

Versuche an Plattenstreifen aus Stahlbeton unter Längszug und Querbelastrung

Report**Author(s):**

Galmarini, Andreas; Locher, Daniel; Wyss, Jonas; Marti, Peter

Publication date:

2013-06

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-009950786>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Originally published in:

IBK Bericht 349

Versuche an Plattenstreifen aus Stahlbeton unter Längszug und Querbelastrung

Andreas Galmarini
Daniel Locher
Jonas Wyss
Peter Marti

KEYWORDS: Axial tension, bending, reinforced concrete, shear, slab strips, tests, transverse loading

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechts.

Andreas Galmarini, Daniel Locher, Jonas Wyss, Peter Marti:
Versuche an Plattenstreifen aus Stahlbeton unter Längszug und Querbelastung

Bericht IBK Nr. 349, Juni 2013

© 2013 Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, Zürich

Sie finden das Verzeichnis der IBK-Publikationen auf unserer Homepage unter:

The catalogue of IBK publications is available on our homepage at:

www.ibk.ethz.ch/publications

Die meisten Berichte von Nr. 270 bis Nr. 333 sind auch noch in gedruckter Form unter Angabe der ISBN-Nr. erhältlich bei:

Most reports from No. 270 to No. 333 can still be purchased in printed form by indicating the ISBN number from:

AVA Verlagsauslieferung AG

Centralweg 16

CH-8910 Affoltern am Albis

Tel. ++41 44 762 42 00

Fax ++41 44 762 42 10

e-mail: avainfo@ava.ch

Berichte ab Nr. 334 sind nur noch in elektronischer Form verfügbar. Sie finden die entsprechenden Dateien in der e-collection der ETH Bibliothek unter <http://e-collection.library.ethz.ch> oder über die Links auf unserer Homepage.

Reports from No. 334 onwards are only available in electronic form. The respective files can be found in the e-collection of the ETH Library at <http://e-collection.library.ethz.ch> or through the links on our homepage.

Versuche an Plattenstreifen aus Stahlbeton unter Längszug und Querbelastung

Andreas Galmarini, dipl. Ing. ETH
Daniel Locher, MSc ETH Bau-Ing.
Jonas Wyss, BSc ETH Bau-Ing.
Prof. Dr. Peter Marti, dipl. Ing. ETH

Institut für Baustatik und Konstruktion
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Zürich
Juni 2013

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	1
1.3 Versuchskonzept	1
2. Versuchskörper	3
2.1 Abmessungen und Bewehrung	3
2.2 Herstellung	10
2.3 Baustoffe	11
2.3.1 Beton	11
2.3.2 Betonstahl	13
3. Versuchsdurchführung	17
3.1 Versuchsanlage	17
3.1.1 Einführung	17
3.1.2 Lasteinleitung	21
3.1.3 Ein- und Ausbau der Versuchskörper	24
3.1.4 Hydraulische Systeme	25
3.2 Messungen	26
3.2.1 Kontinuierliche Messungen	26
3.2.2 Manuelle Messungen	30
3.2.3 Messgenauigkeit	33
3.2.4 Rissprotokolle	35
3.2.5 Fotodokumentation	36
3.3 Versuchsablauf	37
4. Versuchsergebnisse	39
4.1 Auswertung und Darstellung der Resultate	39
4.1.1 Bezeichnungen	39
4.1.2 Auswertung der kontinuierlichen Messungen	39
4.1.3 Auswertung der manuellen Messungen	41
4.1.4 Auswertung der Risscharakteristika	42
4.1.5 Darstellung der Resultate	43
4.1.6 Archivierung der Messdaten und Auswertungen	43

4.2	Generelle Bemerkungen	44
4.3	Versuch T0	45
4.3.1	Versuchsablauf	45
4.3.2	Beobachtungen	46
4.3.3	Versuchsergebnisse	47
4.3.4	Bilder	54
4.4	Versuch T1	56
4.4.1	Versuchsablauf	56
4.4.2	Beobachtungen	58
4.4.3	Versuchsergebnisse	58
4.4.4	Bilder	66
4.5	Versuch T2	68
4.5.1	Versuchsablauf	68
4.5.2	Beobachtungen	70
4.5.3	Versuchsergebnisse	71
4.5.4	Bilder	78
4.6	Versuch T3	80
4.6.1	Versuchsablauf	80
4.6.2	Beobachtungen	82
4.6.3	Versuchsergebnisse	83
4.6.4	Bilder	90
4.7	Versuch T4	92
4.7.1	Versuchsablauf	92
4.7.2	Beobachtungen	94
4.7.3	Versuchsergebnisse	95
4.7.4	Bilder	102
4.8	Versuch T5	104
4.8.1	Versuchsablauf	104
4.8.2	Beobachtungen	106
4.8.3	Versuchsergebnisse	107
4.8.4	Bilder	114
5.	Zusammenfassung	117
5.1	Zusammenfassung	117
5.2	Summary	122
	Verdankungen	127
	Bezeichnungen	128
	Literatur	131

1. Einleitung

1.1 Problemstellung

Stahlbetonplatten gehören zu den wichtigsten und am häufigsten verwendeten Bauteilen im Massivbau. Als Bestandteile integraler Tragwerke können sie neben ihrer Eigenlast sowie Auf- und Nutzlasten durch Zugkräfte in der Plattenebene beansprucht werden. Beispiele dafür sind Spannbänder und Teile von Hohlkastenträgern sowie Teile von Faltenwerken. Infolge der Belastung sowie der Kombination von globalem und lokalem Tragverhalten können in solchen Platten hohe Zugkräfte gemeinsam mit signifikanten Momenten und Querkräften auftreten.

Die beschriebene Kombination von Membran- und Plattenkräften wurde bislang nicht vertieft experimentell untersucht. Insbesondere zum Einfluss hoher Zugkräfte auf den Querkrafttragwiderstand bestehen Wissenslücken, die mit dem vorliegenden Bericht reduziert werden sollen.

1.2 Zielsetzung

Mit den in diesem Bericht beschriebenen Versuchen wurde das Tragverhalten von Stahlbetonplattenstreifen unter Längszug und Querbelastung experimentell untersucht. Im Vordergrund stand die Frage, inwiefern der Längszug den Querkrafttragwiderstand beeinflusst.

1.3 Versuchskonzept

Das Versuchsprogramm orientierte sich an einer praktischen Problemstellung. Daraus ergab sich die Grundanordnung der Versuche mit Spannweite und Plattendicke sowie Bewehrungsgehalt und -lage.

Mit dem Ziel, das Tragverhalten eines mehrfeldrigen Plattenstreifens inklusive Momentenumlagerung zu untersuchen, wurde ausgehend von einem Zweifeldträger unter Gleichlast (Bild 1.1(a)) eine Versuchsanlage entwickelt, in der die Versuchskörper als einfache Balken mit einseitigem Kragarm belastet wurden. Die Gleichlast im Feld wurde durch drei Einzellasten Q simuliert; eine weitere Last P am Ende des Kragarms ermöglichte die Kontrolle des Moments M_B , siehe Bild 1.1(b) und (c). Das gewählte System ist statisch bestimmt; alle Schnittgrößen lassen sich eindeutig aus der aufgetragenen Belastung und der Geometrie ableiten.

Die Längszugkraft T wurde beim Versuchsbeginn aufgebracht und bei der anschließenden Steigerung der Querbelastung (P und Q) konstant gehalten

Nachdem über dem Zwischenaufleger B das Fließmoment M_y erreicht wurde, konnte die Last P nicht mehr signifikant gesteigert werden. In den Versuchen wurde deshalb, nach festgestelltem Abfall der Steifigkeit des Kragarms B - C, der Ölfluss zu den Hydraulikzylindern bei C (P -Zylinder) abgeriegelt. Damit wurde die Lage bei C konstant gehalten. Dieses Vorgehen kann als Änderung des statischen Systems interpretiert werden, siehe Bild 1.1(d) und (e).

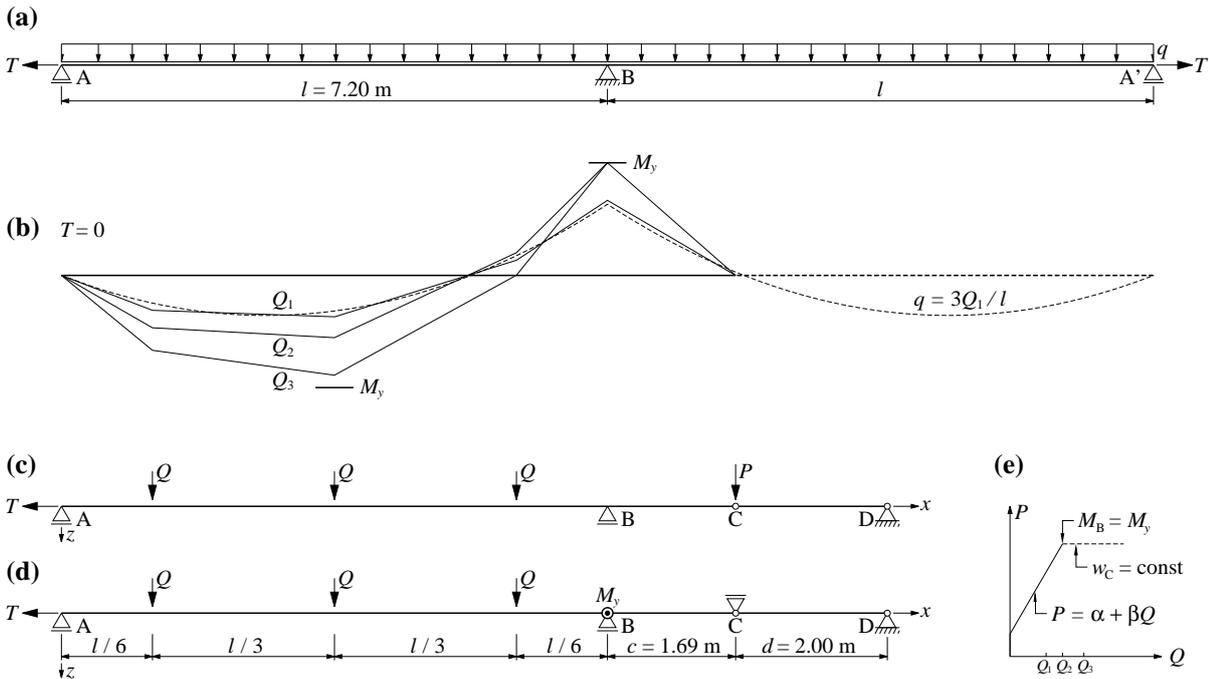


Bild 1.1 Versuchskonzept: (a) Zweifeldträger unter Gleichlast; (b) idealisierte Momentenverläufe bei Versuch ohne Normalkraft und Vergleich mit Zweifeldträger; (c) statisches System für $M_B < M_y$; (d) statisches System für $M_B = M_y$ und abgeriegelte P -Zylinder; (e) idealisierte Versuchssteuerung.

Die Abmessungen und der verwendete Beton aller Versuchskörper waren identisch. Die Versuchskörper wurden gleichzeitig betoniert und vor dem Beginn des ersten Versuches drei Monate gelagert, um alterungsbedingte Unterschiede der Betoneigenschaften zu minimieren. Die Grundkonfiguration der Bewehrung bestand aus zwei Lagen durchgehender Stäbe in Längsrichtung, welche nur an den Kräfteinleitungsstellen lokal verbügelt waren, um ein vorzeitiges Versagen an diesen Stellen auszuschliessen.

Im ersten Teil der Versuchsserie (T0, T1 und T2) wurde die Längszugkraft T variiert. Die maximal aufgebrauchte Längszugkraft wurde so gewählt, dass sie in der Längsbewehrung eine Spannung von 300 N/mm^2 erzeugte. Im zweiten Teil wurde bei gleichbleibender (maximaler) Längszugkraft die Bewehrung der Grundkonfiguration ergänzt durch aussen liegende Querstäbe (T3) bzw. eine durchgehende Verbügelung mit kleinem (T4) und grossem Abstand (T5).

2. Versuchskörper

2.1 Abmessungen und Bewehrung

Die Abmessungen der Versuchskörper sowie die Lage von Einlagen und Anschlussdetails sind aus Bild 2.1 ersichtlich. Die Bilder 2.2, 2.3, 2.4 und 2.5 zeigen die Bewehrung der verschiedenen Versuchskörper, und Tabelle 2.1 gibt eine Übersicht der Bewehrungsmerkmale.

Alle sechs Versuchskörper wiesen identische Abmessungen auf. Die Geometrie wurde so gewählt, dass die Lasteinleitungsstellen dem Raster der Aufspannpunkte auf dem Aufspannboden der Versuchshalle HIF der ETH Höggerberg entsprachen.

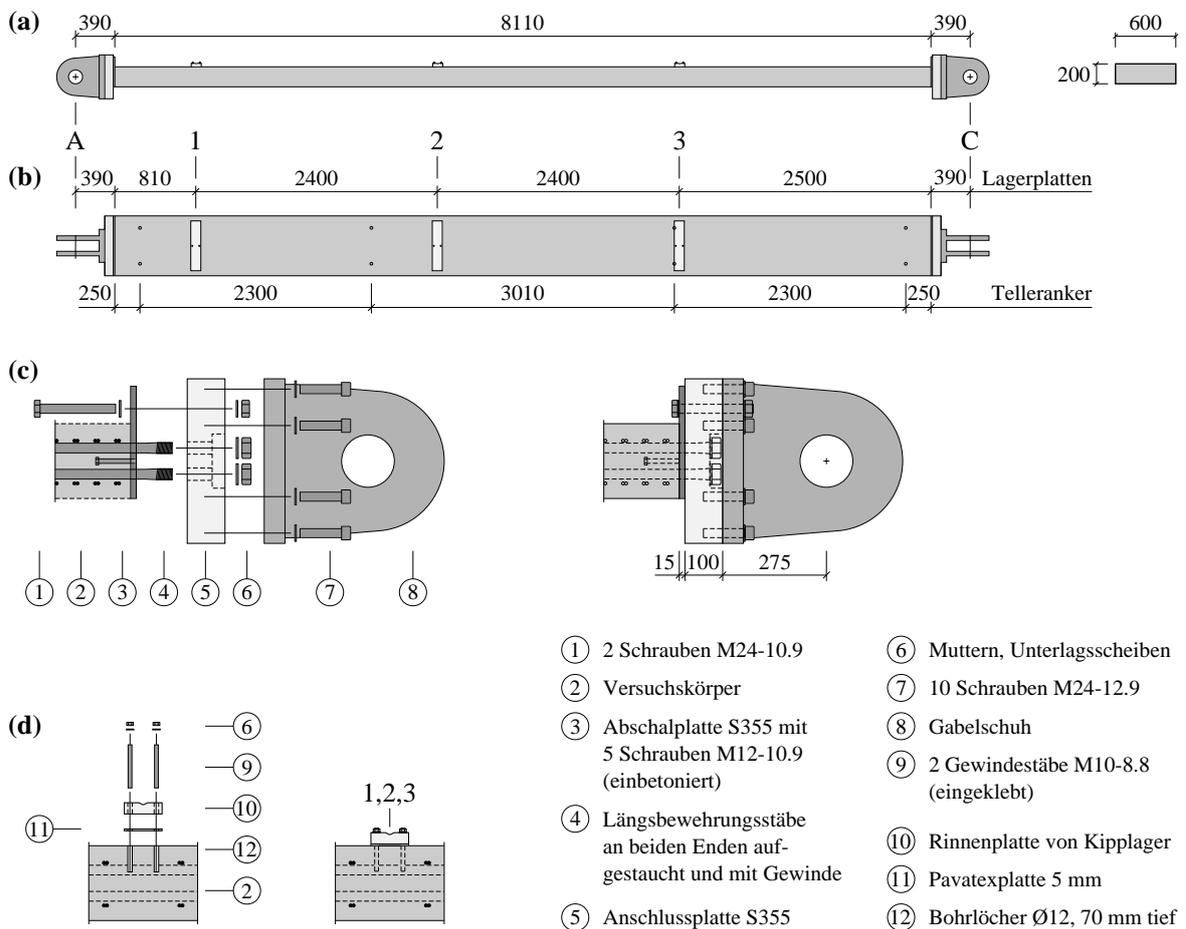


Bild 2.1 Versuchskörper: (a) Geometrie; (b) Einlagen; (c) Endanschluss vor und nach dem Zusammenfügen; (d) Fixierung der Lagerplatten für die Belastungsjoche 1 bis 3 vor und nach dem Zusammenfügen. Abmessungen in mm.

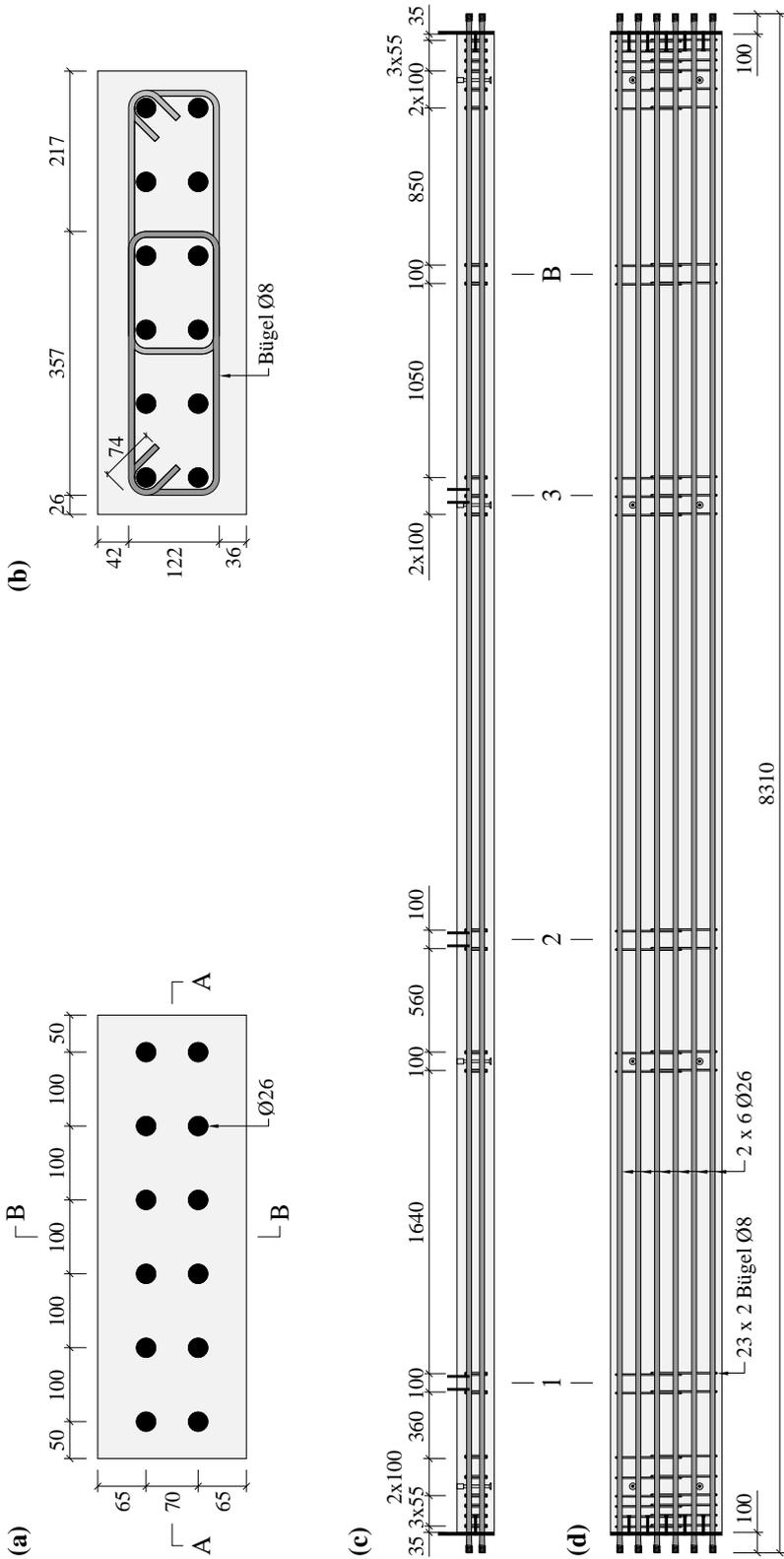


Bild 2.2 Bewehrung der Versuchskörper T0, T1 und T2: (a) Längsbewehrung; (b) Bügel; (c) Längsschnitt B-B; (d) Längsschnitt A-A. Abmessungen in mm.

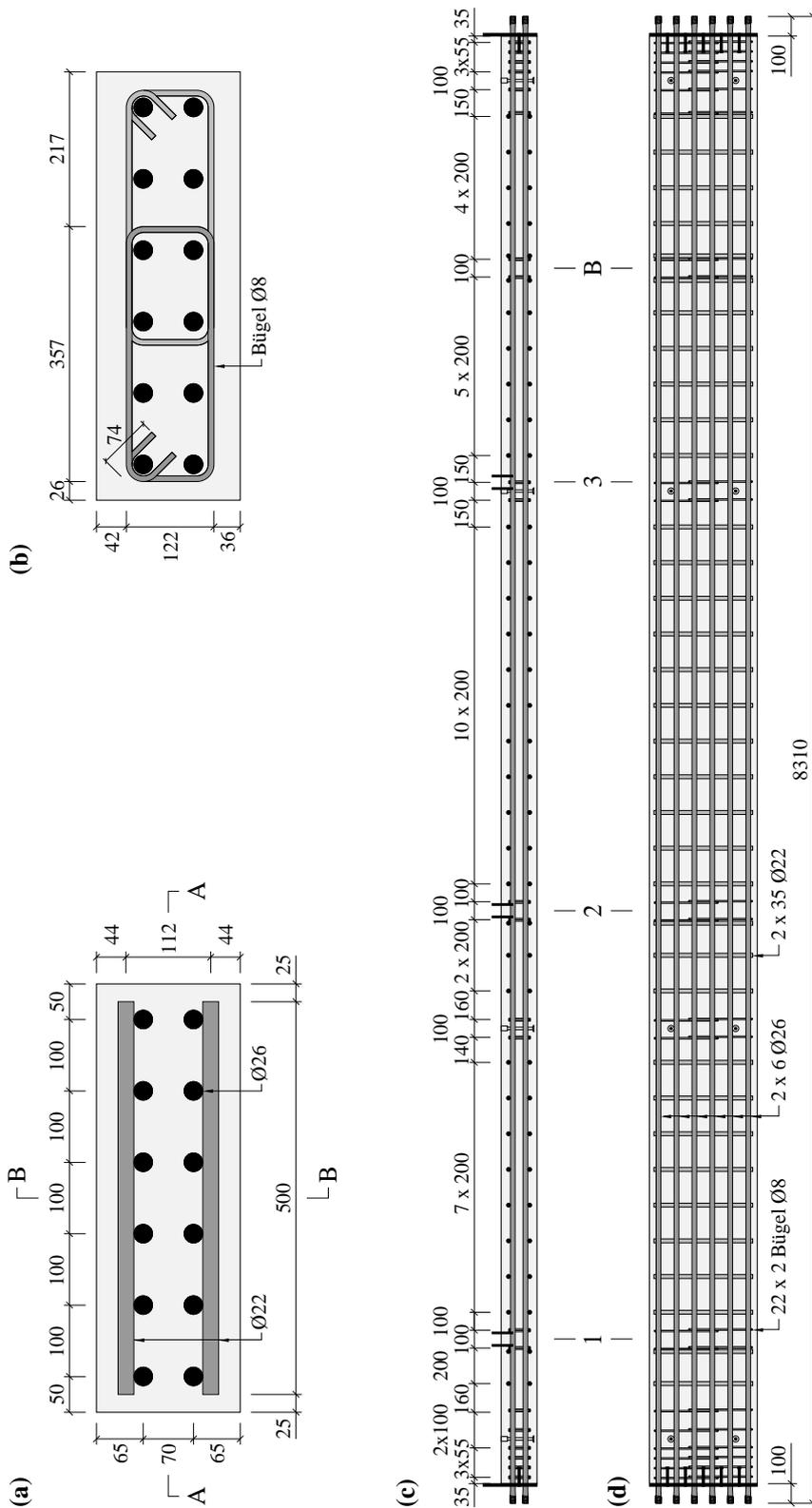


Bild 2.3 Bewehrung des Versuchskörpers T3: (a) Längs- und Querbewehrung; (b) Bügel; (c) Längsschnitt B-B; (d) Längsschnitt A-A. Abmessungen in mm.

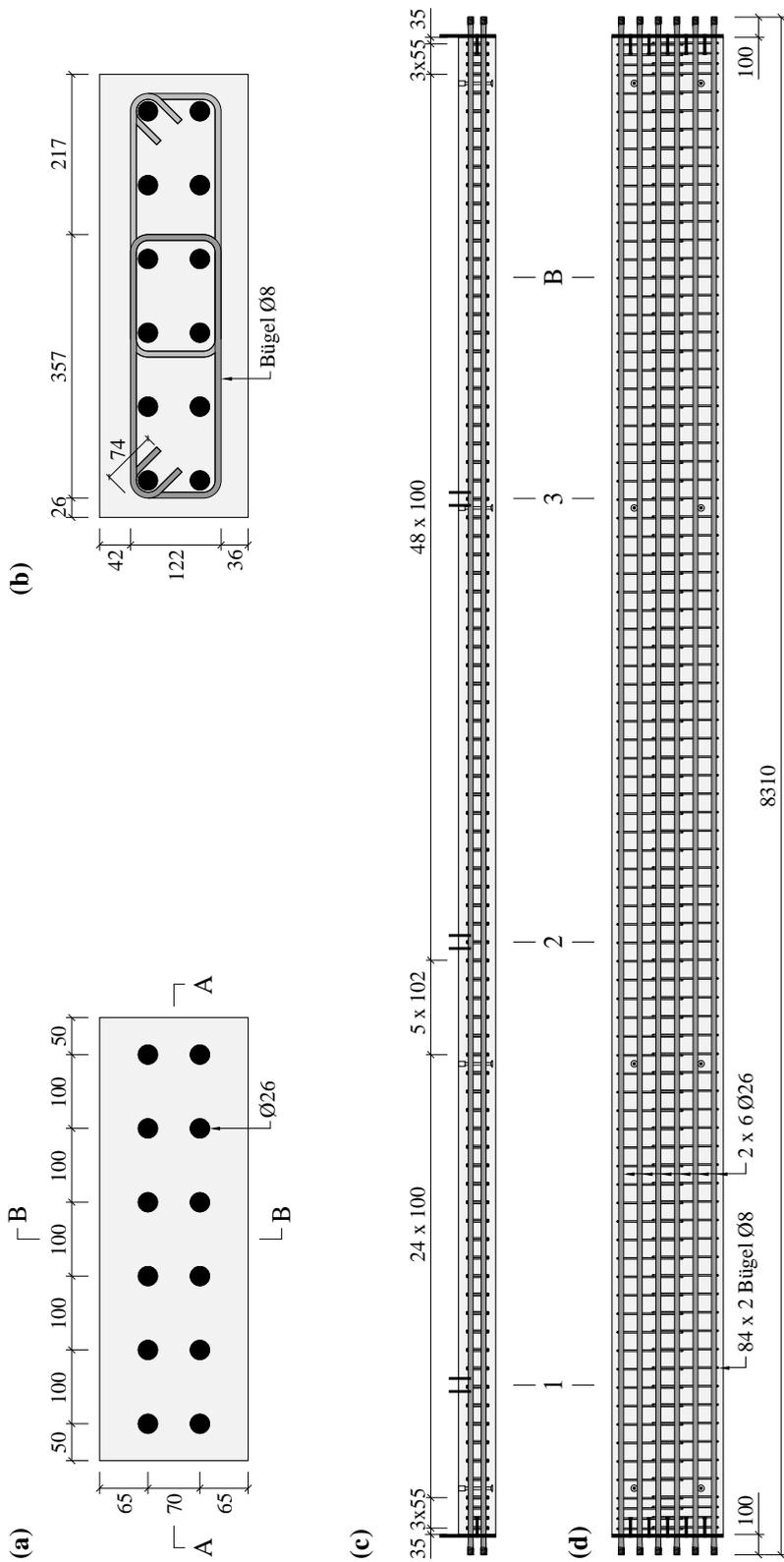


Bild 2.4 Bewehrung des Versuchskörpers T4: (a) Längsbewehrung; (b) Bügel; (c) Längsschnitt B-B; (d) Längsschnitt A-A. Abmessungen in mm.

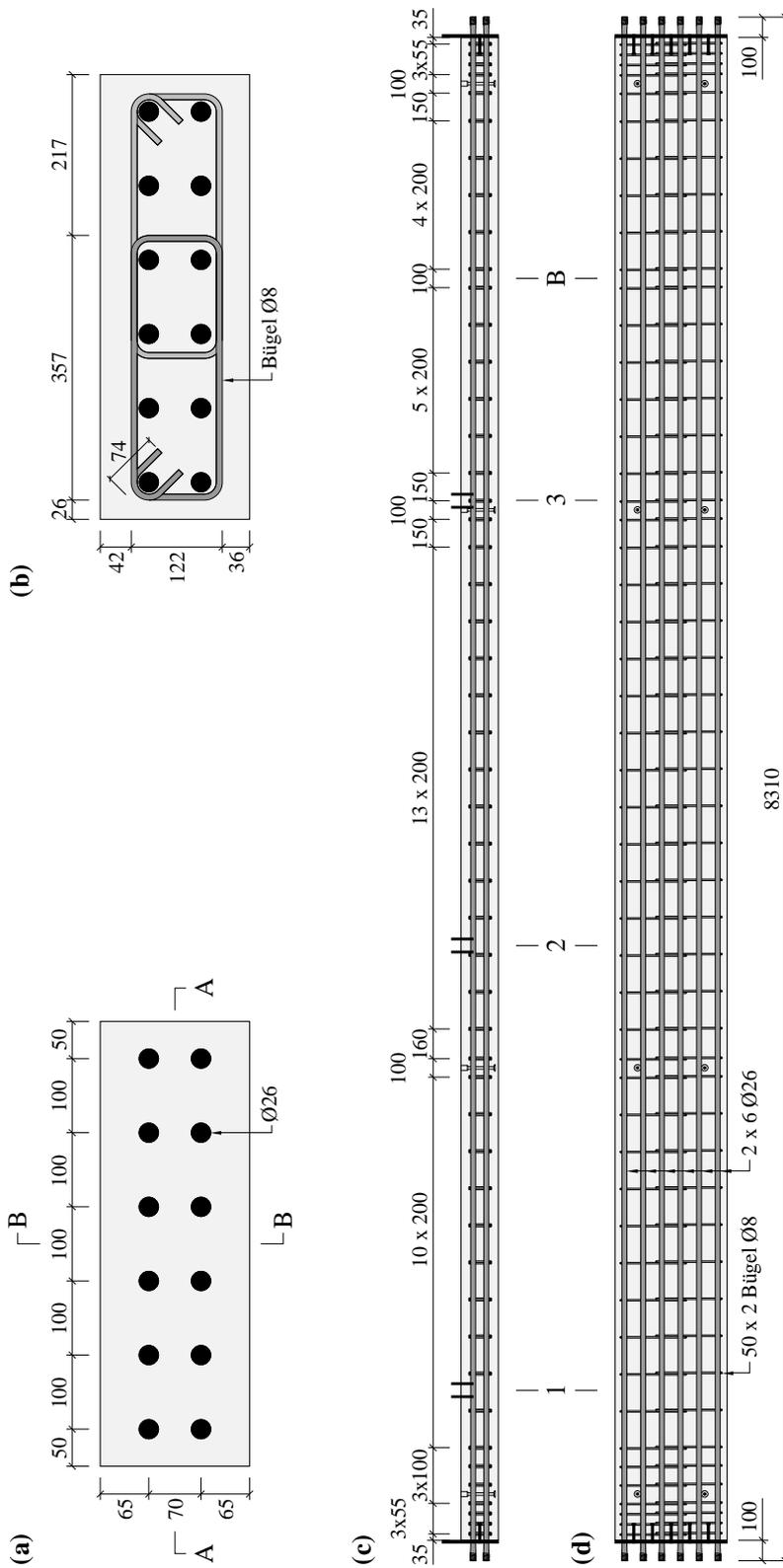


Bild 2.5 Bewehrung des Versuchskörpers T5: (a) Längsbewehrung; (b) Bügel; (c) Längsschnitt B-B; (d) Längsschnitt A-A. Abmessungen in mm.

Die Längsbewehrung bestand aus zwei Lagen von sechs Stäben $\text{Ø}26$ mm (Stahl B450C) und war bei allen Versuchskörpern identisch. Der Schwerpunkt dieser Bewehrungsstäbe lag 35 mm ober- bzw. unterhalb der Schwerachse der Versuchskörper. Die Bewehrungsüberdeckung für die Längsbewehrungsstäbe betrug somit $c_{\text{nom}} = 52$ mm. Der Längsbewehrungsgehalt betrug 5.31 % bezogen auf die Bruttoquerschnittsfläche.

Die Versuchskörper T0, T1 und T2 wiesen keine Querbewehrung auf. Beim Versuchskörper T3 waren oben und unten jeweils aussenliegend Querstäbe $\text{Ø}22$ mm mit einem Stababstand von 200 mm angeordnet. Die Bewehrungsüberdeckung für diese Querstäbe betrug $c_{\text{nom}} = 30$ mm. Bei den Versuchskörpern T4 und T5 wurden Bügel $\text{Ø}8$ mm mit einem Stababstand von 100 mm bzw. 200 mm eingelegt. Bei allen Versuchskörpern wurde bei den Lasteinleitungsstellen und Aufhängepunkten lokal eine Verbügelung angeordnet.

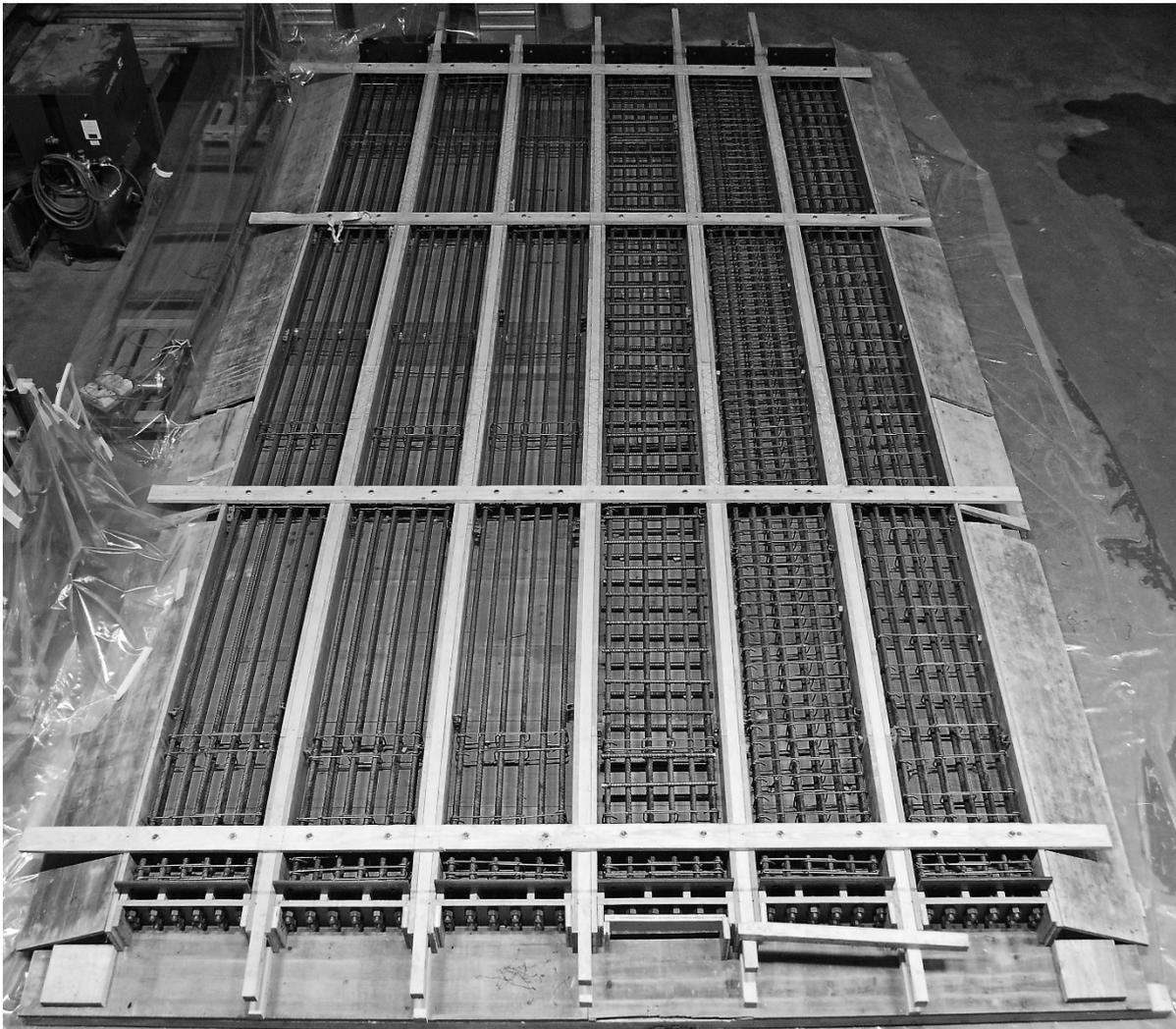


Bild 2.6 Schalung und Bewehrung der Versuchskörper. Von links: T2, T1, T0, T3, T4, T5.

An den beiden Stirnseiten der Versuchskörper wurden Stahlplatten ($t = 15$ mm) als Schalung verwendet. Die Längsbewehrungsstäbe wurden durch Löcher in diesen Stahlplatten geführt und wiesen beidseitig an ihren aufgestauchten Enden ein Gewinde M30 auf (System BARTEC). Zusätzliche Hartholztafeln fixierten die Längsbewehrung während des Betoniervorgangs. Zur Sicherstellung der Schubübertragung zwischen dem Beton und den Abschaltplatten wurden in diese je fünf Schrauben M12 geschraubt und anschliessend einbetoniert. Bild 2.7 zeigt das Enddetail vor dem Betonieren.

Eine 100 mm starke Anschlussplatte sicherte die stirnseitige Krafteinleitung in den Versuchskörper. Die Längsbewehrungsstäbe der Versuchskörper wurden an beiden Enden mit 900 Nm gegen eine Anschlussplatte vorgespannt, auf die anschliessend ein Gabelschuh mit 10 Schrauben M24-12.9 gespannt wurde. Die Schubübertragung zwischen Abschaltplatte und Anschlussplatte wurde durch zwei voll vorgespannte Schrauben M24-10.9 sichergestellt. Aus Bild 2.1 (c) ist die Situation an den Stirnseiten ersichtlich.



Bild 2.7 Versuchskörper: Enddetail vor dem Betonieren.

An vier Stellen in Längsrichtung wurden auf der Oberseite der Versuchskörper je zwei Telleranker in den Beton eingelegt. An diesen acht Tellerankern konnten die Versuchskörper mittels vier Doppelketten und einem knapp 6 m langen Jochträger am Kran befestigt und in der Versuchshalle bewegt werden ohne zu reißen. Mit einer Waage zwischen Jochträger und Kran wurden die Versuchskörper gewogen, siehe Tabelle 2.1.

Versuchskörper	T0	T1	T2	T3	T4	T5
Durchmesser Längsbewehrung [mm]	26	26	26	26	26	26
Überdeckung Längsbewehrung [mm] (bis Achse Bewehrung)	65	65	65	65	65	65
Querbewehrung	nein	nein	nein	ja	nein	nein
Verbügelung	lokal	lokal	lokal	lokal	$s = 0.1 \text{ m}$	$s = 0.2 \text{ m}$
Gewicht G [kN]	26.8	26.0	26.0	26.7	26.6	26.7

Tabelle 2.1 Übersicht Versuchskörper.

An den Stellen der Belastungsjoche 1, 2 und 3 wurden je zwei Gewindestäbe M10-8.8 in die Versuchskörper eingeleimt, siehe Bild 2.1 (d). Mit den Gewindestäben wurde pro Joch eine Rinnenplatte auf den Versuchskörper gespannt. Diese Anordnung stellte sicher, dass die Rinnenplatten der Kipp-lager bei grossen Neigungen des Versuchskörpers nicht abrutschten. Lokale Unebenheiten der Betonoberfläche wurden an den betreffenden Stellen vor der Installation der Rinnenplatten durch Schleifen reduziert, und eine 5 mm starke Pavatexplatte wurde als Ausgleichsschicht zwischen Betonoberfläche und Rinnenplatte gelegt. In drei von 18 Fällen während der ganzen Versuchsserie waren die Unebenheiten zu gross, und die Pavatexplatte musste durch ein Mörtelbett ersetzt werden.

2.2 Herstellung

Alle Versuchskörper wurden in der Versuchshalle HIF der ETH Höggerberg hergestellt. Dazu wurde ein Schalboden mit sechs Bahnen auf dem Hallenboden erstellt, siehe Bild 2.6. Die Bewehrung der Versuchskörper wurde jeweils zu einem Korb zusammengesetzt und anschliessend mit dem Kran in die entsprechende Bahn gehoben. Dieser Vorgang wurde für alle Versuchskörper wiederholt. Die Telleranker wurden mit Hilfe von vier quer über alle sechs Bahnen verlegten Holzbalken während des Betoniervorgangs in Position gehalten.

