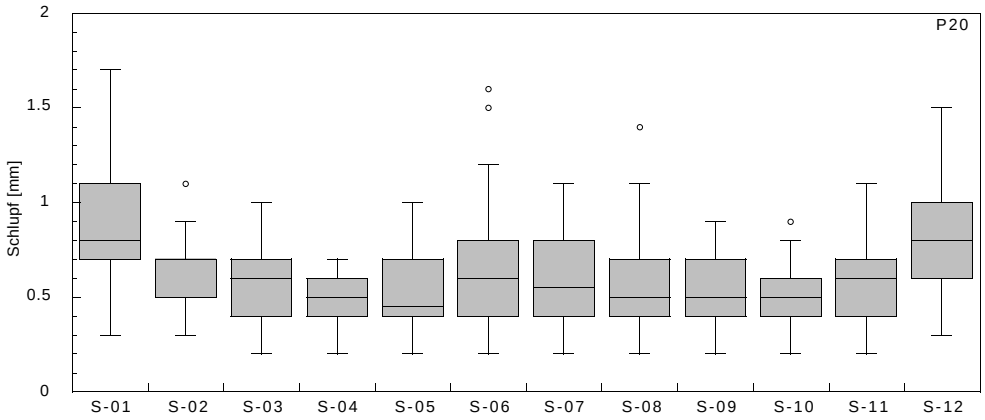


Abb. A.3 Anfangsschlupf der Litzen S-01 bis S-12 des Plattentyps P20

Tab. A.4 Kennwerte des Anfangsschlupfes der geprüften Platten des Typs P20 [mm]

	S-01	S-02	S-03	S-04	S-05	S-06	S-07	S-08	S-09	S-10	S-11	S-12
$\bar{x}$	0.92	0.63	0.55	0.49	0.54	0.67	0.67	0.59	0.60	0.52	0.48	0.61
$\tilde{x}$	0.8	0.7	0.6	0.5	0.45	0.6	0.6	0.55	0.5	0.5	0.6	0.8
x_s	0.35	0.20	0.21	0.15	0.24	0.34	0.34	0.23	0.26	0.18	0.21	0.35
n	29	30	30	30	30	30	30	30	29	29	30	29

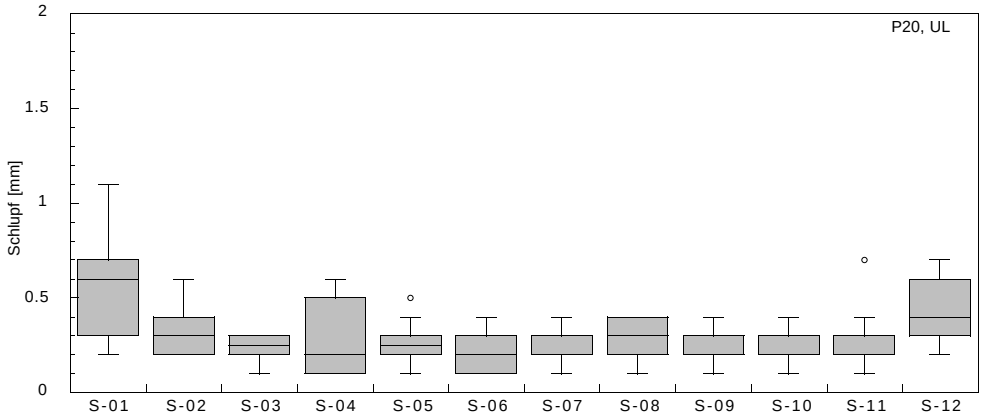
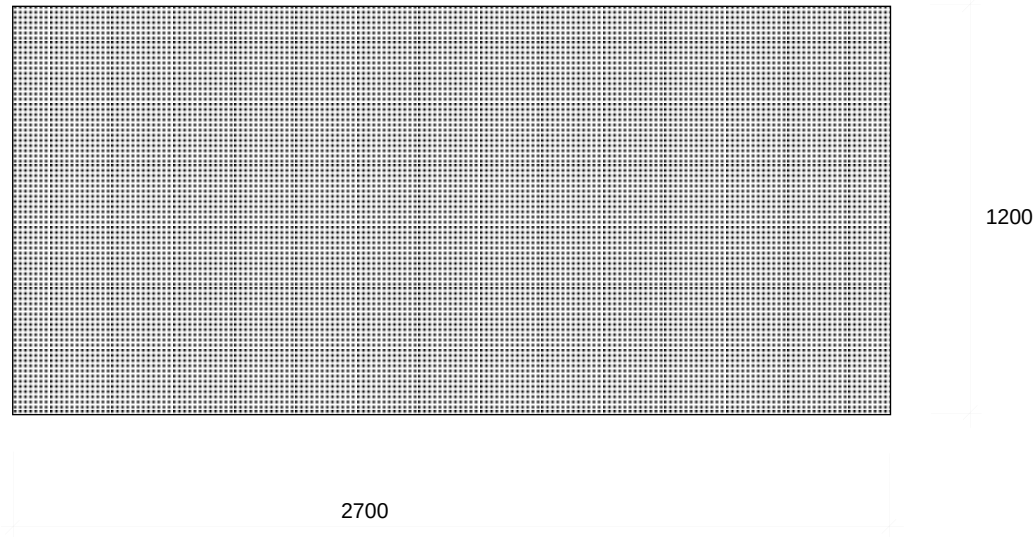


Abb. A.4 Anfangsschlupf der Litzen S-01 bis S-12 des Plattentyps P20, UL

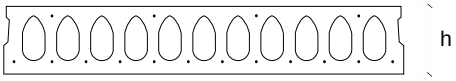
Tab. A.5 Kennwerte des Anfangsschlupfes der geprüften Platten des Typs P20, UL [mm]

	S-01	S-02	S-03	S-04	S-05	S-06	S-07	S-08	S-09	S-10	S-11	S-12
$\bar{x}$	0.57	0.31	0.23	0.28	0.26	0.23	0.23	0.28	0.24	0.25	0.25	0.42
$\tilde{x}$	0.6	0.3	0.25	0.2	0.25	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.4
x_s	0.28	0.12	0.08	0.19	0.12	0.11	0.08	0.11	0.08	0.09	0.16	0.16
n	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

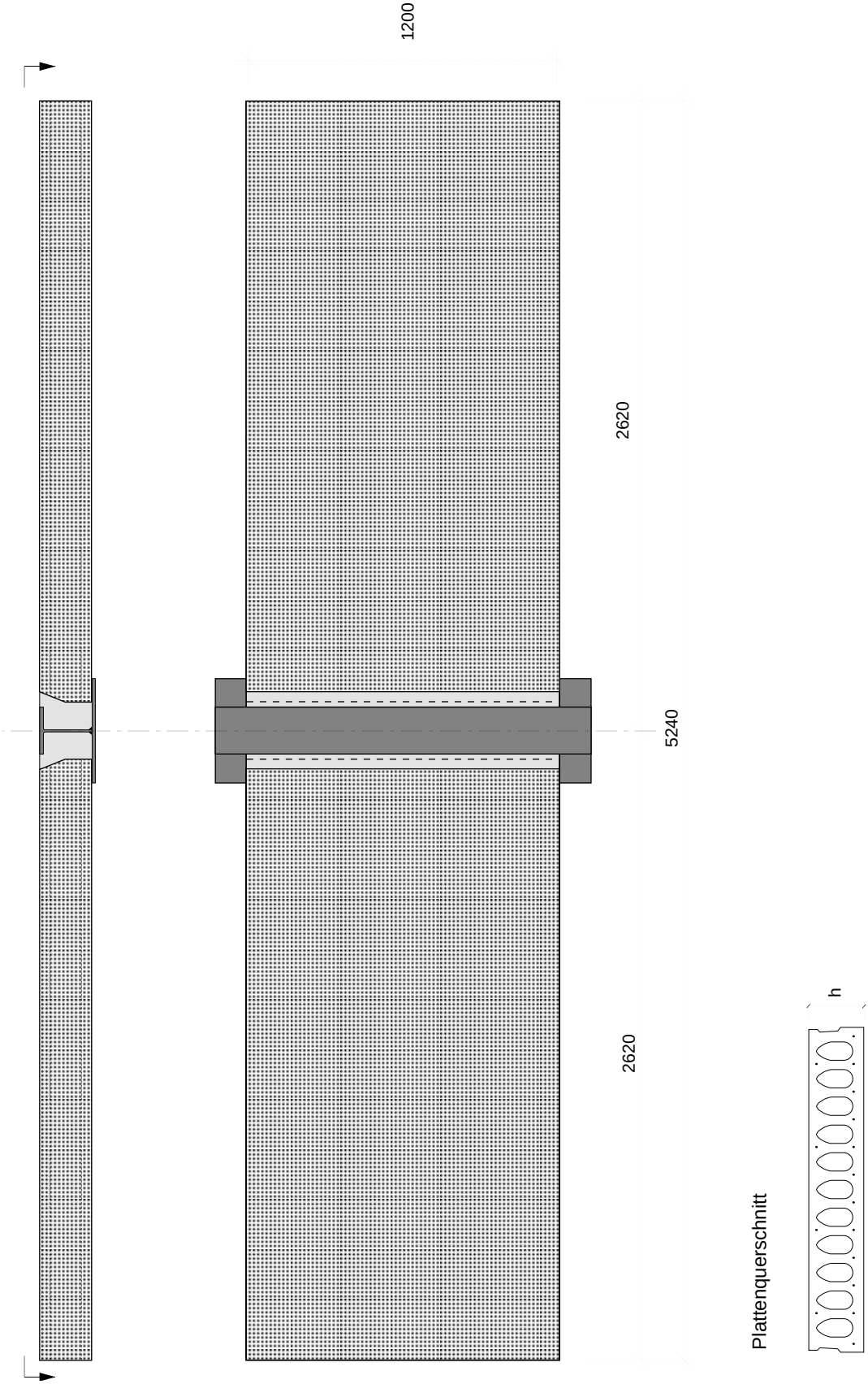
Anhang A.3 Versuchskörper der Serien S1K, S2K, S5K und S6K