Der Beton wurde am 21. Dezember 2011 in einer Charge mit einem Fahrmascher direkt in die Versuchshalle geliefert. Er wurde in einem Guss eingebracht und mit Hilfe einer Vibriernadel verdichtet. Die Oberfläche wurde mit einem Holzbalken abgezogen. Anschliessend wurden die Versuchskörper mit einer Plastikfolie abgedeckt und während einer Woche regelmässig mit Wasser nachbehandelt.

Nach dem Ausschalen wurden die Netze für die Deformetermessungen sowie die Positionen der induktiven Messgeber angezeichnet und die Versuchskörper mit weisser Dispersionsfarbe gestrichen, um Risse besser erkennen zu können. Anschliessend wurden die Versuchskörper mit den gleichzeitig hergestellten Betonprüfkörpern bis zur Versuchsdurchführung in der Versuchshalle HIF der ETH Höggerberg zwischengelagert. Die Daten der Herstellung, des Ausschalens und der Versuchsdurchführungen sind in Tabelle 2.2 zusammengestellt.

Versuchskörper	T0	T1	T2	T3	T4	T5
Betonierdatum	21.12.2011	21.12.2011	21.12.2011	21.12.2011	21.12.2011	21.12.2011
Ausschalen	31.01.2012	07.02.2012	13.02.2012	23.01.2012	17.01.2012	10.01.2012
Versuchsbeginn	28.03.2012	27.04.2012	07.05.2012	22.05.2012	12.06.2012	19.06.2012
Versuchsende	30.03.2012	28.04.2012	11.05.2012	24.05.2012	14.06.2012	21.06.2012
Betonversuche	23.03.2012	-	08.05.2012	-	-	19.06.2012

Tabelle 2.2 Daten der Herstellung und Prüfung der Versuchskörper.

2.3 Baustoffe

2.3.1 Beton

Als Beton wurde ein Standardbeton der Firma Toggenburger mit der Bezeichnung C349 verwendet. Der Beton entspricht einem Beton C30/37 und weist ein Grösstkorn von 16 mm auf. Alle Versuchs- und Prüfkörper wurden gleichzeitig betoniert.

Zur Ermittlung der Festigkeitswerte und des Spannungs-Dehnungsverhaltens wurden insgesamt 15 Zylinder ($\varnothing = 150$ mm, $h = 300$ mm) und drei Würfel (Kantenlänge 150 mm) hergestellt. Die Würfel und neun Zylinder dienten zur Bestimmung der Druckfestigkeiten f_{cw} und f_{cc} ; an den neun Zylindern wurde auch der Elastizitätsmodul E_c bestimmt. Die restlichen sechs Zylinder wurden in Hälften zersägt, an welchen mittels Stempeldruckversuchen die Spaltzugfestigkeit $f_{ct,s}$ ermittelt werden konnte. In Tabelle 2.3 sind sämtliche ermittelten Kennwerte zusammengefasst.

Alter der Prüfkörper	[d]	93	139	181
Rohdichte	[kg/m ³]	2370	2354	2345
ρ_c		± 1.4 %	± 1.2 %	± 1.4 %
Würfeldruckfestigkeit	[N/mm ²]	51.6	54.7	50.8
f_{cw}				
Zylinderdruckfestigkeit	[N/mm ²]	42.3	41.6	39.7
f_{cc}		± 0.7 %	± 3.4 %	± 2.3 %
Spaltzugfestigkeit	[N/mm ²]	3.41	3.20	3.04
$f_{ct,s}$		± 10.7 %	± 4.7 %	± 9.7 %
Bruchstauchung	[%]	1.90	1.87	1.70
ϵ_{cu}		± 6.2 %	± 3.3 %	± 8.6 %
Elastizitätsmodul	[kN/mm ²]	32.0	32.6	32.5
E_c		± 5.7 %	± 3.2 %	± 2.3 %

Tabelle 2.3 Kennwerte des Betons der Versuchskörper: Mittelwerte und Variationskoeffizienten.

Mit Ausnahme der verformungsgesteuerten Versuche zur Bestimmung der Zylinderdruckfestigkeiten erfolgten die Versuche kraftgesteuert. Die Wahl der Belastungsgeschwindigkeit ergab einen Spannungszuwachs von 0.5 N/(mm²·s) bei den Versuchen zur Ermittlung der Würfeldruckfestigkeiten. Bei den Stempeldruckversuchen betrug der auf die gesamte Querschnittsfläche des Zylinders bezogene Spannungszuwachs 0.02 N/(mm²·s), was einem fiktiven Zugspannungszuwachs von zirka 0.5 N/(mm²·min) entspricht. Die Spaltzugfestigkeit kann näherungsweise mit der in Bild 2.8 (c) angegebenen Beziehung (Chen 1970) ermittelt werden, wobei F_u die Stempeldruckkraft beim Bruch des Körpers bezeichnet. Die weiteren Bezeichnungen und die übliche Versagensart können Bild 2.8 entnommen werden.

Die Versuche zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls wurden ebenfalls kraftgesteuert durchgeführt. Der Spannungszuwachs betrug 0.5 N/(mm²·s). Der Elastizitätsmodul wird als Sekantenmodul zwischen einer Unterspannung von 0.5 N/mm² und einer Oberspannung von einem Drittel der Würfeldruckfestigkeit angegeben (SIA 2003). Die Betonstauchungen zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls wurden in der Mitte der Zylinder mit zwei induktiven Wegmessern über eine Messbasis von 150 mm bestimmt.

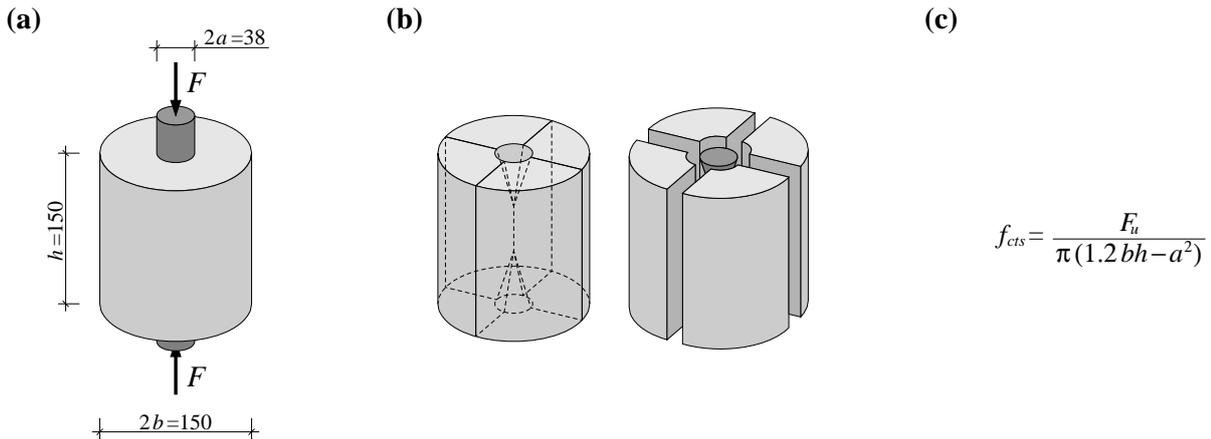


Bild 2.8 Stempeldruckversuch: (a) Versuchsanordnung; (b) übliches Bruchbild; (c) Formel zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit. Abmessungen in mm.

Die Zylinderdruckfestigkeiten wurden mit verformungsgesteuerten Versuchen ermittelt. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug $5 \mu\text{m/s}$, was einem Druckspannungszuwachs im elastischen Zustand von zirka $0.5 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$ entsprach. In Bild 2.9 sind die vollständigen Spannungs-Stauchungsdiagramme dargestellt. Die Bruchstauchungen des Betons sowie die Spannungs-Stauchungsbeziehungen wurden aus dem Kolbenweg bestimmt. Dabei wurde die Nachgiebigkeit der Prüfmaschine bei der Berechnung der Stauchungen berücksichtigt.

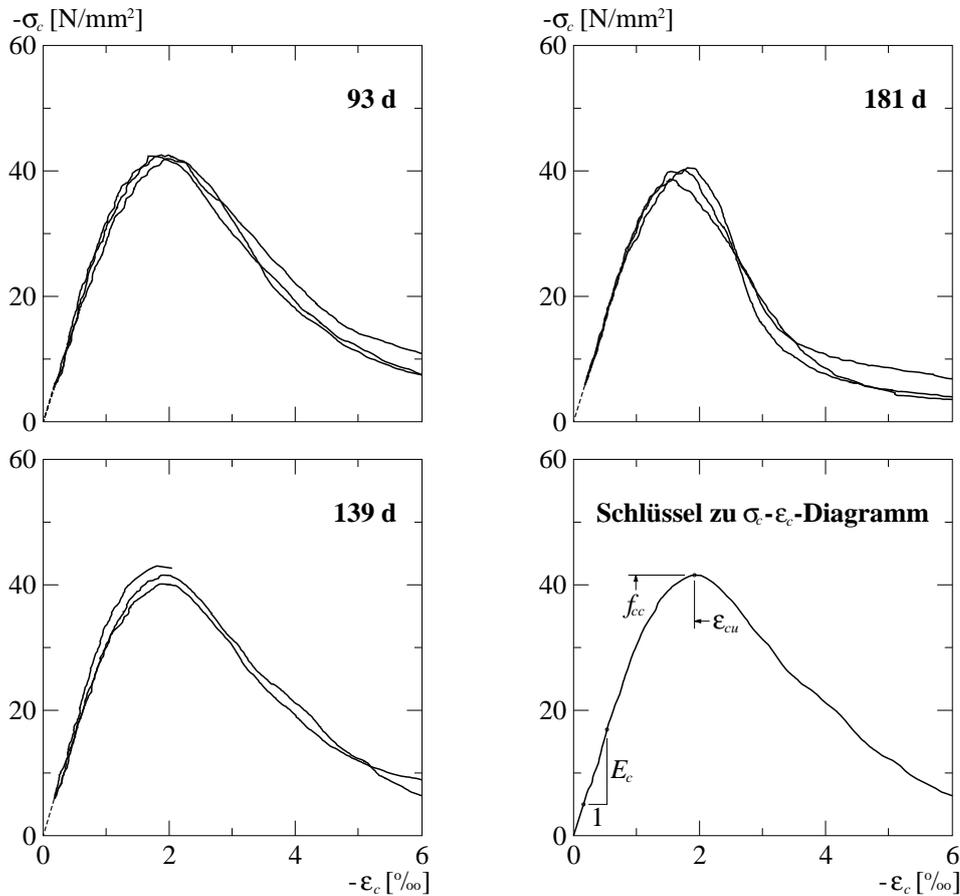
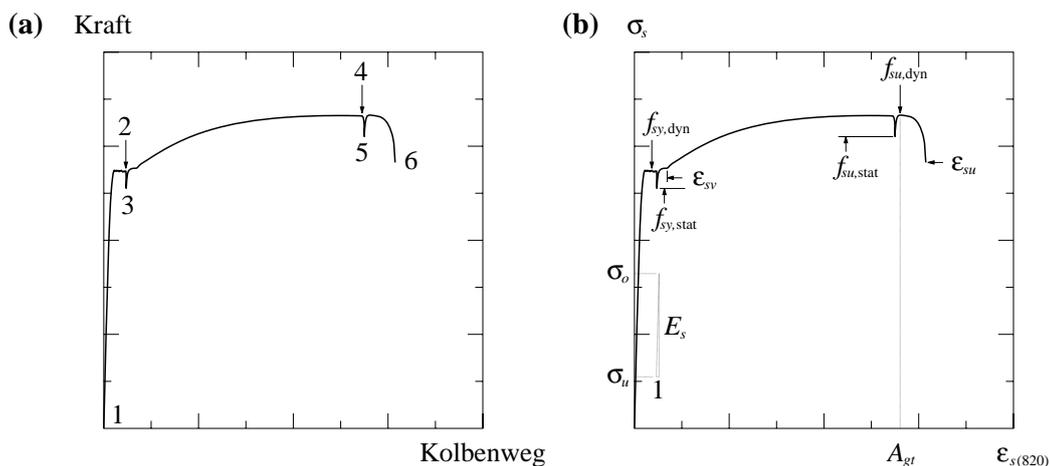


Bild 2.9 Spannungs-Stauchungs-Diagramme des eingesetzten Betons für verschiedene Alter.

2.3.2 Betonstahl

Für die Bügel Ø8 mm wurde kaltverformtes, geripptes Ringmaterial verwendet. Für die Stäbe Ø22 mm und Ø26 mm kamen aus der Walzhitze vergütete, gerippte Bewehrungsstäbe zur Anwendung. Bei den Stäben Ø26 mm handelte es sich um Stabmaterial topar-S 500C der Stahl Gerlafingen AG. Für jeden Stabdurchmesser stammte der Stahl aus dem gleichen Herstellungslos, womit ein ausgeglichenes Materialverhalten gewährleistet war.

Die Bestimmung des effektiven Durchmessers erfolgte mittels Wägung und Längenmessung unter Annahme einer Stahldichte von 7850 kg/m^3 . Anschliessend wurden die Stäbe verformungsgesteuert bis zum Bruch belastet. Zusätzlich zu Zugkraft und Kolbenweg der Prüfmaschine wurde die Dehnung in Stabmitte mit einem induktiven Wegaufnehmer über eine Basislänge von 300 mm gemessen. Die Kolbengeschwindigkeit entsprach bis zum Erreichen der Fließgrenze einem Zugspannungszuwachs von $10 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$. Bei einer Stahldehnung von zirka 5.5 ‰ wurde der Kolbenweg während zwei Minuten konstant gehalten, bevor der Versuch mit der zehnfachen Kolbengeschwindigkeit fortgesetzt wurde, was einer Dehnungsgeschwindigkeit von zirka 30 ‰/min entsprach. Im Bereich der Maximallast wurde der Kolbenweg ein zweites Mal während zwei Minuten konstant gehalten, bevor die Probe mit gleicher Geschwindigkeit bis zum Bruch belastet wurde. Bild 2.10(a) illustriert den Ablauf der Stahlzugversuche. Bild 2.11 zeigt die Stahlkennlinien aufgrund der mittleren Dehnungen $\epsilon_{s(820)}$ über die ganze freie Prüflänge.



- 1: Nullstellung
- 1-2: Belastungsgeschwindigkeit von 0.04 mm/s
- 2-3: Konstanter Kolbenweg während 120 s (Dehnung ca. 0.55 ‰)
- 3-4: Weiterbelastung mit 0.4 mm/s
- 4-5: Konstanter Kolbenweg während 120 s im Bereich der Höchstlast
- 5-6: Weiterbelastung mit 0.4 mm/s
- 6: Bruch

Bild 2.10 Stahlzugversuche: (a) Versuchsablauf; (b) Auswertung.

Sämtliche in Tabelle 2.4 zusammengestellten Kennwerte wurden unter Verwendung des nominellen Stabdurchmessers berechnet. Die statischen Werte der Fließgrenze und der Zugfestigkeit wurden durch Reduktion der dynamischen Festigkeitswerte um den Spannungsabfall nach zwei Minuten bei den jeweiligen Belastungspausen ermittelt. Die Dehnungen bei Höchstlast A_{gt} und die Bruchdehnungen ε_{su} wurden aus dem Kolbenweg bestimmt, die Dehnungen bei Verfestigungsbeginn ε_{sv} aus den Extensometermessungen. Als Elastizitätsmodul E_s des Betonstahls ist die mittlere Steigung der Stahlkennlinie zwischen 10 % und 50 % der dynamischen Fließgrenze $f_{sy,dyn}$ angegeben, ausgenommen für die Stäbe Ø26 mm, für welche als Unter- und Oberspannung 20 % beziehungsweise 60 % von $f_{sy,dyn}$ genommen wurde. Die verschiedenen Kennwerte sind in Bild 2.10(b) eingetragen.

Nomineller Durchmesser Ø	[mm]	8	22	26
Anzahl Prüfkörper	[St.]	8 ¹⁾	12	12 ²⁾
Effektiver Durchmesser (durch Wägung bestimmt)	[mm]	7.95 ± 0.13 %	21.82 ± 0.1 %	25.96 ± 0.15 %
Freie Prüflänge	[mm]	820	820	820
Dynamische Fließgrenze $f_{sy,dyn}$	[N/mm ²]	517 ³⁾ ± 0.5 %	544 ± 0.8 %	527 ± 0.6 %
Statische Fließgrenze $f_{sy,stat}$	[N/mm ²]	492 ± 0.6 %	520 ± 1.2 %	498 ± 2.8 %
Dynamische Zugfestigkeit $f_{su,dyn}$	[N/mm ²]	585 ± 0.8 %	663 ± 0.5 %	632 ± 0.4 %
Statische Zugfestigkeit $f_{su,stat}$	[N/mm ²]	536 ± 1.4 %	618 ± 1.6 %	587 ± 0.5 %
Dehnung bei Verfestigungsbeginn ε_{sv}	[‰]	-	12.8 ± 8.2 %	20.9 ± 7.9 %
Dehnung bei Höchstlast A_{gt}	[‰]	50.9 ± 16.9 %	110 ± 4.6 %	119 ± 5.6 %
Bruchdehnung ε_{su}	[‰]	68.6 ± 18.0 %	125 ± 3.0 %	140 ± 5.0 %
Plastische Dehnung bei Höchstlast A_g	[‰]	48.0 ± 17.9 %	107 ± 4.8 %	116 ± 5.6 %
Elastizitätsmodul E_s	[kN/mm ²]	199 ± 2.4 %	197 ± 4.2 %	215 ± 6.8 %

Tabelle 2.4 Kennwerte des Betonstahls; Mittelwerte und Variationskoeffizienten.

¹⁾ für statische Zugfestigkeit nur 4 Prüfkörper.

²⁾ für statische Zugfestigkeit nur 11 Prüfkörper.

³⁾ 2 ‰ -Dehngrenze.

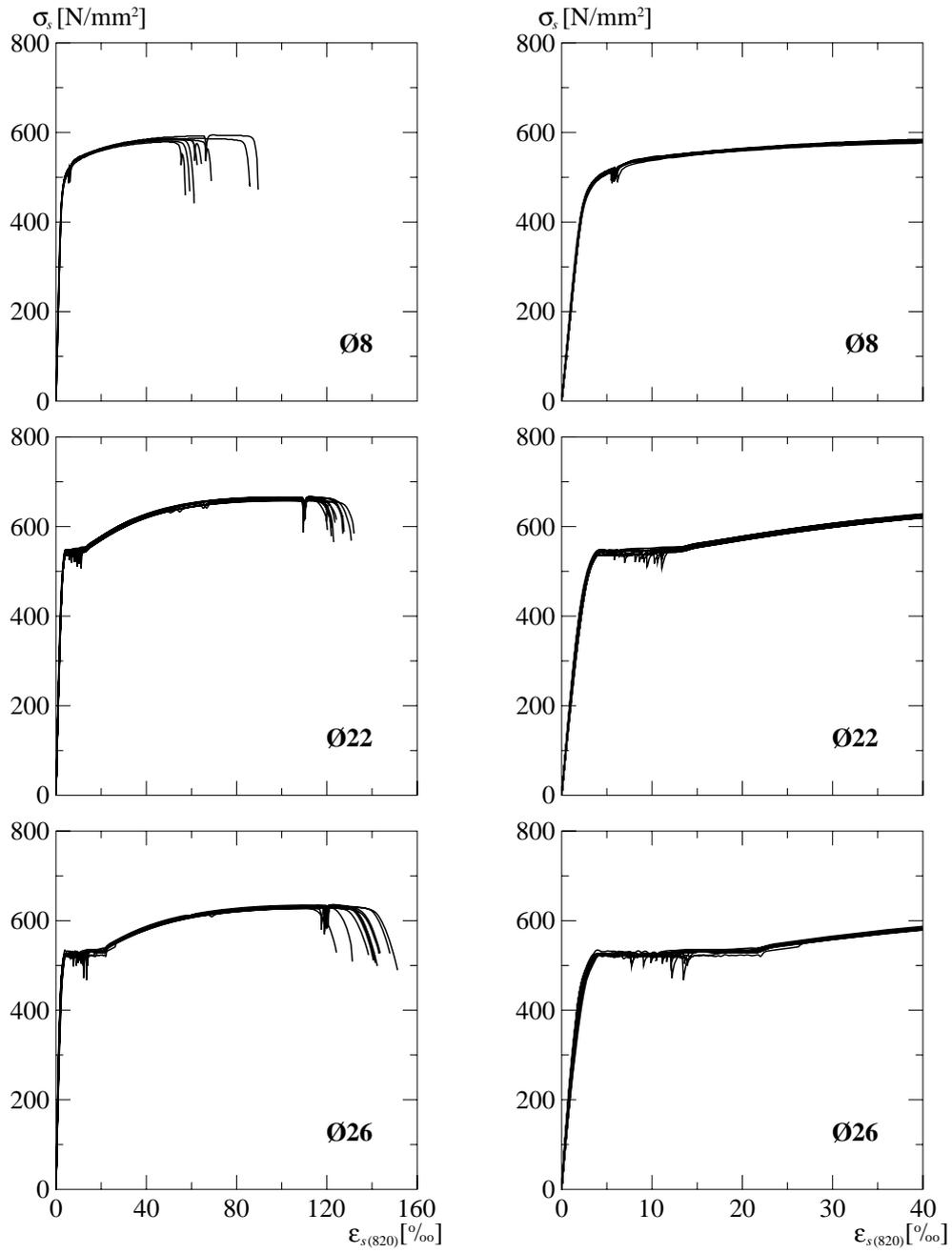


Bild 2.11 Spannungs-Dehnungsdiagramme des Betonstahls.

3. Versuchsdurchführung

3.1 Versuchsanlage

3.1.1 Einführung

Die Versuche erforderten eine Versuchsanlage, die Längszugkräfte bis zu 2 MN sowie an vier Stellen Querbelastungen bis zu 260 kN auf die hängend gelagerten Versuchskörper aufbringen konnte. Beim Entwurf der Anlage stand nebst der mechanischen Beanspruchung eine ausreichende Steifigkeit im Vordergrund. Das vorliegende Kapitel liefert einen Überblick über die Versuchsanlage. Ausgewählte Aspekte der Anlage sind in den Kapiteln 3.1.2, 3.1.3 und 3.1.4 genauer beschrieben.

Die in den Bildern 3.1 bis 3.3 dargestellte Versuchsanlage wurde auf dem Aufspannboden der Versuchshalle HIF der ETH Höngrgerberg aufgebaut. Sie bestand aus zwei Reaktionsstrukturen, welche das Aufbringen einer horizontalen Längszugkraft auf die Versuchskörper ermöglichten, zwei Lager-Reaktionsstrukturen, an denen die Versuchskörper aufgehängt wurden, sowie drei Belastungsjochen und einer Belastungs- und Halteinrichtung, an denen die vertikale Querbelastung aufgebracht wurde.



Bild 3.1 Versuchsanlage mit eingebautem Versuchskörper (Blick Richtung Südwest).

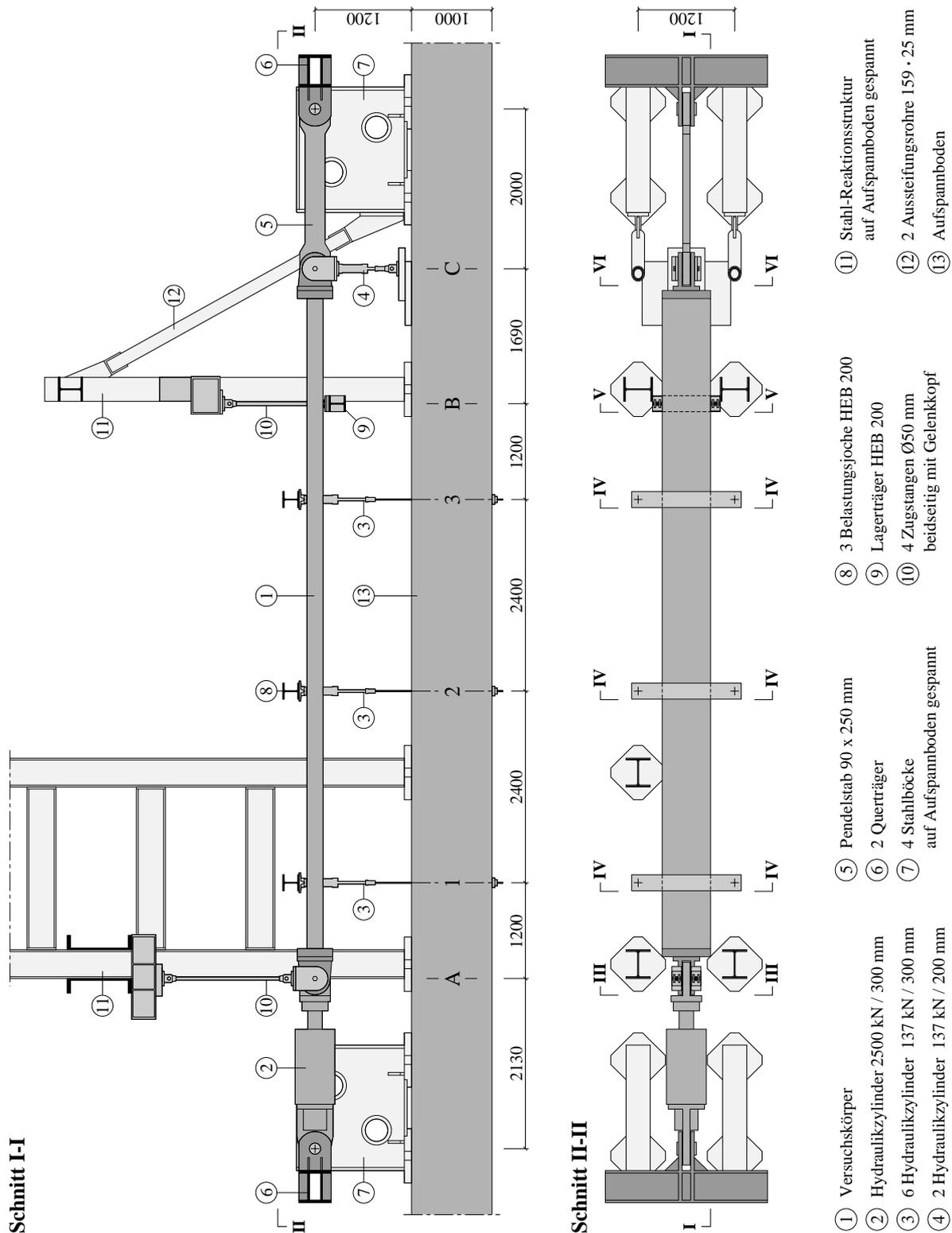


Bild 3.2 Versuchsanlage: Ansicht und Aufsicht (Querschnitte in Bild 3.3). Abmessungen in mm.

Die Reaktionsstrukturen für die Längszugkraft waren aus je zwei Stahlböcken und einem doppelsteigigen Querträger mit aufgeschweisstem Gabelschuh zusammengesetzt und wurden mit vier Spann- stangen pro Stahlbock auf den Aufspannboden abgespannt. A-seitig war ein Hydraulikzylinder und C-seitig war ein Pendelstab gelenkig am Gabelschuh befestigt. Der Hydraulikzylinder hatte eine

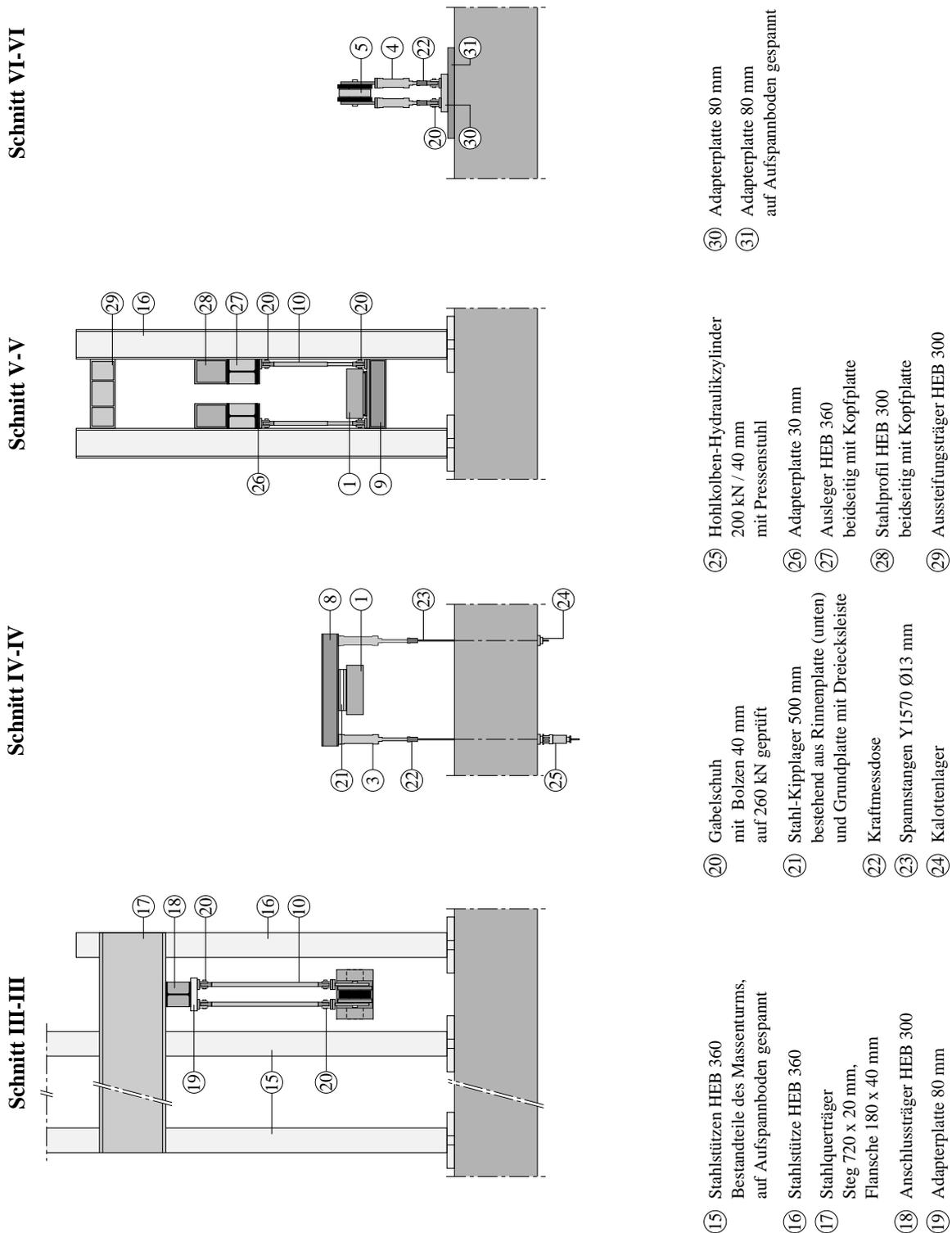


Bild 3.3 Versuchsanlage: Querschnitte (Ansicht und Aufsicht in Bild 3.2).

statische Zugkapazität von 2500 kN bei einem maximalen Weg von 300 mm und wurde durch ein Konstantdruck-Aggregat gespiesen.

In der Achse A wurde der Hydraulikzylinder gelenkig an den Versuchskörper angeschlossen und im Gelenk über zwei Zugstangen mit beidseitig gelenkigen Anschlüssen und einen Anschlussträger

HEB 300 an die Lager-Reaktionsstruktur aufgehängt. Die Lager-Reaktionsstruktur bestand aus geschweissten Blechträgern und Stützen HEB 360, welche je mittels zwei Spannstangen auf den Aufspannboden abgespannt waren.

In der Achse B wurde der Versuchskörper auf einen Lagerträger HEB 200 aufgelegt, welcher über zwei Zugstangen mit beidseitig gelenkigen Anschlüssen und Stahlprofile HEB 300 und HEB 360 an die Lager-Reaktionsstruktur aufgehängt war. Die Lager-Reaktionsstruktur bestand aus zwei Stützen HEB 360, die je mittels zwei Spannstangen auf den Aufspannboden abgespannt, oben mittels Aussteifungsträger HEB 300 verbunden und in Längsrichtung der Versuchskörper je durch ein Rohrprofil 159·25 mm ausgesteift waren.

Die drei Belastungsjoche, bestehend aus je einem Querträger HEB 200 und zwei Hydraulikzylindern, hatten eine Masse von je ca. 180 kg. Die Querträger übertrugen die Kräfte aus den Hydraulikzylindern über stählerne Kipplager als Linienlasten auf den Versuchskörper. Die Hydraulikzylinder hatten eine statische Zugkapazität von 137 kN bei einem maximalen Weg von 300 mm. Nach dem ersten Versuch mussten die Zylinder der Joche 1 und 3 durch baugleiche Zylinder, jedoch mit reduziertem maximalem Weg von 200 mm, ersetzt werden. Damit reduzierte sich die Masse der entsprechenden Joche auf je ca. 165 kg. Alle sechs Zylinder wurden über ein kommunizierendes, hydraulisches System von einer Handpumpe gespiesen. Die Kräfte aus den Hydraulikzylindern wurden mittels Gewindestangen $\varnothing 13$ mm aus Spannstahl Y1570 an den Aufspannboden abgegeben. Die Gewindestangen wurden durch vorhandene Löcher durch den Aufspannboden hindurchgeführt und von unten mittels sphärischen Kalottenlagern und Muttern verankert. Zwischen Kolben- und Gewindestange wurde bei jedem Hydraulikzylinder eine Kraftmessdose installiert.

Um grössere vertikale Verformungen als der maximale Kolbenweg der Zylinder zu ermöglichen, konnten zwischen den Kalottenlagern und den Muttern der Gewindestangen zusätzliche Hohlkolben-Hydraulikzylinder installiert werden. Diese hatten eine statische Kapazität von 200 kN bei einem maximalen Kolbenweg von 40 mm und wurden über ein separates hydraulisches System gespiesen. Die Hohlkolbenzylinder ermöglichten ein Ausziehen der Kolbenstangen der Zylinder an den Belastungsjochen während des Belastungsvorgangs. Die maximal erzielbaren Durchbiegungen des Versuchskörpers wurden mit diesem System erheblich vergrössert.

Zwei weitere Hydraulikzylinder in der Achse C dienten zur Steuerung der Querbelastung P auf das Ende des Kragarms des Versuchskörpers bzw. der Lage dieses Endes. Die Hydraulikzylinder hatten eine statische Zugkapazität von 137 kN und eine statische Druckkapazität von 191 kN bei einem maximalen Weg von 200 mm. Sie wurden über ein kommunizierendes, hydraulisches System von einer zweiten Handpumpe gespiesen, wobei jeweils beide Kammern angeschlossen waren, um sowohl Druck- wie auch Zugkräfte erzeugen zu können. Die beiden Zylinder wurden oben mittels Laschen zentrisch an den Gelenkbolzen zwischen Versuchskörper und Pendelstab angeschlossen und unten gelenkig auf zwei Adapterplatten fixiert, von denen die untere mittels zwei Spannstangen auf den Aufspannboden abgespannt war. Zwischen Hydraulikzylinder und Fixation wurde eine Kraftmessdose installiert. Die beschriebene Anordnung beschränkte die vertikalen Verschiebungen von der theoretischen Nulllage gegen den Aufspannboden auf knapp 50 mm.

Sämtliche Teile der beschriebenen Versuchsanlage wurden mit Schrauben M24-10.9 miteinander verbunden. Diese Schrauben wurden jeweils in einem Raster von 80 mm in genügender Anzahl angeordnet und mit einem Drehmoment von je 1000 Nm vorgespannt. Wo die Geometrie der Versuchsanlage dies erforderte, wurden Adapterplatten eingesetzt. Die Spannstangen, mit welchen die Reaktionsstrukturen auf den Aufspannboden abgespannt wurden, wurden mit 1.5 MN vorgespannt.

Aufgrund der Erfahrungen des Versuchs T0 und in geringerem Umfang der Versuche T1 und T2 wurden für die nachfolgenden Versuche der Versuchsablauf und Details der Versuchsanlage sowie der Messungen und Messgeräte optimiert und standardisiert.

3.1.2 Lasteinleitung

Gelenklager A und C

Der Aufbau der stirnseitigen Anschlüsse mit gelenkiger Lagerung in den Achsen A und C ist in Bild 3.4 detailliert dargestellt. Die Krafteinleitung in den Versuchskörper selbst wurde bereits in Kapitel 2.1 beschrieben.

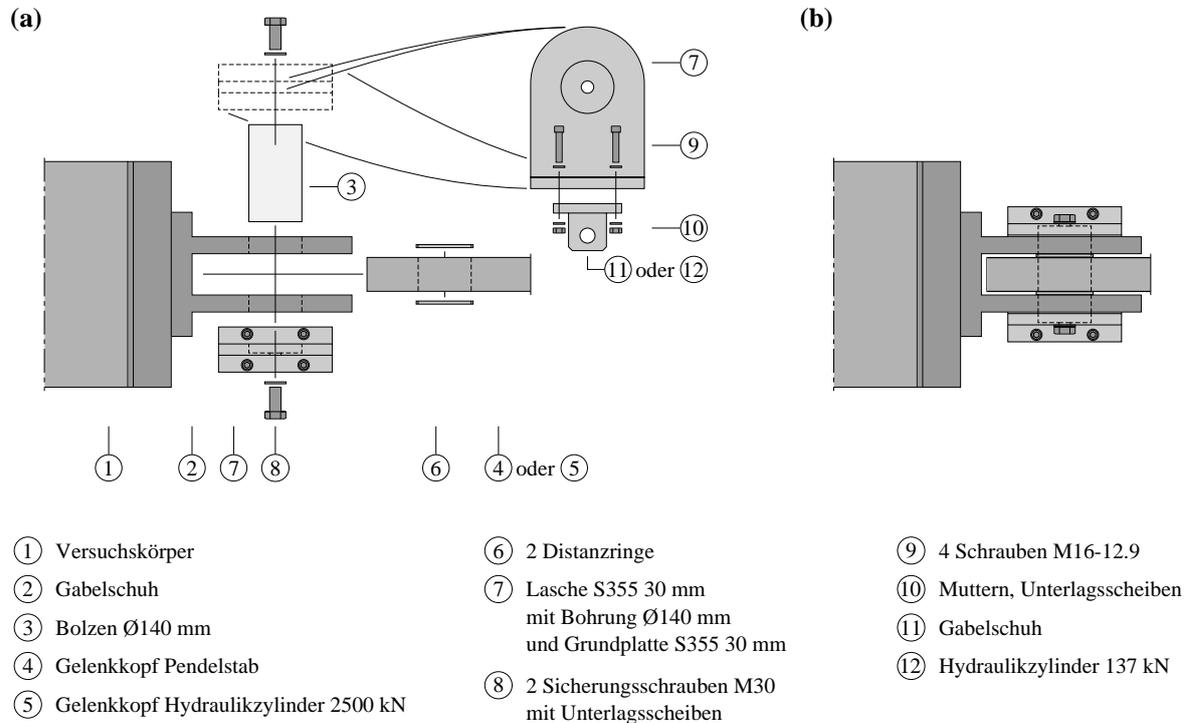


Bild 3.4 Lager A und C: (a) vor dem Zusammenfügen; (b) nach dem Zusammenfügen. Für Details der Befestigung Gabelschuh am Versuchskörper siehe Bild 2.1. Massstab 1:20.

Der über eine Anschlussplatte am Versuchskörper befestigte Gabelschuh war über einen Bolzen $\varnothing 140$ mm mit dem Gelenkkopf des Hydraulikzylinders bzw. des Pendelstabs verbunden. Seitlich wurden je zwei speziell angefertigte Laschen über den Bolzen gestülpt, welche der Krafteinleitung in Vertikalrichtung dienten. Die drei Anussteile Gabelschuh, Gelenkkopf und Lasche konnten sich durch diese Anordnung unabhängig voneinander um die Achse des Bolzens drehen. Bei A waren die Laschen je mittels Gabelschuh, Bolzen und Gelenkkopf an eine Zugstange angeschlossen. Bei C waren die Hydraulikzylinder zur Erzeugung der Vertikallast P direkt an die Laschen geschraubt. Hydraulikzylinder und Gabelschuh wurden jeweils mit vier voll vorgespannten Schrauben M16-12.9 an den Grundplatten der Laschen befestigt.

Zwischenaufleger B

Der Aufbau des Zwischenauflegers B ist in Bild 3.5 detailliert dargestellt. Es wurde ein Lagerträger HEB 200 gelenkig an zwei Zugstangen aufgehängt. Auf diesen Lagerträger wurden eine Adapterplatte, Futterplatten und ein Plattenstapel aus zehn 2.5 mm dicken Platten geschraubt. Die Abmessungen der einzelnen Platten, abgesehen von einer Grundplatte, nahmen von unten nach oben in Längs- und Querrichtung linear zu. Damit sollte die Spannungskonzentration an den Rändern der Krafteinleitung reduziert werden. Der Versuchskörper wurde beim Einbau direkt auf diesen Plattenstapel aufgelegt. Mit Ausnahme der Plattenstapelschrauben waren sämtliche Schrauben voll vorgespannt.