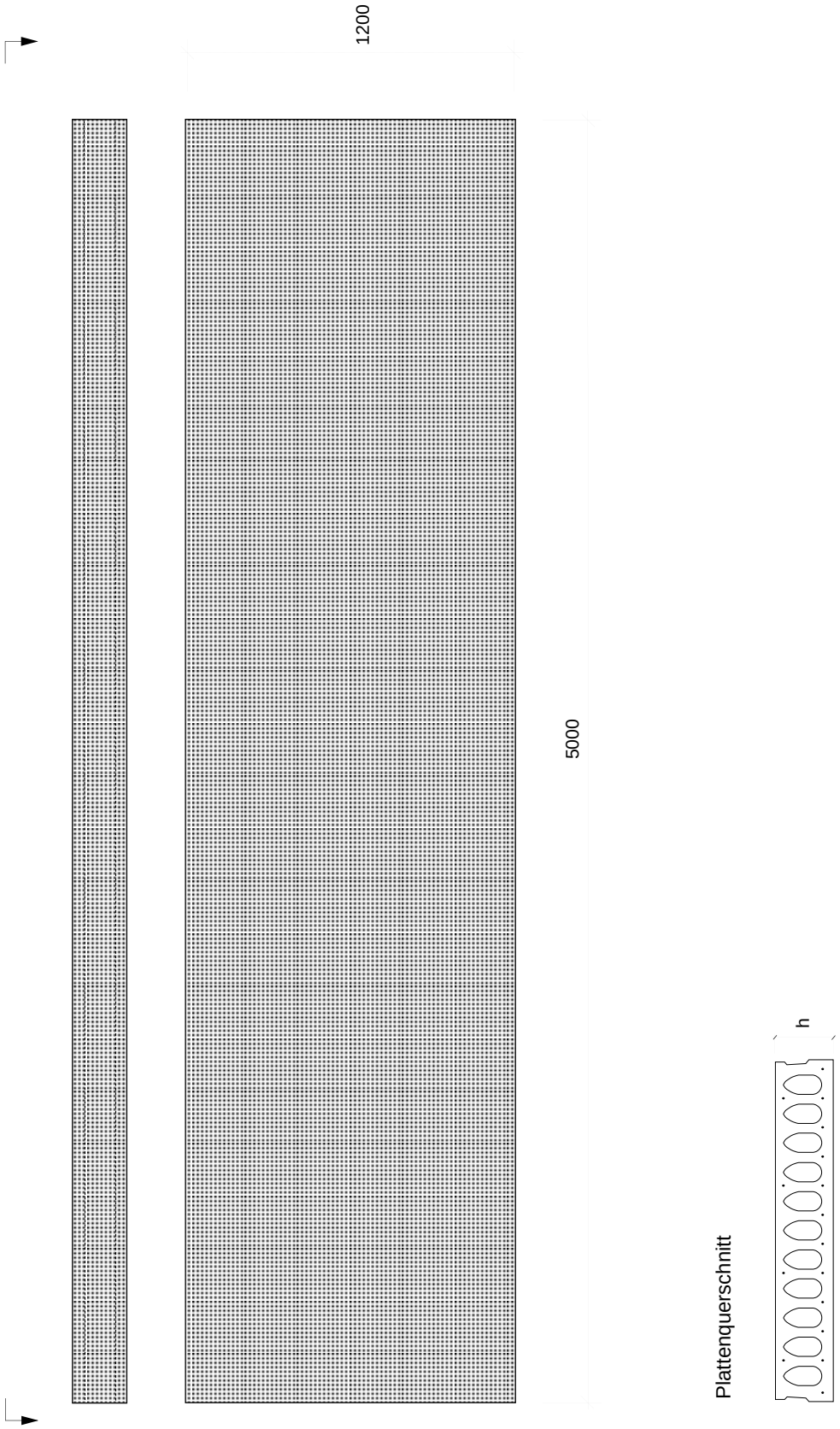
Plattenquerschnitt



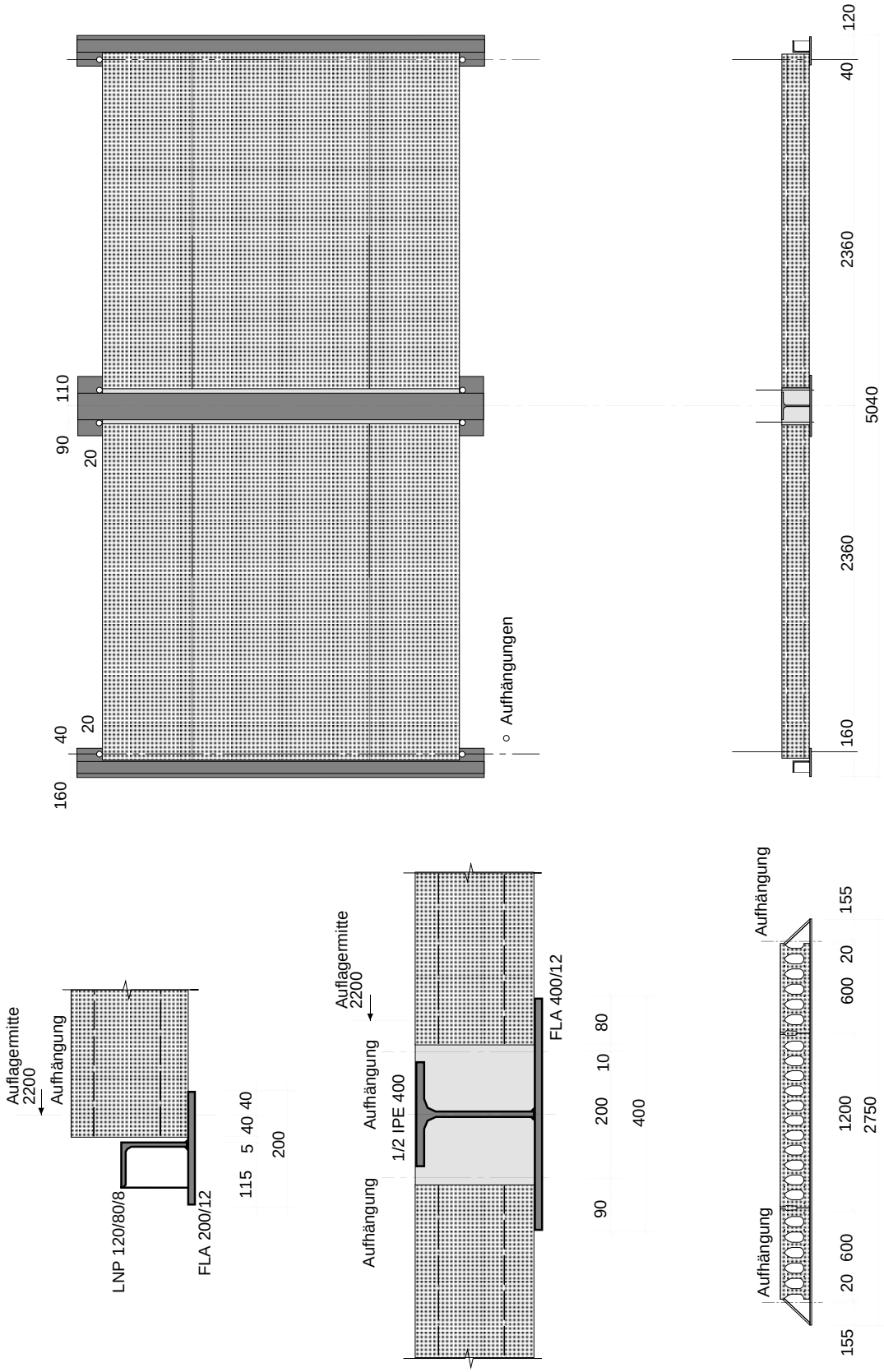
Anhang A.4 Versuchskörper der Serie S3K



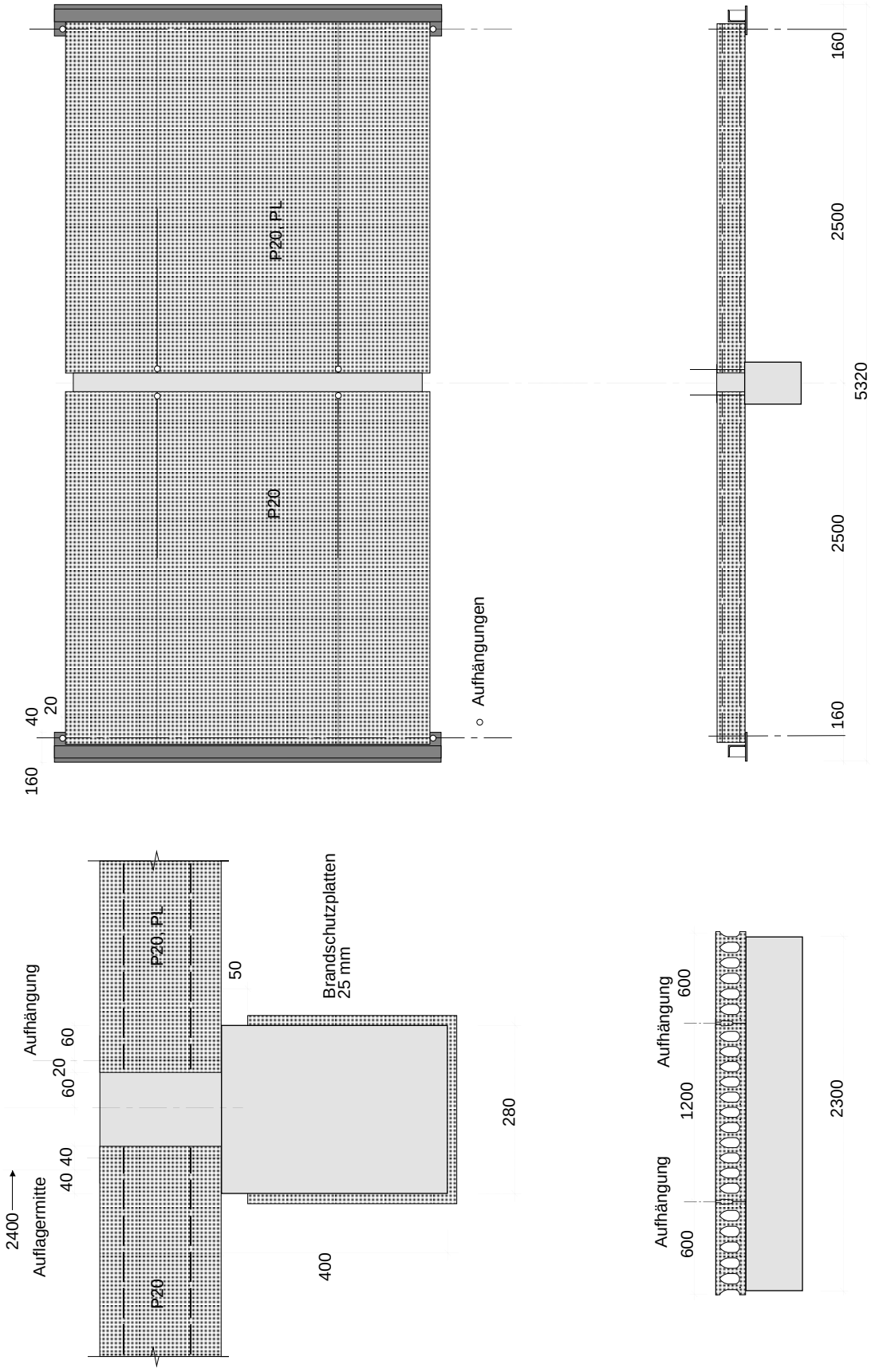
Anhang A.5 Versuchskörper der Serie S4K



Anhang A.6 Versuchskörper der Serie B2

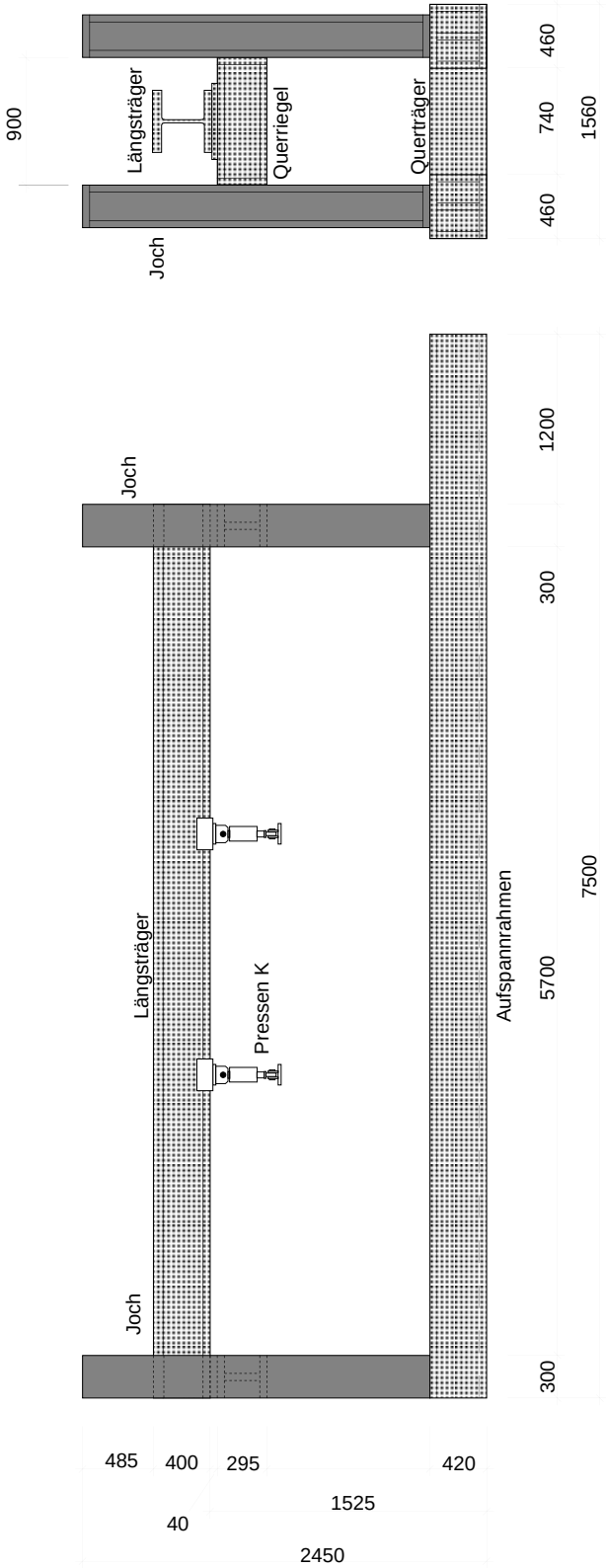