Der beschriebene Aufbau des Zwischenauflegers B ermöglichte Verschiebungen des Versuchskörpers in Längsrichtung und Rotationen des Versuchskörpers um die horizontale Querachse sowie geringe Rotationen um die Vertikale. Verschiebungen quer zum Versuchskörper wurden durch die Stützen der Lager-Reaktionsstruktur auf ± 1 mm begrenzt. Um die Reibung zwischen Stützen und Lagerträger zu minimieren, wurden dessen Stirnseiten mit Teflon beschlagen.

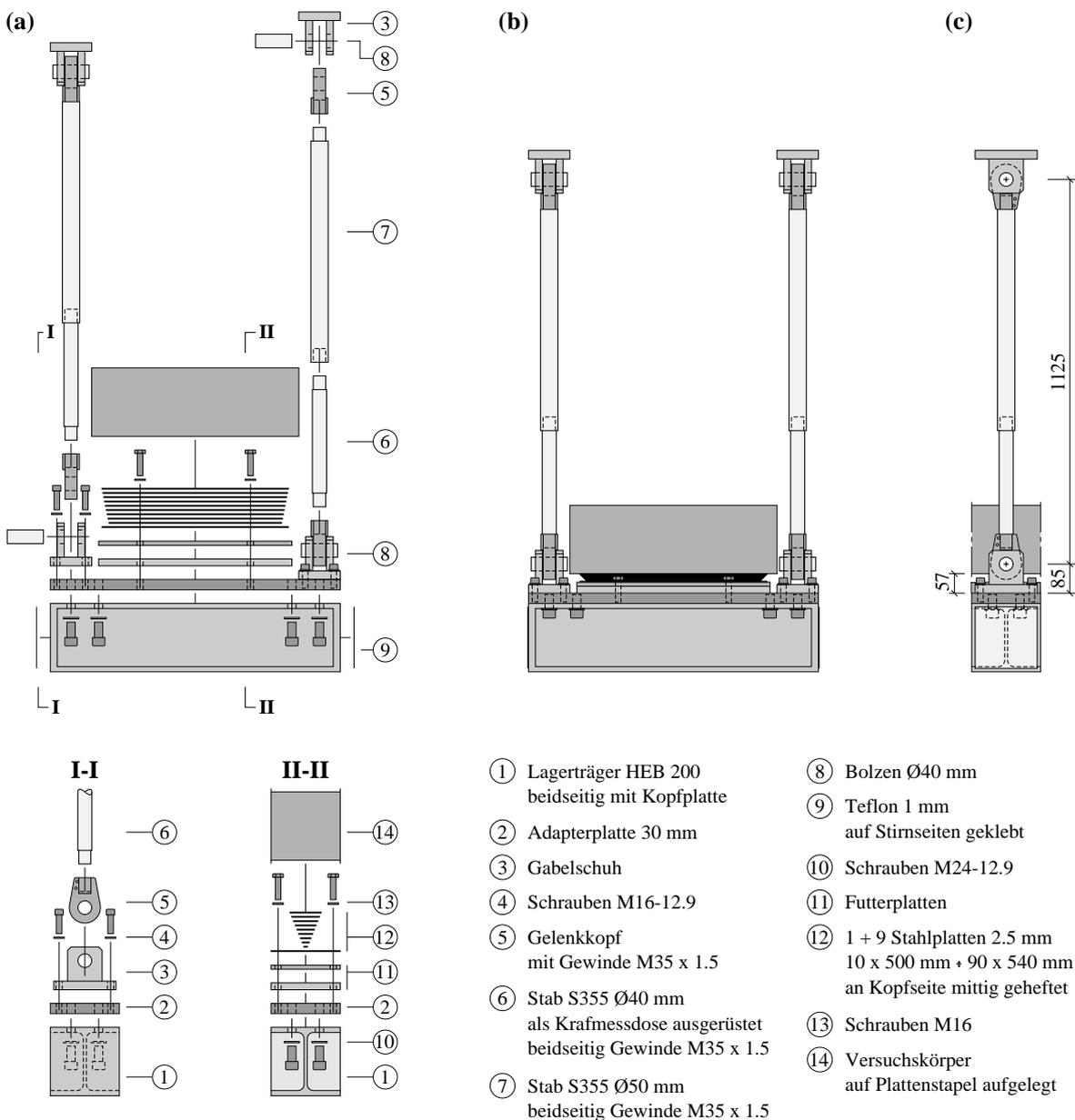


Bild 3.5 Lager B: (a) Schnitte vor dem Zusammenfügen; (b) Querschnitt nach dem Zusammenfügen; (c) Ansicht nach dem Zusammenfügen. Massstab 1:20.

Belastungsjoche

Der Aufbau der drei Belastungsjoche 1, 2 und 3 ist in Bild 3.6 detailliert dargestellt. Die Kräfteinleitung in den Versuchskörper selbst wurde bereits in Kapitel 2.1 beschrieben.

An die Unterseite der Jochträger HEB 200 wurden jeweils an beiden Enden ein Hydraulikzylinder und in der Mitte eine Dreiecksleiste mit Grundplatte festgeschraubt. Die Dreiecksleiste wurde in die Rinne der Rinnenplatte gelegt und in Querrichtung zentriert. Dadurch war eine linienförmige Lasteinleitung sichergestellt. Sämtliche Schraubverbindungen wurden voll vorgespannt.

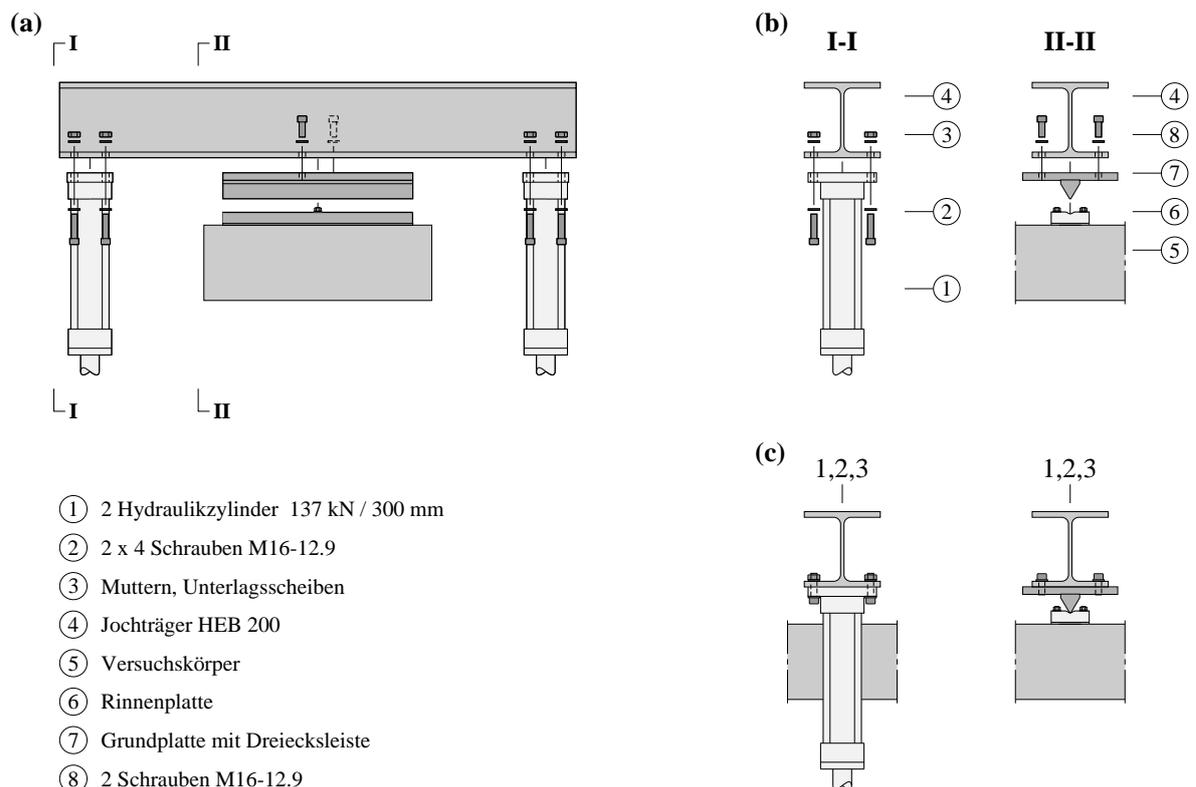


Bild 3.6 Belastungsjoche 1, 2, 3: (a) Ansicht vor dem Zusammenfügen; (b) Schnitte vor dem Zusammenfügen; (c) Schnitte nach dem Zusammenfügen. Detail Befestigung Rinnenplatte auf Versuchskörper siehe Bild 2.1. Masstab 1:20.

3.1.3 Ein- und Ausbau der Versuchskörper

Für den Einbau wurden als erstes die beiden Anschlussplatten an den Versuchskörper gespannt, während dieser auf vier Schwerlastböcken gelagert war. Anschliessend wurde der Versuchskörper durch vier Doppelketten und einen Jochträger am Kran befestigt und in die Versuchsanlage eingefahren. Dabei musste der Versuchskörper zwischen den Stützen der Lager A und B eingedreht werden, siehe Bild 3.7.

Der Versuchskörper wurde zunächst auf dem Zwischenaufleger B abgesetzt. Danach wurde der Gabelschuh bei C an die Anschlussplatte gespannt. Durch Ausfahren der Kolbenstange des Hydraulikzylinders zur Erzeugung der Längszugkraft konnten danach ein Kontakt zwischen dem Gabelschuh und der Anschlussplatte bei A erzeugt und die Verbindungsschrauben vorgespannt werden. Schliesslich wurden die zwei hängenden Laschen beim Lager A seitlich über den Bolzen gestülpt und die beiden seitlichen Laschen bei C mitsamt der Hydraulikzylinder zur Erzeugung der Vertikallast P eingebaut.



Bild 3.7 Einbau: Einfahren des Versuchskörpers.

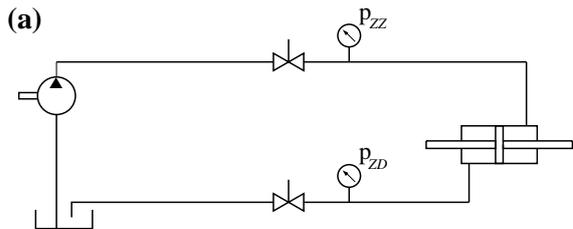
Danach wurde der Kran entlastet. An der Stelle des Belastungsjochs 2 wurde als zusätzliches Auflager bis zum Versuchsbeginn eine Zahnstangenwinde unter den Versuchskörper gestellt. Der Längskraftzylinder und der Pendelstab wurden über Spannstangen und Querbleche auf den Stahlböcken abgestellt. Diese temporären Unterstützungen wurden jeweils kurz vor Versuchsbeginn abgelassen und nach Versuchsende wieder angezogen.

Nach dem Einbau des Versuchskörpers wurden die drei Belastungsjoche mit dem Kran auf die Rinneplatten gestellt und an den Spannstangen festgeschraubt. Zuletzt wurden die Hydraulikzylinder angeschlossen und die Messeinrichtungen für die kontinuierlichen Messungen montiert, mit dem Messverstärker verbunden und auf Funktionstüchtigkeit geprüft. Der Einbau inklusive Installation der Messtechnik dauerte knapp zwei Tage.

Der Ausbau der Versuchskörper erfolgte in umgekehrter Reihenfolge und dauerte einen Tag.

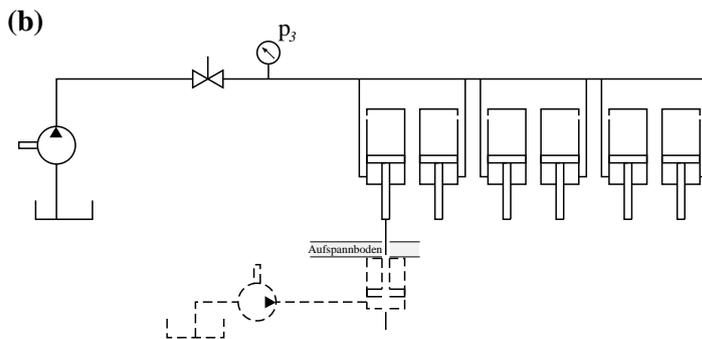
3.1.4 Hydraulische Systeme

Die Versuche wurden mit drei unabhängigen hydraulischen Systemen gesteuert. Mit einem System wurde die Längszugkraft aufgebracht, mit einem zweiten die Querbelastung Q im Feld und mit einem dritten die Querbelastung P bei C. Alle Komponenten dieser drei Systeme waren auf einen maximalen Betriebsdruck von 350 bar ausgelegt. Mit Hilfe eines vierten hydraulischen Systems mit einem maximalen Betriebsdruck von 700 bar konnten die Kolbenstangen der Q -Zylinder während des Belastens wieder ausgezogen werden. Die hydraulischen Systeme sind schematisch in Bild 3.8 dargestellt.



Pumpe:
Konstantdruck-Aggregat

wirksame Kolbenflächen:
 $A_{ZZ} = 70'764 \text{ mm}^2$ (Ringkammer)
 $A_{ZD} = 70'764 \text{ mm}^2$ (Ringkammer)

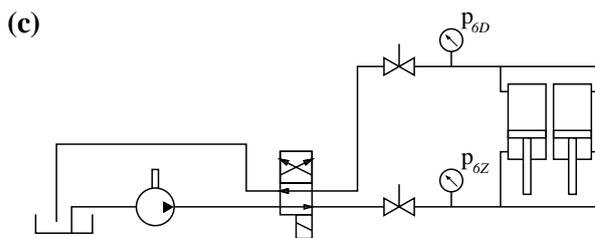


Pumpe:
Handpumpe

wirksame Kolbenfläche je Zylinder:
 $A_Q = 3'800 \text{ mm}^2$ (Ringkammer)

Pumpe:
Handpumpe

wirksame Kolbenfläche je Zylinder:
 $A = 3'070 \text{ mm}^2$ (Ringkammer)



Pumpe:
Handpumpe

wirksame Kolbenflächen je Zylinder:
 $A_{6Z} = 3'890 \text{ mm}^2$ (Ringkammer)
 $A_{6D} = 5'440 \text{ mm}^2$ (Kolbenkammer)

Legende:

Behälter	Pumpe	Zylinder, doppelt wirkend
Absperrventil	Drucksensor	Zylinder, doppelt wirkend mit zweiseitiger Kolbenstange
4/2-Wegeventil	Hohlkolbenzylinder	

Bild 3.8 Hydraulische Systeme: (a) Anordnung zur Erzeugung der Längszugkraft; (b) Anordnung zur Erzeugung der Querbelastung Q ; (c) Anordnung zur Erzeugung der Querbelastung P .

Der Betriebsdruck zur Erzeugung der Längszugkraft T wurde mit einem Konstantdruck-Aggregat gesteuert. Die wirksamen Kolbenflächen waren in beiden Kammern des Hydraulikzylinders identisch und betragen $A_{ZZ} = A_{ZD} = 70'764 \text{ mm}^2$. Im Vor- und im Rücklauf des hydraulischen Systems wurden

Absperrventile angeordnet, mit denen der Ölfluss unterbrochen werden konnte. Das hydraulische System ist in Bild 3.8 (a) schematisch dargestellt.

Die Ringkammern der sechs parallel angeordneten hydraulischen Zylinder zur Erzeugung der Querbelastung Q wurden von einer Handpumpe gespeist; die Kolbenkammern blieben offen. Die Hydraulikzylinder mit einer wirksamen Kolbenfläche von jeweils $A_Q = 3'800 \text{ mm}^2$ waren auf einen maximalen Betriebsdruck von 350 bar ausgelegt. Die maximale Kraft pro Zylinder betrug während den Versuchen 127 kN, was einem Öldruck von ca. 330 bar entsprach. Mit einem Absperrventil zwischen der Handpumpe und dem Verteiler konnte der Ölfluss zu den Zylindern unterbrochen werden. Der Ölfluss zwischen den sechs Zylindern blieb dabei weiter frei. Bild 3.8 (b) zeigt schematisch das hydraulische System.

Für das Ausfahren der Kolbenstangen der Q -Zylinder wurde ein zusätzliches hydraulisches System verwendet, welches in Bild 3.8 (b) schematisch strichliert dargestellt ist. Dazu wurden Hohlkolbenzylinder ($A = 3'070 \text{ mm}^2$) von einer Handpumpe gespeist. Durch das Ausfahren eines Hohlkolbenzylinders wurde die Kolbenstange des zugehörigen Hydraulikzylinders am Belastungsjoch ausgezogen, wodurch in allen sechs an den Belastungsjochen fixierten Zylindern ($A_Q = 3'800 \text{ mm}^2$) die Kraft gleichmässig anstieg, bis der maximale Kolbenweg des Hohlkolbenzylinders ausgenutzt war. Anschliessend konnte die Belastung Q wieder mit dem ursprünglich verwendeten hydraulischen System weiter gesteigert werden. Dieses Vorgehen wurde bei Bedarf mehrmals und an verschiedenen Zylindern wiederholt. Es konnten dabei bis zu vier Hohlkolbenzylinder parallel geschaltet werden. In der Regel wurden die beiden zu einem Joch gehörenden Hohlkolbenzylinder parallel betätigt.

Die zwei parallel angeordneten hydraulischen Zylinder zur Erzeugung der Querbelastung P wurden von einer zweiten Handpumpe gespeist. Durch ein in die Handpumpe integriertes 4/2-Wegeventil konnte Öl im Kreislauf in beide Richtungen gepumpt werden. Während der Versuche wurde Öl ausschliesslich in die Ringkammern der beiden Hydraulikzylinder gepumpt. Die Kolbenkammern der beiden Zylinder waren an den Rücklauf der Handpumpe angeschlossen, womit in diesen Kammern für Atmosphärendruck gesorgt und das Eindringen von Luft in das hydraulische System verhindert wurde. Die verwendeten Hydraulikzylinder wiesen eine Ringfläche von je $A_{\text{RZ}} = 3'890 \text{ mm}^2$ und eine Kolbenfläche von je $A_{\text{KD}} = 5'440 \text{ mm}^2$ auf. Im Vor- und im Rücklauf des hydraulischen Systems wurden Absperrventile angeordnet, mit denen der Ölfluss unterbrochen werden konnte. Der Ölfluss zwischen den zwei Zylindern blieb dabei weiter frei. Das hydraulische System ist in Bild 3.8 (c) schematisch dargestellt.

3.2 Messungen

3.2.1 Kontinuierliche Messungen

Zur kontinuierlichen Aufzeichnung der Verformungen und Lasten wurden fest verdrahtete Sensoren eingesetzt. Die Messungen wurden von einem Messcomputer ausgelöst. Für die Versuche T0 und T1 betrug die Messfrequenz 0.5 Hz, für die Versuche T2 bis T5 1.0 Hz. Zur Steuerung des Versuchs und zu Kontrollzwecken wurden ausgewählte Messungen in Echtzeit am Bildschirm des Messcomputers visualisiert. Alle 15 Minuten wurden die Messungen automatisch zwischengespeichert. Während dieses Vorgangs konnten keine Messungen ausgelöst werden. Da dieser Speichervorgang mit zunehmender Versuchsdauer immer länger dauerte, konnte die ursprüngliche Messfrequenz nicht ganz aufrechterhalten werden.

Die Anordnung und die Bezeichnungen der fest verdrahteten Sensoren sind aus den Bildern 3.9 und 3.10 ersichtlich. Der Ursprung des rechtshändigen kartesischen Koordinatensystems x, y, z liegt vertikal unter der Mitte des Lagers A auf der Oberfläche des Aufspannbodens. Die nachfolgend

beschriebenen Messungen lassen sich aufteilen in Hauptmessungen, Sekundärmessungen und Kontrollmessungen.

In die Kategorie der Hauptmessungen fallen die Zeit und Messungen, aus denen die Schnittgrößen bestimmt wurden (Öldrücke p und Verschiebungen w_{11} bis w_{26}) sowie die Messungen zur Bestimmung der Veränderung der Distanz A - C (u_{11} bis u_{26}). Diese Messungen sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt.

Bezeichnung	Messgrösse	Ort ($x/y/z$) [mm]	Basislänge	Richtung	Messbereich
w_{11}	Verschiebung	0/159/1200	-	z	± 10 mm
w_{12}	Verschiebung	1200/275/1100	-	z	± 50 mm
w_{13}	Verschiebung	3600/275/1100	-	z	± 100 mm
w_{14}	Verschiebung	6000/275/1100	-	z	± 50 mm
w_{15}	Verschiebung	7200/250/825	-	z	± 5 mm
w_{16}	Verschiebung	8890/120/580	-	z	± 25 mm
w_{21}	Verschiebung	0/-159/1200	-	z	± 10 mm
w_{22}	Verschiebung	1200/-275/1100	-	z	± 50 mm
w_{23}	Verschiebung	3600/-275/1100	-	z	± 100 mm
w_{24}	Verschiebung	6000/-275/1100	-	z	± 50 mm
w_{25}	Verschiebung	7200/-250/825	-	z	± 5 mm
w_{26}	Verschiebung	8890/-120/580	-	z	± 25 mm
u_{11}	Verschiebung	0/159/1200	-	x	± 25 mm
u_{16}	Verschiebung	8890/159/1200	-	x	± 5 mm
u_{21}	Verschiebung	0/-159/1200	-	x	± 25 mm
u_{26}	Verschiebung	8890/-159/1200	-	x	± 5 mm
p_{ZZ}	Öldruck (Längszugkraft, Ringkammer)	-	-	-	500 bar
p_{ZD}	Öldruck (Längszugkraft, Kolbenkammer)	-	-	-	500 bar
p_3	Öldruck (Querbelastrung Q , Ringkammer)	-	-	-	500 bar
p_{6Z}	Öldruck (Querbelastrung P , Ringkammer)	-	-	-	500 bar
p_{6D}	Öldruck (Querbelastrung P , Kolbenkammer)	-	-	-	500 bar
t	Zeit	-	-	-	-

Tabelle 3.1 Kontinuierliche Messungen – Hauptmessungen.

Die Änderungen des Abstands zwischen dem Versuchskörper und dem Aufspannboden wurden mit induktiven Wegaufnehmern (w_{11} bis w_{15} ; w_{21} bis w_{25}), verlängert mit Invardrähten, gemessen. Die Tauchanker der vertikal montierten Wegaufnehmer waren an Gewichten befestigt, die mit Invardrähten an den Versuchskörper bzw. die Versuchsanlage befestigt wurden, siehe Bild 3.13. Für die Messungen w_{16} und w_{26} wurden die induktiven Wegaufnehmer direkt an den Hydraulikzylindern zur Erzeugung der Querbelastrung P befestigt; damit wurde die Änderung des Abstands zu den am Aufspannboden befestigten Gabelschuhen gemessen.

Die Verschiebung des Versuchskörpers in Längsrichtung wurde an den Stellen A und C mit je zwei induktiven Wegaufnehmern gemessen (u_{11} , u_{16} , u_{21} und u_{26}). Für diese Messungen wurden Invardrähte von den Bolzenlaschen horizontal zu Messständern gespannt und über Rollen umgelenkt, damit die induktiven Wegaufnehmer wie für die Messungen der vertikalen Verschiebungen in vertikaler Lage positioniert werden konnten.

Die aufgebrachte Last wurde über die Drücke in den drei Ölkreisläufen bestimmt. Die Drücke in den drei hydraulischen Systemen wurden mit Drucksensoren gemessen. Beim hydraulischen Zylinder zur Erzeugung der Längszugkraft war an den Vorlauf der Drucksensor p_{ZZ} und an den Rücklauf der Drucksensor p_{ZD} angeschlossen. Der Drucksensor p_3 war am Verteiler zu den sechs hydraulischen

Zylindern bei den Belastungsjochen angeschlossen. Bei den beiden Hydraulikzylindern am Kragarmende C war an den Vorlauf (Ringkammer) der Drucksensor p_{6Z} und an den Rücklauf (Kolbenkammer) der Drucksensor p_{6D} angeschlossen. An den Handpumpen und am Konstantdruck-Aggregat waren zu Kontrolle während der Versuche zusätzlich analoge Manometer installiert.

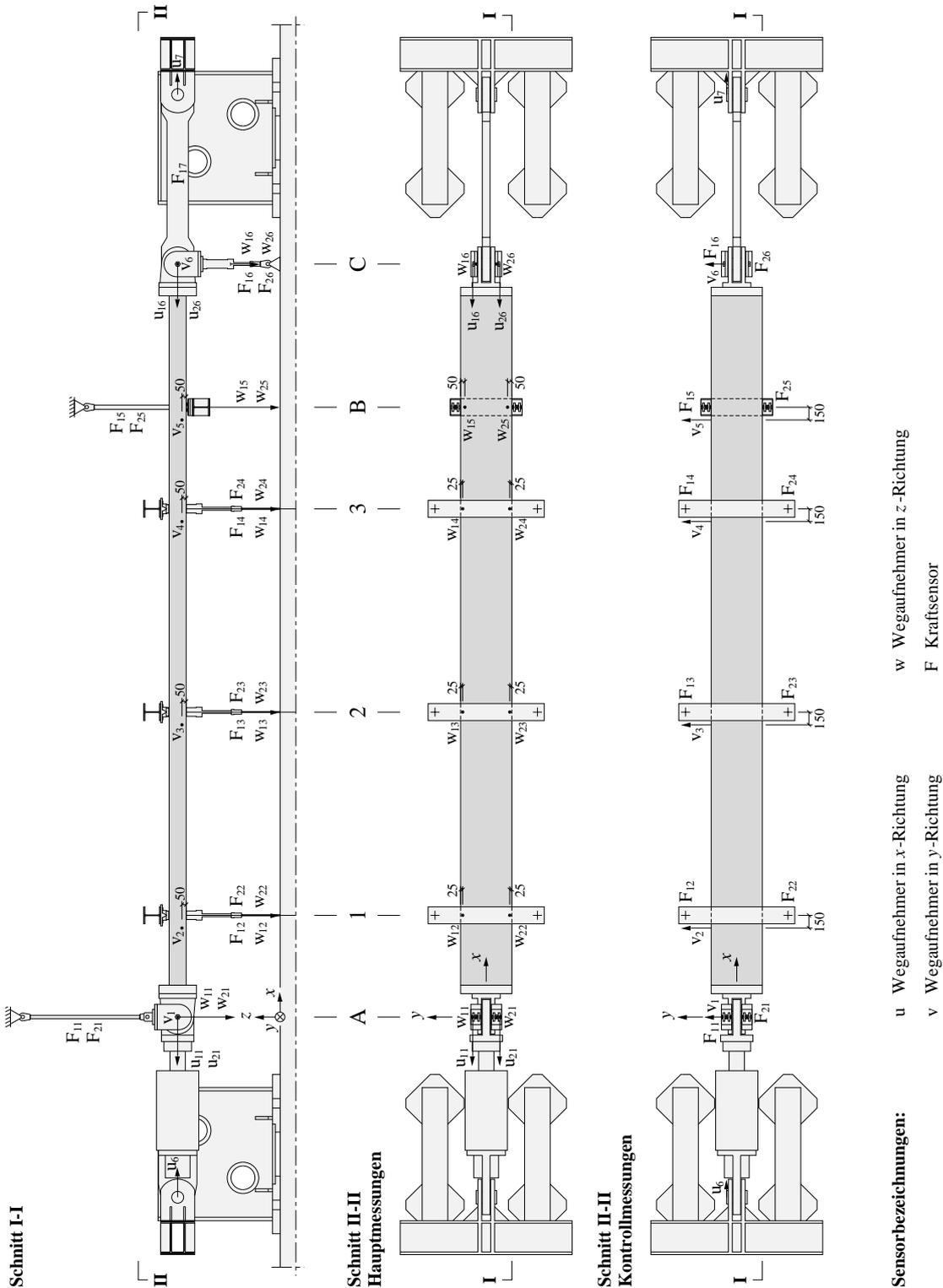


Bild 3.9 Anordnung und Bezeichnung der kontinuierlichen Messungen – Haupt- und Kontrollmessungen (Druckmessungen in Bild 3.8).

Die Kategorie der Sekundärmessungen beinhaltet Messungen von lokalen Veränderungen des Versuchskörpers (Längenänderungen u_1 bis u_5 und v_7 bis v_{10}). Um diese Längenänderungen an den Betonoberflächen zu bestimmen, wurden induktive Wegaufnehmer, verlängert mit Invarstäben, montiert (u_1 bis u_5 ; v_7 bis v_{10}). Aus konstruktiven Gründen betrug der Abstand zwischen der Betonoberfläche und den Messgeräten 25 mm. Positive Messwerte bedeuten dabei eine Verlängerung der Basislänge. Diese Messungen sind in Tabelle 3.2 zusammengestellt.

Bezeichnung	Messgröße	Ort (x/y/z) [mm]	Basislänge	Richtung	Messbereich
u_1	Längenänderung	6825/12.5/1325... 6975/12.5/1325	150 mm	x	± 20 mm
u_2	Längenänderung	6975/-12.5/1325... 7125/-12.5/1325	150 mm	x	± 20 mm
u_3	Längenänderung	7125/12.5/1325... 7275/12.5/1325	150 mm	x	± 10 mm
u_4	Längenänderung	7275/-12.5/1325... 7425/-12.5/1325	150 mm	x	± 20 mm
u_5	Längenänderung	7425/12.5/1325... 7575/12.5/1325	150 mm	x	± 20 mm
v_7	Längenänderung	6965/100/1075... 6965/-100/1075	200 mm	y	± 1 mm
v_8	Längenänderung	7075/100/1075... 7075/-100/1075	200 mm	y	± 1 mm
v_9	Längenänderung	7325/100/1075... 7325/-100/1075	200 mm	y	± 1 mm
v_{10}	Längenänderung	7435/100/1075... 7435/-100/1075	200 mm	y	± 1 mm

Tabelle 3.2 Kontinuierliche Messungen – Sekundärmessungen.

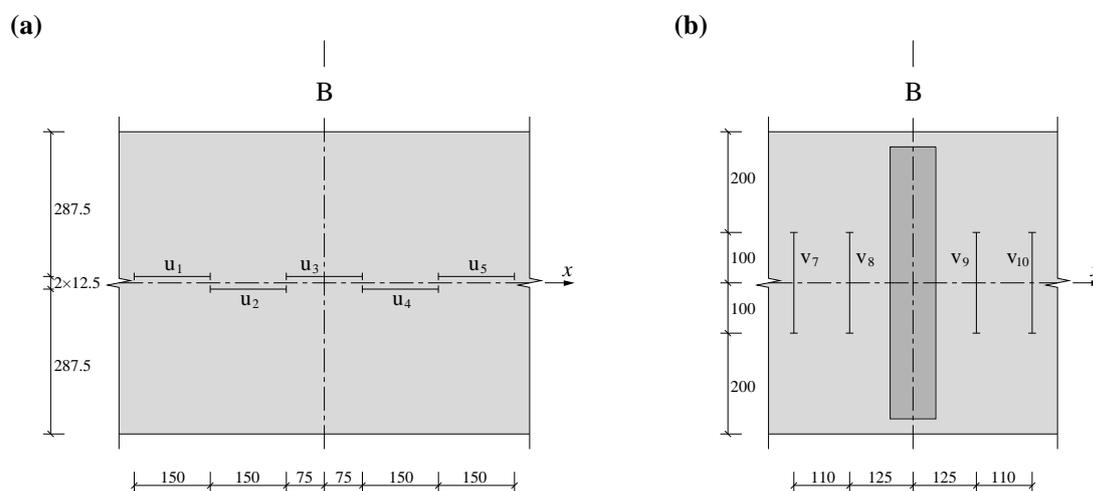


Bild 3.10 Anordnung und Bezeichnung der kontinuierlichen Messungen – Sekundärmessungen: (a) Draufsicht; (b) Untersicht. Abmessungen in mm.

Die Kategorie der Kontrollmessungen umfasst alle Messungen zur Kontrolle einer Hauptmessung (Kräfte F) und Messungen zur Kontrolle, dass keine unbeabsichtigten Bewegungen der Versuchsanlage entstanden (Verschiebungen v_1 bis v_6 , u_6 und u_7). Diese Messungen sind in Tabelle 3.3 zusammengestellt.

Die Verschiebungen des Versuchskörpers in Querrichtung wurden bei den Stellen A, 1, 2, 3, B und C mit je einem induktiven Wegaufnehmer gemessen (v_1 bis v_6). Für diese Messungen wurden Invar-

drähte vom Versuchskörper bzw. von den Bolzenlaschen horizontal zu Messständen gespannt und über Rollen umgelenkt, damit die induktiven Wegaufnehmer wie für die Messungen der vertikalen Verschiebungen in vertikaler Lage positioniert werden konnten, siehe Bild 3.13.

Die Messungen u_6 und u_7 dienten der Kontrolle der Horizontalverschiebungen der Reaktionsstrukturen für die Längszugkraft. Dazu wurde je ein induktiver Wegaufnehmer in horizontaler Lage angebracht. Die Tauchanker wurden mit Invarstäben verlängert und diese mit Zweikomponentenkitt an Ringschrauben in der jeweiligen Bolzenachse geklebt.

Die aufgebrachte Last wurde über Kraftmessdosen bzw. Dehnmessstreifen kontrolliert. An die Kolbenstangen der acht Zylinder bei den Belastungsjochen und beim Kragarmende C wurden jeweils Kraftmessdosen geschraubt (F_{12} bis F_{14} ; F_{22} bis F_{24} ; F_{16} und F_{26}). Die Zugstangen bei den Lagern A und B wurden als Kraftmessdosen ausgerüstet (F_{11} , F_{15} , F_{21} und F_{25}). Der Pendelstab beim Kragarmende C war mit Dehnmessstreifen bestückt, was die Ermittlung der entsprechenden Kraft im Pendelstab ermöglichte (F_{17}).

Bezeichnung	Messgrösse	Ort (x/y/z) [mm]	Basislänge	Richtung	Messbereich
v_1	Verschiebung	0/159/1200	-	y	± 10 mm
v_2	Verschiebung	1050/300/1150	-	y	± 10 mm
v_3	Verschiebung	3450/300/1150	-	y	± 25 mm
v_4	Verschiebung	5850/300/1150	-	y	± 10 mm
v_5	Verschiebung	7050/300/1150	-	y	± 10 mm
v_6	Verschiebung	8890/159/1200	-	y	± 10 mm
u_6	Verschiebung	-2130/120/1200	-	x	± 10 mm
u_7	Verschiebung	10890/-120/1200	-	x	± 10 mm
F_{11}	Kraft Zugstange A	0/120/z	-	z	250 kN
F_{12}	Kraft	1200/600/z	-	z	150 kN
F_{13}	Kraft	3600/600/z	-	z	150 kN
F_{14}	Kraft	6000/600/z	-	z	150 kN
F_{15}	Kraft Zugstange B	7200/360/z	-	z	250 kN
F_{16}	Kraft	8890/120/z	-	z	150 kN
F_{17}	Dehnung (→ Kraft) Pendelstab C	x/0/1200	-	x	2'000 kN
F_{21}	Kraft Zugstange A	0/-120/z	-	z	250 kN
F_{22}	Kraft	1200/-600/z	-	z	150 kN
F_{23}	Kraft	3600/-600/z	-	z	150 kN
F_{24}	Kraft	6000/-60 /z	-	z	150 kN
F_{25}	Kraft Zugstange B	7200/-360/z	-	z	250 kN
F_{26}	Kraft	8890/-120/z	-	z	150 kN

Tabelle 3.3 Kontinuierliche Messungen – Kontrollmessungen.

3.2.2 Manuelle Messungen

Zur Bestimmung der mittleren Verzerrungen auf den Betonoberflächen und der vertikalen Verschiebungen der Untersicht der Versuchskörper wurden Deformeter- und Stabdeformetermessungen durchgeführt. Die Messung der Distanz zwischen den Messmarken auf der Betonoberfläche erfolgte mittels Deformeter. Das Messgerät wurde dafür auf die Zentrierbohrungen der auf die Betonoberflächen geklebten Aluminiumbolzen gesetzt, die als Messmarken dienten. Aufgrund der Höhe der Messmarken wurde so die Distanz etwa zwei Millimeter oberhalb der Betonoberfläche gemessen. Für die Stabdeformetermessungen wurden Aluminiumbolzen auf Aluminiumplättchen geklebt und diese direkt auf den Aufspannboden geleimt. An der Unterseite der Versuchskörper wurden dieselben Messmarken verwendet wie für die Deformetermessungen. Durch Aufsetzen des Deformeterstabs konnte so die Distanz zwischen dem Versuchskörper und dem Aufspannboden bestimmt werden. Für die Messungen 456 und 460 (beim Kragarmende C) wurde die Distanz des Versuchskörpers zu der auf den Aufspannboden gespannten Adapterplatte gemessen. Die Anordnung der Messmarken und

die Nummerierung der Messstrecken für die Deformeter- und die Stabdeformetermessungen sind aus den Bildern 3.11 und 3.12 ersichtlich.

Die Deformetermessungen auf der Ober- und Unterseite des Versuchskörpers sowie die Stabdeformetermessungen wurden auf der ganzen Länge der Versuchskörper durchgeführt. Die Deformetermessungen auf den vertikalen Seitenflächen der Versuchskörper wurden für die Versuche T0, T1 und T2 lediglich zwischen dem Belastungsjoch 3 und dem Zwischenaufleger B durchgeführt. Für die Versuche T3, T4 und T5 wurden diese Messungen auf den Bereich zwischen dem Zwischenaufleger B und dem Kragarmende C erweitert.

Um aus den Deformetermessungen auf der Ober- und Unterseite der Versuchskörper die Dehnungsebenen in den einzelnen Querschnitten genauer ermitteln zu können, wurden vor Versuchsbeginn bei jedem Paar von Messmarken (Ober- und Unterseite) die Dicken der Versuchskörper gemessen. Dazu wurde ein spezielles Messgerät in die Zentrierbohrungen der Aluminiumbolzen gehalten und die Dicke mittels einer digitalen Messuhr abgelesen sowie handschriftlich notiert. An Stellen, wo sich die Dicke des Versuchskörpers bei späteren Laststufen stark änderte, wurden diese Dickenmessungen bei Bedarf wiederholt.

Für die Deformetermessungen (Tabelle 3.4) wurden fünf verschiedene Messgeräte eingesetzt:

- Deformeter mit einer Basislänge von 300 mm, Messbereich ± 10 mm
- Deformeter mit einer Basislänge von 424 mm, Messbereich ± 20 mm
- Deformeter mit einer Basislänge von 141 mm, Messbereich ± 10 mm
- Deformeter mit einer Basislänge von 200 mm, Messbereich ± 10 mm
- Stabdeformeter mit einer Basislänge von 1060.5 mm, Messbereich ± 100 mm

Aufgrund der sehr grossen Durchbiegungen konnten mit dem oben beschriebenen Stabdeformeter die Messungen nicht bis zum Bruchzustand durchgeführt werden. Bei den Versuchen T0 und T1 waren die Biegelinien bei höheren Laststufen deshalb nur unvollständig messbar. Bei den Versuchen T2 und T3 kam für die Durchbiegungsmessungen ein zusätzlicher Stabdeformeter mit variabler Länge und einem Messbereich von ± 50 mm zum Einsatz, sobald der Messbereich des standardmässig eingesetzten Stabdeformeters nicht mehr genügte. Die Länge dieses zusätzlichen Stabdeformeters konnte durch verschiedene Zwischenstücke aus Messing angepasst werden. Für die Versuche T4 und T5 wurde ein weiterer Stabdeformeter mit einem Messbereich von ± 500 mm entwickelt. Die Durchbiegungen wurden allerdings wegen der grösseren Messgenauigkeit trotzdem so weit wie möglich mit dem ursprünglichen Stabdeformeter gemessen und nur bei grossen Durchbiegungen mit dem neuen Stabdeformeter ergänzt. Für die Versuche T2 bis T5 konnten die Biegelinien somit bei sämtlichen Laststufen komplett gemessen werden.

Messungen	Basislänge	Ort	Anzahl
5...87	300 mm	Oberseite	79
105...187	300 mm	Unterseite	77
205...258	424 mm	Oberseite	46
305...358	424 mm	Unterseite	50
405...460	1060.5 mm	Unterseite (Stabdeformeter)	54
505...556	141 mm	Vorderseite	48 (24)
605...656	141 mm	Rückseite	48 (24)
705...738	200 mm	Vorderseite	30 (15)
805...838	200 mm	Rückseite	30 (15)

Tabelle 3.4 Deformetermessungen. Die Werte in Klammern beziehen sich auf die Versuchskörper T0, T1 und T2.

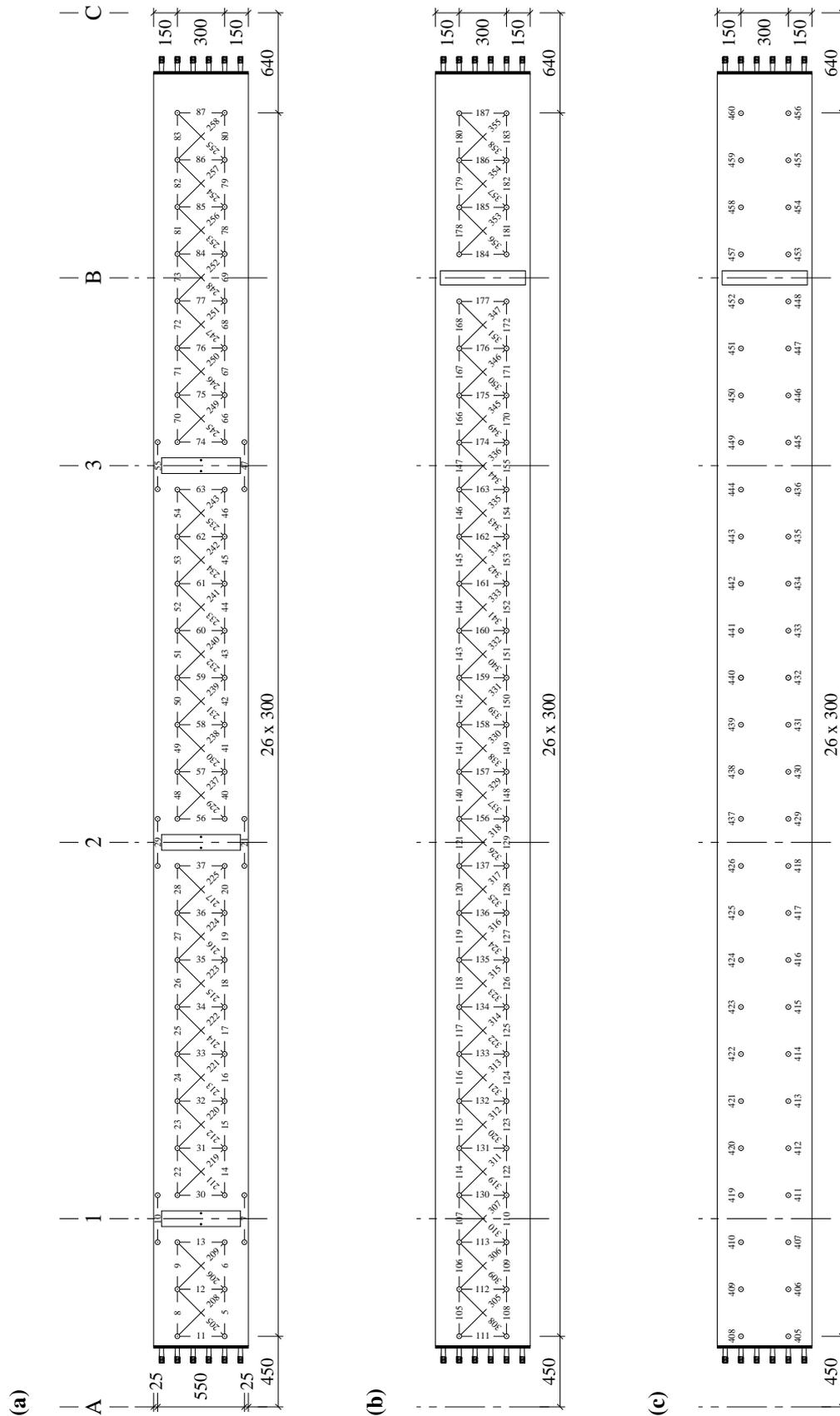


Bild 3.11 Anordnung und Nummerierung der Deformeternetz auf der Ober- und Unterseite der Versuchskörper: (a) Deformeternetz Draufsicht; (b) Deformeternetz Untersicht; (c) Stabdeformeternetz Untersicht. Abmessungen in mm.

Um die Messfehler infolge Temperaturschwankungen erfassen und ausgleichen zu können, wurde nach maximal 30 Messungen eine Referenzmessung am Invarstab durchgeführt. Die Messresultate wurden in einem Messcomputer gespeichert, der die Signale des Messverstärkers in Mikrometer umrechnet und zur Kontrolle am Bildschirm anzeigte.

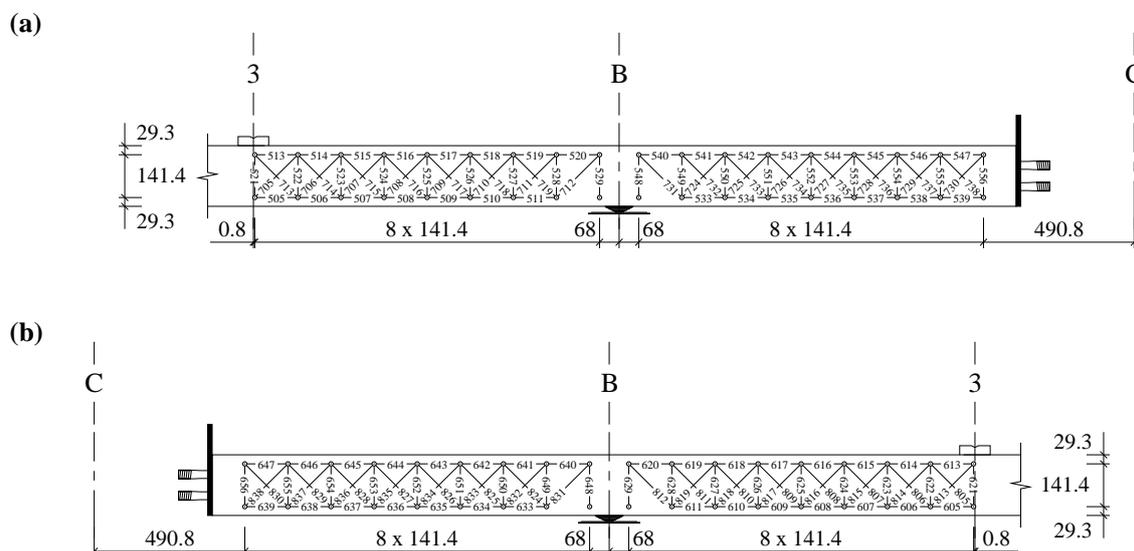


Bild 3.12 Anordnung und Nummerierung der Deformometermessungen auf den vertikalen Seitenflächen: (a) Deformeternetz Vorderseite; (b) Deformeternetz Rückseite. Abmessungen in mm.

Als Kontrolle wurde in den Achsen A, B und C sowie beim Belastungsjoch 2 jeweils zu Beginn und am Ende jeder Laststufe der Abstand zwischen dem Versuchskörper und dem Aufspannboden mit einem Gliedermeter gemessen und protokolliert.

3.2.3 Messgenauigkeit

Sämtliche oben beschriebenen Messgeräte wurden vor dem ersten Versuch kalibriert. Dabei wurde jeweils für den gesamten Messbereich der Sensoren mittels Minimierung der Fehlerquadrate eine Kalibrationsgerade durch zwei Punkte definiert, um das elektische Signal in die entsprechende Messeinheit umzurechnen. Diese Gerade stellt eine Vereinfachung des realen Verhaltens der Sensoren dar. Der Messstrang, bestehend aus der Verkabelung und dem Messverstärker, beeinflusste dieses Signal in unterschiedlichem Mass. Bei den Messungen geometrischer Grössen wurde dieser Einfluss erfasst und in die Kalibrationsgerade eingerechnet; bei den Messungen von Kraftgrössen wurde er nicht berücksichtigt. Äussere Einflüsse wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, elektrische und magnetische Felder beeinflussten die Messgenauigkeit zusätzlich, wurden aber nicht speziell erfasst.

Bei den Distanzmessungen hatte zudem die Geometrie einen Einfluss auf die Messgenauigkeit. Die Messeinrichtungen für die kontinuierlichen Distanzmessungen wurden vor Versuchsbeginn so positioniert, dass die Distanzen exakt in Richtung der definierten Verschiebungsgrössen gemessen wurden. Durch die Verformung der Versuchskörper ergab sich eine Verschiebung zwischen Versuchskörper und den fix befestigten Messaufnehmern senkrecht zur gemessenen Distanz. Dadurch wurden effektiv Distanzen gemessen, die einen kleinen Winkel mit den Richtungen der definierten Verschiebungsgrössen einschlossen. In Bild 3.13 ist stellvertretend und schematisch die Situation für die Durchbiegungsmessungen w_{13} bzw. w_{23} beim Belastungsjoch 2 dargestellt. An dieser Stelle entstan-

den (mit Ausnahme der Querverschiebungen v_1 bis v_6) die grössten Relativverschiebungen zwischen Versuchskörper und Messaufnehmer. Am gezeigten Beispiel ist zu erkennen, wie der Einfluss der Geometrie auf die Messgenauigkeit mit zunehmender Durchbiegung zunimmt und sich im Bereich von einigen Zehntelmillimetern bewegt.

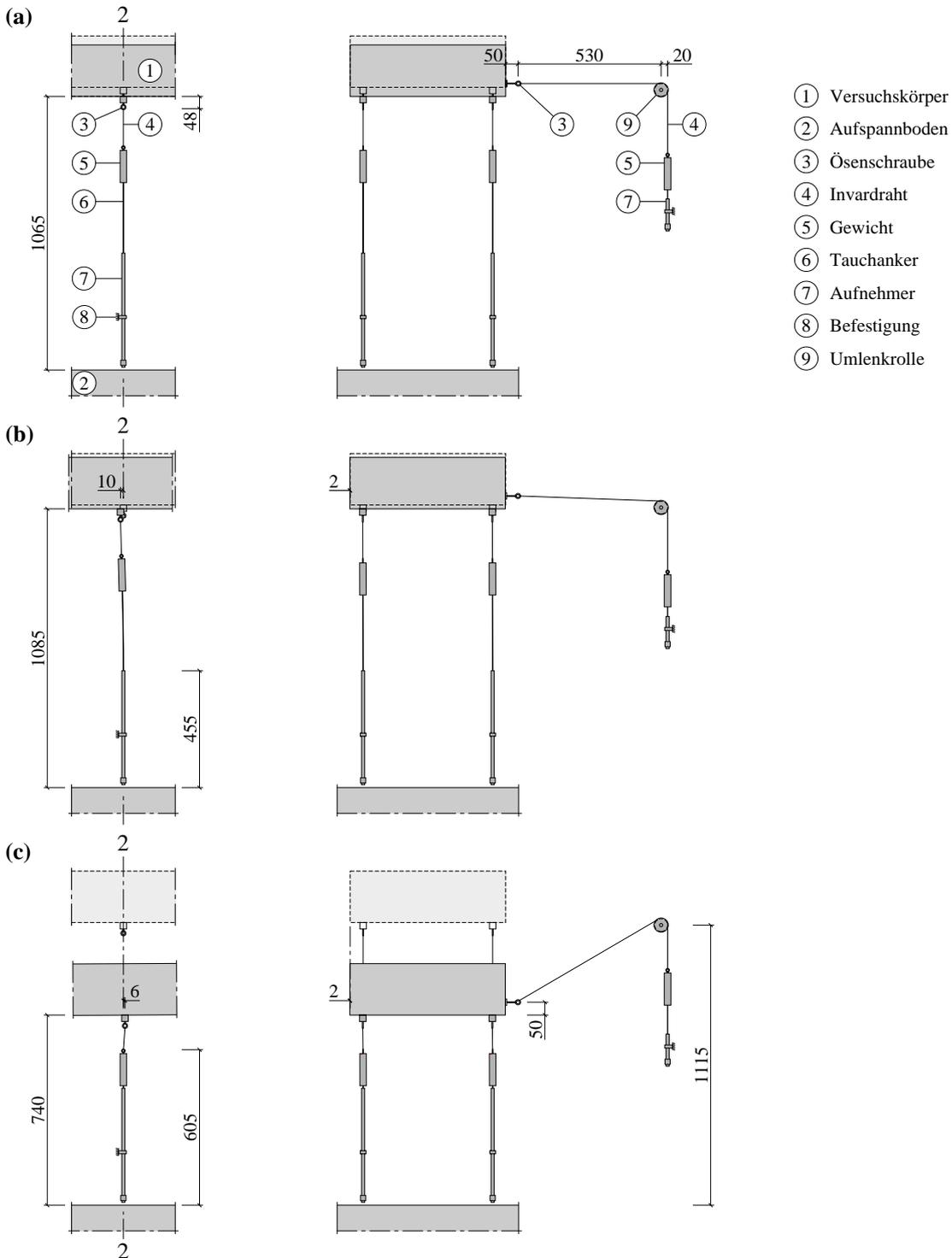


Bild 3.13 Messeinrichtung für Durchbiegungs- und Querverschiebungsmessungen: (a) Zustand bei Versuchsbeginn und Bezeichnungen; (b) Zustand nach Aufbringen der Längszugkraft; (c) Zustand bei maximalen Durchbiegungen. Strichliert die Referenzlage des Versuchskörpers. Werte typisch für Belastungsjoch 2. Abmessungen in mm.

Die geometrischen Verhältnisse bewirkten, dass die Querverschiebungen v_1 bis v_6 nur während dem Aufbringen der Längszugkraft aussagekräftig waren. Danach waren die Messwerte hauptsächlich ein Resultat der wesentlich grösseren vertikalen Durchbiegungen, siehe Bild 3.13 (c).

Alle erwähnten Einflüsse zusammen führten zu einer Genauigkeit der kontinuierlich gemessenen geometrischen Grössen von ca. 1 % des Messbereichs.

Bei den Deformetermessungen konnte insgesamt eine Messgenauigkeit von ca. 0.3 % des Messbereichs erreicht werden. Bei den beiden für die Versuche T2 bis T5 zusätzlich eingesetzten Stabdeformetern betrug die Messgenauigkeit ca. 0.7 % des jeweiligen Messbereichs.

Aus den Öldrücken in den hydraulischen Systemen wurden durch Multiplikation mit den Kolbenflächen der jeweiligen Zylinder die Belastungen Q , P und T berechnet. Die Reibungseinflüsse in den Zylindern wurden dabei nicht berücksichtigt. Zusammen mit den übrigen Einflüssen führte dies zu einer Genauigkeit dieser gemessenen Kraftgrössen von ca. 1 % des Messbereichs.

3.2.4 Rissprotokolle

Es wurden nur die Risse an der Vorderseite protokolliert. Zu diesem Zweck wurde der Versuchskörper in 5 Felder eingeteilt. Die Felder waren begrenzt durch die Achsen (1, 2, 3 und B) und durch die Kanten der Versuchskörper. Feldweise wurden die Risse an der Ober- und Unterkante der Vorderseite gegen C aufsteigend nummeriert und der Abstand in Längsrichtung des Versuchskörpers zur Feldbegrenzung gemessen. Für jeden so definierten Riss wurden in jeder Laststufe die Rissbreite t_R , die Rissbreite auf der Ober- bzw. Unterseite sowie die Relativkoordinaten des Rissendes in der Seitenfläche bezüglich des Kantenpunktes gemessen. Zusätzlich konnten pro Laststufe die Relativkoordinaten eines zusätzlichen Zwischenpunktes sowie der Start- und Endpunkte einer Verzweigung protokolliert werden. Maximal zwei Verzweigungen pro Riss konnten in der Auswertung berücksichtigt werden. Risse mit Start- und Endpunkt in der Seitenfläche wurden separat protokolliert.

Die Risskoordinaten wurden mittels Gliedermeter und Schlosserwinkel mit Anschlag auf 5 mm genau aufgenommen. Die Rissbreiten wurden mittels Rissmeter bestimmt, wobei Risse kleiner 0.05 mm mit "HR" (Haarriss) und bei höheren Querbelastungen an der Kante geschlossene Risse mit "g" protokolliert wurden.

3.2.5 Fotodokumentation

Ab Laststufe LS1 des Versuchs T1 wurde der Zustand der Versuchskörper bei jeder Laststufe systematisch fotografisch dokumentiert. Dabei wurden die Vorder-, Ober- und Unterseite des Versuchskörpers von fixen Positionen aus aufgenommen. Die Positionen mit der entsprechenden Bezeichnung sind in Bild 3.14 dargestellt. Bei grossen Durchbiegungen wurden die Höhen der Aufnahmepositionen der Vorderseite entsprechend reduziert. Zusätzlich wurden bei jeder Laststufe Übersichtsbilder, und bei Bedarf Detailaufnahmen, gemacht. Als Kamera diente eine Nikon D80 mit einem 18-200 mm VR Objektiv. Abgesehen von den Detailaufnahmen wurde mit einer Brennweite von 18 mm fotografiert.

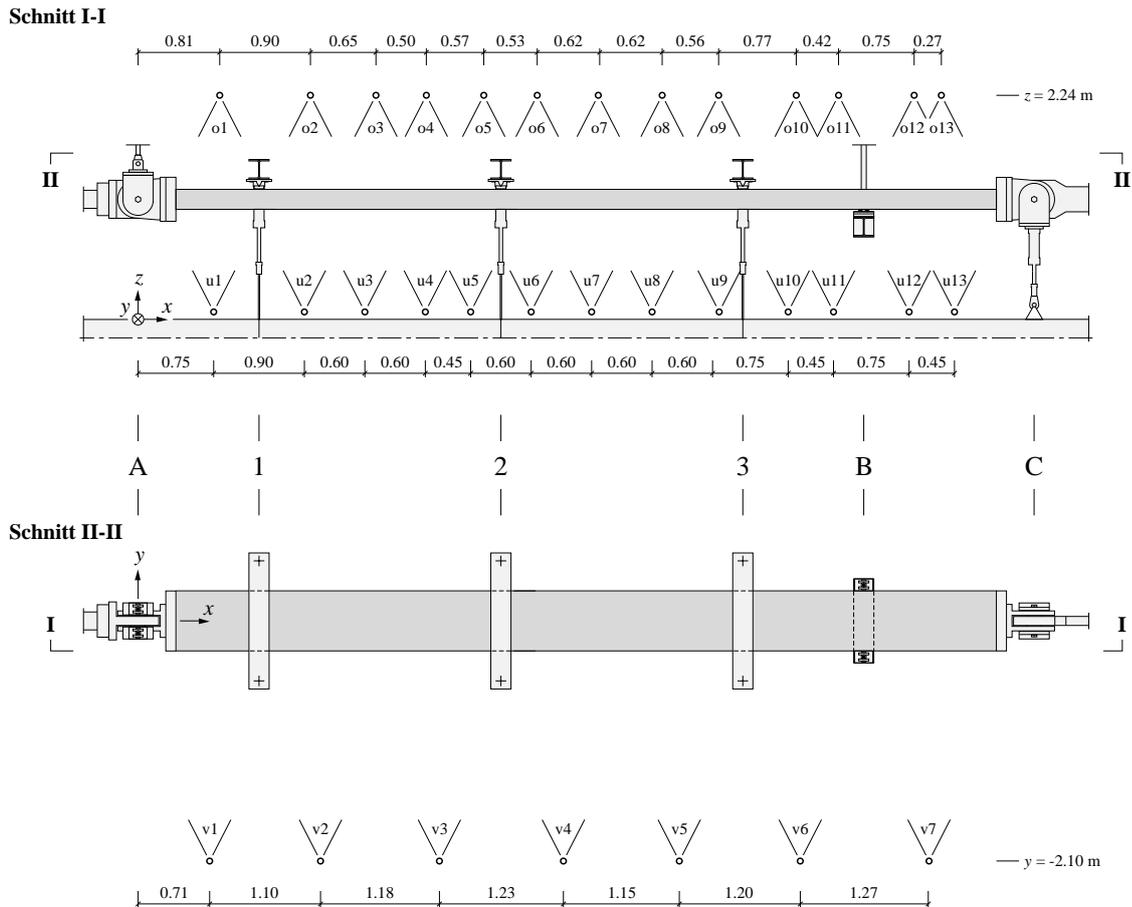


Bild 3.14 Fotopositionen. Abmessungen in m.

3.3 Versuchsablauf

Die Versuche dauerten in der Regel zwei Tage. Vor dem ersten Tag wurden zuerst alle temporären Halterungen und Unterstützungen entfernt und der Atmosphärendruck in den Hydrauliksystemen hergestellt. Danach wurden alle Sensoren der kontinuierlichen Messungen zu Null abgeglichen und zwei vollständige Nullmessungen mit den Deformetern durchgeführt, wobei die zweite als Bezugsmessung für die Auswertung verwendet wurde und die erste der Kontrolle der zweiten diente. Am ersten Versuchstag wurde als erste Laststufe bei frei laufenden Querbelastungszylindern (Absperrventile geöffnet) die Längszugkraft aufgebracht und eine erste vollständige Messung durchgeführt. Bei der zweiten Laststufe musste zuerst die Längszugkraft nachjustiert werden, weil sich das Öl im entsprechenden Hydraulikkreislauf inzwischen erwärmt hatte. Dann wurde die Querbelastung P auf einen vorgängig definierten Wert erhöht, bei dem das Moment über dem Zwischenaufleger M_B etwa dem Stützmoment eines symmetrischen Zweifeldträgers unter Eigenlast entsprach. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Zylinder der Belastungsjoche 1 bis 3 keine Kraft aufbauten. Anschliessend wurden die Belastungen P und Q in einem vorgängig definierten Verhältnis gesteigert. Mit den Messungen der Laststufe Q50 endete der erste Tag. Der Versuchskörper wurde über Nacht nicht entlastet.

Am zweiten Tag wurden die Querbelastungen P und Q im gleichen Verhältnis weiter gesteigert, bis zu einem Wert, bei dem die Absperrventile zu den P -Zylindern geschlossen wurden. Dieser Wert wurde vorgängig so definiert, dass sich der Versuchskörper über dem Zwischenaufleger im plastischen Bereich befand. So wurde für den weiteren Versuchsablauf die Lage z_C bei C konstant gehalten und die Messung des Öldrucks zur Bestimmung der Reaktion benutzt. Dies wurde während des Versuchs überprüft, indem die Absperrventile erst geschlossen wurden, nachdem ein Abfall des Widerstandes beim Betätigen der Handpumpe festgestellt worden war. Nach dem Schliessen der Absperrventile wurde die Querbelastung Q stufenweise bis zum Bruch oder bis zum Erreichen der Kapazität des Versuchsaufbaus weiter gesteigert. Dabei wurde die Belastung in vorgängig definierten Schritten bzw. nach dem Bruch angehalten, um Messungen durchzuführen. Sofern es die Zeitverhältnisse erlaubten, wurde nach dem Bruch nochmals Öl in die Q -Zylinder gepumpt, um das Nachbruchverhalten zu untersuchen.

Laststufe	Versuch T0	Versuch T1	Versuch T2	Versuch T3	Versuch T4	Versuch T5
Eigenlast	LS 0					
T150	-	-	LS 1	-	-	-
T300	-	LS 1	-	LS 1	LS 1	LS 1
Q25	LS 1	LS 2	LS 2	LS 2	-	-
Q50	LS 2	LS 3	LS 3	LS 3	LS 2	LS 2
Q60	LS 3	LS 4	LS 4	-	-	-
Q75	-	LS 5	LS 5	LS 4	LS 3	LS 3
Q100	-	LS 6	LS 6	LS 5	LS 4	LS 4
Q125	-	LS 7	LS 7	LS 6	-	-
Q150	-	-	LS 8	LS 7	LS 5	LS 5
Q200	-	-	-	LS 9	LS 6	LS 6
Q250	-	-	-	-	LS 7	LS 7
Q260	-	-	-	LS 10	LS 8	LS 8
Bruch	LS 4	LS 8	LS 9	LS 8	-	-
Bruch2	LS 6	-	-	-	-	-
Wiederbelastung		-	-	-	-	LS 10

Tabelle 3.5 Übersicht der Laststufen aller Versuche.

Die Messungen innerhalb einer Laststufe wurden erst begonnen, nachdem die Verformungen des Versuchskörpers während mindestens 10 Minuten konstant gehalten worden waren. Eine vollständige Messung beinhaltete ausser der Durchführung der Deformetermessungen auch das Anzeichnen neu entstandener Risse, das Protokollieren der Rissbreiten und –geometrie sowie die fotografische Dokumentation der Laststufe. Nach dem Bruch wurden die Deformetermessungen auf die Messungen mit dem Stabdeformeter beschränkt.

Beim Versuch T0 entfiel das Aufbringen der Längszugkraft. Bei den Versuchen T4 und T5 wurde der Versuchskörper nach Erreichen der Kapazität des Versuchsaufbaus entlastet und am folgenden Tag wiederbelastet. Tabelle 3.5 gibt eine Übersicht über die Laststufen der verschiedenen Versuche.

Die wichtigsten Steuergrössen waren die aus den Messwerten der Flüssigkeitsdrucksensoren berechneten Zylinderkräfte T , Q und P sowie die vertikalen Verschiebungen in Feldmitte w_2 und am Kragarmende w_C .

4. Versuchsresultate

4.1 Auswertung und Darstellung der Resultate

4.1.1 Bezeichnungen

Es wird das in Kapitel 3.2.1 eingeführte Koordinatensystem (siehe Bild 3.9) verwendet.

Im Allgemeinen entsprechen die kursiv geschriebenen Variablen den Messresultaten der entsprechenden Messgeräte (Bild 3.9, Bild 3.10, Tabellen 3.1 bis 3.3), oder sie werden neu definiert.

4.1.2 Auswertung der kontinuierlichen Messungen

Die Zugkraft des horizontalen Hydraulikzylinders berechnet sich aus $T = p_{ZZ} \cdot A_{ZZ} - p_{ZD} \cdot A_{ZD}$; für die vertikalen Hydraulikzylinder gelten die Beziehungen $Q = 2 \cdot p_3 \cdot A_Q$ und $P = 2 (p_{6Z} \cdot A_{6Z} - p_{6D} \cdot A_{6D})$.

Zur Bestimmung der Durchbiegungen w an den Belastungsjochen und am Kragarmende wurde in einem ersten Schritt für jeden Zeitpunkt die Absolutlage der Versuchskörperunterseite in den Achsen A, 1, 2, 3, B und C berechnet als $z_i(t) = z_i(0) + [w_{1i}(t) - w_{1i}(0) + w_{2i}(t) - w_{2i}(0)] / 2$, wobei $z_i(0)$ aus den Stabdeformometerwerten der Nullmessungen gewonnen wurde und w_{1i} , w_{2i} die Messwerte der beiden Verschiebungsmessungen in der betreffenden Achse bezeichnen. Die Durchbiegungen entsprechen den Abständen der Absolutlage der entsprechenden Stellen zur Verbindungsgeraden $z_A - z_B$, wie in Bild 4.1(b) illustriert.

In analoger Weise wurden die Verschiebungen v in Querrichtung ausgewertet, wobei auf die Messung der Absolutlage bei Versuchsbeginn verzichtet wurde. Die Verschiebungen in Querrichtung wurden erhoben, um zu kontrollieren, dass die Versuchskörper nicht durch grössere Biegemomente um die Vertikale beansprucht wurden (verursacht durch in der Horizontalebene gebogene Längsbeiwehrung oder schiefe Endflächen (Abschalplatten) der Versuchskörper). Die Messwerte sind nur für die erste Laststufe aussagekräftig, siehe Kapitel 3.2.3.

Die horizontale Verschiebung u_A in Längsrichtung wurde berechnet aus der Differenz der Mittelwerte der entsprechenden gemessenen Verschiebungen in A und C, wobei ein positiver Wert eine Vergrößerung der Distanz A - C bedeutet.

Aus dem Gleichgewicht, den gemessenen Eigenlasten und den aufgetragenen Lasten T , Q und P sowie der Durchbiegung am Kragarmende w_C wurde das auf die Verbindungsgerade $z_A - z_B$, bezogene Biegemoment M_0 berechnet, wobei P zuerst um denjenigen Anteil korrigiert wurde, der vom Pendelstab aufgenommen wurde. Das zugrundeliegende statische System ist aus Bild 4.1(c) ersichtlich; die Beiträge der einzelnen Lasten zum Biegemoment $M_0(x)$ sind in Bild 4.1(d) dargestellt. Für die Momente wurden auch die auf die (verformte) Versuchskörperachse bezogenen Werte $M = M_0 - Tw$ berechnet, wie in Bild 4.1(e) gezeigt. Die auf die Horizontale bezogenen Querkräfte V_0 wurden A-seitig der Belastungsjoche 1, 2, 3 ($V_{1,0}^-$, $V_{2,0}^-$, $V_{3,0}^-$) und beidseits des Zwischenauflegers B ($V_{B,0}^-$, $V_{B,0}^+$) berechnet.

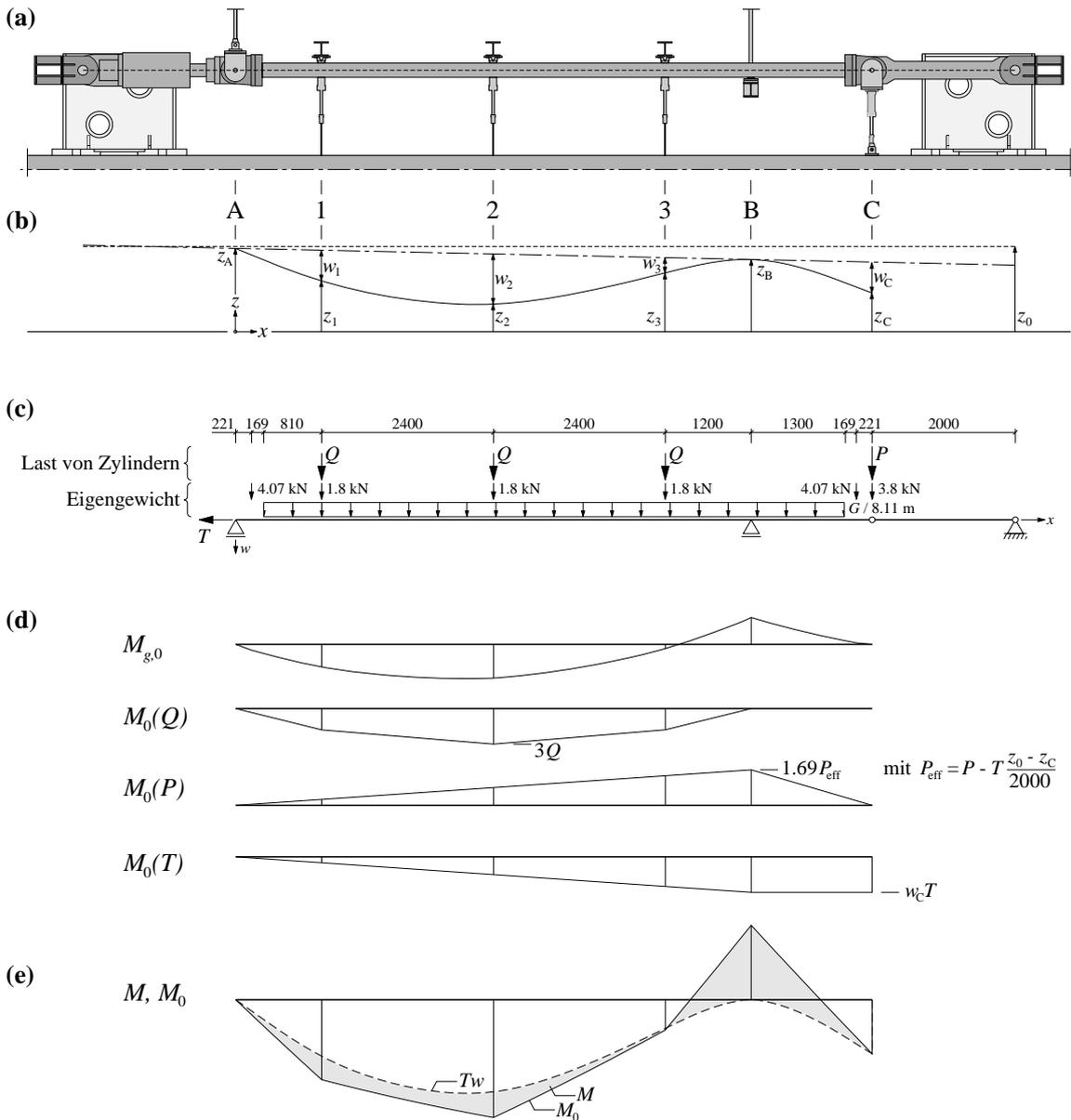


Bild 4.1 Verformungen und Momente: (a) Versuchsaufbau und Achsen; (b) Definition der Durchbiegungen; (c) Statisches System mit relevanten Lasten; (d) Momentenanteile; (e) Momentendefinition.

Aus den Längenänderungsmessungen u_1 bis u_5 wurden durch Division mit der Basislänge Dehnungen berechnet ($\epsilon_{x,o}$; Kopfzeiger mit Plus und Minus bezeichnen die Lage der Messung bezüglich dem Zwischenaufleger B). Aufgrund des Abstandes der Wegsensoren von der Betonoberfläche sind diese Dehnungen grösser als diejenigen auf der Oberfläche. Aus den Verläufen ist aber trotzdem zu erkennen, wo und bei welcher Last das Dehnungsverhalten nichtlinear wird.

Aus den Längenänderungsmessungen v_7 bis v_{10} wurden ebenfalls durch Division mit der Basislänge Dehnungen ($\epsilon_{y,u}$; Kopfzeiger mit Plus und Minus bezeichnen die Lage der Messung bezüglich dem Zwischenaufleger B) berechnet.

Die Messwerte der Kraftsensoren wurden nicht ausgewertet. Sie dienen lediglich der Plausibilitätskontrolle der entsprechenden, aus den Öldrücken berechneten Kräfte.

4.1.3 Auswertung der manuellen Messungen

Die Auswertung der bei den einzelnen Laststufen durchgeführten Deformermessungen erfolgte in mehreren Schritten. Zuerst wurden die Messwerte der Deformermessungen auf die Eichwerte abgestimmt und somit systematische Fehler thermisch bedingter Verformungen der Messgeräte eliminiert. Dazu wurden die Differenzen der in Kapitel 3.2.2 erwähnten Referenzmessungen am Invarstab linear auf die dazwischen liegenden Messungen verteilt. Anschliessend wurde bei allen Messwerten die Differenz zur zweiten Nullmessung berechnet. Offensichtlich fehlerhafte Messwerte konnten daraufhin eliminiert werden. Aus der zweiten Nullmessung wurde ebenfalls für jede gemessene Deformometerstrecke die tatsächliche Basislänge berechnet.

An den statisch überbestimmten Messnetzen auf den vier Seiten der Versuchskörper konnten zufällige Messfehler anhand einer Fehlerausgleichsrechnung, welche der Methode der kleinsten Quadrate entspricht, minimiert werden. Dazu wurden die Messnetze als innerlich statisch unbestimmte, linear elastische Fachwerke mit gelenkigen Knoten modelliert. Diesen Fachwerken wurden Verformungen in Form initialer Stabdehnungen aufgezwungen. Die initialen Stabdehnungen entsprechen dabei den gemessenen Längenänderungen aus den Deformermessungen. Die einzelnen Messwerte werden bei diesem Ausgleichsverfahren proportional zu den jeweiligen Stabsteifigkeiten gewichtet. Die Berechnung erfolgte mit dem Stabstatikprogramm Statik-6 der Cubus AG, wobei die Dehnsteifigkeiten aller Stäbe proportional zu deren Länge angenommen wurden, was zu gleich grossen Stabsteifigkeiten EAI für alle Stäbe führte. Die entstandenen Korrekturen aus diesem Fehlerausgleich waren stets um Grössenordnungen kleiner als die während der Versuche maximal gemessenen Dehnungsänderungen pro Laststufe.

Für die Laststufe 0 wurden jeweils die absoluten, theoretischen Durchbiegungen durch eine Rückrechnung aus den Schnittgrössen unter Eigenlast ermittelt. Dazu wurden zwei konstante Biegesteifigkeiten EI_I und EI_{II} berechnet. Falls das rechnerische Rissmoment in einem Schnitt überschritten war, wurde dort die kleinere Steifigkeit EI_{II} angesetzt, ansonsten die grössere (EI_I). Durch Minimierung der Fehlerquadrate zwischen den gemessenen und den berechneten Durchbiegungen wurden so die Steifigkeiten für jeden Versuch festgelegt. Das Verhältnis der zwei Biegesteifigkeiten wurde für die Versuche T1, T2, T3 und T5 zu 3.2 gesetzt. Für die Versuche T0 und T4 wurde aufgrund der Vorbelastung der Versuchskörper dieses Verhältnis gleich 1 gesetzt. ($EI_I = EI_{II}$).

Aus den zur Laststufe 0 gehörigen Steifigkeiten und den Schnittgrössen konnten bei jeder Masche des Deformernetzes aus den Dehnungsebenen die Längsdehnungen der Schwerachse $\varepsilon_{x,0}$ sowie Krümmungen χ_y und schliesslich Längsdehnungen auf der Ober- und Unterseite der Versuchskörper ($\varepsilon_{x,\text{sup}}$ bzw. $\varepsilon_{x,\text{inf}}$) berechnet werden. Dazu wurde die theoretische Höhe der Versuchskörper von 200 mm verwendet. Die Dehnungen in vertikaler Richtung ε_z sowie die Schiebungen γ_{xz} wurden für diese Laststufe gleich Null gesetzt. Somit konnten im Bereich der Deformermessungen auf den Seitenflächen auch die Hauptdehnungen ε_1 für diese Laststufe bestimmt werden.

Für sämtliche Laststufen konnten nun die Dehnungsänderungen zu den absoluten Dehnungen der Laststufe 0 addiert werden. Dabei wurden die Krümmungen aus den Dehnungen der Ober- und Unterseite und den bei jedem Punktepaar gemessenen Dicken bestimmt. Die Oberflächendehnungen wurden danach wieder auf die theoretische Höhe der Versuchskörper von 200 mm umgerechnet. Wenn eine Dehnungsmessung auf der Ober- oder Unterseite in einer Laststufe nicht mehr messbar war, wurde bei der gegenüberliegenden Dehnungsmessung der tatsächlich gemessene anstatt der umgerechnete Wert dargestellt. Dies ist jeweils im entsprechenden Bild vermerkt. Für die Deformermessungen auf den Seitenflächen konnten ebenfalls die Schiebungs- und Hauptdehnungsänderungen bestimmt und zu den Absolutwerten der Laststufe 0 addiert werden.

Aus den Stabdeformermessungen wurden unter der Annahme eines starren Aufspannbodens die vertikalen Verschiebungen des Versuchskörpers bestimmt. Zur Berechnung der Durchbiegungen w aus den vertikalen Verschiebungen wurden die vertikalen Lagerverschiebungen anteilmässig davon subtrahiert (analog zu den kontinuierlichen Durchbiegungsmessungen, siehe Bild 4.1 (b)). Für die Laststufen 0 wurden jeweils die theoretischen Durchbiegungen unter Verwendung der berechneten

Biegesteifigkeiten EI_I und EI_{II} bestimmt, um die Unebenheiten der Unterseite der Versuchskörper zu korrigieren. Für die folgenden Laststufen wurden jeweils die gemessenen Differenzen zu dieser Referenzlaststufe addiert. Bei gemessenen Änderungen der Dicke der Versuchskörper wurden diese Differenzen von den Durchbiegungen subtrahiert.

Aus den Durchbiegungen w und den aus den kontinuierlichen Messungen bestimmten Zylinderkräften Q , P und T wurden für alle Laststufen die auf die Versuchskörper wirkenden Normalkräfte N , Querkräfte V und Biegemomente M berechnet.

4.1.4 Auswertung der Risscharakteristika

Aus den protokollierten Relativkoordinaten wurden in einem ersten Schritt Koordinaten entlang der Versuchskörperachse berechnet. Aus den x -Werten der Kantenpunkte folgten die Rissabstände s_R , welche anschliessend für jede Laststufe statistisch ausgewertet wurden (Mittelwert, Standardabweichung, Maximum und Minimum). Ebenfalls statistisch ausgewertet wurden die Rissbreiten t_R (Mittelwert, Standardabweichung und Maximum), wobei für Haarrisse eine Rissbreite von 0.025 mm eingesetzt wurde. Geschlossene Risse wurden für diese Auswertung als nicht existent betrachtet.

Aus den Rissbreiten und Rissabständen wurden die Rissintensität i_R und daraus eine mittlere Rissintensität i_R^* wie folgt bestimmt:

$$i_R = \frac{t_R}{s_R} \quad (4.1)$$

$$i_{R,j}^* = \frac{i_{R,j-1} + 2i_{R,j} + i_{R,j+1}}{4} \quad (4.2)$$

Für die Darstellung der schematischen Rissbilder wurden die Koordinaten auf die manuell gemessene Biegelinie transformiert.