160
40
20
90
20
110
Auflagermitte
2200
Auflagermitte
2200
Auflagermitte
2200

Anhang A.7 Versuchskörper der Serie B3

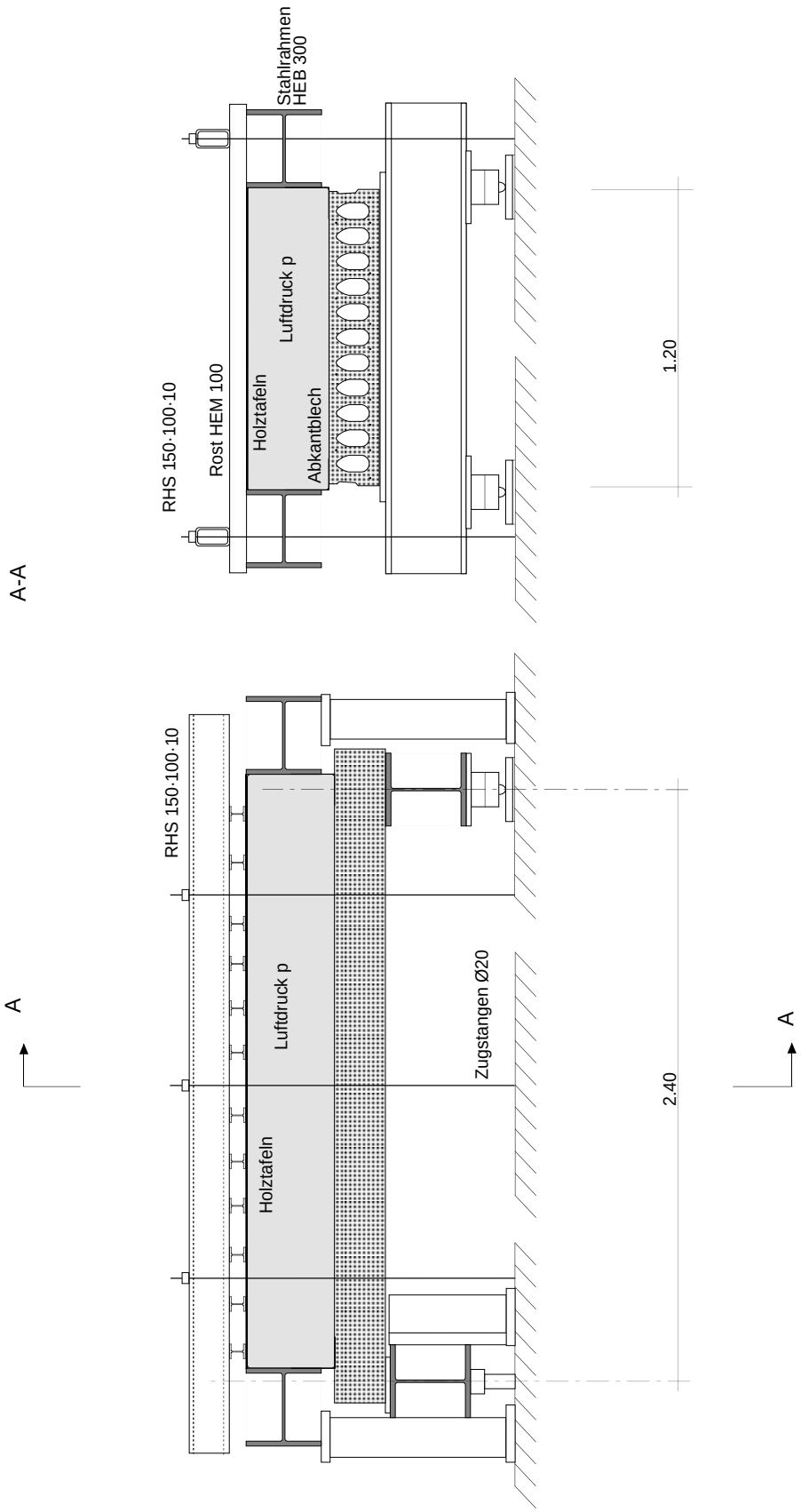


Anhang B Versuchseinrichtungen

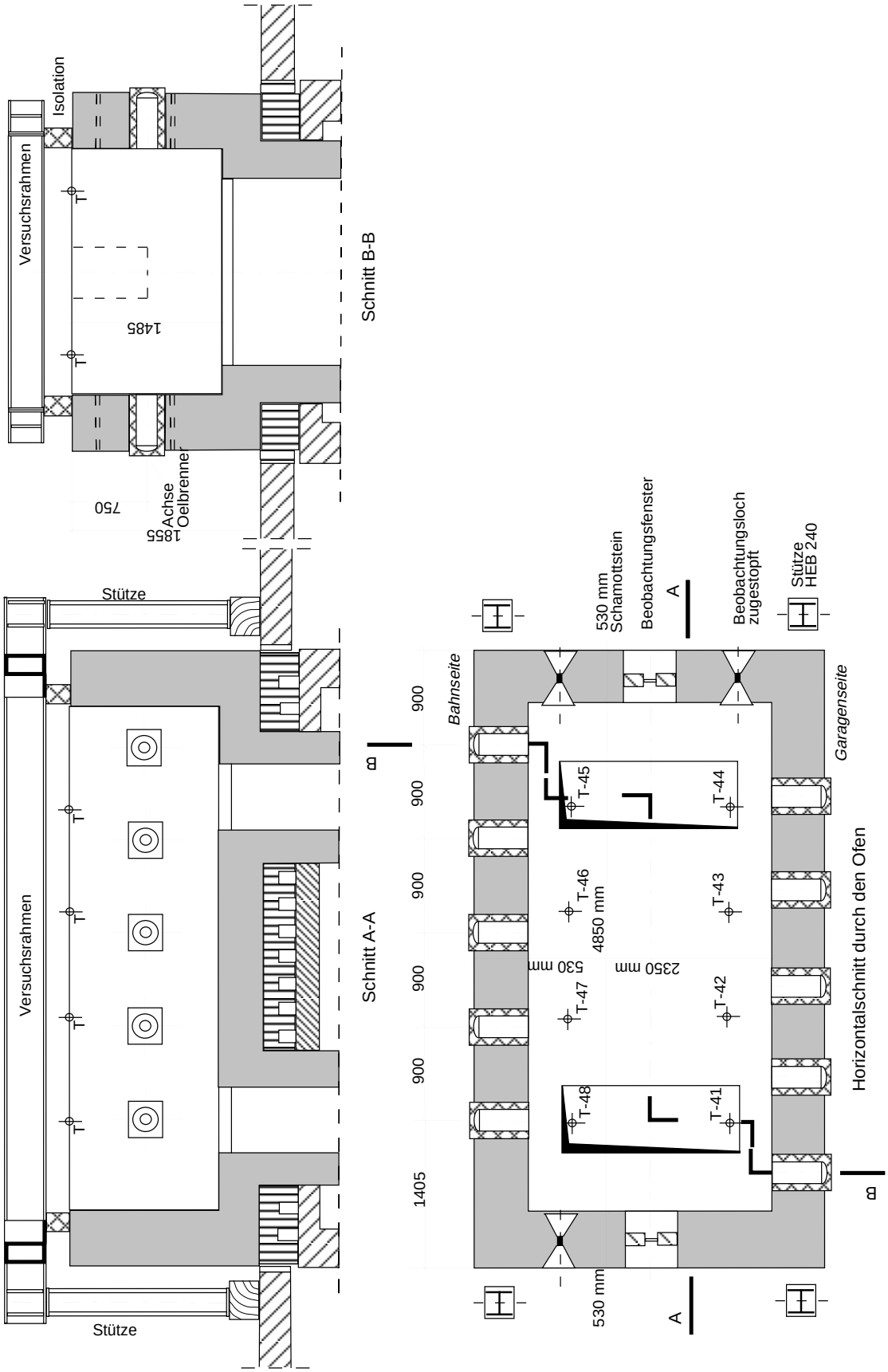
Anhang B.1 Versuchsrahmen Kaltversuche



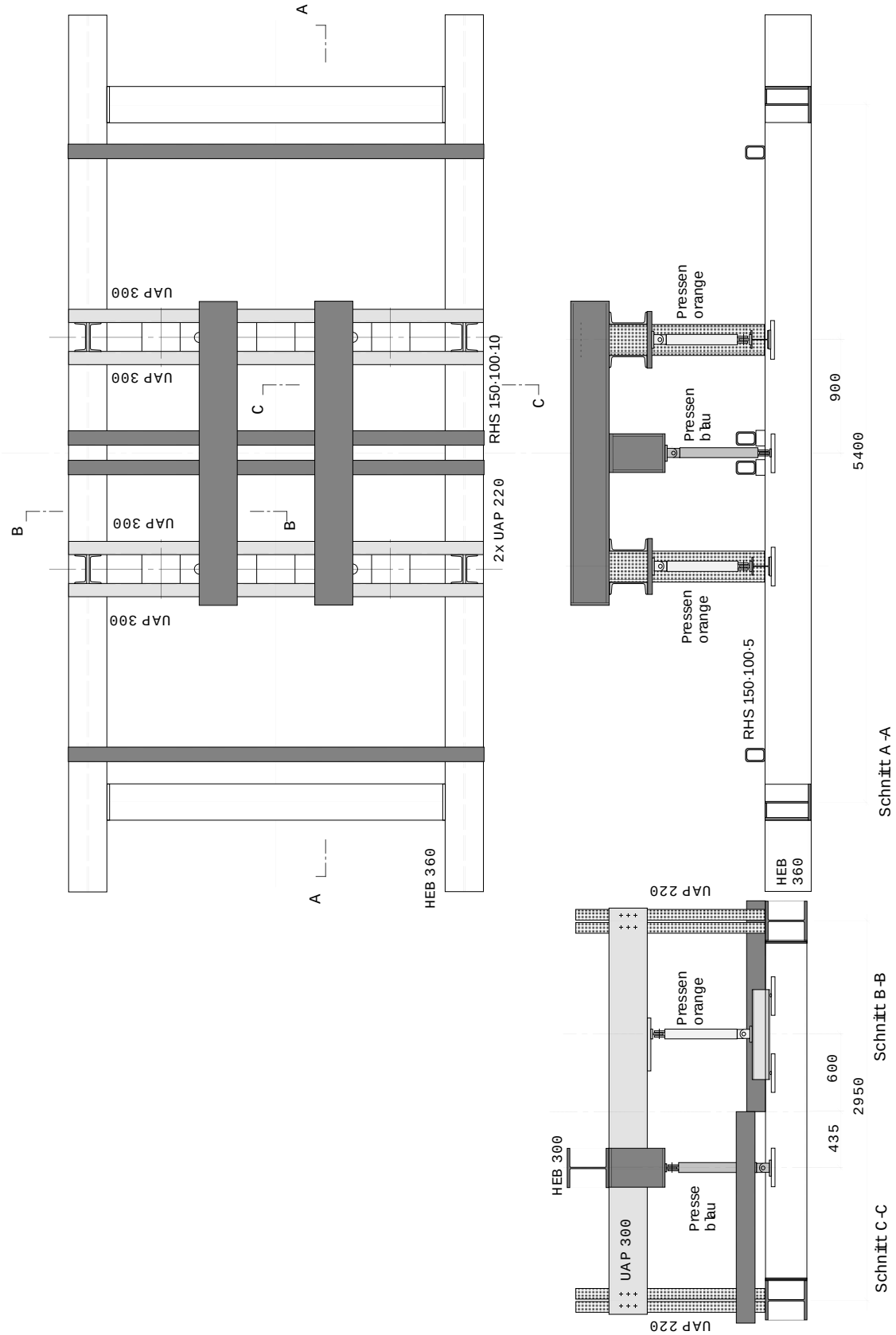