4.1.5 Darstellung der Resultate

Im vorliegenden Bericht werden folgende Resultate dargestellt:

- Für jeden Versuch ist eine Zusammenfassung des Versuchsablaufs in tabellarischer Form vorhanden. Sie beinhaltet die aus den kontinuierlichen Messungen gewonnenen Resultate zu den Zeitpunkten Belastungsbeginn, Belastungsende und Messbeginn jeder Laststufe sowie beim Bruch (Tabellen 4.1, 4.3, 4.5, 4.7, 4.9, 4.11).
- Für jeden Versuch sind folgende Darstellungen der Resultate der kontinuierlichen Messungen vorhanden: Zeitverläufe der aufgebrachtten Kräfte T , Q und P sowie der Durchbiegung in Feldmitte w_2 und am Kragarmende w_C (Bilder 4.2, 4.13, 4.24, 4.35, 4.46, 4.57), Q - w -Diagramm, Q - V_0 -Diagramm, Q - M -Diagramm, Q - P -Diagramm, Q - u_A -Diagramm, M_B - $\varepsilon_{x,0}$ -Diagramm (Bilder 4.3, 4.4, 4.14, 4.15, 4.25, 4.26, 4.36, 4.37, 4.47, 4.48, 4.58, 4.59). Für T1 bis T5 zeigen die Q -Diagramme die Verläufe nach dem Aufbringen des Längszugs (ab LS2). Die Verläufe während des Aufbringens sind als T -Diagramme dargestellt.
- Für jeden Versuch sind folgende Darstellungen mit ausgewählten Laststufen der Resultate der Deformermessungen vorhanden: Durchbiegungen w (Bilder 4.5, 4.16, 4.27, 4.38, 4.49, 4.60), berechnete Schnittgrößen N , V und M (Bilder 4.6, 4.17, 4.28, 4.39, 4.50, 4.61), mittlere Längsdehnungen auf der Ober- und Unterseite der Versuchskörper ($\varepsilon_{x,\text{sup}}$ und $\varepsilon_{x,\text{inf}}$) sowie die daraus berechneten Längsdehnungen in der Schwerachse $\varepsilon_{x,0}$ und Krümmungen χ_y (Bilder 4.7, 4.18, 4.29, 4.40, 4.51, 4.62), mittlere Vertikaldehnungen ε_z , mittlere Schiebungen γ_{xz} , berechnete mittlere Längsdehnungen in der Schwerachse $\varepsilon_{x,0}$ und Hauptdehnungen ε_1 im Bereich der seitlichen Deformermessungen (Bilder 4.8, 4.19, 4.30, 4.41, 4.52, 4.63).
- Für jeden Versuch sind zudem für ausgewählte Laststufen schematische Rissbilder und die mittleren Rissintensitäten dargestellt (Bilder 4.9, 4.20, 4.31, 4.42, 4.53, 4.64).
- Die Rissbreiten und Rissabstände für ausgewählte Laststufen (Tabellen 4.2, 4.4, 4.6, 4.8, 4.10, 4.12).
- Fotografische Aufnahmen: Gesamter Versuchskörper nach dem Bruch oder bei maximaler Verformung (Bilder 4.10, 4.21, 4.32, 4.43, 4.54, 4.65), Hauptbruchzone (Abschnitt 3 - B, ausgenommen T0: B - C) nach dem Bruch bzw. bei maximaler Verformung (Bilder 4.11, 4.22, 4.33, 4.44, 4.55, 4.66) und ausgewählte Detailaufnahmen (Bilder 4.12, 4.23, 4.34, 4.45, 4.56, 4.67).

4.1.6 Archivierung der Messdaten und Auswertungen

Auf der beigelegten Daten-CD wurden für jeden Versuchskörper folgende Resultate gespeichert:

- Sämtliche Resultate der kontinuierlichen Messungen, sowie ausgewählte, daraus berechnete, Größen für den gesamten Versuchsablauf. In den Bereichen zwischen den Be- bzw. Entlastungsstufen wurde die Datenmenge durch Mittelwertbildung reduziert (entspricht einer Reduktion der Messfrequenz).
- Rohdaten der Deformermessungen für sämtliche Laststufen
- Messwerte der Deformermessungen nach dem Fehlerausgleich sowie die daraus berechneten Dehnungen, Krümmungen und Schiebungen für sämtliche Laststufen.
- Aus den Stabdeformermessungen berechnete Durchbiegungen für sämtliche Laststufen.
- Rissbreiten und -positionen für alle Laststufen bis zum Bruch
- Ausgewählte Fotos.
- Filmsequenz(en) des Bruchs.

4.2 Generelle Bemerkungen

Bei sämtlichen Versuchen wurde an den Enden der Versuchskörper beidseitig eine Linie in x -Richtung vom Versuchskörper über die Abschaltplatte bis auf die Anschlussplatte aufgezeichnet. Nach jeder Laststufe wurden die Endanschlüsse mittels dieser Linie auf Relativverschiebungen und Spaltöffnungen zwischen den einzelnen Komponenten untersucht. Es wurde nie eine Relativverschiebung oder eine Spaltöffnung festgestellt.

Die Horizontalverschiebungen in x -Richtung der Reaktionsstrukturen für die Längszugkraft waren bei allen Versuchen kleiner als 1.6 mm.

Die Querverschiebungen wurden gemessen, um auf eine allfällige übermäßige horizontale Krümmung der Versuchskörper infolge der Längskraft reagieren zu können. Da die Querverschiebungen bis und mit der ersten Laststufe mit Querbelastung weniger als 2 mm betrugen, war ein Eingreifen nicht notwendig.

Die aufgezeichneten Werte für F17 sind generell zu tief. Die Ursache war ein Messkabel, welches das Signal dämpfte. Da es bei der Überprüfung nach den Versuchen beschädigt wurde, konnte der genaue Wert der Dämpfung nicht mehr gemessen werden. Der Messwert des Drucks im T -Zylinder p_{zz} wurde jedoch während der Versuche am Computer angezeigt und jedes Mal bei Erreichen der gewünschten Längszugkraft mit dem an das Konstantdruck-Aggregat angeschlossenen, unabhängigen Manometer verifiziert.

4.3 Versuch T0

Der Versuchs T0 war als Tastversuch und Vergleichsversuch zu T1 und T2 konzipiert. Er sollte das Tragverhalten ohne Zugkraft aufzeigen und gleichzeitig zur Überprüfung der Versuchsabläufe und der Optimierung der Versuchseinrichtung dienen.

4.3.1 Versuchsablauf

Der vorbereitete Versuchskörper wurde am 29. Februar 2012 in die Versuchsanlage eingebaut und temporär unterstützt. Anschliessend wurden die hydraulischen Systeme fertiggestellt und die Messeinrichtung installiert. Am 23. März musste der erste Versuch kurz nach Versuchsbeginn abgebrochen werden, weil der Hydraulikzylinder F24 schon bei $Q < 5$ kN stark Öl verlor. Der Versuchskörper wurde entlastet und erneut temporär unterstützt. Der beschädigte Hydraulikzylinder wurde ersetzt.

Am Nachmittag des 27. März wurden die temporären Halterungen und Unterstützungen entfernt und die erste manuelle Nullmessung durchgeführt. Am 28. März, dem ersten Versuchstag, wurde zuerst die zweite manuelle Nullmessung durchgeführt. Um 10:45 Uhr wurde die kontinuierliche Messung gestartet und nach dem Nullstellen aller Kanäle mit dem Aufbringen der Querbewegungen P und Q begonnen. Bei $Q = 25$ kN war die erste Laststufe erreicht, und es wurde eine vollständige Messung durchgeführt. Beim anschliessenden Kontrollrundgang wurde festgestellt, dass drei der sechs Q -Zylinder leicht leckten. Dies führte nicht nur zu einem Abfall der Belastung während der Messung, sondern auch zu einer Reduktion der Verformungen. Als Massnahme wurde während des restlichen Versuchsverlaufs während der Laststufen periodisch nachgepumpt, um die Verformungsreduktion in Grenzen zu halten. Während der Steigerung der Belastung zu Laststufe LS4 wurde ein Abfallen des Widerstands beim Betätigen der P -Handpumpe festgestellt und die Absperrventile zu den P -Zylindern geschlossen, um die Kolbenposition dieser Zylinder zu fixieren. Fortan wurde nur noch Q gesteigert. Wenig später fiel der Öldruck in beiden Hydrauliksystemen deutlich, worauf das Pumpen gestoppt und eine vollständige Messung durchgeführt wurde. Weil zum Zeitpunkt des plötzlichen Lastabfalls noch nicht alle Ventile im P -Hydrauliksystem vollständig geschlossen waren, nahm die Durchbiegung w_C während des Lastabfalls nochmals zu. Gegen 23:30 Uhr war die Dokumentation abgeschlossen. Der Versuchskörper blieb über Nacht belastet.

Der 29. März wurde darauf verwendet, den Ölverlust in den Q -Zylindern zu untersuchen. Dazu wurden die Belastungen Q und P soweit gesteigert, dass der Verformungszustand nach dem Lastabfall am Vortag wiederhergestellt werden konnte. Der Versuchskörper blieb über Nacht belastet.

Am 30. März um 09:00 Uhr wurden die Belastungen Q und P nochmals auf die Werte nach dem Lastabfall gesteigert. Anschliessend wurde die Belastung weiter gesteigert, bis bei einer Durchbiegung w_2 von 200 mm eine Laststufe mit vollständiger Messung eingelegt wurde. Anschliessend wurde die Belastung bis zu einem erneuten Lastabfall weiter gesteigert, worauf eine vollständige Messung vorgenommen wurde (LS6). Die Belastung wurde nochmals gesteigert, bis die Durchbiegung w_2 300 mm erreichte, und um 17:00 Uhr eine letzte Messung durchgeführt.

Ab LS5 konnten mit dem vorhandenen Stabdeformometer die Durchbiegungen in Feldmitte nicht mehr gemessen werden. Dieser Bereich wurde mit zunehmenden Durchbiegungen immer grösser. Ebenso konnten aufgrund der grossen Dehnungen ab dieser Laststufe die Deformometermessungen auf der Oberseite des Versuchskörpers unmittelbar C-seitig des Zwischenauflegers B nicht mehr durchgeführt werden. Ab LS6 konnten an gleicher Stelle auch an der Unterseite des Versuchskörpers aufgrund von Betonabplatzungen keine Deformometermessungen mehr durchgeführt werden.

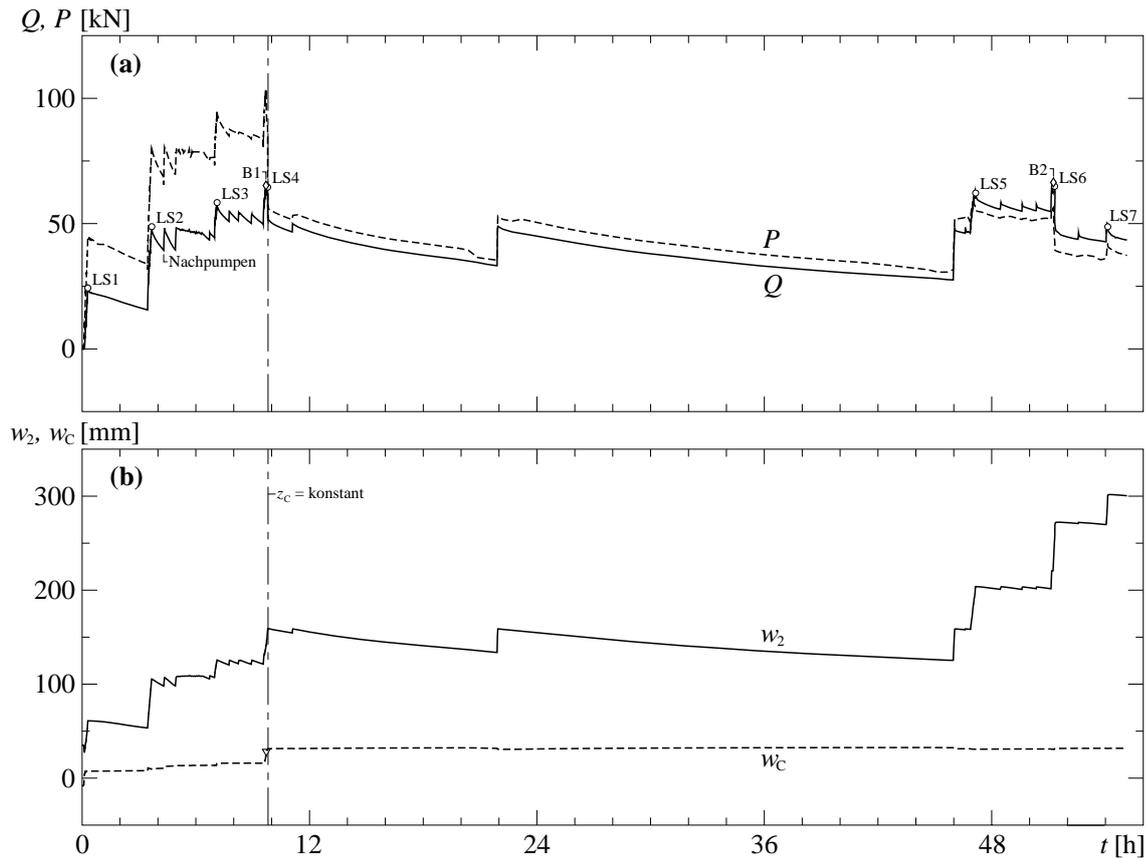


Bild 4.2 Ablauf des Versuchs T0: (a) Zeitverlauf der aufgebrachten Lasten Q und P ; (b) Zeitverlauf der Durchbiegungen w_2 und w_c . Rauten mit Zahlen markieren den Bruchbeginn.

4.3.2 Beobachtungen

Kurz nach dem Schliessen der ersten Ventile im P -Hydrauliksystem brach der Versuchskörper C-seitig von Zwischenaufleger B mit einem dumpfen Geräusch. Die kontinuierlichen Messungen zeigen, dass der Bruch schon kurz vor dem Schliessen begann (Ereignis B1 in Bild 4.2). In einer ersten Phase nahm die Verformung bei leicht abfallender Belastung zu. In einer zweiten Phase fiel die Belastung schlagartig um 20 % ab. Der zweite Bruch (Ereignis B2), bei dem die Biegedruckzone A-seitig von Joch 2 versagte (siehe Bild 4.12(c)), zeigte dasselbe Verhalten.

Bei Versuchsbeginn waren Risse unten im Feld und oben über dem Zwischenaufleger vorhanden. Diese Risse standen senkrecht zur Versuchskörperachse. Durch die Querbelastung verlängerten sich diese Risse, die Rissbreiten wurden grösser, und es entstanden neue Risse. Ab Laststufe LS2 / Q50 bildeten sich im Bereich 3 - B mit zunehmender Belastung von oben schräge, gegen B abfallende Risse aus. Die Neigung dieser Risse gegenüber der Versuchskörperlängsachse variierte von 55° beim Zwischenaufleger B zu 21° auf halber Strecke zwischen den Achsen B und 3. Beim Bruch bildeten sich ausgehend von der Biegedruckbruchzone C-seitig neben dem Zwischenaufleger B flach gegen C ansteigende Risse (Neigung zwischen 22° und 25° , Rissöffnung bis 5 mm nach dem Bruch und bis 10 mm bei maximaler Verformung) sowie horizontale, den Bewehrungslagen folgende Risse (Rissöffnung bis 7 mm nach dem Bruch und bis 30 mm bei maximaler Verformung). Bei der weiteren Belastung vergrösserten sich die Risse, aber das Rissbild veränderte sich nicht mehr wesentlich, siehe Bild 4.12(a) und (b).

4.3.3 Versuchsergebnisse

Tabelle 4.1 gibt eine Übersicht über die Belastungs- und Verformungsgeschichte des Versuchs T0. Die folgenden Bilder und Tabelle 4.2 zeigen Auswertungen der kontinuierlichen Messungen, der Deformermessungen und der Rissaufnahmen.

LS	Bezeichnung	Lasten			Verschiebungen			Schnittgrößen			Zeit	
		T [MN]	Q [kN]	P [kN]	u_A [mm]	w_2 [mm]	w_C [mm]	$V_{B,0}^-$ [kN]	$V_{B,0}^+$ [kN]	M_B [kNm]	t [s]	t [h:min]
0	Versuchsbeginn	0	0.0	0.0	0.0	35	-8	-17	12	-15	0	0:00
1	Belastungsbeginn	0	0.0	0.0	0.0	35	-8	-17	12	-15	183	0:03
	Q25 Belastungsende	0	24.4	44.4	0.0	61	7	-64	57	-90	1096	0:18
2	Belastungsbeginn	0	15.6	33.6	0.0	53	8	-48	46	-72	12422	3:27
	Q50 Belastungsende	0	48.8	80.0	-0.7	105	10	-109	92	-150	13234	3:41
3	Belastungsbeginn	0	44.5	76.4	-1.1	107	14	-102	89	-144	25140	6:59
	Q60 Belastungsende	0	58.5	94.3	-1.7	126	16	-127	107	-175	25637	7:07
4	Belastungsbeginn	0	49.8	83.3	-1.8	121	16	-111	95	-156	34408	9:33
	Bruch Bruch Phase 1	0	64.4	102.7	-2.9	142	27	-138	115	-189	34977	9:43
	Bruch Phase 2	0	64.6	88.1	-4.0	157	30	-135	100	-164	35245	9:47
	Belastungsende	0	53.1	56.4	-4.8	159	31	-110	69	-110	35315	9:49
5	Belastungsbeginn	0	46.6	52.6	-5.3	159	31	-99	65	-104	168280	46:45
	Belastungsende	0	62.2	55.5	-9.2	204	31	-123	68	-109	169750	47:09
6	Belastungsbeginn	0	54.8	51.7	-9.4	202	31	-111	64	-103	184064	51:08
	Bruch Bruch Phase 1	0	66.7	56.4	-12.4	230	31	-130	69	-110	184536	51:16
	Bruch Phase 2	0	64.4	42.5	-16.1	258	31	-123	55	-87	184790	51:20
	Bruchende	0	49.5	39.4	-17.4	270	32	-100	52	-82	184812	51:20
7	Belastungsbeginn	0	42.7	36.1	-17.7	270	32	-90	48	-76	194538	54:02
	Belastungsende	0	48.8	41.4	-22.2	301	32	-100	54	-85	194852	54:08
	Versuchsende	0	43.5	37.3	-22.3	301	32	-91	49	-78	198497	55:08

Tabelle 4.1 Ablauf des Versuchs T0.

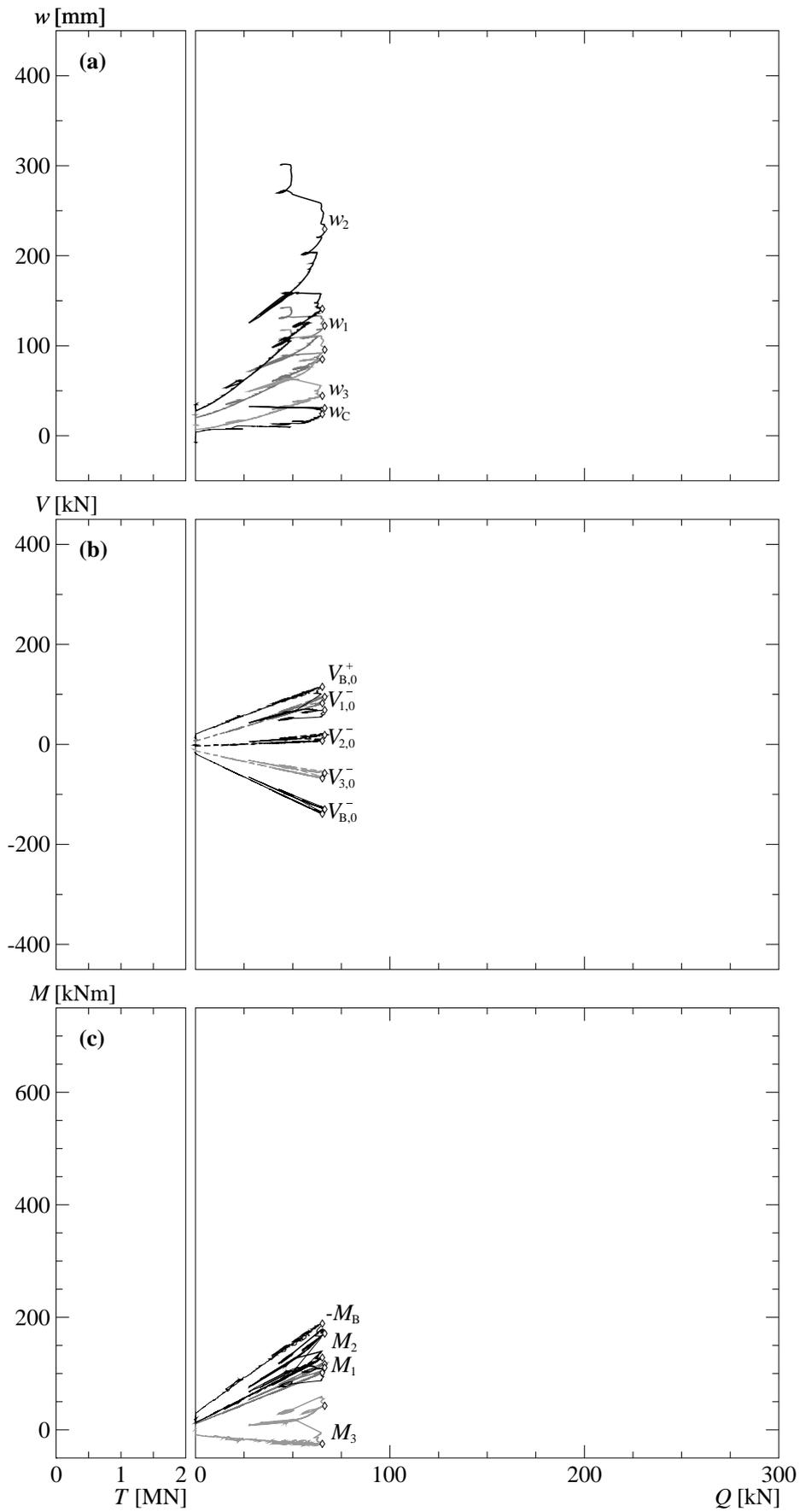


Bild 4.3 Resultate der ständigen Messungen des Versuchs T0:
 (a) Durchbiegungen; (b) Querkräfte; (c) Momente.

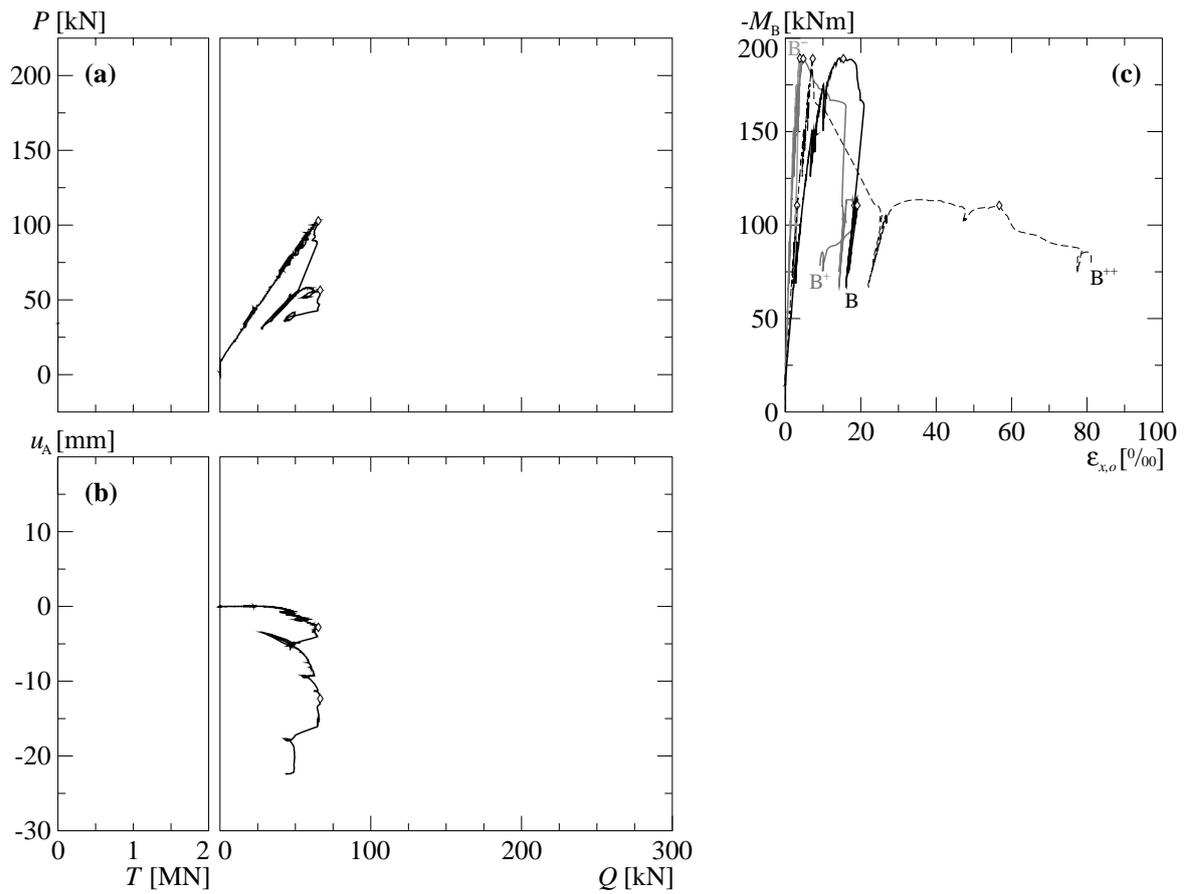


Bild 4.4 Resultate der ständigen Messungen des Versuchs T0: (a) Verhältnis P zu Q ; (b) Verschiebung des Lagers A; (c) Dehnungen an der Plattenoberseite in Längsrichtung über dem Zwischenaufleger B.

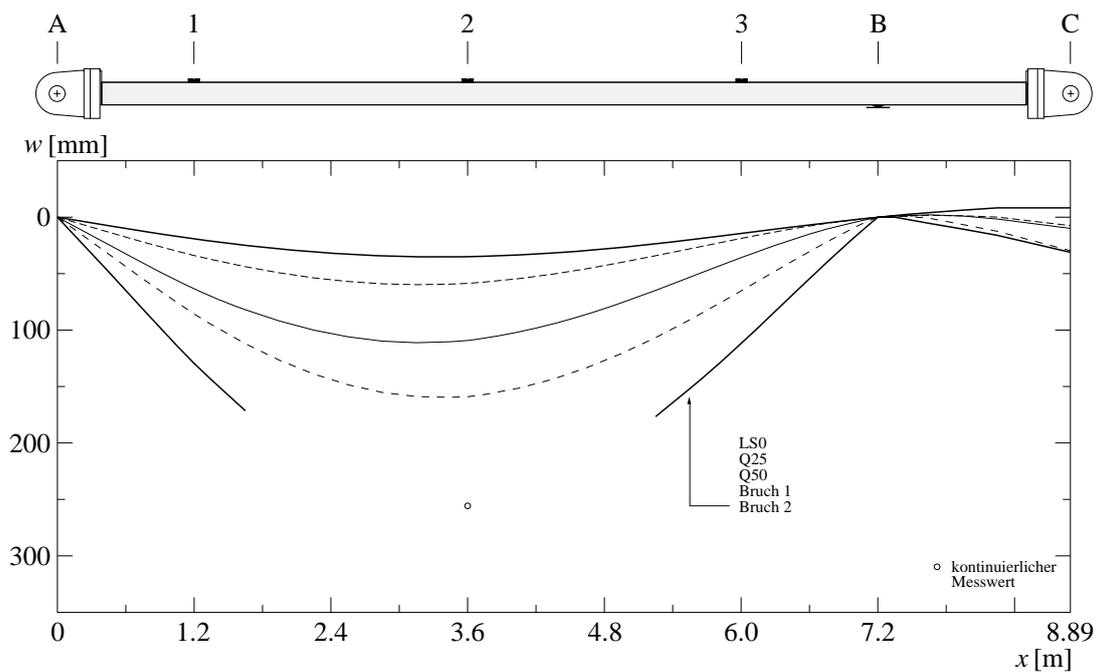


Bild 4.5 T0: Durchbiegungen

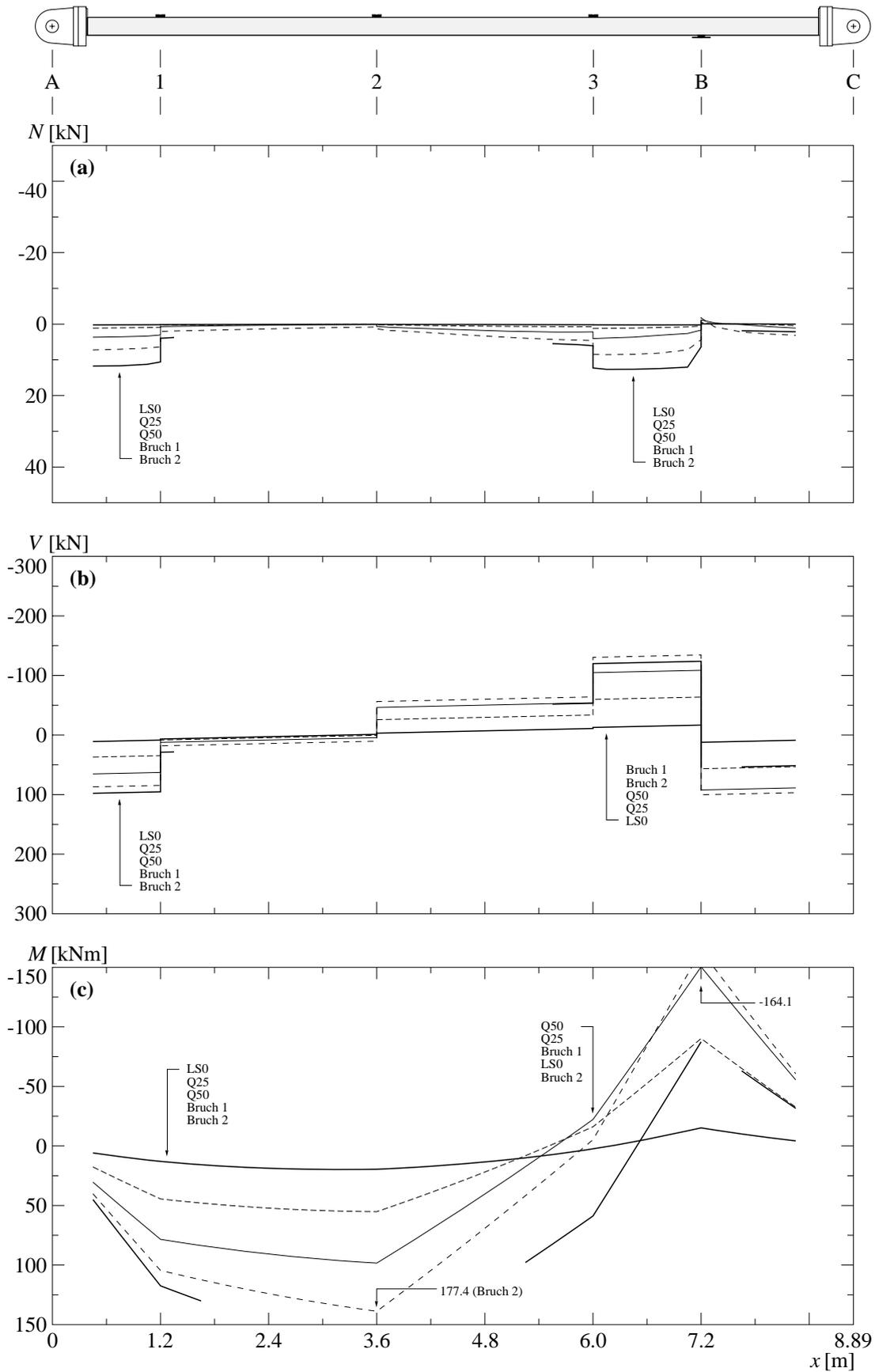


Bild 4.6 T0: (a) berechnete Normalkräfte; (b) berechnete Querkräfte; (c) berechnete Biegemomente.

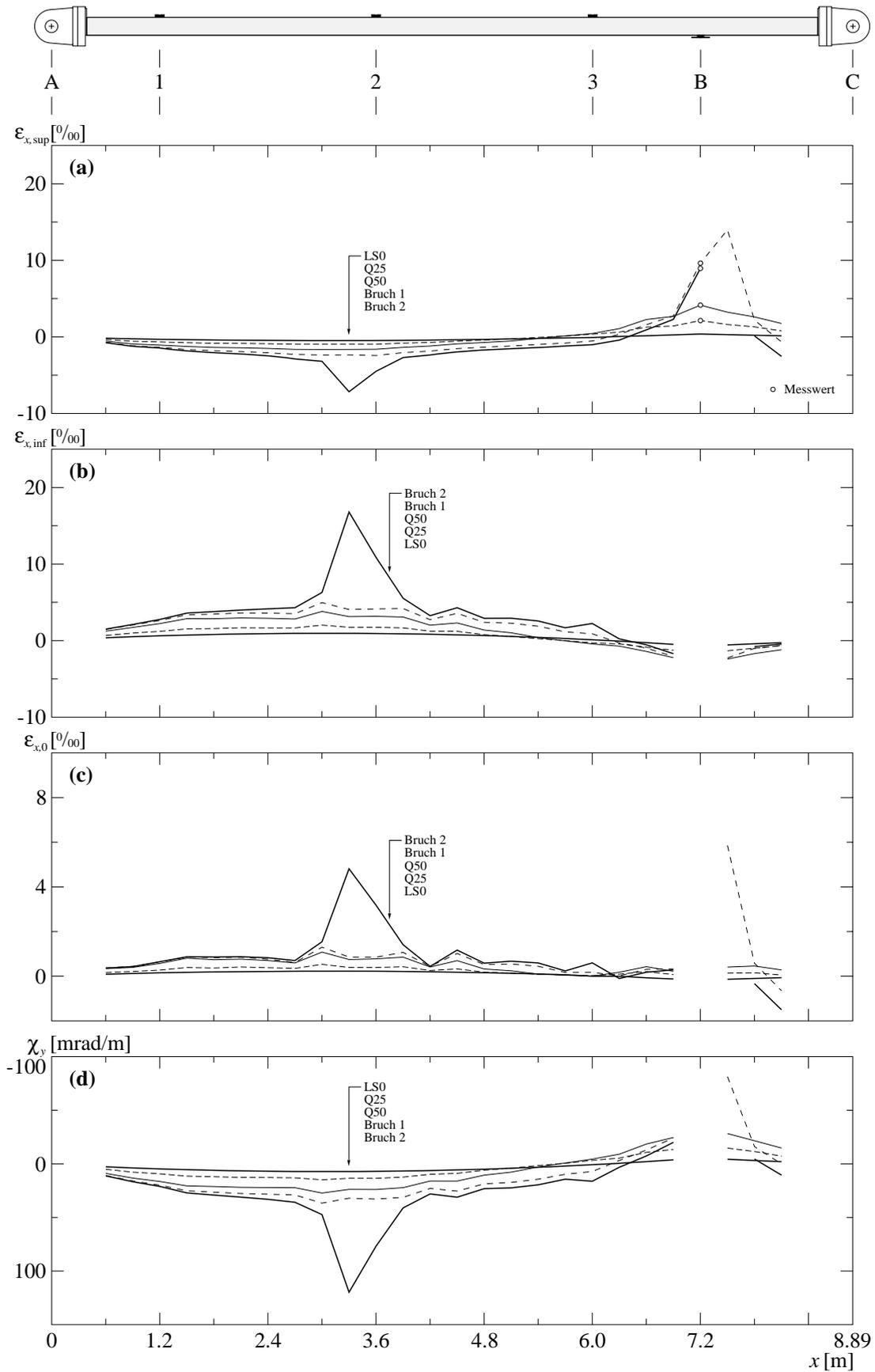


Bild 4.7 T0: (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Längsdehnungen unten; (c) berechnete Längsdehnungen der Schwerachse; (d) berechnete Krümmungen.

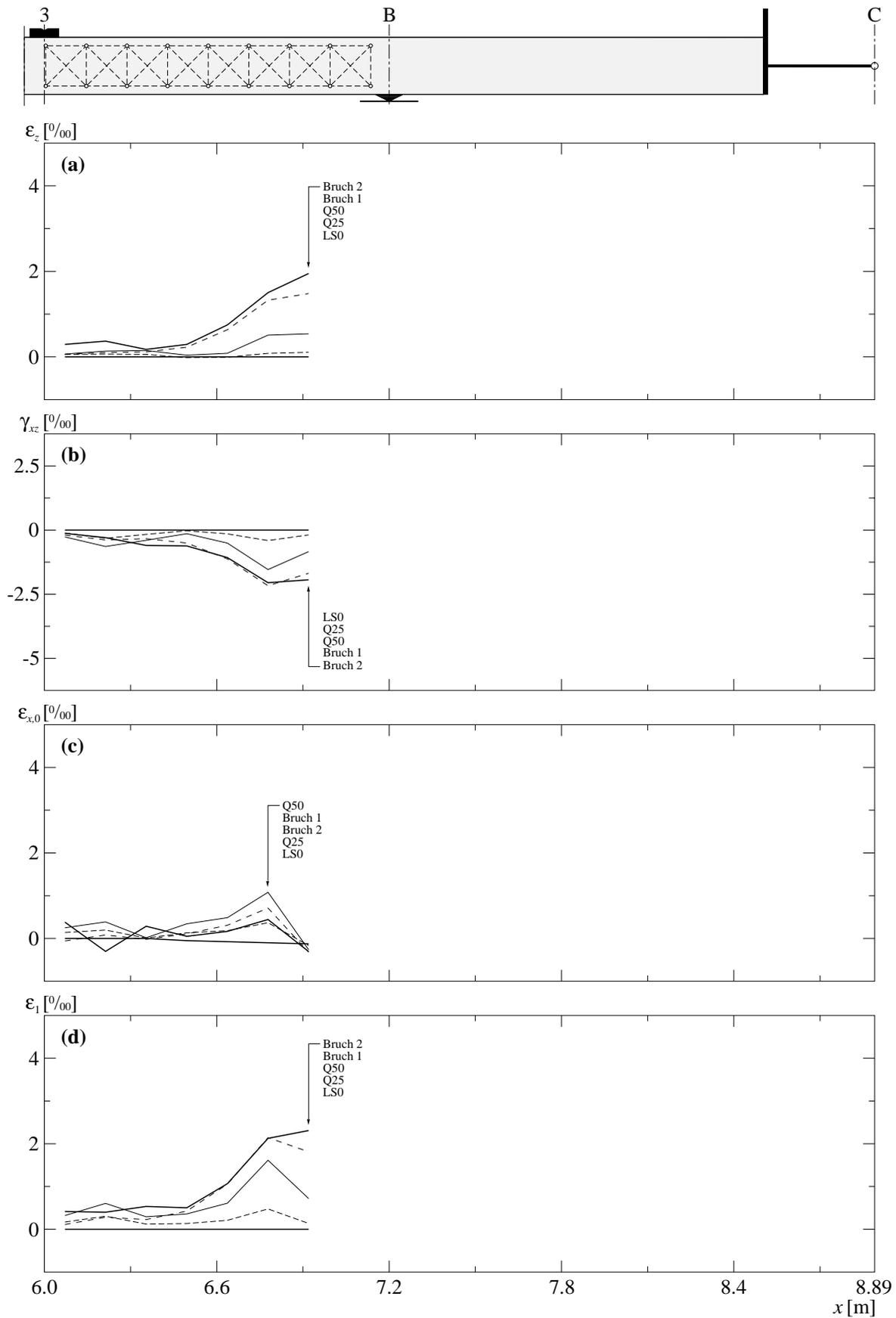


Bild 4.8 T0: (a) Mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (b) mittlere Schiebungen seitlich; (c) mittlere Längsdehnungen seitlich; (d) berechnete Hauptdehnungen seitlich.

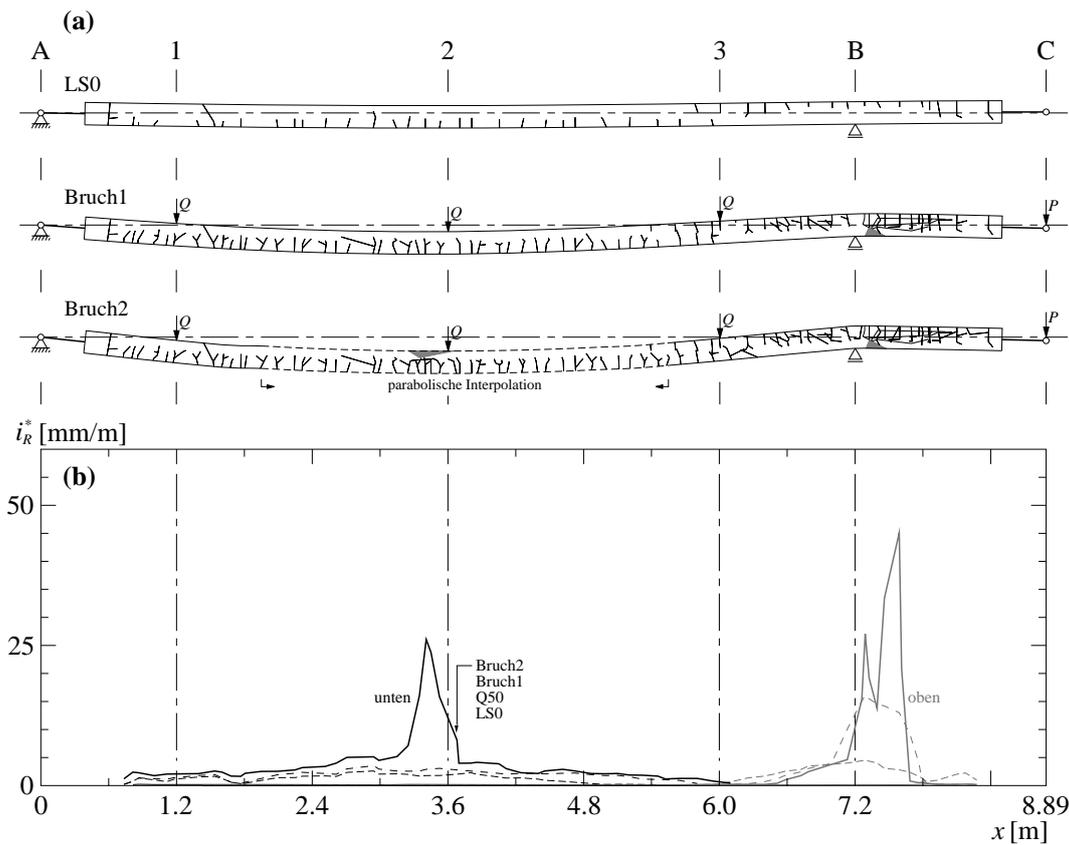


Bild 4.9 Risse bei Versuch T0: (a) Rissbilder ausgewählter Laststufen; (b) mittlere Rissintensität.