Anhang B.2 Belastungseinrichtung der Serie S5K



Anhang B.3 Ofen

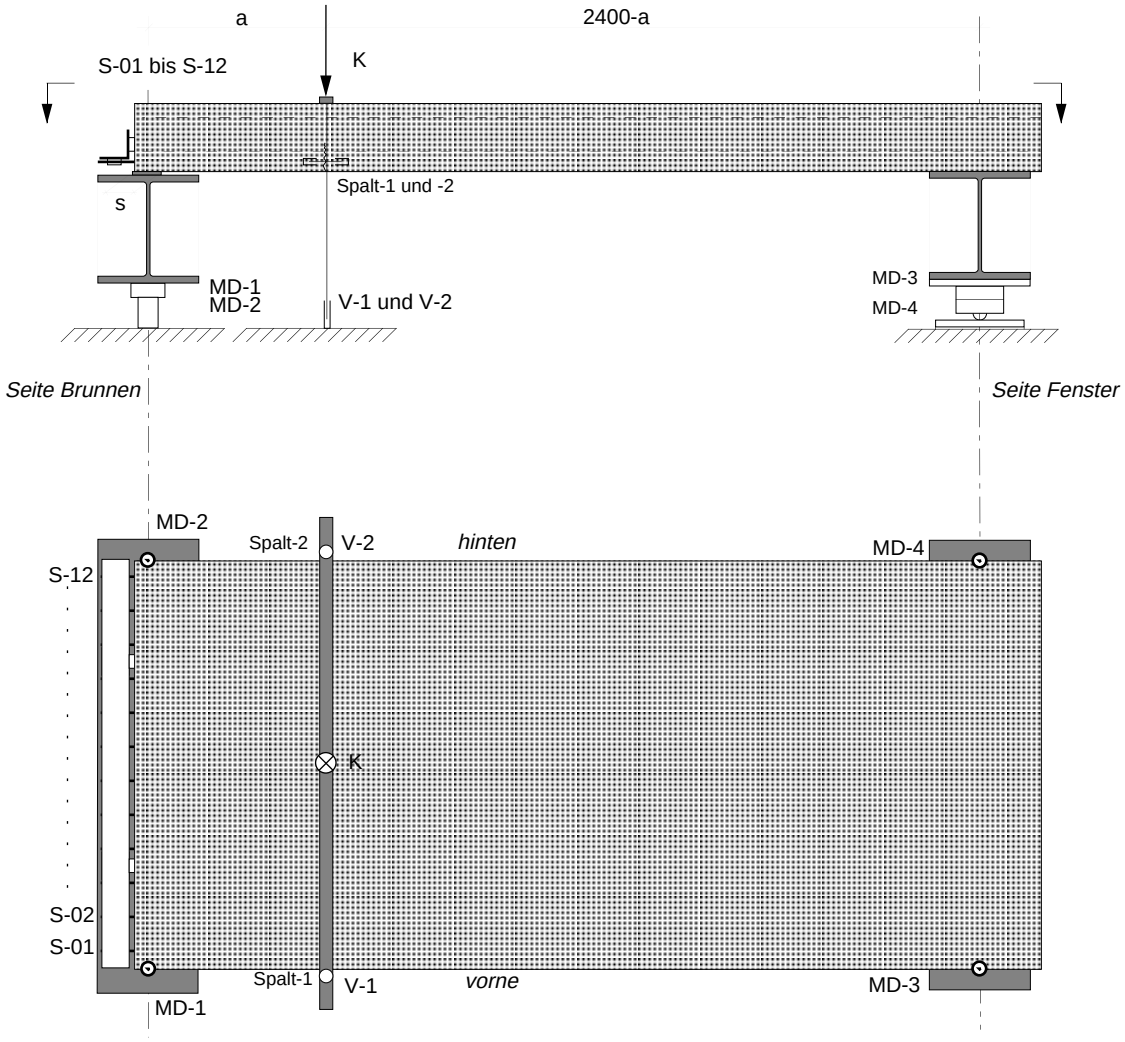


Anhang B.4 Versuchsrahmen Brandversuche

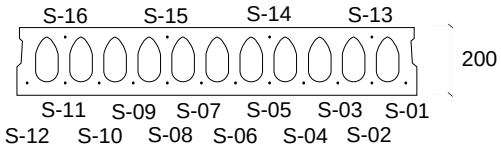


Anhang C Messungen

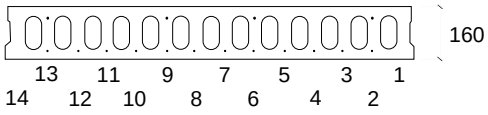
Anhang C.1 Messungen der Serien S1K und S2K



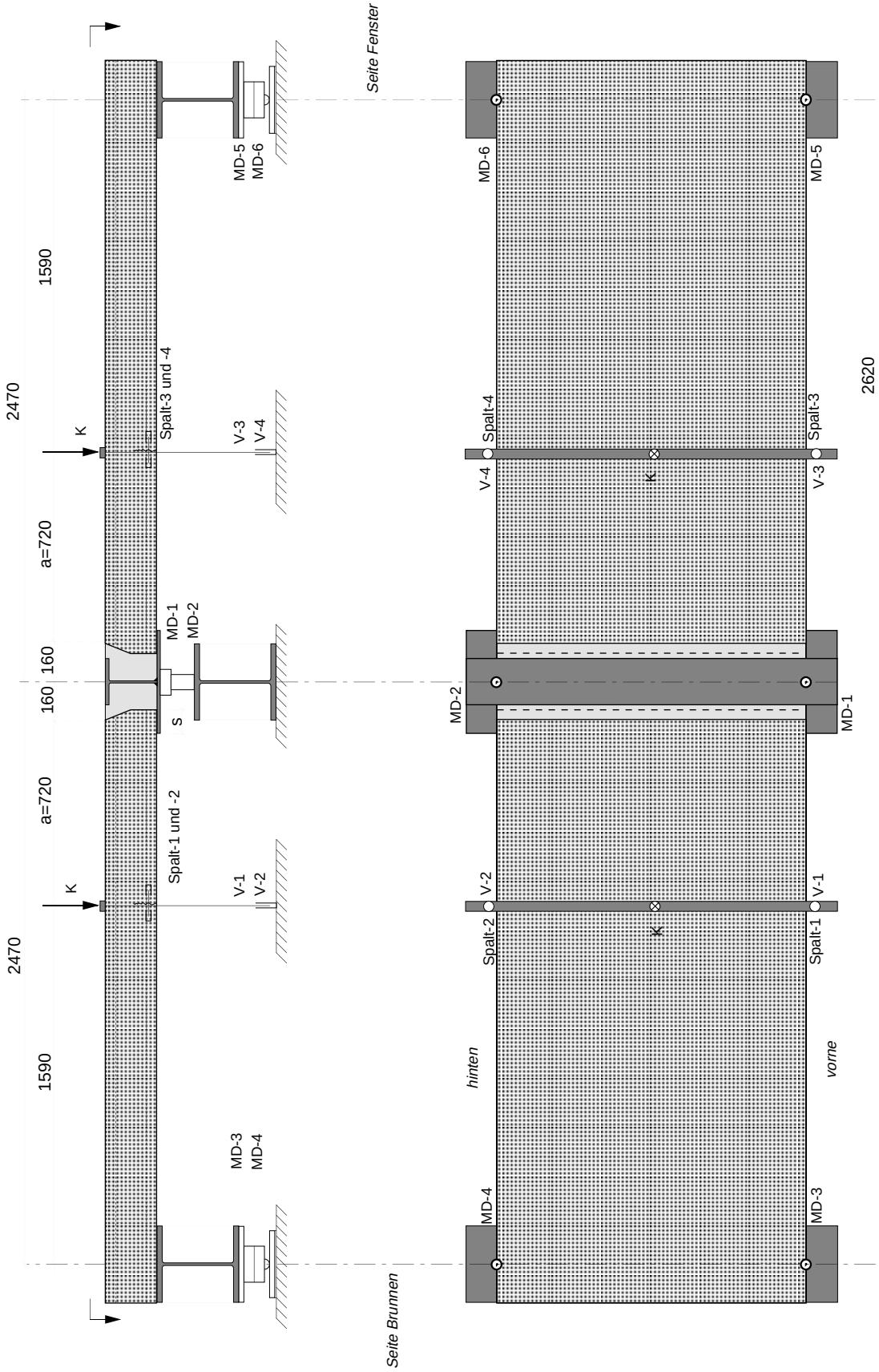
Litzenschlupf und Steg Nr. (P20):



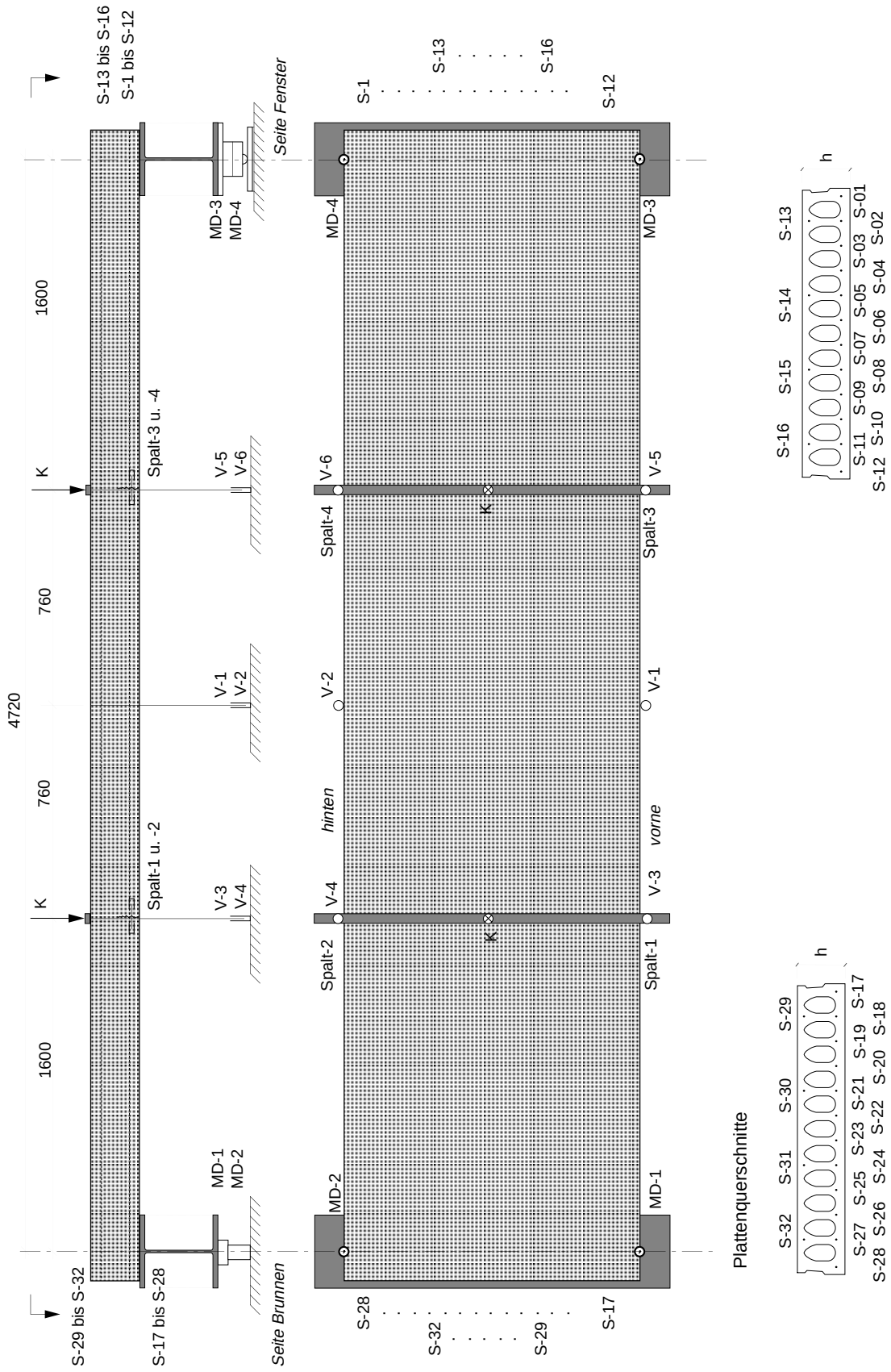
Steg Nr. (P16):