LS	Seite	Anzahl ¹⁾	Rissbreite			Rissabstand			
			t_R [mm]	$\sigma(t_R)$ [mm]	$t_{R,max}$ [mm]	S_R [mm]	$\sigma(S_R)$ [mm]	$S_{R,min}$ [mm]	$S_{R,max}$ [mm]
0	oben	18	Haarrisse	-	< 0.05	173	58	68	278
	unten	31	Haarrisse	-	< 0.05	178	66	52	326
1 Q25	oben	27	0.12	0.10	0.35	124	45	45	214
	unten	40	0.07	0.07	0.30	137	64	38	297
2 Q50	oben	28	0.22	0.19	0.70	119	43	45	214
	unten	44	0.17	0.12	0.50	124	57	38	297
4 Bruch 1	oben	30	0.37	0.60	2.50	110	49	23	214
	unten	46	0.22	0.13	0.60	119	47	38	237
6 Bruch 2	oben	32	0.43	1.10	6.00	103	52	21	214
	unten	51	0.40	0.43	2.50	115	50	17	237

Tabelle 4.2 T0: Risscharakteristika für ausgewählte Laststufen.
¹⁾ Rissabstandswerte basierend auf (Anzahl-2) Rissen.

4.3.4 Bilder



Bild 4.10 Versuchskörper T0 nach dem zweiten Bruch (LS6).

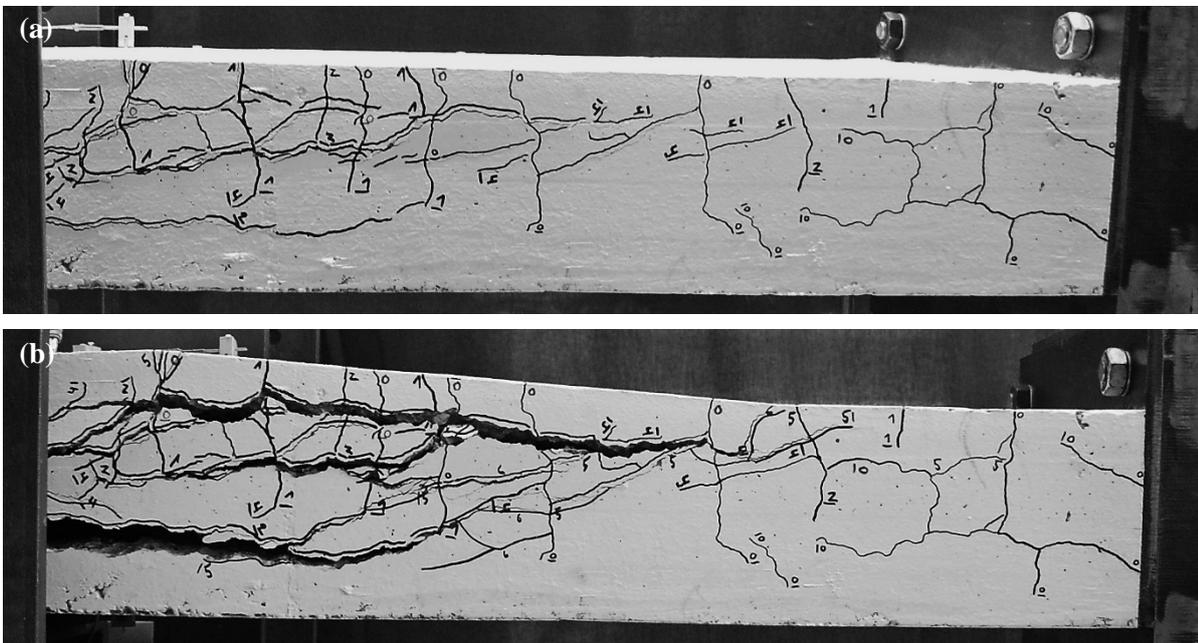


Bild 4.11 Bruchzone des Versuchskörpers T0 C-seitig des Zwischenauflagers B: (a) unmittelbar nach dem Bruch (LS4); (b) nach dem Bruch bei Joch 2 (LS6).

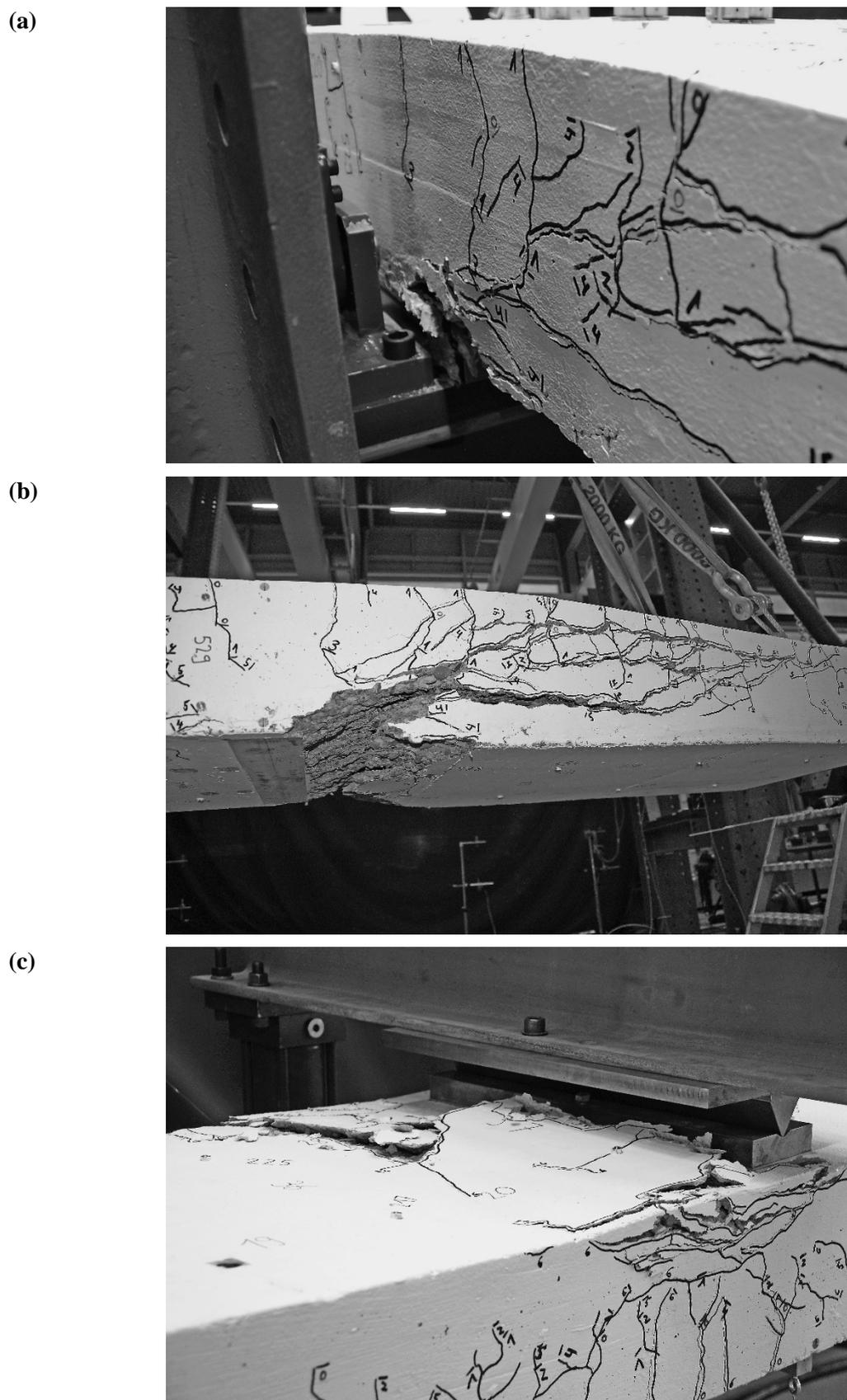


Bild 4.12 Bruchzonen des Versuchskörpers T0; (a) bei Zwischenaufleger B, LS4; (b) bei Zwischenaufleger B, nach dem Ausbau; (c) bei Joch 2, LS7.

4.4 Versuch T1

Der Versuch T1 war als Basisversuch konzipiert, der den Einfluss einer hohen Zugkraft auf das Trag- und Verformungsverhalten aufzeigen sollte. Die Zugkraft von $T = 1\,911$ kN wurde so ausgelegt, dass sie eine Spannung von 300 MPa in der Bewehrung bewirkte. Der Versuch T1 sollte ausserdem zur Überprüfung der Veränderungen an Versuchsanlage und -ablauf infolge der Erkenntnisse aus dem Versuch T0 dienen.

4.4.1 Versuchsablauf

Der vorbereitete Versuchskörper wurde am 4. April 2012 in die Versuchsanlage eingebaut und temporär unterstützt. Anschliessend musste die Reparatur der Q -Hydraulikzylinder abgewartet werden, bevor am 18. April der erste Versuch begonnen werden konnte. Es wurden die ersten beiden Nullmessungen durchgeführt, die Zugkraft gesteigert und eine vollständige Messung durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass sich das Öl im T -Hydrauliksystem bei der eingestellten Zugkraft so stark erwärmte, dass das Konstantdruck-Aggregat den Druck nicht mehr aufrecht zu halten vermochte. Der Versuch wurde deshalb abgebrochen, die Zugkraft wieder abgelassen und das Konstantdruck-Aggregat anschliessend ersetzt.

Am 19. und 20. April wurde je ein Vorversuch gefahren. Dabei wurden jeweils die Zugkraft und die erste Stufe der Querbelastung $Q = 25$ kN aufgebracht und der Versuchskörper anschliessend wieder entlastet und temporär unterstützt. Die Vorversuche zeigten, dass das neue Konstantdruck-Aggregat genügend Leistung erbrachte, die vorgenommenen Reparaturen an den Q -Zylindern jedoch nicht ausreichten. In der Folge wurden bei den Jochen 1 und 3 kleinere Zylinder eingesetzt. Diese Zylinder hatten identische wirksame Kolbenflächen, aber einen kürzeren Hub von 200 mm.

Am Versuchstag, dem 27. April, wurde um 08:45 Uhr die kontinuierliche Messung gestartet und nach dem Nullstellen der Kraft und Druck-Kanäle mit dem Aufbringen der Längszugkraft begonnen. Bei $T = 1.91$ MN (LS1 / T300) wurde eine vollständige Messung durchgeführt. Nach der Nachjustierung der Längszugkraft wurden die Querbelastungen P und Q stufenweise gesteigert, bis bei $Q = 64$ kN die Absperrventile zu den P -Zylindern geschlossen und damit die Kolbenposition dieser Zylinder fixiert wurde (Linie "z_c gesteuert" in Bild 4.13). Anschliessend wurde Q bis zur nächsten Laststufe weiter gesteigert (LS5 / Q75). Beim Kontrollrundgang vor dem nächsten Belastungsbeginn wurde festgestellt, dass die temporäre Aufhängung des Pendelstabs deformiert war (siehe Bild 4.23(a)) – es wurde offensichtlich vergessen, diese vor Versuchsbeginn zu lösen. Nachdem die Verformung aufgenommen worden war, wurde die Aufhängung gelöst (Ereignis 1 in Bild 4.13), was eine Reduktion von $\Delta P = 21$ kN bewirkte, und P auf den Sollwert von LS4 gesteigert. Dieser Fehler wurde erst bei der Belastung auf LS7 / Q125 bemerkt, und darum anschliessend bei jener Laststufe nach der Steigerung der Querbelastung Q auch P nochmals gesteigert. Kurz vor dem Erreichen der nächsten Laststufe Q150 fiel die Belastung Q markant ab, worauf eine vollständige Messung durchgeführt wurde (LS8). Für einen Einblick in das Nachbruchverhalten wurde die Querbelastung anschliessend nochmals über die Bruchbelastung hinaus gesteigert (LS9). Aufgrund der fortgeschrittenen Stunde wurde auf weitere Messungen und Belastungssteigerungen verzichtet und der Versuchskörper entlastet. Dazu wurde bei geschlossenen Q - und P -Zylindern die Zugkraft T abgelassen. Um 03:45 Uhr am 28. April wurden die Arbeiten beendet.

Ab LS8 konnten mit dem vorhandenen Stabdeformeter die Durchbiegungen in Feldmitte nicht mehr gemessen werden. Dieser Bereich wurde mit zunehmenden Durchbiegungen immer grösser. Ebenso konnten aufgrund von Betonabplatzungen ab dieser Laststufe die Deformermessungen auf der Unterseite des Versuchskörpers unmittelbar 3-seitig des Zwischenauflagers B nicht mehr erhoben werden. Zudem waren die Deformermessungen auf den Seitenflächen des Versuchskörpers für diese Laststufe nicht mehr durchführbar.

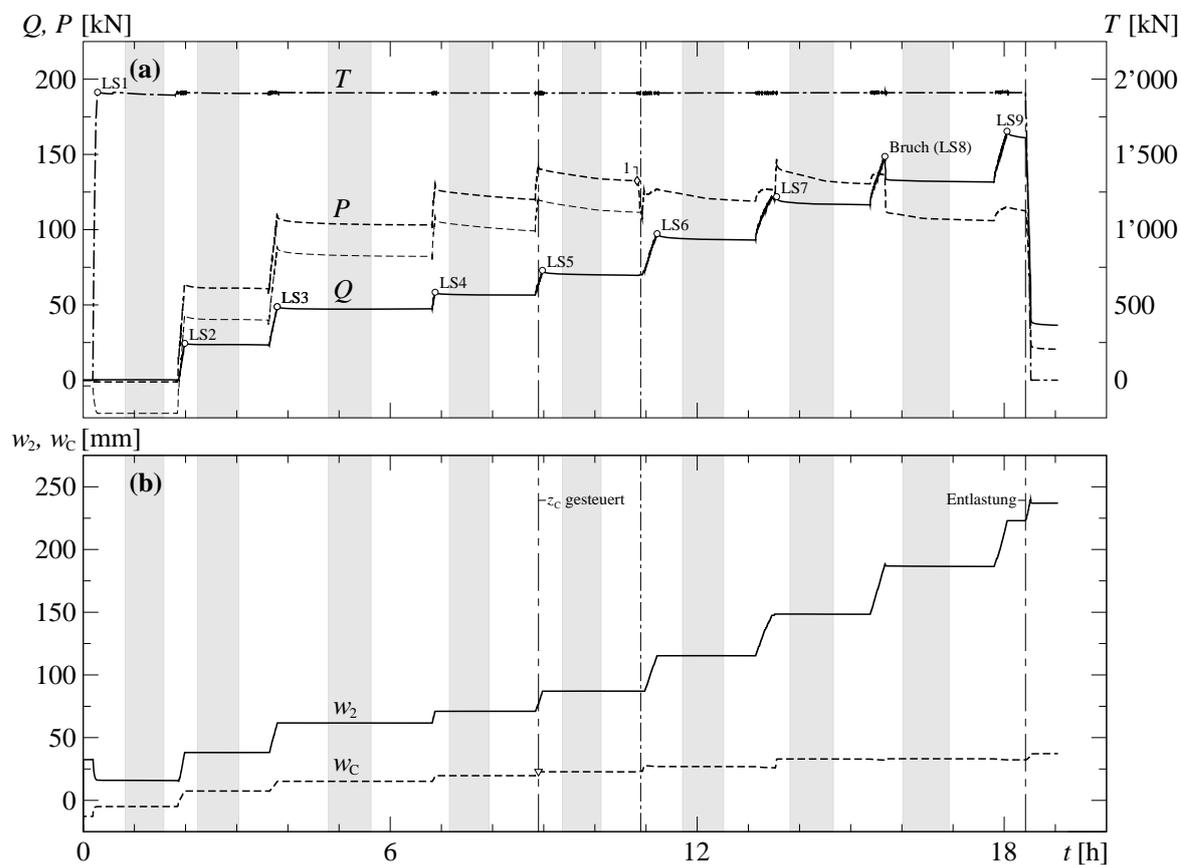


Bild 4.13 Ablauf des Versuchs T1: (a) Zeitverlauf der aufgetragenen Lasten T , Q und P ; (b) Zeitverlauf der Durchbiegungen w_2 und w_c . Graue Bereiche markieren die Messphasen. Rauten mit Zahlen markieren Ereignisse, welche im Text beschrieben sind.

4.4.2 Beobachtungen

Während der Dokumentation der Laststufe LS7 / Q125 wurde festgestellt, dass sich eine Biegedruckbruchzone C-seitig des Zwischenauflagers B ausgebildet hatte (Bild 4.23(b)). Die Querdehnungen zeigen, dass sich diese Biegedruckbruchzone spätestens bei einer Querbelastung von $Q = 122$ kN auszubilden begann. Nach Erreichen der Höchstlast $Q = 149$ kN fiel die Last leicht auf 145 kN, um sich wieder bis auf 147 kN zu steigern, bevor sie schlagartig und mit einem dumpfen Geräusch auf 142 kN fiel. Die Last reduzierte sich über die anschließende halbe Minute weiter auf 140 kN, um dann mit einem zweiten, lauterem dumpfen Geräusch schlagartig auf 134 kN zu fallen. Während des Ablassens der Zugkraft T beim Entlasten war ein kontinuierliches Knacken aus der Bruchzone zu hören. Bei $T = 260$ kN löste sich der untere Teil der Bruchzone schlagartig und fiel zu Boden (Bild 4.23(c)).

Bei Versuchsbeginn waren Risse unten im Feld und oben über dem Zwischenauflager vorhanden. Diese Risse standen senkrecht zur Versuchskörperachse. Durch das Aufbringen der Zugkraft entstanden Trennrisse in regelmässigem Abstand über die ganze Länge des Versuchskörpers. Durch die Querbelastung änderten sich die Rissbreiten, und einige Risse wurden so wieder geschlossen. Bis zur Laststufe LS5 / Q75 änderte sich das Rissbild nur geringfügig, und es entstanden nur vereinzelt neue Risse. Mit zunehmender Belastung bildeten sich im Bereich 3 - B schräge, gegen A ansteigende Risse aus. Beginn und Ende dieser Risse waren häufig in der Seitenfläche und erstreckten sich nicht bis an die Ober- bzw. Unterseite des Versuchskörpers. Kurz vor Erreichen der Höchstlast begann sich B-seitig des Jochs 3 ein flacher, gegen A ansteigender Riss auszubilden. Nach dem Erreichen der Höchstlast öffnete sich dieser Riss auf 1 - 2 mm. Anschliessend bildete sich parallel dazu ein neuer Riss, ca. 30 mm gegen B verschoben. Als dieser Riss sich über ca. einen Viertel der Versuchskörperdicke erstreckte, wuchs er schlagartig, und es öffnete sich weitere 50 mm gegen B ein dritter paralleler Riss. Nach diesem Bruch öffneten sich die Risse weiter, und es entstand 25 mm gegen B ein vierter paralleler Riss. Die oberen Rissenden wuchsen dabei parallel zur Mittelebene des Versuchskörpers. Als diese Schrägrisse sich bis zu 4 mm geöffnet hatten, entstanden in Versuchskörpermitte schlagartig Risse parallel zur Mittelebene des Versuchskörpers, sowie B-seitig zwei weitere Schrägrisse. Die Rissöffnung betrug nun bis zu 7.5 mm. Die mittlere Neigung dieser Risse betrug 15° , wobei sie im Bereich der Versuchskörperachse bei 18° lag (Bild 4.22).

4.4.3 Versuchsergebnisse

Tabelle 4.3 gibt eine Übersicht über die Belastungs- und Verformungsgeschichte des Versuchs T1. Die folgenden Bilder und Tabelle 4.4 zeigen Auswertungen der kontinuierlichen Messungen, der Deformetermessungen und der Rissaufnahmen.

Eine rechnerische Überprüfung der Aufhängung des Pendelstabes zeigte, dass das Querblech bereits beim Aufbringen der Zugkraft (LS1) ins Fliessen gekommen sein musste. Für die in den Diagrammen gezeigten Schnittgrössenverläufe wurde vereinfacht angenommen, dass sich die beim Ablassen der Aufhängung gemessene Differenz ΔP beim Aufbringen der Zugkraft proportional zu dieser aufbaute und anschliessend konstant blieb, siehe Bild 4.15(a). Die Differenz entspricht dem Anteil der gemessenen Kraft P , welche in die Aufhängung wanderte und damit den Versuchskörper nicht belastete. Die für die Auswertung verwendete Kraft P ist in Bild 4.13(a) als dünne, gestrichelte Linie dargestellt.

LS	Bezeichnung	Lasten			Verschiebungen			Schnittgrößen			Zeit	
		T [MN]	Q [kN]	P [kN]	u_A [mm]	w_2 [mm]	w_C [mm]	$V_{B,0}^-$ [kN]	$V_{B,0}^+$ [kN]	M_B [kNm]	t [s]	t [h:min]
0	Versuchsbeginn	0.00	0	0 ¹⁾	0.0	32	-13	-16	8	-9	0	0:00
1 T300	Belastungsbeginn	0.00	0	0 ¹⁾	0.0	32	-13	-16	8	-9	656	0:11
	Belastungsende	1.91	0	-1²⁾	11.5	16	-5	-15	-2	-1	1009	0:17
	Messbeginn	1.91	0	-1 ²⁾	11.6	16	-5	-15	-2	-1	2954	0:49
2 Q25	Belastungsbeginn	1.89	0	-1 ²⁾	11.6	16	-5	-15	-2	-1	6478	1:48
	Belastungsende	1.91	24	64²⁾	11.6	38	7	-60	51	-66	7140	1:59
	Messbeginn	1.91	24	62 ²⁾	11.6	38	7	-59	48	-62	8045	2:14
3 Q50	Belastungsbeginn	1.91	23	61 ²⁾	11.6	38	7	-58	48	-61	13010	3:37
	Belastungsende	1.91	49	109²⁾	11.4	61	15	-103	88	-115	13645	3:47
	Messbeginn	1.91	47	104 ²⁾	11.3	62	15	-100	83	-105	17251	4:48
4 Q60	Belastungsbeginn	1.91	47	103 ²⁾	11.4	62	15	-100	82	-104	24535	6:49
	Belastungsende	1.91	58	129²⁾	11.1	71	20	-120	103	-132	24760	6:53
	Messbeginn	1.91	57	125 ²⁾	11.1	71	20	-117	99	-124	25764	7:09
5 Q75	Belastungsbeginn	1.91	57	120 ²⁾	11.1	71	20	-115	94	-116	31797	8:50
	z_C gesteuert	1.91	64	142 ²⁾	11.0	77	23	-130	112	-140	32033	8:54
	Belastungsende	1.91	73	140²⁾	10.7	87	23	-143	110	-138	32306	8:58
	Messbeginn	1.91	71	137 ²⁾	10.7	87	23	-139	108	-133	33720	9:22
	Ablassen Aufhängung Pendelstab	1.91	70	133 ²⁾	10.7	87	23	-136	103	-125	38973	10:50
	Ende Ablassen	1.91	70	112	10.7	87	23	-137	102	-124	39223	10:54
6 Q100	Belastungsbeginn	1.91	70	111	10.7	87	23	-136	102	-124	39304	10:55
	Belastungsende	1.91	97	127	9.8	115	27	-179	113	-135	40379	11:13
	Messbeginn	1.91	94	124	9.8	115	27	-173	110	-130	42171	11:43
7 Q125	Belastungsbeginn	1.91	93	119	9.7	115	27	-171	106	-122	47309	13:08
	Belastungsende	1.91	122	147	8.4	148	33	-218	127	-147	48788	13:33
	Messbeginn	1.91	118	138	8.3	149	33	-210	118	-132	49729	13:49
8 Bruch	Belastungsbeginn	1.91	117	131	8.3	148	33	-206	111	-119	55370	15:23
	Höchstlast	1.91	149	136	6.1	188	32	-256	117	-131	56408	15:40
	Bruchende	1.92	134	113	5.8	187	33	-228	93	-88	56458	15:41
	Messbeginn	1.91	133	110	5.6	187	33	-225	89	-83	57670	16:01
9	Belastungsbeginn	1.91	132	106	5.6	186	33	-222	86	-77	64084	17:48
	Belastungsende	1.92	165	115	2.0	223	32	-275	95	-94	64999	18:03
10	Entlastungsbeginn	1.91	161	113	1.9	223	32	-268	93	-90	66302	18:25
	Entlastungsende	0.00	39	23	-11.7	237	37	-81	35	-54	66701	18:32
	Versuchsende	0.00	36	21	-12.3	237	37	-76	33	-50	68584	19:03

Tabelle 4.3 Ablauf des Versuchs T1.

¹⁾ Wert für die Berechnung der Schnittgrößen um 3.8 kN abgemindert

²⁾ Wert für die Berechnung der Schnittgrößen um 20.9 kN abgemindert

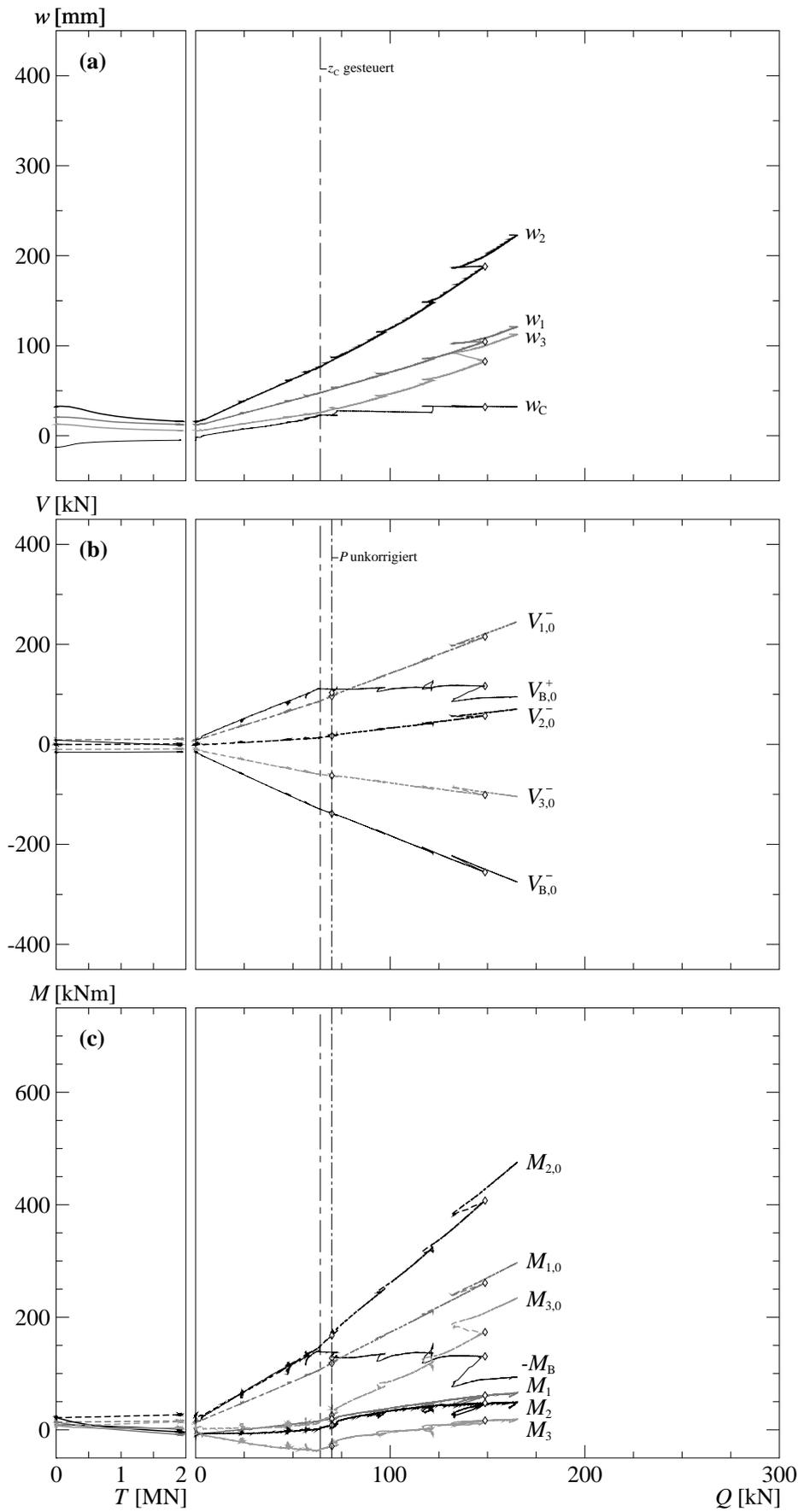


Bild 4.14 Resultate der ständigen Messungen des Versuchs T1:
 (a) Durchbiegungen; (b) Querkräfte; (c) Momente.

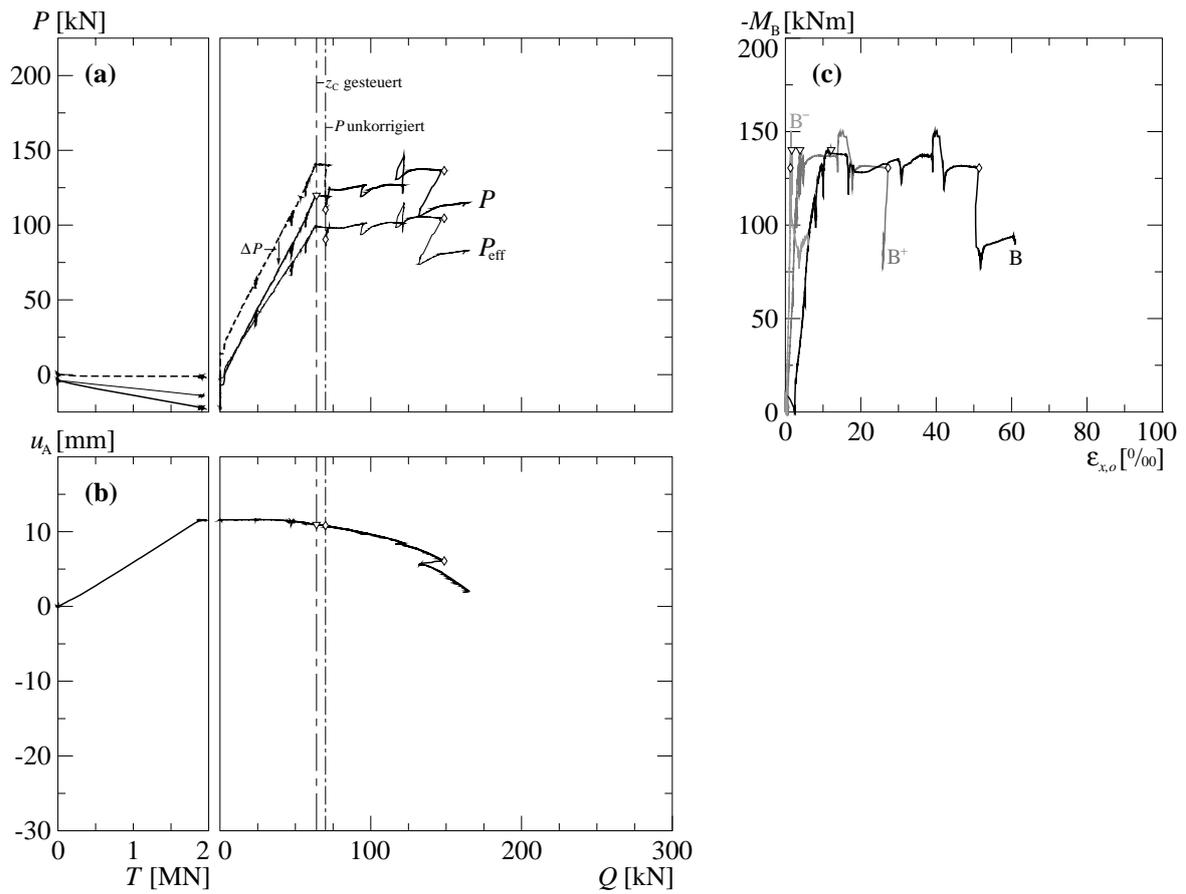


Bild 4.15 Resultate der ständigen Messungen des Versuchs T1: (a) Verhältnis P zu Q ; (b) Verschiebung des Lagers A; (c) Dehnungen an der Plattenoberseite in Längsrichtung über dem Zwischenauflager B.

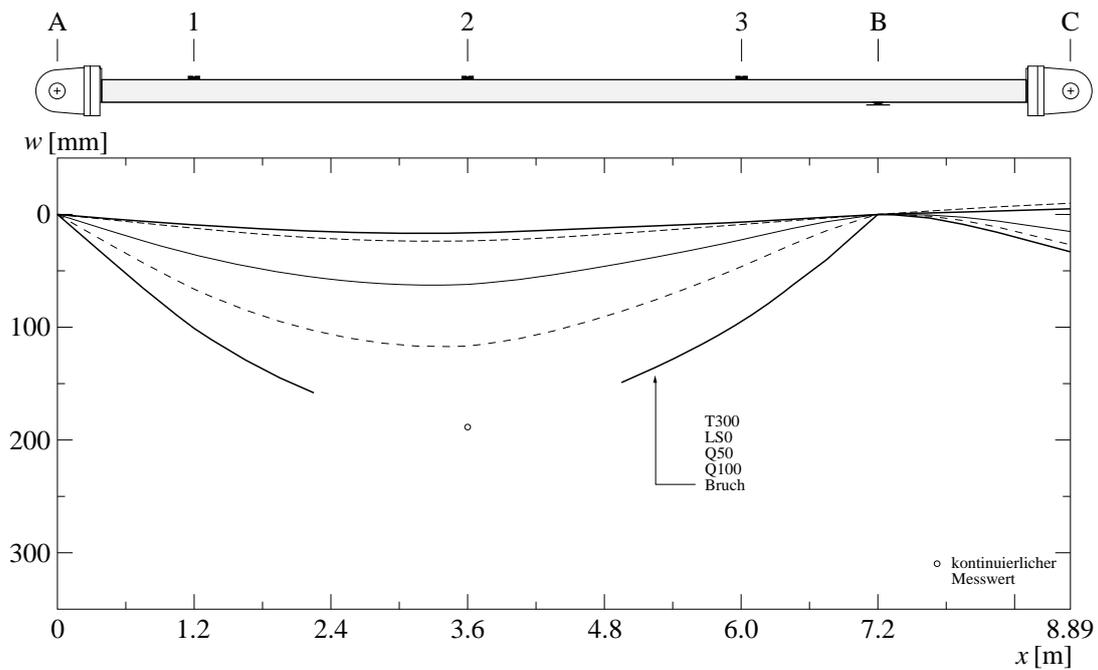


Bild 4.16 T1: Durchbiegungen

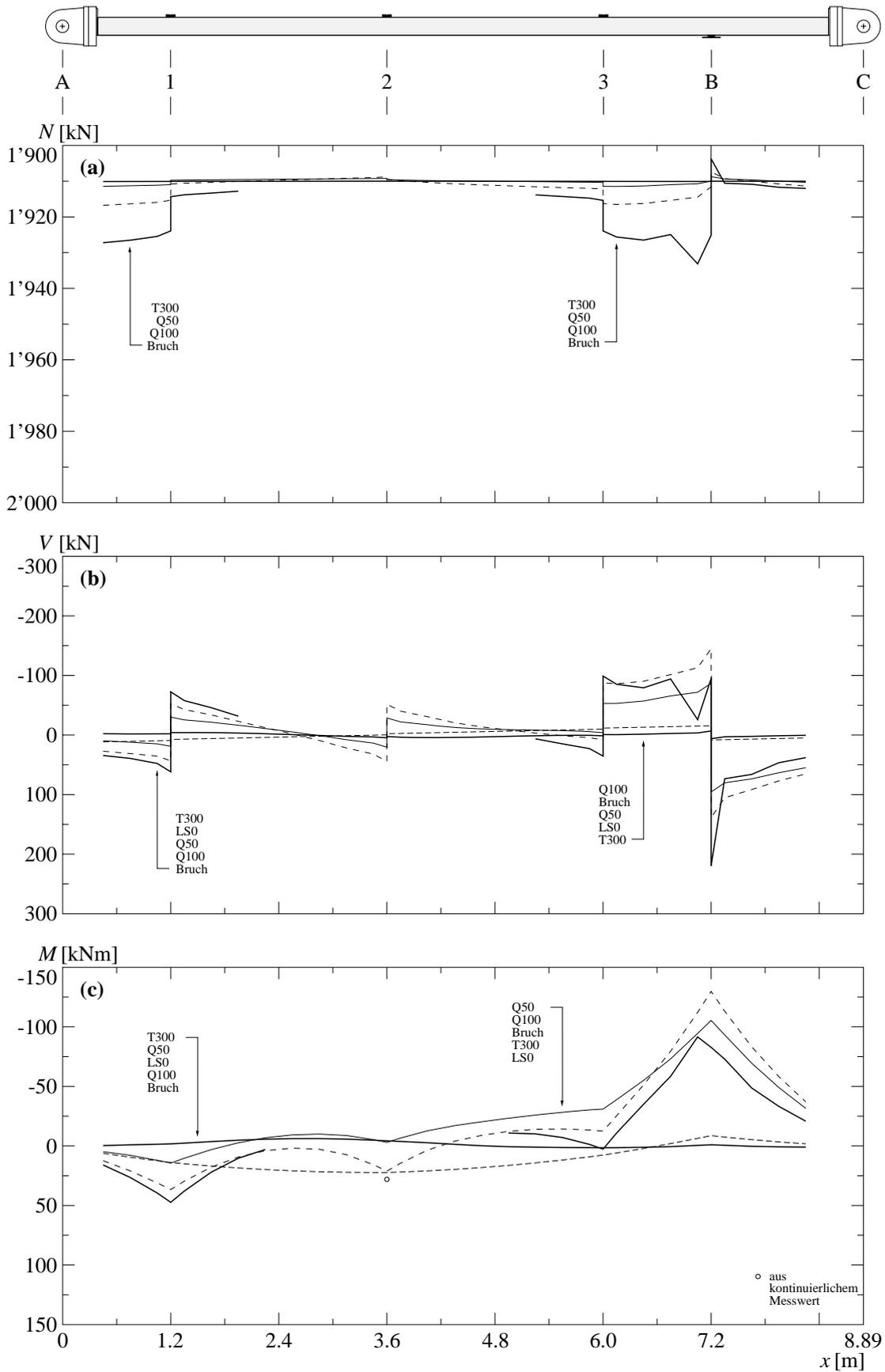


Bild 4.17 T1: (a) berechnete Normalkräfte; (b) berechnete Querkräfte; (c) berechnete Biegemomente.

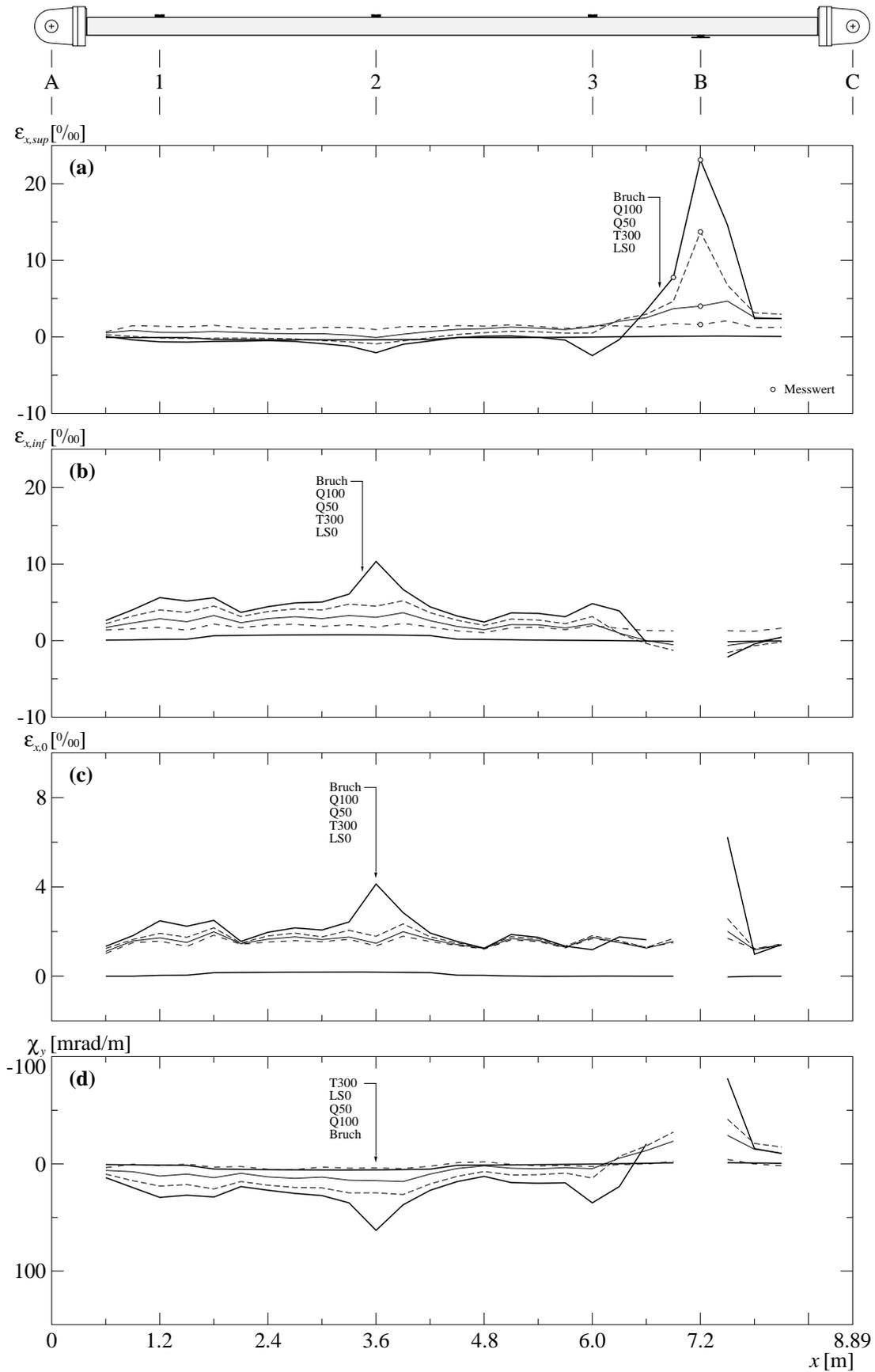


Bild 4.18 T1: (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Längsdehnungen unten; (c) berechnete Längsdehnungen der Schwerachse; (d) berechnete Krümmungen.

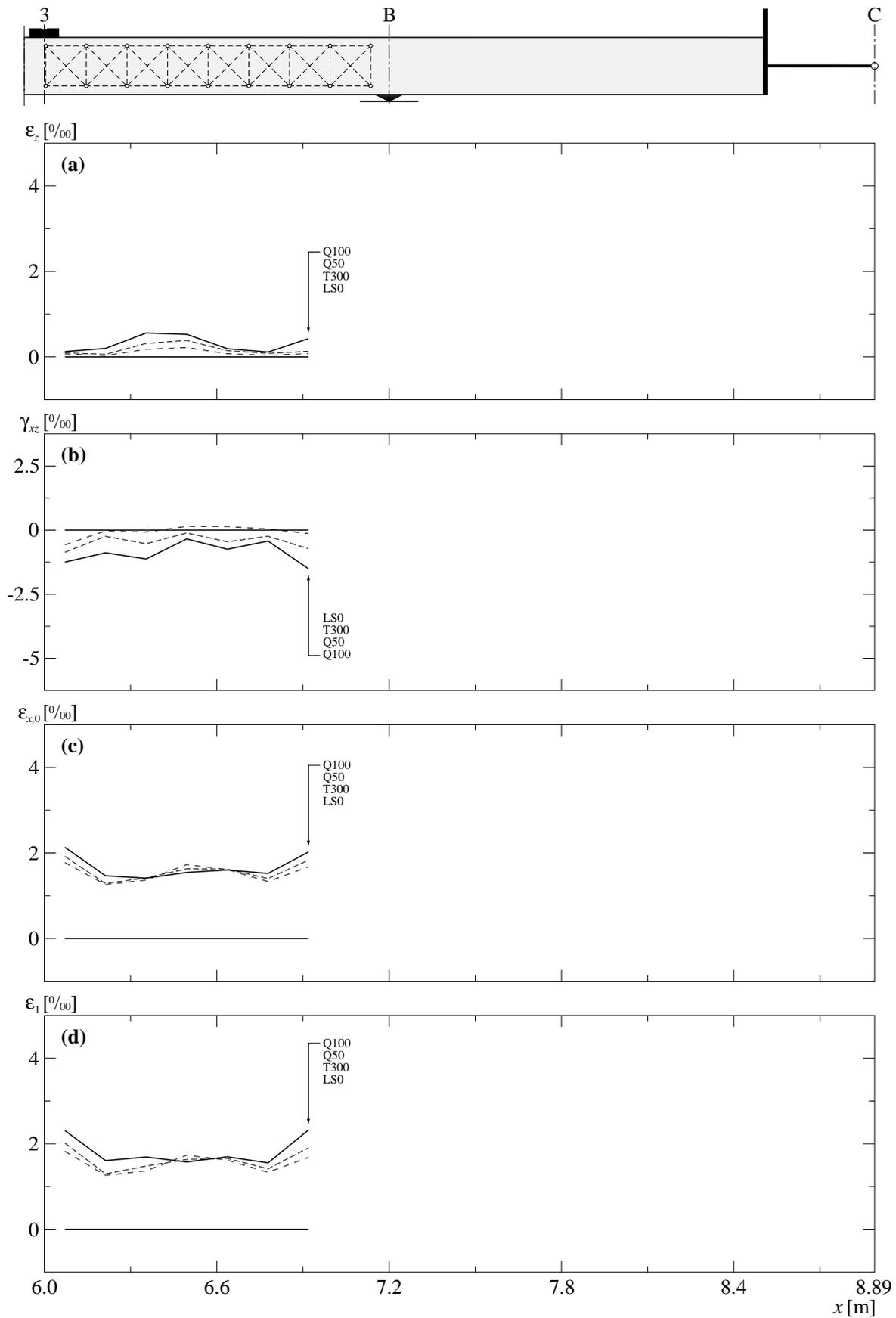


Bild 4.19 T1: (a) Mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (b) mittlere Schiebungen seitlich; (c) mittlere Längsdehnungen seitlich; (d) berechnete Hauptdehnungen seitlich.

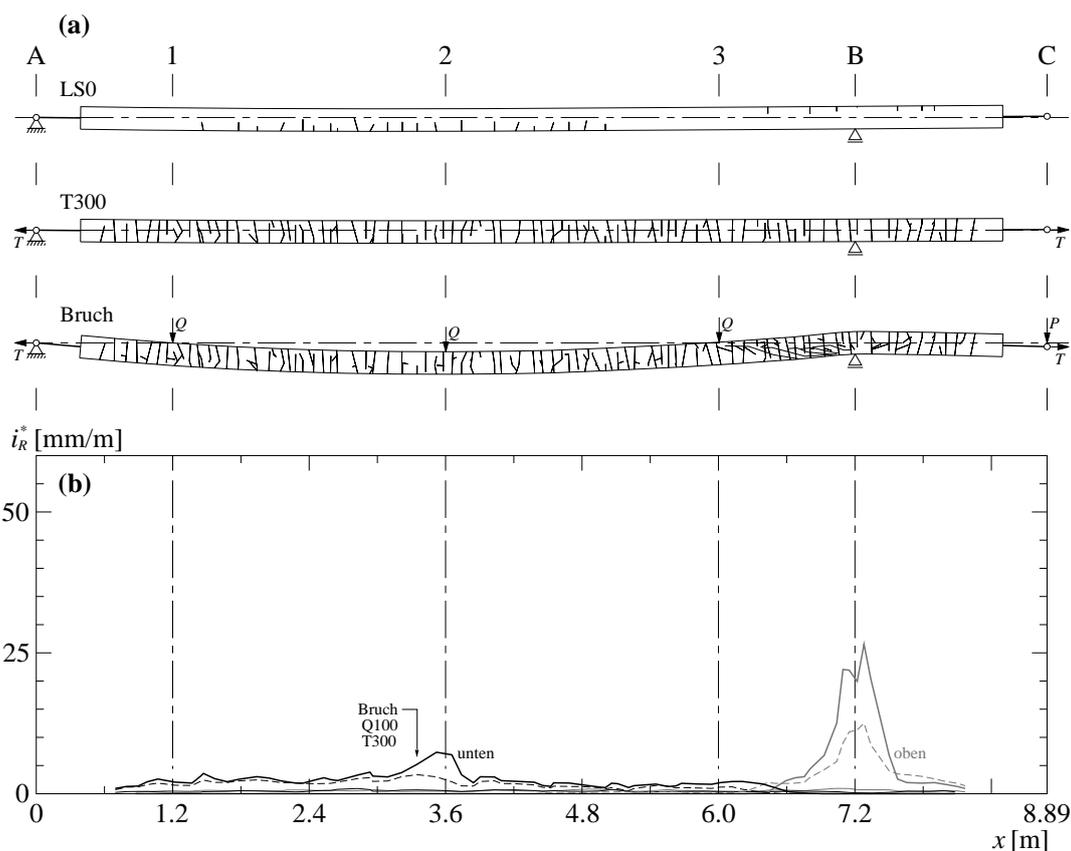


Bild 4.20 Risse bei Versuch T1: (a) Rissbilder ausgewählter Laststufen; (b) mittlere Rissintensität.

LS	Seite	Anzahl	Rissbreite			Rissabstand			
			t_R [mm]	$\sigma(t_R)$ [mm]	$t_{R,max}$ [mm]	s_R [mm]	$\sigma(s_R)$ [mm]	$s_{R,min}$ [mm]	$s_{R,max}$ [mm]
0	oben	7	Haarrisse	-	< 0.05	244	92	110	370
	unten	22	Haarrisse	-	< 0.05	168	56	60	310
1 T300	oben	70	0.06	0.03	0.15	110	37	50	210
	unten	70	0.05	0.02	0.15	107	41	25	225
3 Q50	oben	60	0.10	0.09	0.35	105	35	50	195
	unten	55	0.09	0.06	0.3	114	36	25	195
6 Q100	oben	39	0.22	0.27	1.2	95	31	50	160
	unten	57	0.17	0.11	0.55	104	40	25	195
8 Bruch	oben	22	0.57	0.70	2.5	87	29	50	160
	unten	26	0.57	0.20	1.2	105	39	25	195

Tabelle 4.4 T1: Risscharakteristika für ausgewählte Laststufen.

4.4.4 Bilder

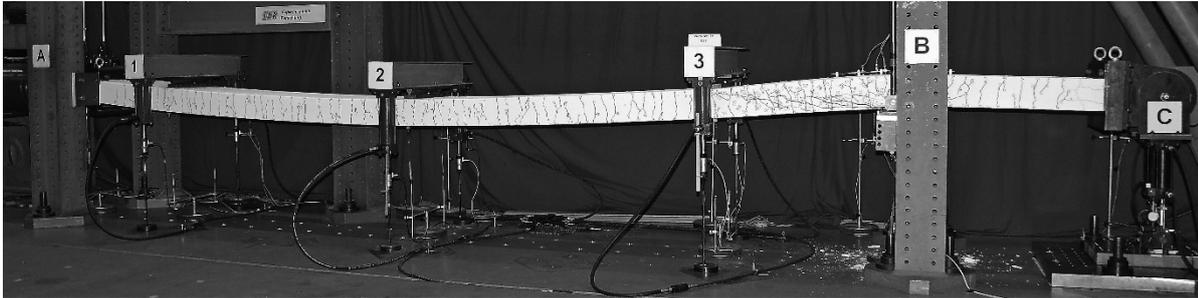


Bild 4.21 Versuchskörper T1 nach dem Bruch.

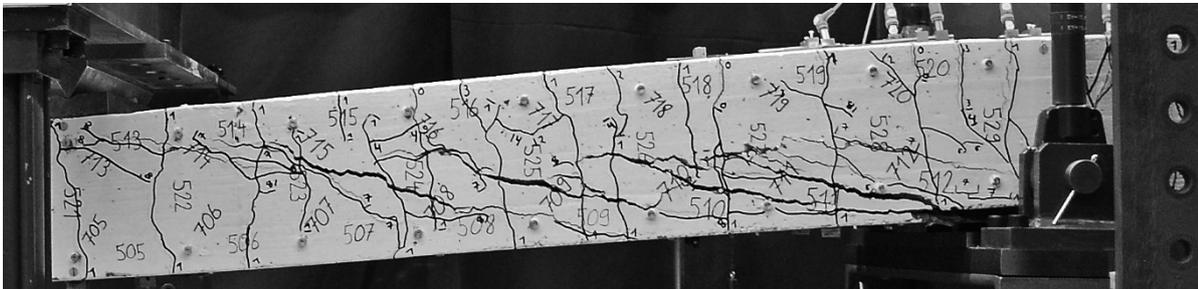


Bild 4.22 Bruchzone des Versuchskörpers T1 nach dem Bruch.

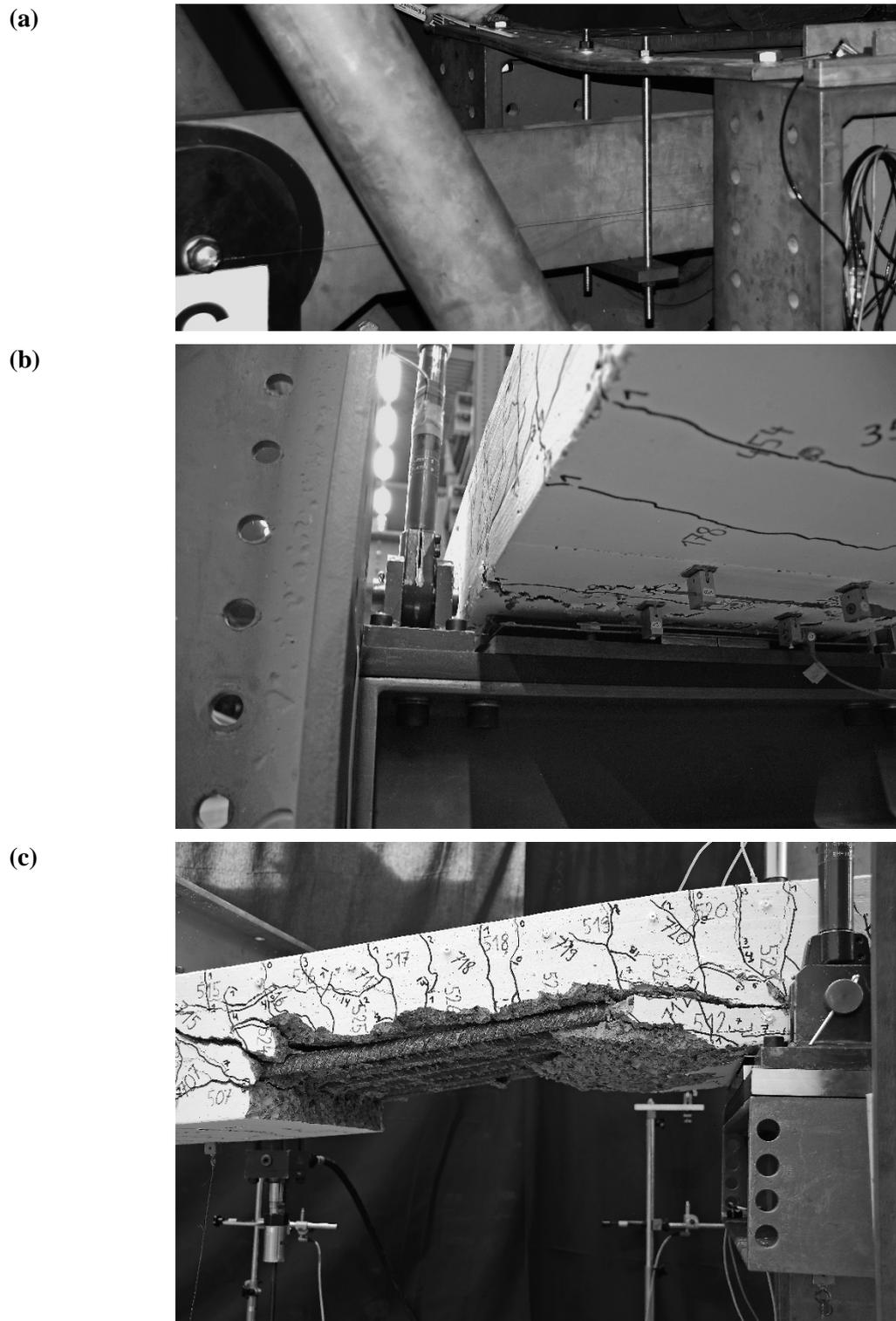


Bild 4.23 Details des Versuchs T1; (a) Temporäre Aufhängung des Pendelstabes vor dem Lösen Ende LS5; (b) Biegedruckbruchzone bei Zwischenaufleger B in LS7; (c) Abplatzung in der Bruchzone vor dem Ausbau.

4.5 Versuch T2

Der Versuch T2 war als Vergleichsversuch zu T1 und T0 konzipiert. Der Versuch T2 sollte den Einfluss einer mittleren Zugkraft auf das Trag- und Verformungsverhalten aufzeigen. Die Zugkraft von $T = 956 \text{ kN}$ wurde so ausgelegt, dass sie eine Spannung von 150 MPa in der Bewehrung bewirkte.

4.5.1 Versuchsablauf

Der vorbereitete Versuchskörper wurde am 2. Mai 2012 in die Versuchsanlage eingebaut. Am Vormittag des 7. Mai wurden die temporären Halterungen und Unterstützungen entfernt und die beiden manuellen Nullmessungen durchgeführt. Um 12:00 Uhr wurden die kontinuierlichen Messungen gestartet und nach dem Nullstellen aller Kanäle mit dem Aufbringen der Längszugkraft von 956 kN begonnen (LS1 / T150). Nach der Nachjustierung der Längszugkraft wurde eine vollständige Messung vorgenommen. Anschliessend wurden die Querbelastungen P und Q mit einer Zwischenstufe (LS2 / Q25) auf $Q = 48 \text{ kN}$ gesteigert (LS3 / Q50). Um 23:00 Uhr war die Dokumentation der Laststufe abgeschlossen. Der Versuchskörper blieb über Nacht belastet.

Am 8. Mai um 09:00 Uhr wurden die Querbelastungen P und Q auf die nächste Laststufe gesteigert (LS4 / Q60). Während der folgenden Laststufe (LS5 / Q75) wurden bei $Q = 68 \text{ kN}$ die Absperrventile zu den P -Zylindern geschlossen, und damit wurde die Kolbenposition dieser Zylinder fixiert (Linie " $z_C = \text{konstant}$ "). Fortan wurde nur noch Q gesteigert. Nach einer vollständigen Messung wurde die Querbelastung Q im Feld in drei Stufen weiter gesteigert (LS6 / Q100, LS7 / Q125, LS8 / Q150). Bei $Q = 100 \text{ kN}$ fiel die am Kragarmende C gemessene Kraft P um 13 kN (Ereignis B1 in Bild 4.24). Die Dokumentation der Laststufe LS8 war um 23:45 Uhr abgeschlossen. Zu diesem Zeitpunkt waren die Hydraulikzylinder am Joch 2 beinahe bis zum Anschlag eingefahren. Der Versuchskörper blieb über die anschliessenden zwei Tage belastet, während denen ein zusätzliches Hydrauliksystem entwickelt und eingebaut wurde, um die Verformung weiter steigern zu können (gestricheltes System in Bild 3.8(b)).

Am 11. Mai um 09:15 wurde die Verformung w_C wieder auf den Wert Ende Laststufe LS8 gebracht (Ereignis 1 in Bild 4.24) und anschliessend zur Kontrolle eine Serie Stabdeformermessungen durchgeführt. Bei der anschliessenden Steigerung der Querbelastung fiel Q zwei Mal kurzzeitig um 7 bzw. 8 kN (Ereignis 2). Bei $Q = 146 \text{ kN}$ fiel Q schlagartig um 16 kN . Darauf wurde eine vollständige Messung vorgenommen (LS9) und anschliessend die Querbelastung für einen Einblick in das Nachbruchverhalten noch einmal auf $Q = 145 \text{ kN}$ gesteigert (LS10). Nach einer letzten Serie Stabdeformermessungen wurde der Versuchskörper entlastet. Dazu wurde bei geschlossenen Q - und P -Zylindern die Zugkraft T abgelassen. Um 17:30 Uhr wurden die Arbeiten beendet.

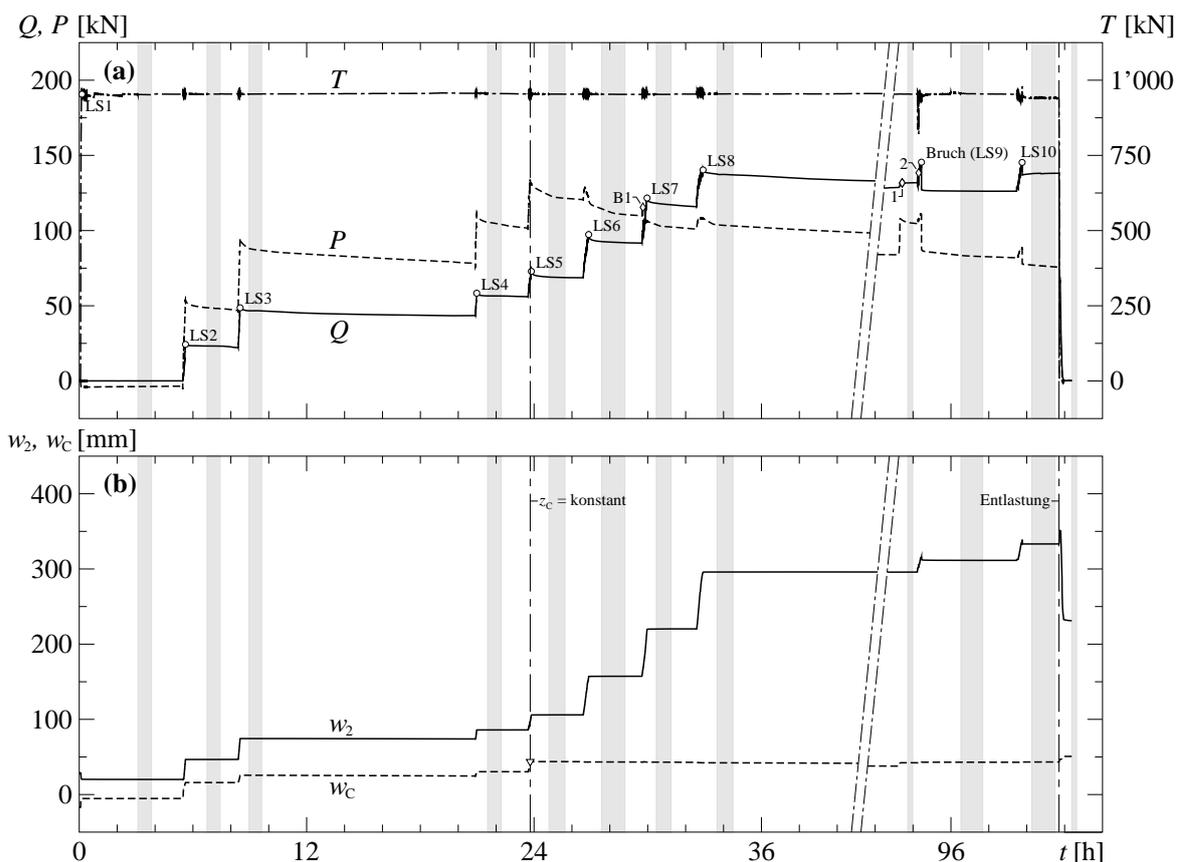


Bild 4.24 Ablauf des Versuchs T2: (a) Zeitverlauf der aufgetragenen Lasten T , Q und P ; (b) Zeitverlauf der Durchbiegungen w_2 und w_c . Graue Bereiche markieren die Messphasen. Rauten mit Zahlen markieren Ereignisse, welche im Text beschrieben sind.

Für LS7 konnten mit dem vorhandenen Stabdeformeter die Durchbiegungen in Feldmitte nicht mehr gemessen werden. Mit einem zusätzlichen, verstellbaren Stabdeformeter (siehe Kapitel 3.2.2) konnten ab LS8 wieder sämtliche Durchbiegungen gemessen werden. Ebenso konnten aufgrund der grossen Dehnungen ab LS7 die Deformetermessungen auf der Oberseite des Versuchskörpers unmittelbar C-seitig des Zwischenauflagers B nicht mehr durchgeführt werden. An gleicher Stelle ab LS8 und unmittelbar 3-seitig des Zwischenauflagers B ab LS9 konnten auch an der Unterseite des Versuchskörpers aufgrund von Betonabplatzungen keine Deformetermessungen mehr durchgeführt werden. Für LS9 waren zudem die Deformetermessungen auf den Seitenflächen des Versuchskörpers nicht mehr durchführbar.

4.5.2 Beobachtungen

Während der Dokumentation der Laststufe LS5 / Q75 wurde festgestellt, dass sich eine Biegedruckbruchzone C-seitig des Zwischenauflegers B ausgebildet hatte. Bei der weiteren Laststeigerung wuchs diese Zone, und es begannen sich kleine Abplatzungen vom Versuchskörper zu lösen. Bei $Q = 100$ kN fiel die am Kragarmende gemessene Kraft schlagartig von $P = 116$ kN auf $P = 105$ kN (Ereignis B1 in Bild 4.24). Die Querbelastung im Feld verringerte sich gleichzeitig von $Q = 100$ kN auf $Q = 95$ kN. Anschliessend baute sich Q sofort wieder auf, während P zuerst noch weiter auf $P = 102$ kN fiel, dann während 5 Minuten bzw. bis $Q = 102$ kN konstant blieb, um schliesslich wieder anzusteigen. Der Bruchvorgang wurde begleitet von leisem Knacken. Die Biegedruckbruchzone vergrösserte sich C-seitig des Zwischenauflegers B ab LS7 nicht mehr. Während der Laststufe LS8 / Q150 bildete sich eine Biegedruckbruchzone im Feld unter Joch 2 aus, siehe Bild 4.34(b). Zu Beginn der Laststufe LS9 fiel die Querbelastung im Feld innert 5 Sekunden von $Q = 136$ kN auf $Q = 130$ kN und etwas später von $Q = 138$ kN auf $Q = 131$ kN. In den folgenden 5 bis 10 Sekunden verringerte sich Q jeweils weiter um 1 kN, worauf die Last wieder anstieg (während des ganzen Vorgangs wurde Öl in die Q -Zylinder gepumpt). Die Kraft P verringerte sich bei diesen Abfällen um weniger als 0.5 kN. Beide Abfälle geschahen lautlos. Bei $Q = 146$ kN fiel die Querbelastung schlagartig und mit einem dumpfen Knall auf $Q = 128$ kN, während P gleichzeitig um 23 kN abnahm. In den folgenden 10 Sekunden verringerten sich beide Werte nochmals um 1 kN. Während des Ablassens der Zugkraft T war beim Entlasten ein kontinuierliches Knacken aus der Bruchzone zu hören, bis sich der untere Teil der Bruchzone A-seitig des Zwischenauflegers B schlagartig löste und zu Boden fiel.

Bei Versuchsbeginn waren Risse unten im Feld und oben über dem Zwischenaufleger vorhanden. Diese Risse standen senkrecht zur Versuchskörperachse. Durch das Aufbringen der Zugkraft entstanden Trennrisse in regelmässigem Abstand über die ganze Länge des Versuchskörpers. Durch die Querbelastung änderten sich die Rissbreiten, und einige Risse wurden so wieder geschlossen. Bis zur Laststufe LS5 / Q75 änderte sich das Rissbild nur geringfügig, und es entstanden nur vereinzelt neue Risse. Mit zunehmender Belastung bildeten sich im Bereich B - C zwei schräge, gegen C ansteigende Risse aus. Die Risse begannen in der Biegedruckbruchzone und endeten in der Seitenfläche des Versuchskörpers. Beim Bruch verlängerten sich diese Risse horizontal gegen C, und es entstand ein weiterer horizontaler Riss in der Schwerachse des Versuchskörpers, welcher sich dann schräg gegen oben und unten verlängerte und sich mit den ersten beiden Rissen verband. Anschliessend öffneten sich diese Schrägrisse weiter, und es entstand A-seitig ein zusätzlicher Schrägriss. Die mittlere Neigung in den ansteigenden Abschnitten der Schrägrisse betrug 17° und die Rissöffnung Ende Laststufe LS7 / Q125 bis zu 6 mm. In derselben Laststufe begannen sich C-seitig des Jochs 3 schräg gegen B abfallende Risse zu bilden. Beginn und Ende dieser Schrägrisse lagen in der Seitenfläche des Versuchskörpers, und ihre mittlere Neigung betrug 19° . Bis zur Laststufe LS8 / Q150 verlängerten sich diese Risse, und es kamen C-seitig zwei weitere, parallel verlaufende Risse hinzu. Kurz vor dem Bruch bildeten sich weitere Schrägrisse, mehrheitlich mit Beginn in der Schwerachse des Versuchskörpers und Ende auf der Höhe der unteren Bewehrung sowie einer Neigung zwischen 21° und 25° . Beim Bruch verbanden sich die Schrägrisse horizontal auf der Höhe der Schwerachse sowie der unteren Bewehrung. Das untere Ende des C-seitigsten Schrägrisses verlängerte sich bis vor das Zwischenaufleger. Es bildeten sich weitere sehr flache (Neigung $\leq 10^\circ$), vom Zwischenaufleger aus gegen A bis zur Schwerachse ansteigende Risse. Nach dem Bruch betrugen die Rissöffnungen dieser Risse 10 bis 20 mm (Bild 4.33(a)). Unter dem C-seitigen Ende der Lasteinleitung von Joch 3 bildete sich zudem eine kleine Druckbruchzone. Bei der Weiterbelastung nach dem Bruch (LS10) öffneten sich die bestehenden Schrägrisse weiter, und es entstand eine zusätzliche horizontale Verbindung auf der Höhe der oberen Bewehrung, siehe Bild 4.33(c).

4.5.3 Versuchsergebnisse

Tabelle 4.5 gibt eine Übersicht über die Belastungs- und Verformungsgeschichte des Versuchs T2. Die folgenden Bilder und Tabelle 4.6 zeigen Auswertungen der kontinuierlichen Messungen, der Deformometermessungen und der Rissaufnahmen.

LS	Bezeichnung	Lasten			Verschiebungen			Schnittgrößen			Zeit	
		T [MN]	Q [kN]	P [kN]	u_A [mm]	w_2 [mm]	w_C [mm]	$V_{B,0}^-$ [kN]	$V_{B,0}^+$ [kN]	M_B [kNm]	t [s]	t [h:min]
0	Versuchsbeginn	0	0	0	0.0	29	-17	-16	12	-15	0	0:00
1 T150	Belastungsbeginn	0	0	0	0.0	29	-17	-16	12	-15	200	0:03
	Belastungsende	0.948	0	-4	6.0	20	-5	-17	12	-19	1488	0:25
	Messbeginn	0.953	0	-4	6.1	20	-5	-17	12	-20	11151	3:06
2 Q25	Belastungsbeginn	0.956	0	-3	6.2	20	-5	-17	12	-20	19641	5:27
	Belastungsende	0.954	24	54	6.3	47	16	-62	59	-79	20183	5:36
	Messbeginn	0.954	23	49	6.3	47	16	-59	54	-70	24281	6:45
3 Q50	Belastungsbeginn	0.955	22	47	6.3	47	16	-57	52	-67	30189	8:23
	Belastungsende	0.955	49	94	6.0	74	26	-105	95	-130	30568	8:29
	Messbeginn	0.953	47	88	6.0	74	26	-101	88	-119	32252	8:58
	Messende	0.954	47	87	6.0	74	26	-101	87	-117	34652	9:38
4 Q60	Belastungsbeginn	0.956	43	78	6.0	74	25	-94	79	-104	75252	20:54
	Belastungsende	0.958	58	111	5.7	86	30	-123	108	-149	75510	20:58
	Messbeginn	0.955	57	105	5.7	86	30	-119	103	-140	77581	21:33
5 Q75	Belastungsbeginn	0.954	56	102	5.7	86	30	-117	99	-134	85252	23:41
	$z_C = \text{konstant}$	0.955	68	134	5.2	97	44	-139	125	-164	85671	23:48
	Belastungsende	0.955	73	131	5.0	106	44	-146	122	-159	85890	23:52
	Messbeginn	0.954	69	124	4.9	106	44	-138	115	-147	89251	24:48
6 Q100	Belastungsbeginn	0.953	69	121	4.9	106	44	-137	112	-142	95724	26:35
	Belastungsende	0.956	97	122	2.5	157	43	-180	113	-145	96782	26:53
	Messbeginn	0.954	93	115	2.3	157	43	-172	106	-132	99252	27:34
7 Q125	Belastungsbeginn	0.953	92	110	2.2	157	43	-169	101	-124	106902	29:42
	Bruchbeginn	0.957	100	116	1.6	167	43	-183	107	-134	107086	29:45
	Bruchende	0.971	95	105	1.4	167	43	-173	96	-115	107091	29:45
	Belastungsende	0.956	122	106	-3.7	220	43	-213	97	-118	107879	29:58
	Messbeginn	0.954	118	104	-3.9	220	43	-207	95	-114	109641	30:27
8 Q150	Belastungsbeginn	0.953	116	101	-3.9	220	43	-204	92	-110	117306	32:35
	Belastungsende	0.959	140	108	-12.8	296	42	-242	99	-122	118512	32:55
	Messbeginn	0.954	138	104	-12.9	296	42	-237	95	-115	121176	33:40
	Messende	0.954	137	103	-12.9	296	42	-236	94	-114	124189	34:30
	Nachpumpbeginn	0.955	129	84	-13.1	296	38	-220	77	-89	335804	93:17
	Nachpumpende	0.955	132	107	-13.1	296	42	-229	98	-120	336344	93:26
9 Bruch	Belastungsbeginn	0.955	132	105	-13.1	296	42	-228	96	-116	339199	94:13
	Höchstlast	0.949	146	111	-16.3	316	42	-250	102	-127	339999	94:27
	Bruchende	0.947	128	89	-16.4	312	43	-219	80	-89	340007	94:27
Messbeginn	0.956	126	84	-16.5	311	43	-215	74	-79	347501	96:32	
10	Belastungsbeginn	0.954	126	82	-16.5	311	43	-214	73	-77	358082	99:28
	Belastungsende	0.943	145	88	-21.4	339	43	-245	80	-89	359129	99:45
	Messbeginn	0.942	138	77	-22.5	333	43	-231	68	-69	360972	100:16
11	Entlastungsbeginn	0.926	138	76	-22.5	333	43	-231	67	-68	366133	101:42
	Entlastungsende	0.000	0	-1	-12.5	234	51	-16	11	-13	366981	101:56
	Versuchsende	0.002	0	0	-12.0	231	51	-17	12	-15	368561	102:23

Tabelle 4.5 Ablauf des Versuchs T2.

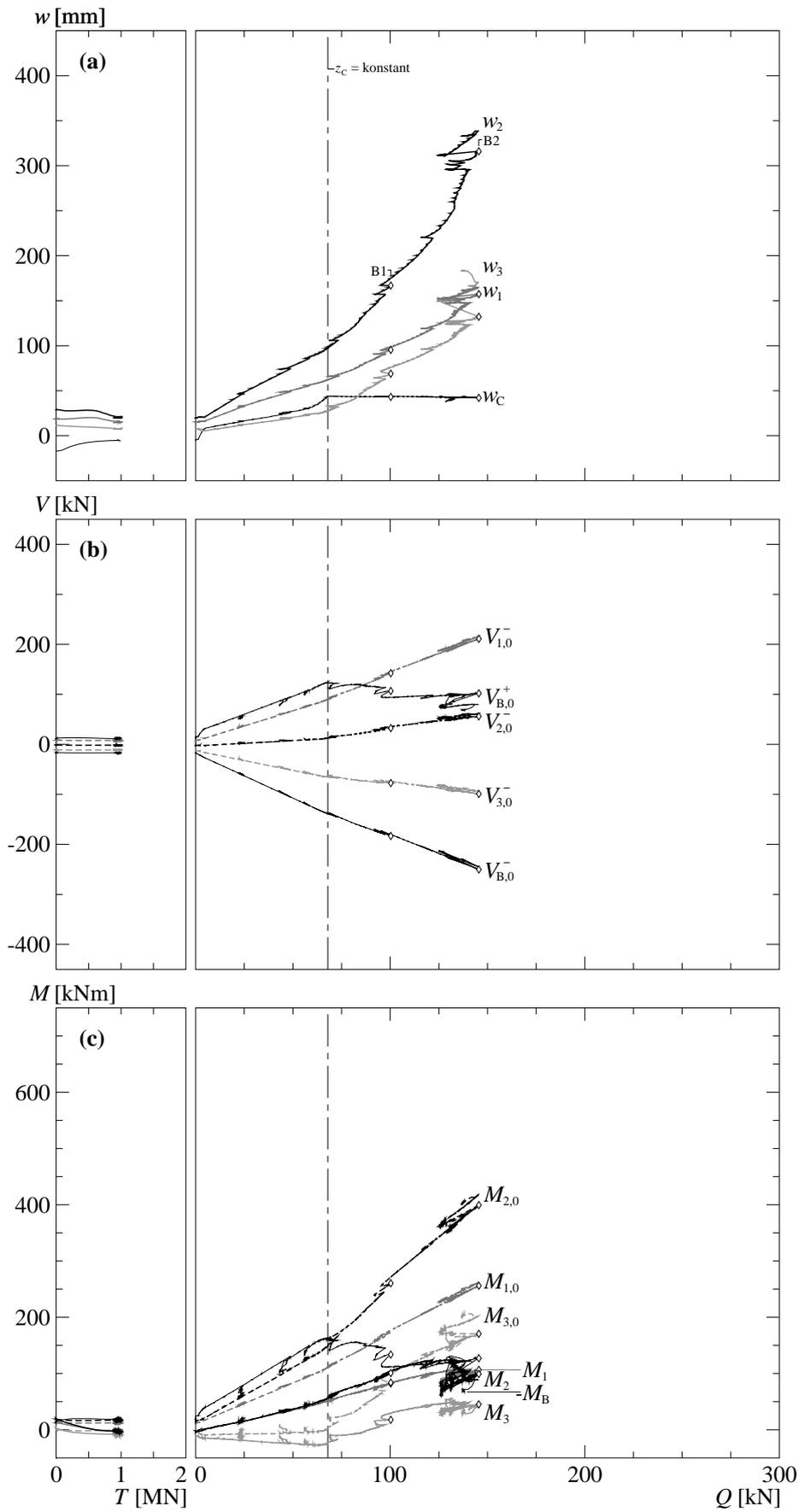


Bild 4.25 Resultate der ständigen Messungen des Versuchs T2:
 (a) Durchbiegungen; (b) Querkräfte; (c) Momente.

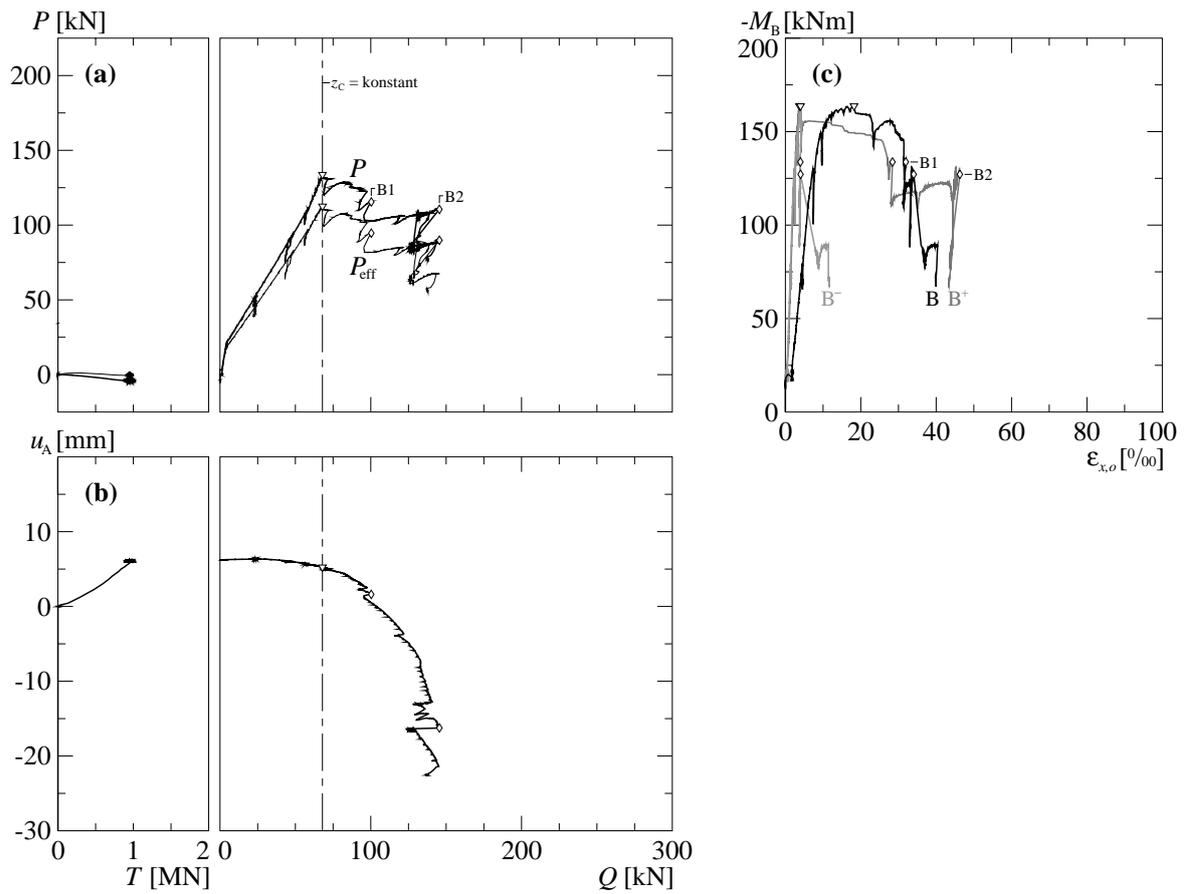


Bild 4.26 Resultate der ständigen Messungen des Versuchs T2: (a) Verhältnis P zu Q ; (b) Verschiebung des Lagers A; (c) Dehnungen an der Plattenoberseite in Längsrichtung über dem Zwischenaufleger B.