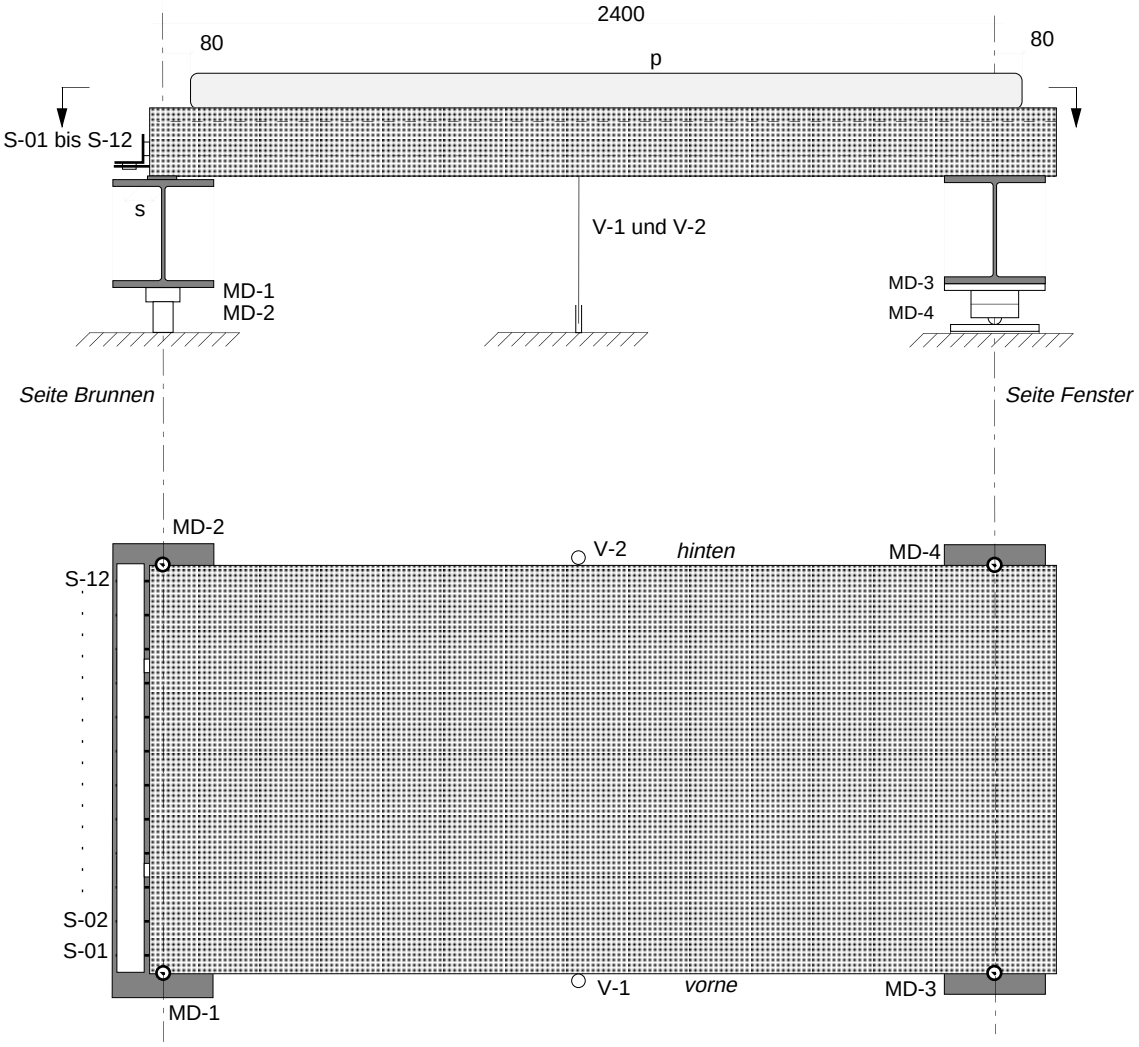
Anhang C.2 Messungen der Serie S3K



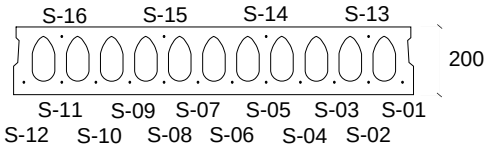
Anhang C.3 Messungen der Serie S4K



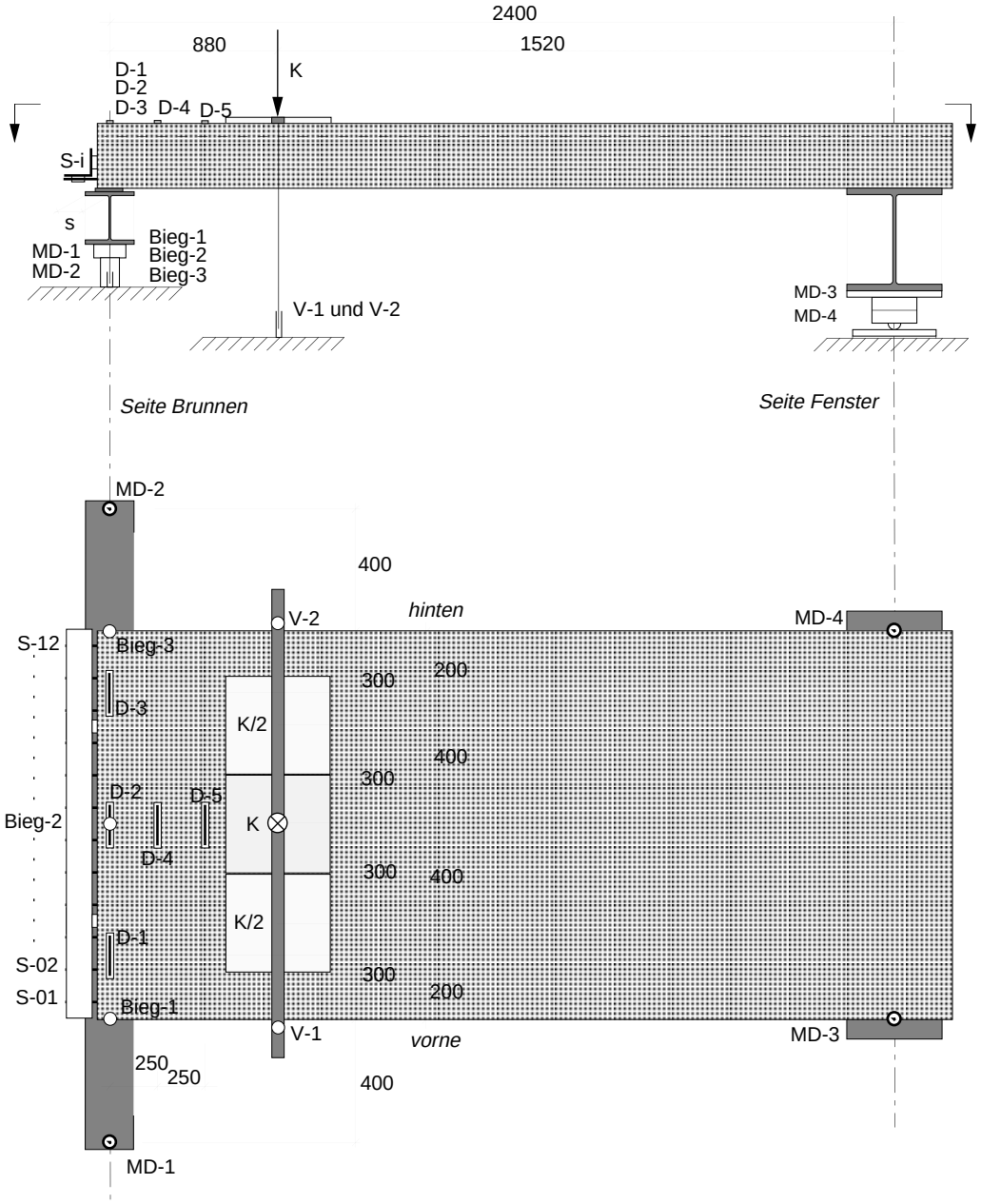
Anhang C.4 Messungen der Serie S5K



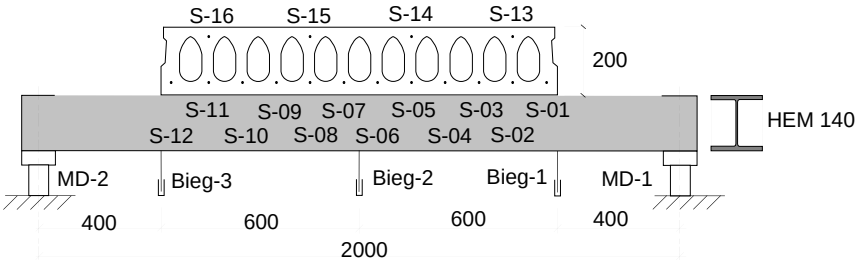
Plattenquerschnitt



Anhang C.5 Messungen der Serie S6K



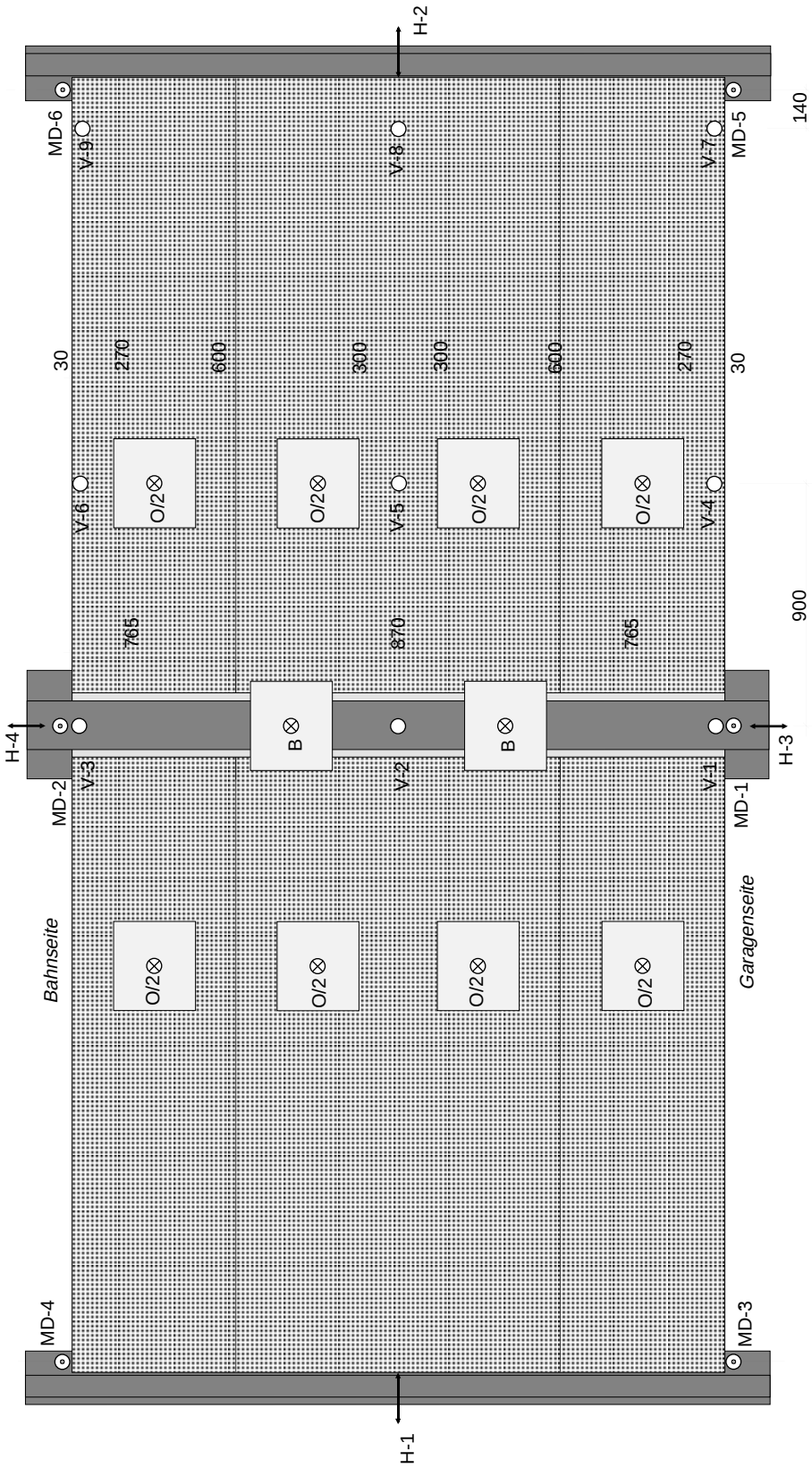
Flexibles Auflager mit Plattenquerschnitt



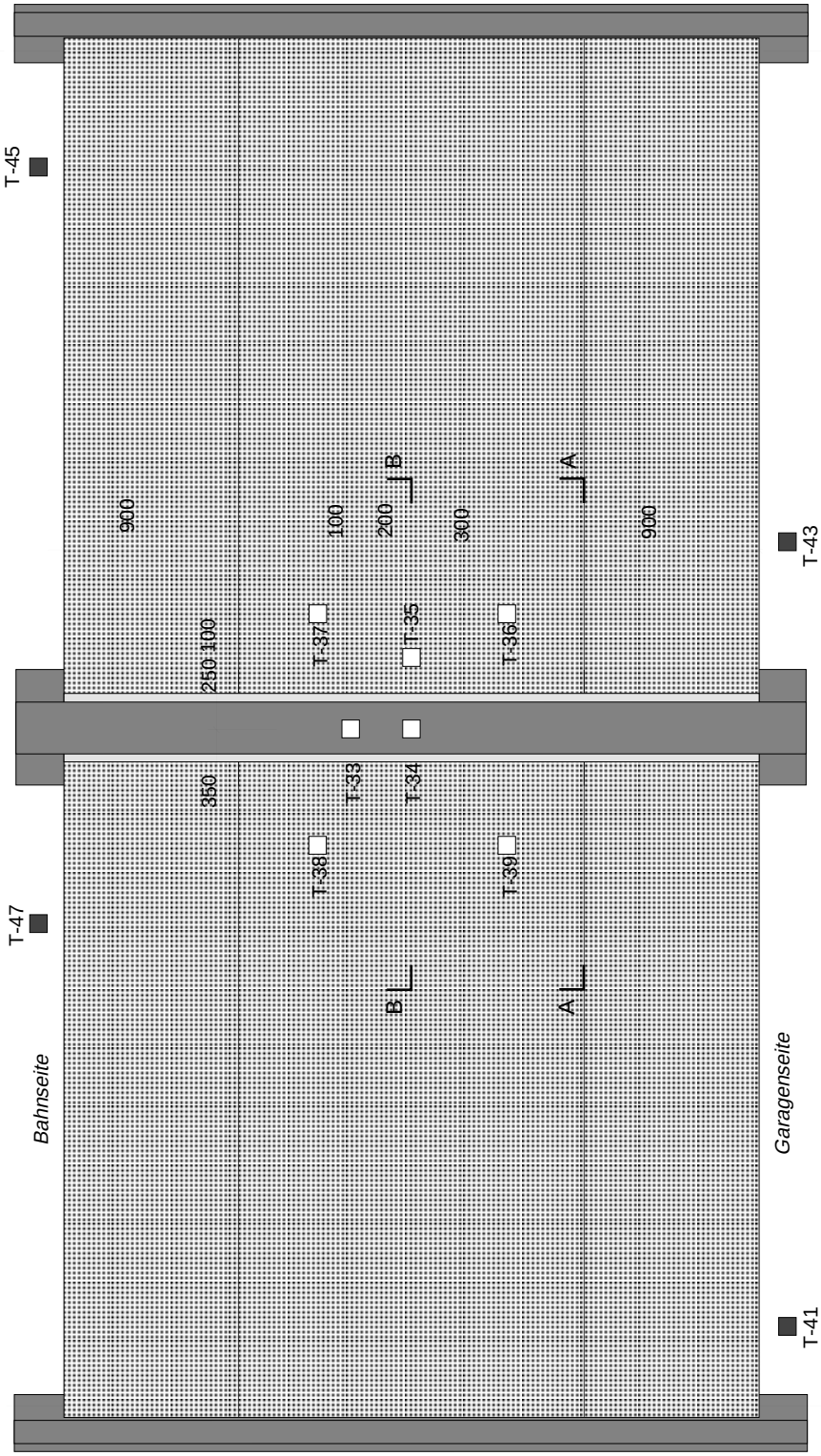
HEM 140:

$t = 21.0$ mm
$d = 12.6$ mm
$2c = 144.7$ mm
$h = 155.2$ mm
$A_a = 7.63 \cdot 10^3$ mm^2
$W_a = 380 \cdot 10^3$ mm^3
$Z_a = 455 \cdot 10^3$ mm^3
$I_a = 29.5 \cdot 10^6$ mm^4

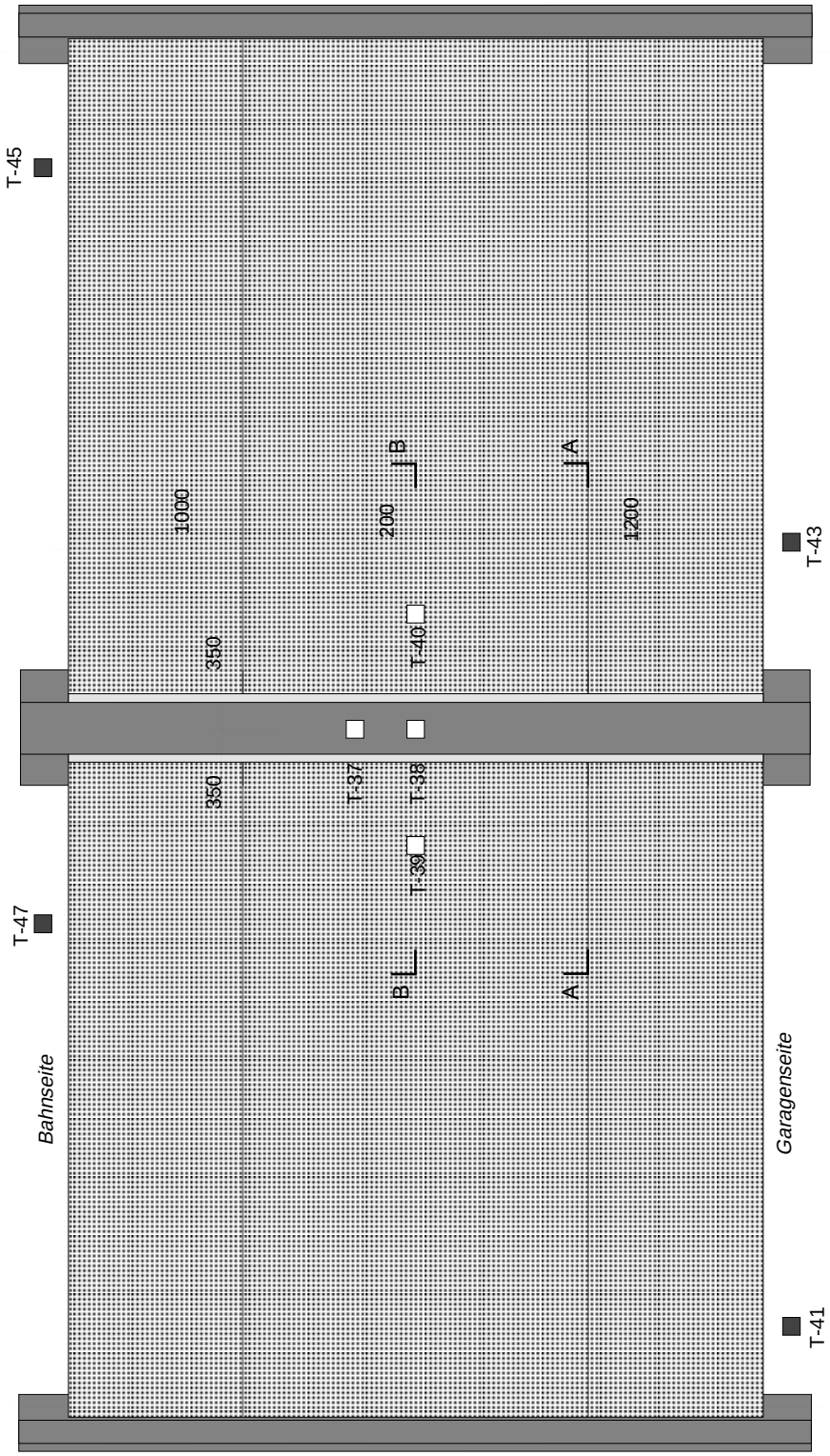
Anhang C.6 Messungen der Serie B2



Anhang C.7 Oberflächentemperaturmessungen von B2-1, B2-2 und B2-4



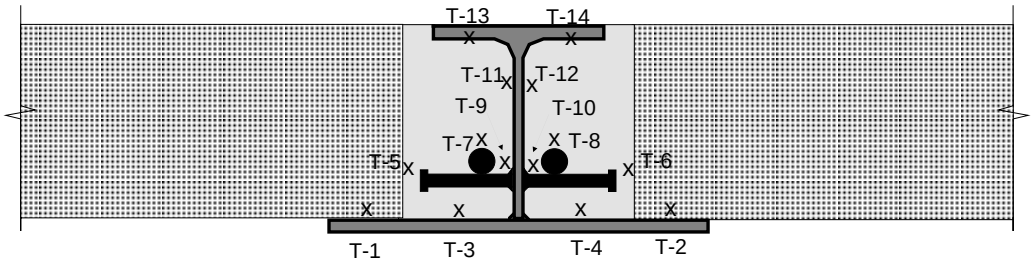
Anhang C.8 Oberflächentemperaturmessungen von B2-3



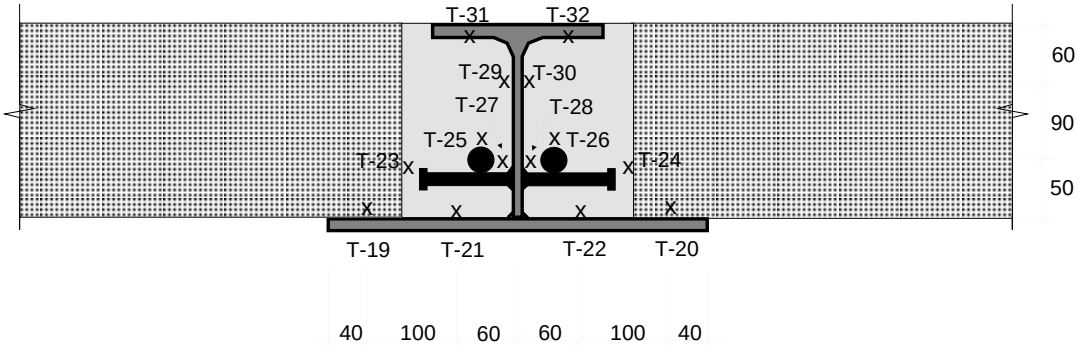
Anhang C.9 Querschnitttemperaturmessungen der Serie B2

Versuche B2-1, B2-2 und B2-4 (B2-1: ohne T-7, T-8, T-25 und T-26**)**

Schnitt A-A

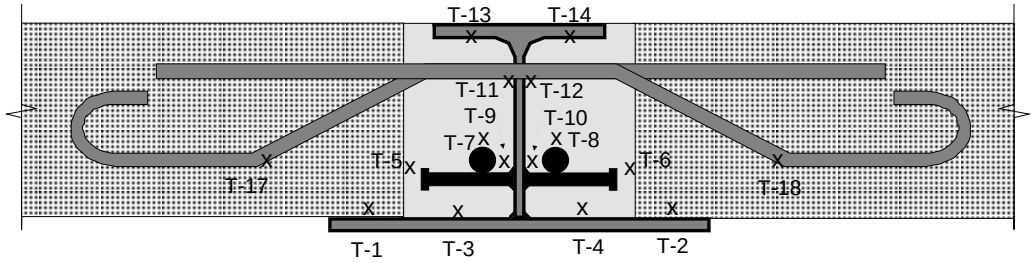


Schnitt B-B

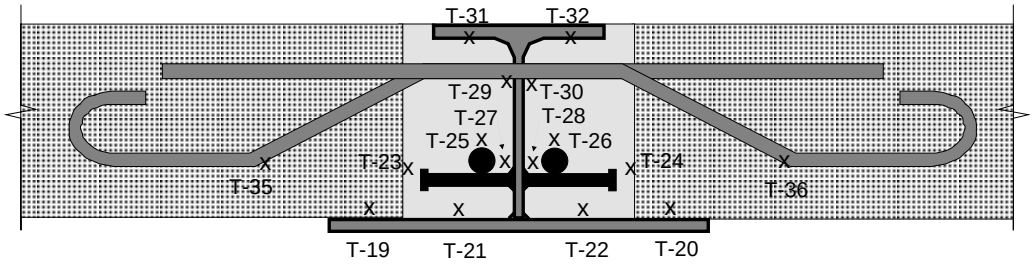


Versuch B2-3

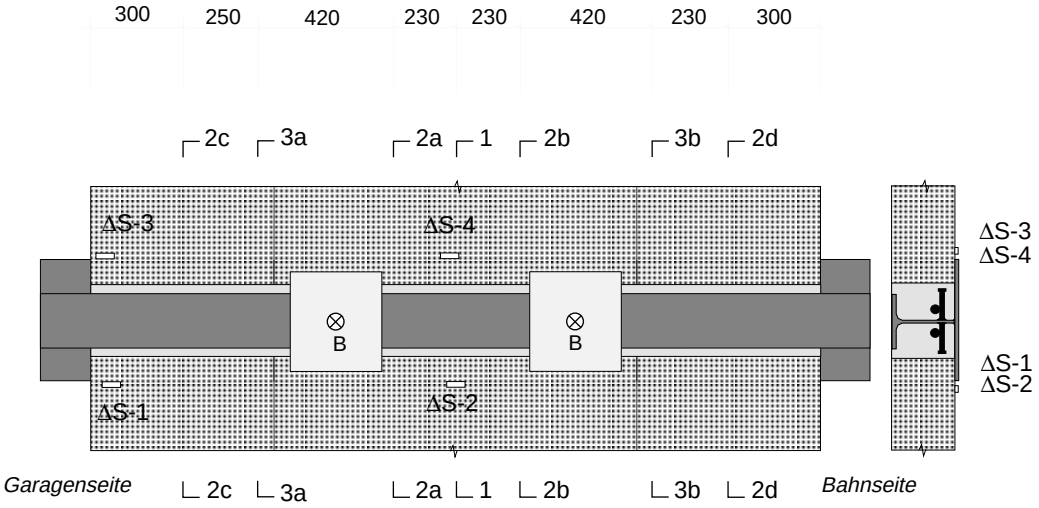
Schnitt A-A



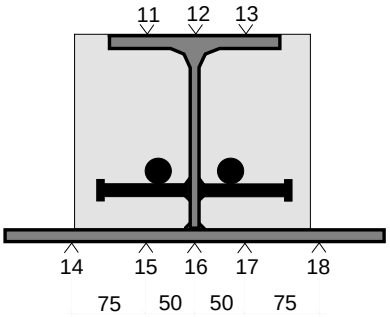
Schnitt B-B



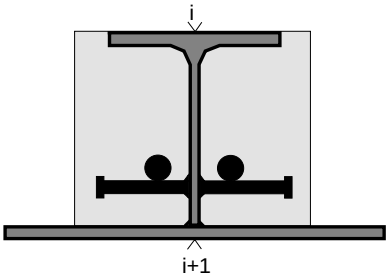
Anhang C.10 DMS-Messungen des Vorversuchs B2-2 und Relativverschiebungen Träger-Platten der Vorversuche B2



Schnitt 1-1

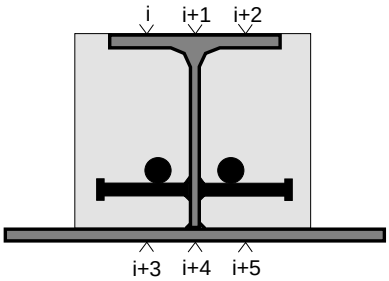


Schnitte 2-2



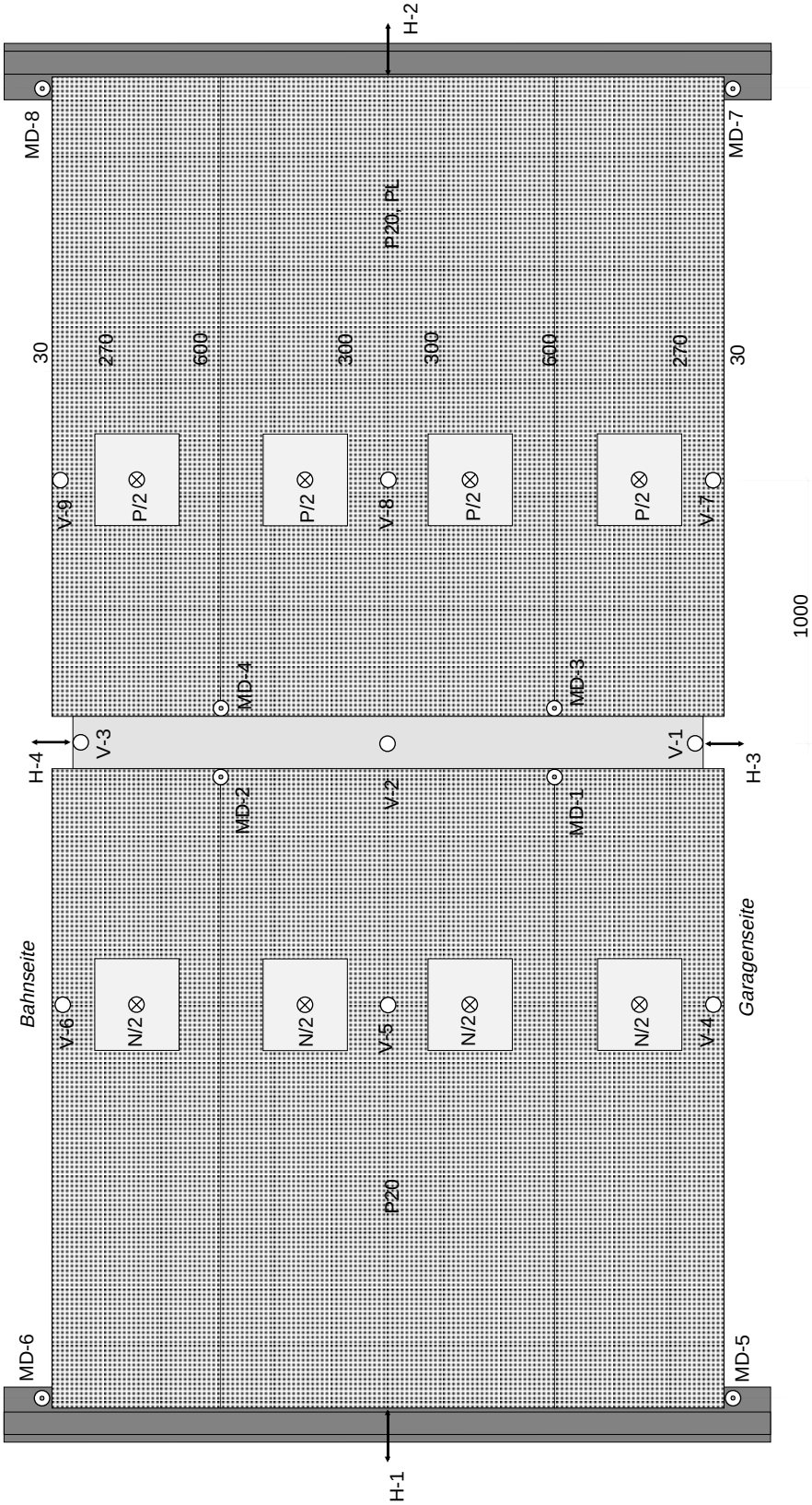
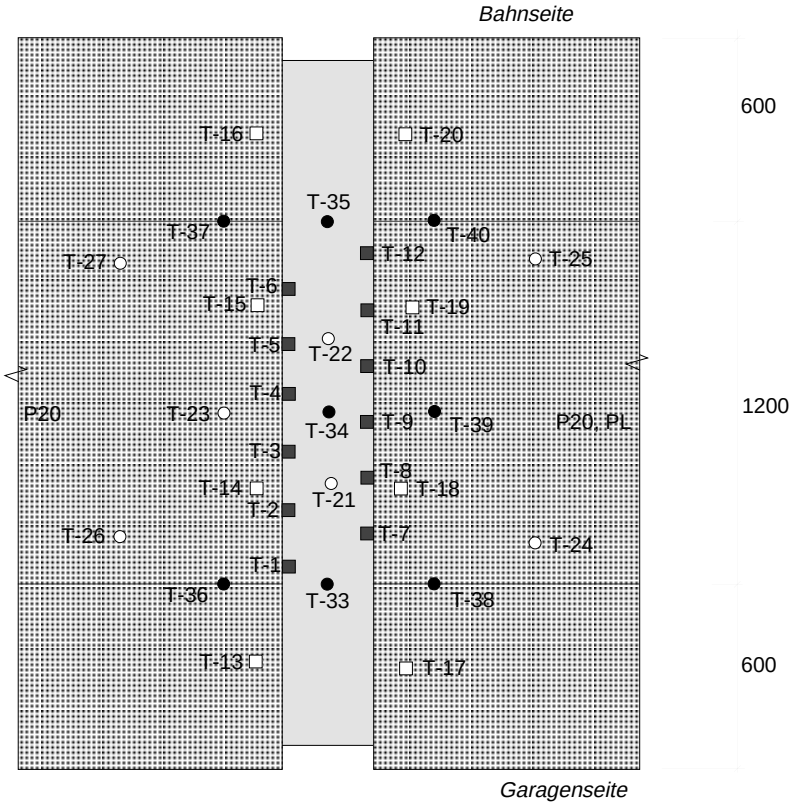
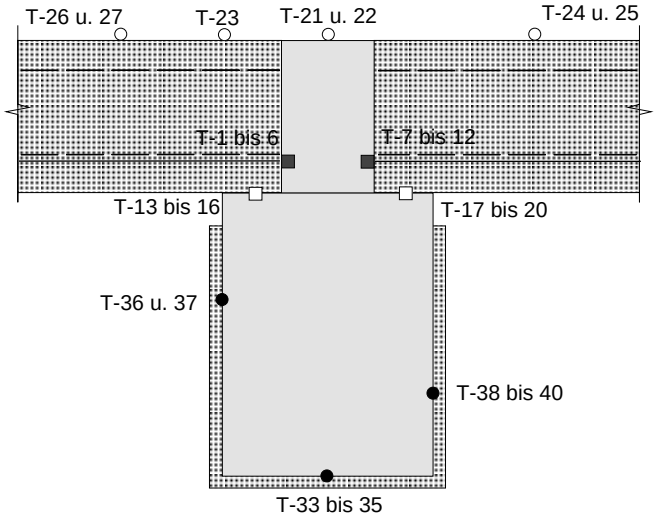
Schnitt	i	i+1
2a	21	22
2b	23	24
2c	25	26
2d	27	28

Schnitte 3-3



Schnitt	i	i+1	i+2	i+3	i+4	i+5
3a	31	32	33	34	35	36
3b	41	42	43	44	45	46

Anhang C.11 Messungen der Serie B3



Anhang C.12 Temperaturmessungen der Serie B3