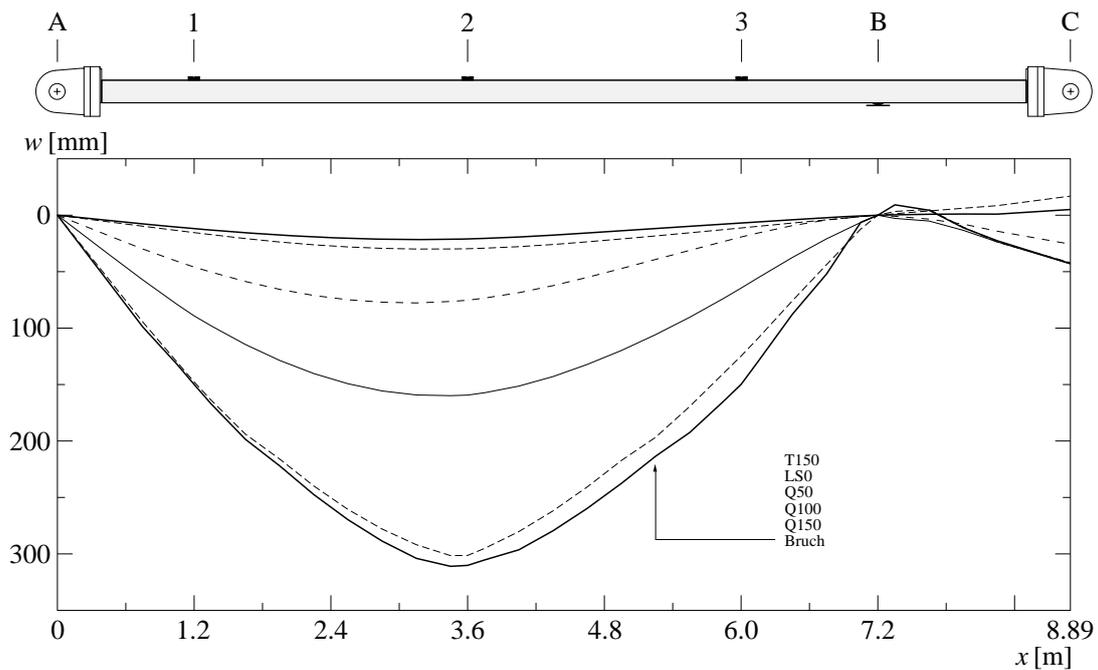


Bild 4.27 T2: Durchbiegungen

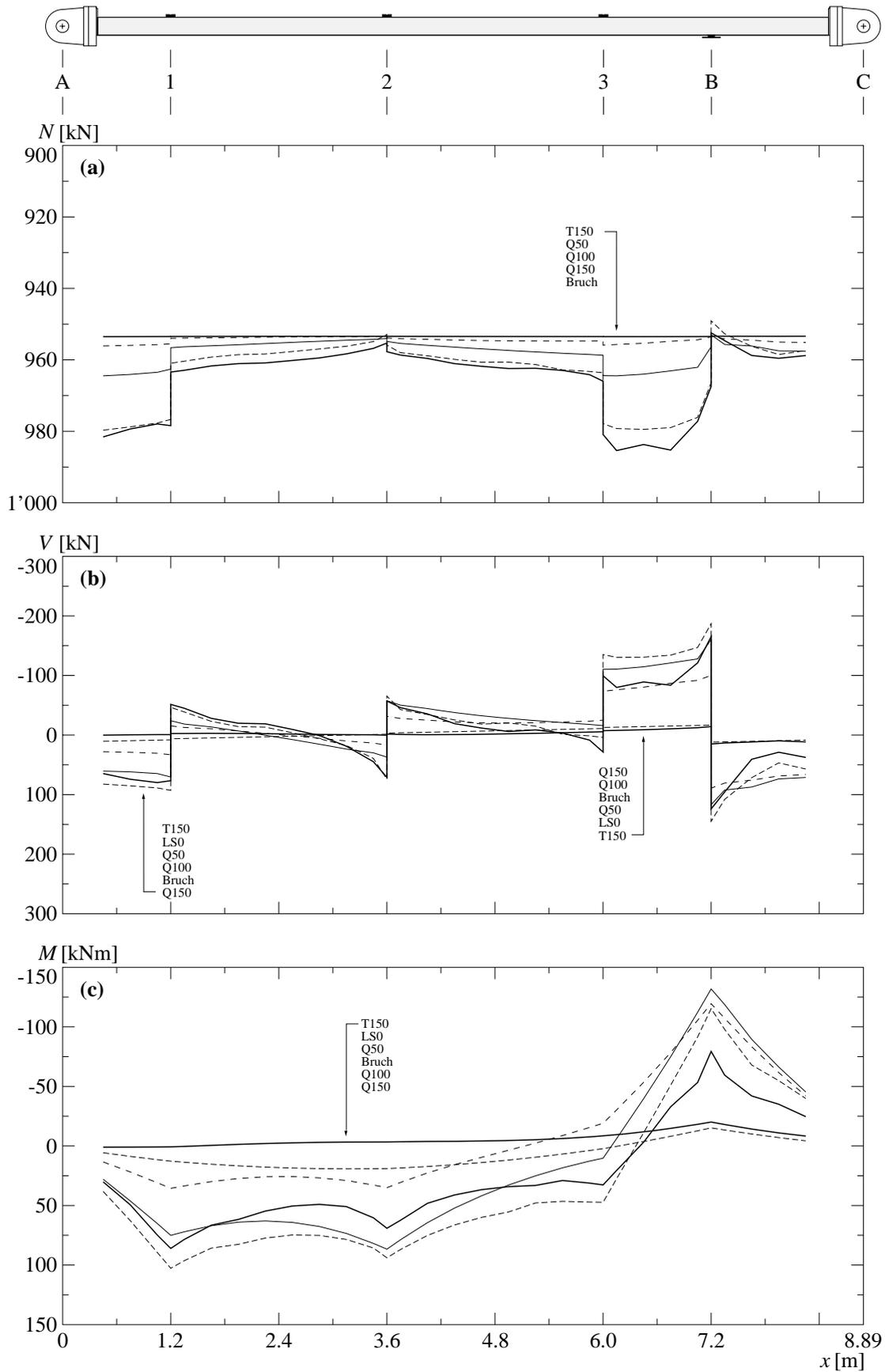


Bild 4.28 T2: (a) berechnete Normalkräfte; (b) berechnete Querkräfte; (c) berechnete Biegemomente.

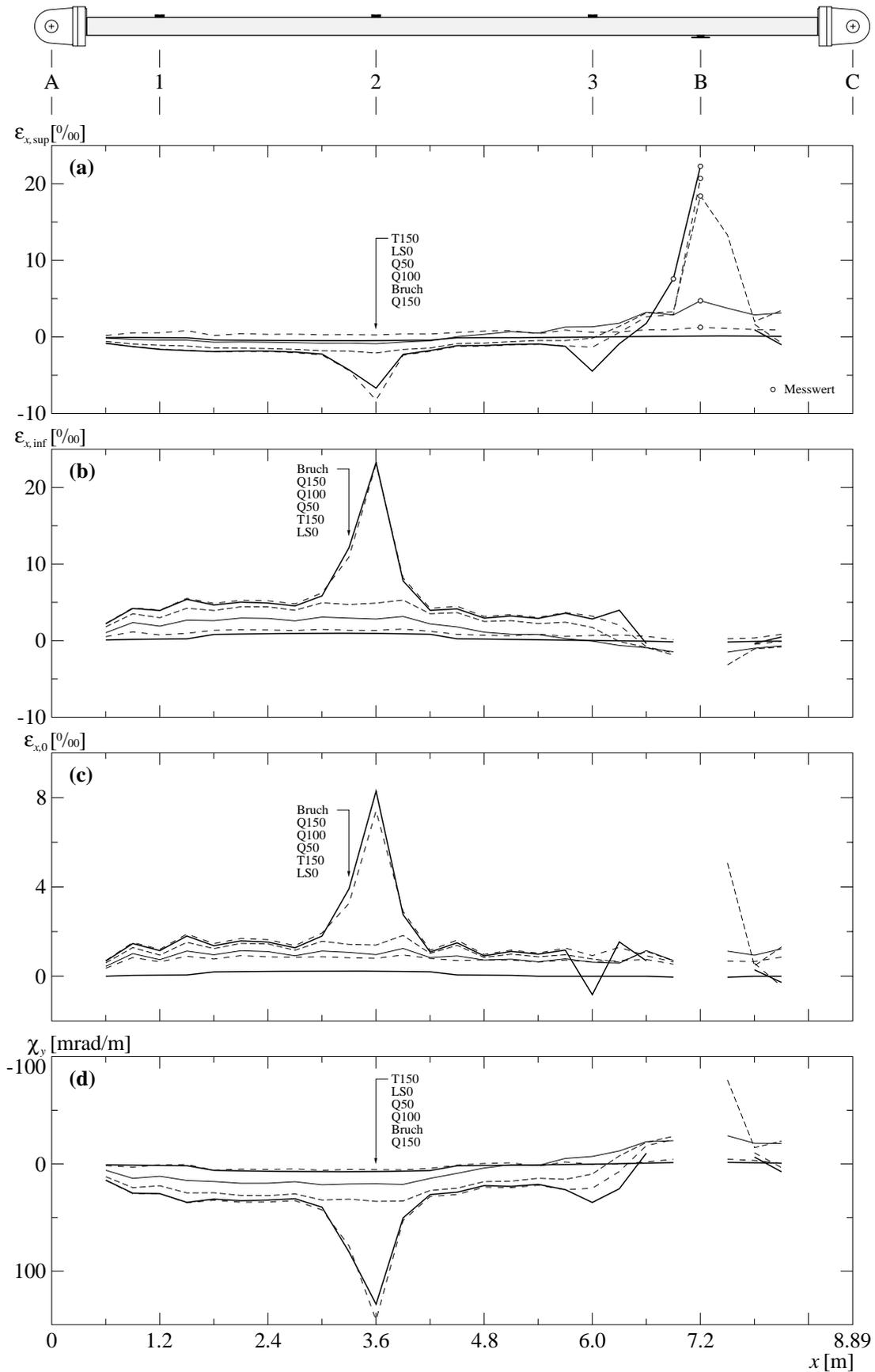


Bild 4.29 T2: (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Längsdehnungen unten; (c) berechnete Längsdehnungen der Schwerachse; (d) berechnete Krümmungen.

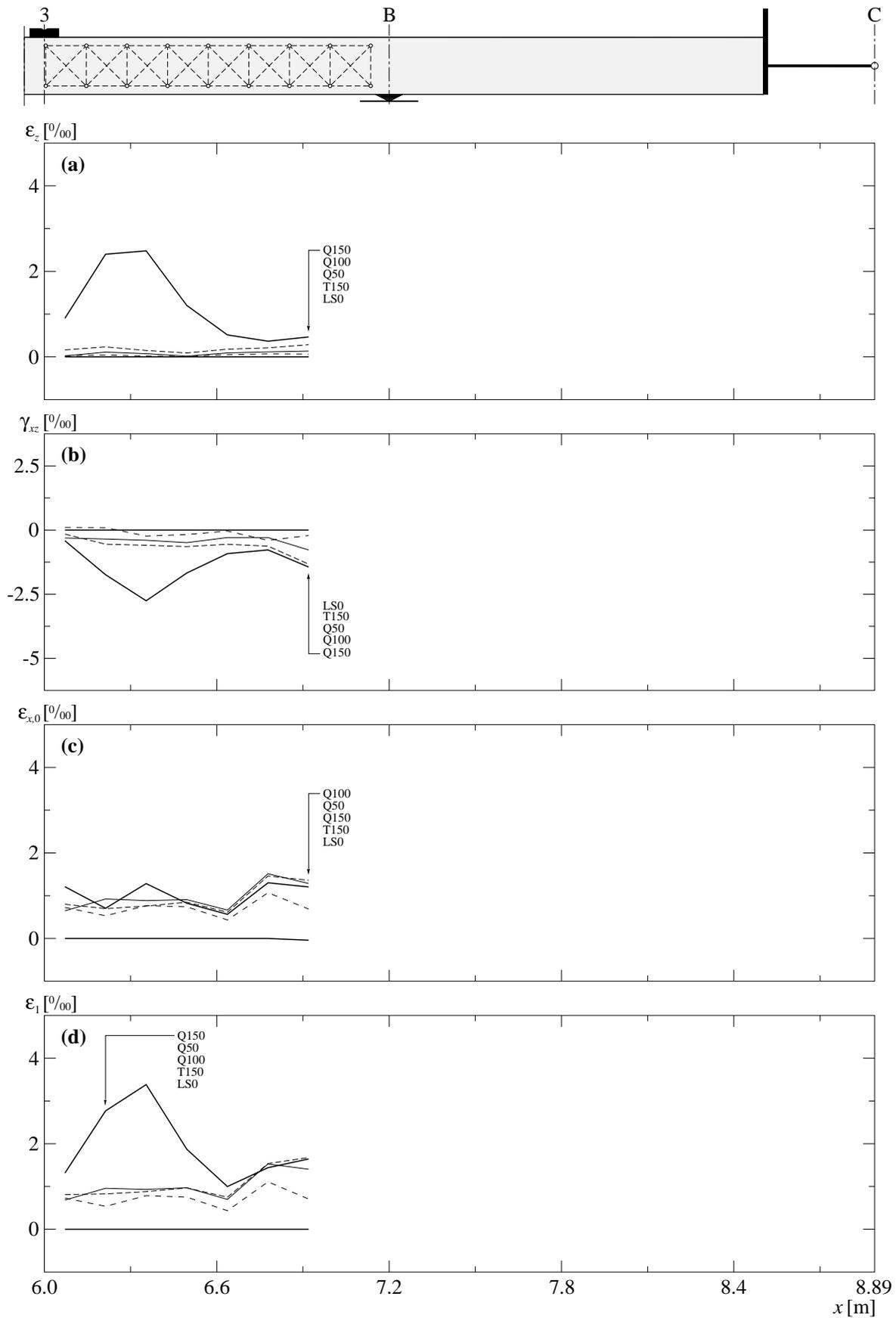


Bild 4.30 T2: (a) Mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (b) mittlere Schiebungen seitlich; (c) mittlere Längsdehnungen seitlich; (d) berechnete Hauptdehnungen seitlich.

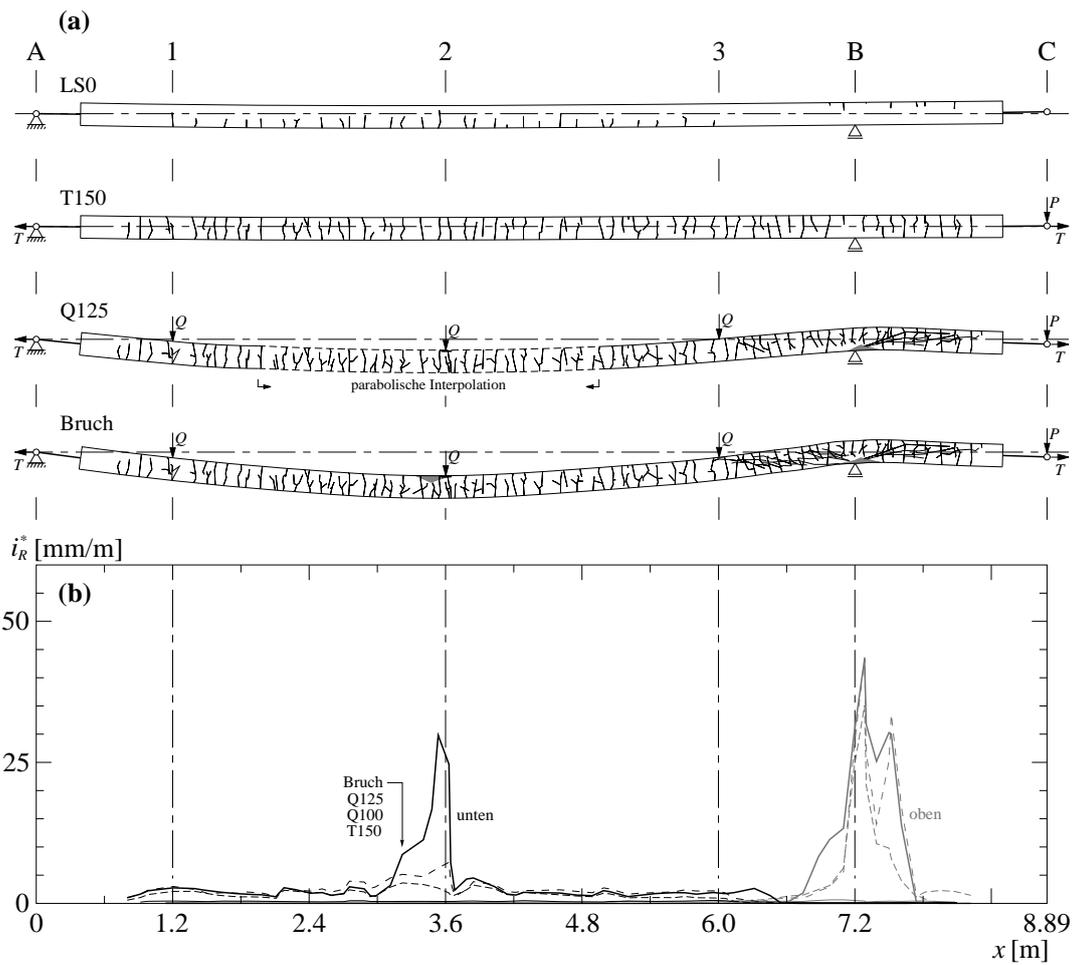


Bild 4.31 Risse bei Versuch T2: (a) Rissbilder ausgewählter Laststufen; (b) mittlere Rissintensität.

LS	Seite	Anzahl	Rissbreite			Rissabstand			
			t_R [mm]	$\sigma(t_R)$ [mm]	$t_{R,max}$ [mm]	s_R [mm]	$\sigma(s_R)$ [mm]	$s_{R,min}$ [mm]	$s_{R,max}$ [mm]
0	oben	7	Haarrisse	-	< 0.05	184	64	77	263
	unten	29	Haarrisse	-	< 0.05	170	62	50	260
1 T150	oben	56	0.04	0.01	0.1	133	47	40	230
	unten	50	0.05	0.02	0.1	144	56	50	255
3 Q50	oben	33	0.13	0.09	0.3	105	43	20	230
	unten	42	0.10	0.07	0.35	127	60	45	255
6 Q100	oben	23	0.46	0.84	3.5	97	31	20	140
	unten	52	0.18	0.14	0.6	106	46	15	220
8 Q150	oben	17	0.95	1.59	4.5	94	29	20	130
	unten	54	0.37	0.50	3	105	47	15	220
9 Bruch	oben	13	1.37	1.58	4.5	92	30	20	130
	unten	56	0.34	0.60	3.5	106	47	15	220

Tabelle 4.6 T2: Risscharakteristika für ausgewählte Laststufen.

4.5.4 Bilder

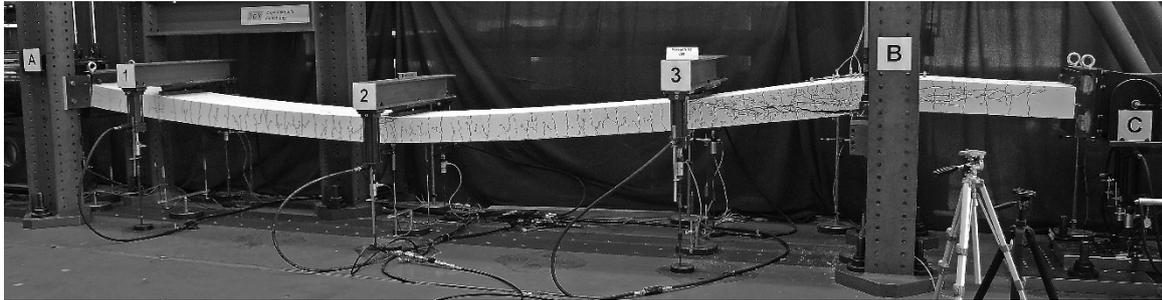


Bild 4.32 Versuchskörper T2 nach dem Bruch bei Laststufe LS9.

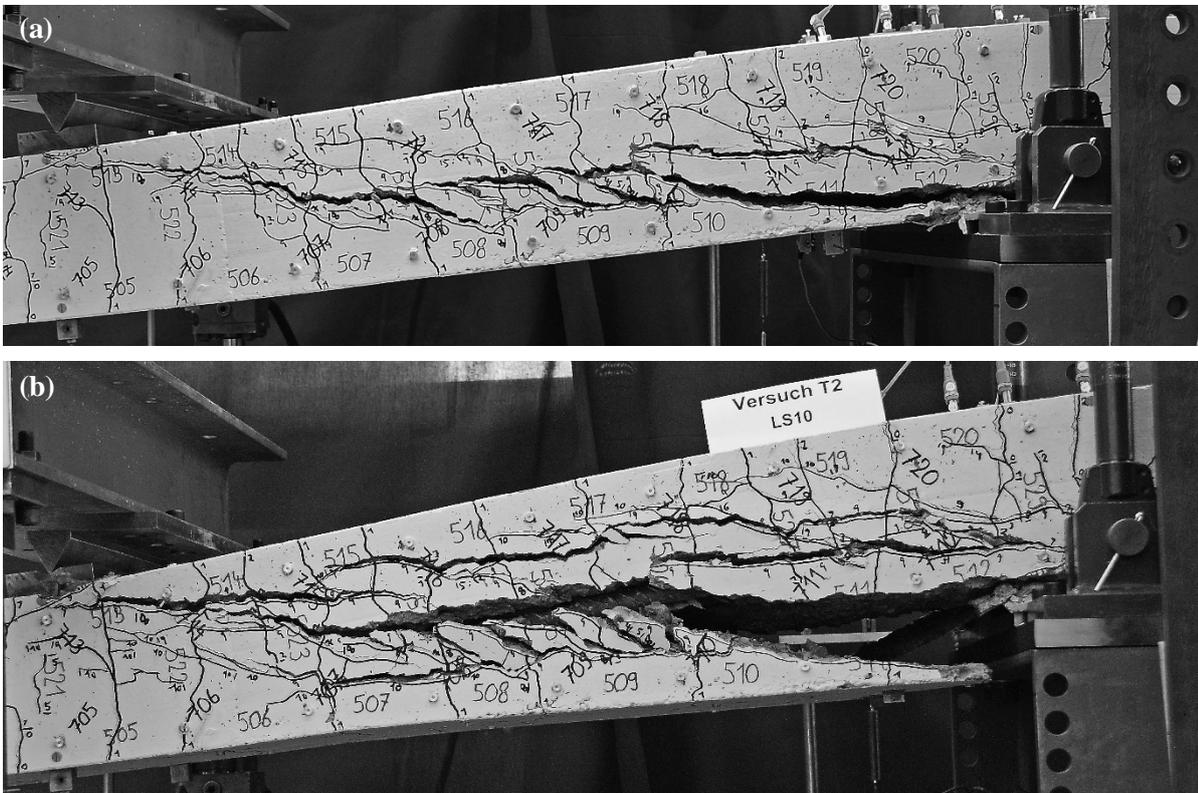


Bild 4.33 Bruchzone des Versuchskörpers T2: (a) unmittelbar nach dem Bruch (LS9); (b) nach der Weiterbelastung (LS10).

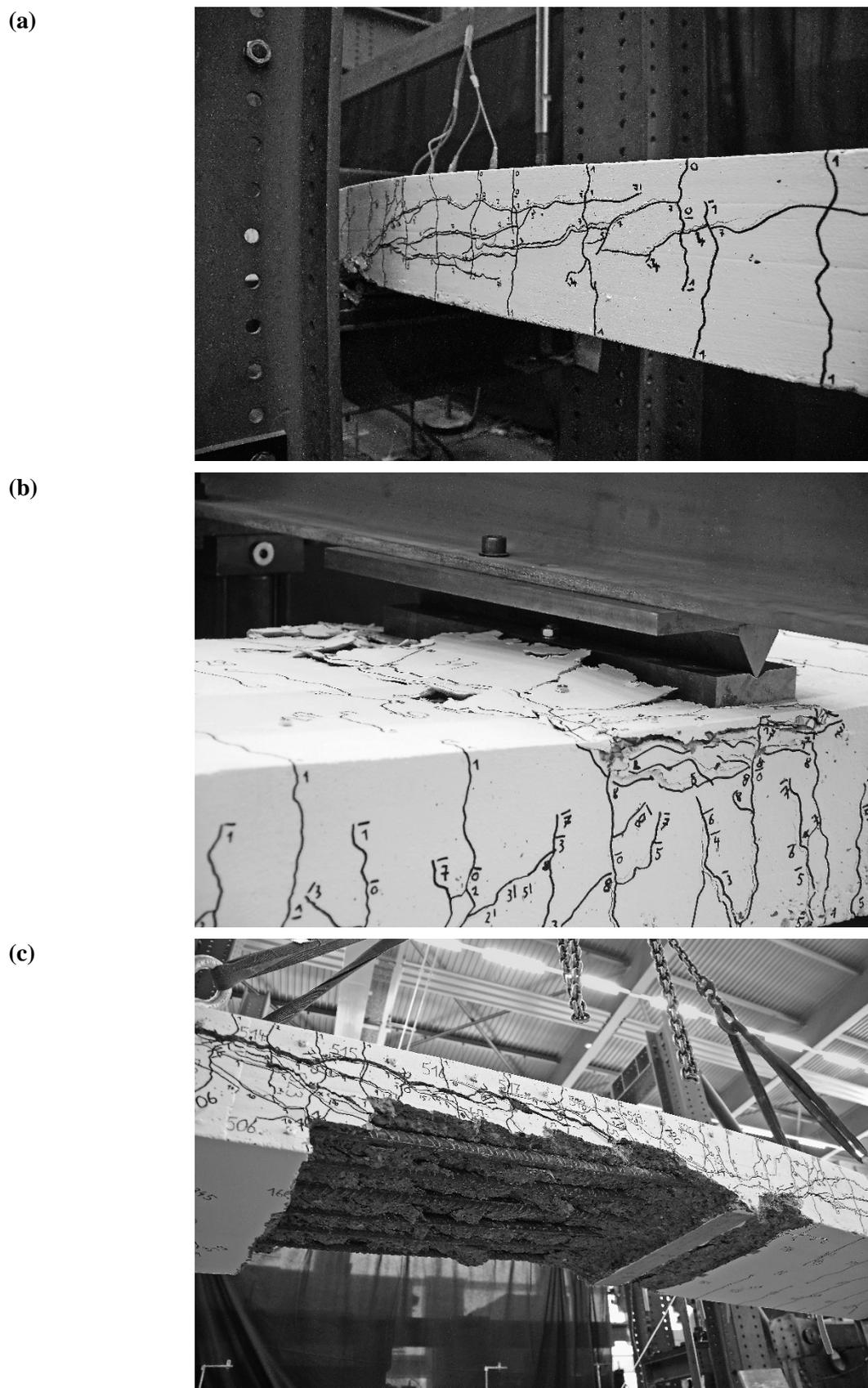


Bild 4.34 Bruchzonen des Versuchskörpers T2; (a) Schrägrisse C-seitig des Zwischenauflagers B bei LS7; (b) Biegedruckbruchzone unter Joch 2 bei LS8; (c) Bruchzonen bei B am ausgebauten Versuchskörper.

4.6 Versuch T3

Der Versuch T3 war als Vergleichsversuch zu T1 konzipiert. Er sollte den Einfluss einer orthogonalen Bewehrung auf das Trag- und Verformungsverhalten aufzeigen. Bewehrungsstäbe $\varnothing 22$ mm wurden aussenliegend im Abstand von 200 mm auf die Längsbewehrung verlegt.

4.6.1 Versuchsablauf

Der vorbereitete Versuchskörper wurde am 15. Mai 2012 in die Versuchsanlage eingebaut. Am Nachmittag des 21. Mai wurden die temporären Halterungen und Unterstützungen entfernt und die erste manuelle Nullmessung durchgeführt.

Am 22. Mai, dem ersten Versuchstag, wurde um 08:30 Uhr die zweite manuelle Nullmessung durchgeführt. Später wurde die kontinuierliche Messung gestartet, und nach dem Nullstellen aller Kanäle wurde um 11:20 Uhr mit dem Aufbringen der Längszugkraft von 1.91 MN begonnen (LS1 / T300). Nach der Nachjustierung der Längszugkraft und einer vollständigen Messung wurden die Querbewehrungen P und Q in zwei Stufen gesteigert (LS2 / Q25 und LS3 / Q50). Um 19:00 Uhr war die Dokumentation abgeschlossen, und die Arbeiten wurden unterbrochen. Der Versuchskörper blieb über Nacht belastet.

Bei Wiederaufnahme der Arbeiten am 23. Mai um 08:00 Uhr wurde festgestellt, dass die Hydraulikzylinder des Jochs 1 leicht leckten. Da sich die Verformungen jedoch nicht merkbar verändert hatten, wurde beschlossen, den Versuch fortzusetzen und die Zylinder vor dem nächsten Versuch auszuwechseln. Anschliessend wurden die Querbewehrungen P und Q auf die nächste Laststufe gesteigert (LS4 / Q75). Während dieser Laststufe wurde ein Abfallen des Widerstands beim Betätigen der P -Handpumpe festgestellt. Die Absperrventile zu den P -Zylindern wurden geschlossen und damit wurde die Kolbenposition dieser Zylinder fixiert (Linie " $z_c = \text{konstant}$ "). Fortan wurde nur noch Q gesteigert. Nach einer vollständigen Messung wurde die Querbewehrung Q im Feld weiter gesteigert (LS5 / Q100). Während der Dokumentation dieser Laststufe vergrösserte sich die Amplitude der Zugkraftoszillation über eine Viertelstunde von 1 kN auf 120 kN, um sich anschliessend wieder auf 1 kN zu reduzieren (Ereignis 1 in Bild 4.35). Die Ursache dafür konnte nicht zweifelsfrei festgestellt werden. Bei der Weiterbelastung fiel nach zwei weiteren Laststufen (LS6 / Q125, LS7 / Q150) bei $Q = 164$ kN die am Kragarmende C gemessene Kraft P (Bruch B1) und darauf auch die Querbewehrung Q im Feld, worauf eine vollständige Messung durchgeführt wurde (LS8 / Bruch). Anschliessend wurde Q nochmals in zwei Stufen gesteigert, bis die Kapazität der Versuchsanlage erschöpft war (LS10 / Q260). Während dieser Laststeigerung fiel die Längszugkraft zweimal um 40 kN (Ereignis 2). Als Ursache dafür wurde die Ausbildung einer Druckbruchzone unter Joch 2 und das Weiterbrechen im Bereich 3 - B vermutet. Um 04:00 Uhr war die Dokumentation der letzten Laststufe abgeschlossen, und die Arbeiten wurden unterbrochen. Der Versuchskörper blieb belastet.

Am 24. Mai wurde der Versuchskörper am Vormittag in belastetem Zustand fotografiert und um 14:40 Uhr entlastet. Dabei wurde zuerst die Querbewehrung im Feld auf $Q = 50$ kN reduziert und anschliessend die Zugkraft T abgelassen (LS11).

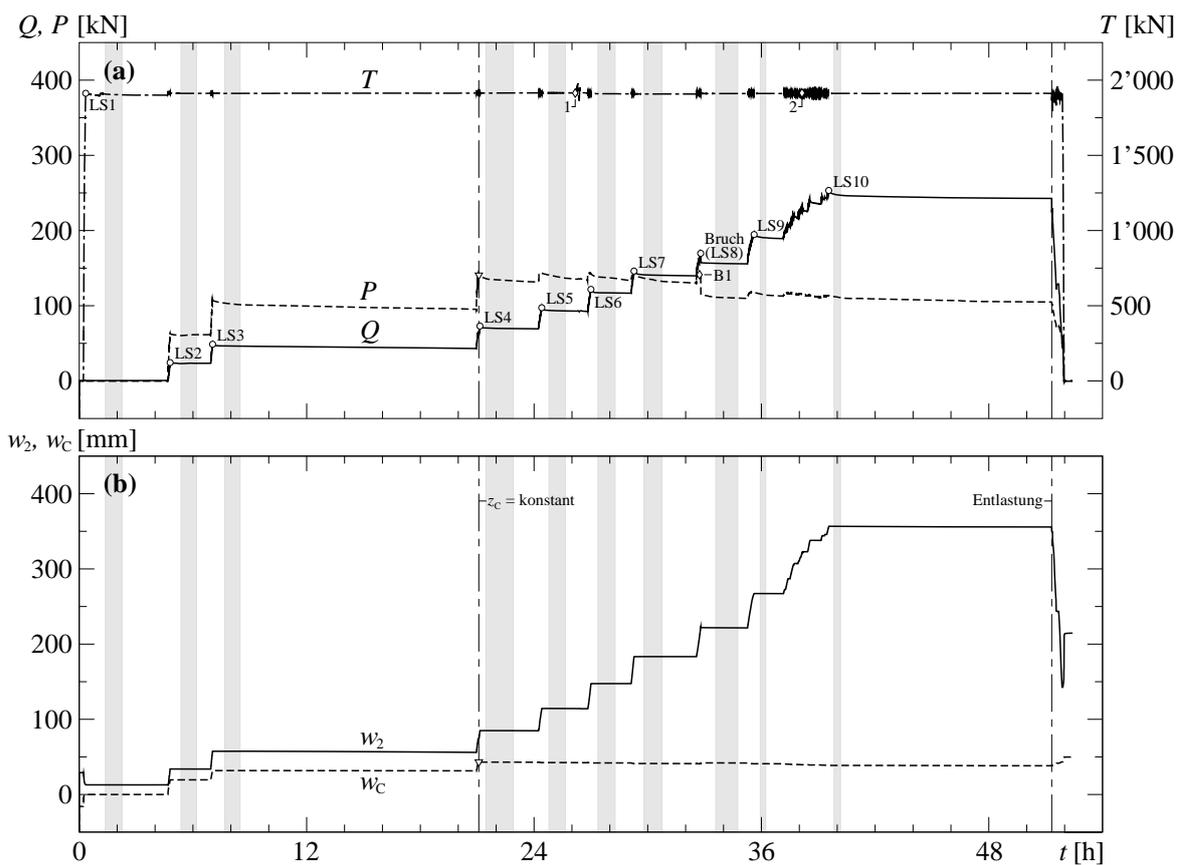


Bild 4.35 Ablauf des Versuchs T3: (a) Zeitverlauf der aufgebracht Lasten T , Q und P ; (b) Zeitverlauf der Durchbiegungen w_2 und w_c . Graue Bereiche markieren die Messphasen. Rauten mit Zahlen markieren Ereignisse, welche im Text beschrieben sind.

Ab LS7 konnten aufgrund der grossen Dehnungen die Deformetermessungen auf der Oberseite des Versuchskörpers über dem Zwischenaufleger B nicht mehr durchgeführt werden. Ab LS8 waren die Deformetermessungen an der Unterseite des Versuchskörpers unmittelbar C-seitig des Zwischenauflegers B aufgrund von Betonabplatzungen nicht mehr durchführbar. Für diese Laststufe konnten zudem einzelne Deformetermessungen auf den Seitenflächen des Versuchskörpers nicht mehr durchgeführt werden.

4.6.2 Beobachtungen

Bei Laststufe LS5 / Q100 zeichnete sich die Druckbruchzone über dem Zwischenauflager B ab. Bis Laststufe LS7 / Q150 vergrösserte sich diese Zone C-seitig des Lagers, und es lösten sich periodisch kleine Betonteile. Bei der Weiterbelastung nach dem Bruch wurde bei LS9 / Q200 eine kleine Druckbruchzone unter Joch 3 festgestellt, welche sich bei höherer Belastung noch vergrösserte. Bei Laststufe LS10 / Q260 ereignete sich auch unter Joch 2 ein Biegedruckbruch.

Bei Versuchsbeginn waren Risse unten im Feld und oben über dem Zwischenauflager vorhanden. Diese Risse standen senkrecht zur Versuchskörperachse. Durch das Aufbringen der Zugkraft entstanden Trennrisse in regelmässigem Abstand über die ganze Länge des Versuchskörpers. Durch die Querbelastung änderten sich die Rissbreiten und einige Risse wurden so wieder geschlossen. Bis zur Laststufe LS4 / Q75 änderte sich das Rissbild nur geringfügig, und es entstanden nur vereinzelt neue Risse. Bei Laststufe LS5 / Q100 entstand ein erster, flacher (Neigung 22°), vom Zwischenauflager B aus gegen A ansteigender Schrägriss. Bei Laststufe LS6 / Q125 bildeten sich weitere Schrägrisse C-seitig des Jochs 3. Beginn und Ende dieser Risse waren in der Seitenfläche des Versuchskörpers, und die mittlere Neigung auf Höhe der Schwerachse lag zwischen 34° und 60° . Bei der weiteren Zunahme der Belastung verlängerten und verbanden sich diese Risse, und es entstanden weitere, flachere Schrägrisse im gleichen Bereich. Beim Bruch öffnete sich in einer ersten Phase (Ereignis B1 in Bild 4.35) der Schrägriss mit Beginn unter Joch 3 und Ende etwa in der Mitte zwischen den Achsen 3 und B, etwa auf der Höhe der unteren Bewehrung (mittlere Neigung 16° , Rissöffnung 3 mm). Es entstand ein zusätzlicher noch flacherer Schrägriss, welcher etwa in der Mitte zwischen den Achsen 3 und B oberhalb der unteren Bewehrung begann und an der Versuchskörperunterseite, 200 mm A-seitig der Achse B, endete. Diese erste Phase war praktisch geräuschlos. In einer zweiten Phase bildete sich unter dezentem Knacken parallel zu letzterem ein zusätzlicher Riss mit Beginn in der Druckbruchzone über dem Zwischenauflager B und Ende auf der Höhe der Schwerachse des Versuchskörpers, in der Mitte zwischen den Achsen 3 und B. Nach dem Bruch betrugen die Rissöffnungen dieser drei Schrägrisse bis 6 mm. Bei der anschliessenden Weiterbelastung öffneten sich die drei Risse weiter bis zu 15 bis 20 mm (LS10 / Q260), und es entstanden feine, parallel zur Schwerachse verlaufende Risse C-seitig des Jochs 3, auf der Höhe der oberen und unteren Bewehrungslage.

4.6.3 Versuchsergebnisse

Tabelle 4.7 gibt eine Übersicht über die Belastungs- und Verformungsgeschichte des Versuchs T3. Die folgenden Bilder und Tabelle 4.8 zeigen Auswertungen der kontinuierlichen Messungen, der Deformermessungen und der Rissaufnahmen. Die Resultate der seitlichen Deformermessungen im Bruchzustand (LS8) sind in Bild 4.41 nicht dargestellt.

LS	Bezeichnung	Lasten			Verschiebungen			Schnittgrößen			Zeit	
		T [MN]	Q [kN]	P [kN]	u_A [mm]	w_2 [mm]	w_C [mm]	$V_{B,0}^-$ [kN]	$V_{B,0}^+$ [kN]	M_B [kNm]	t [s]	t [h:min]
0	Versuchsbeginn	0.00	0	0	0.0	29	-16	-17	12	-15	0	0:00
1 T300	Belastungsbeginn	0.00	0	0	0.0	29	-16	-17	12	-15	746	0:12
	Belastungsende	1.91	0	0	12.4	13	0	-18	13	-17	1230	0:20
	Messbeginn	1.91	0	0	12.5	13	0	-18	13	-17	4534	1:16
2 Q25	Belastungsbeginn	1.90	1	0	12.5	13	0	-18	13	-17	16792	4:40
	Belastungsende	1.91	24	64	12.5	34	19	-59	58	-55	17268	4:48
	Messbeginn	1.91	23	61	12.4	34	19	-56	55	-50	18899	5:15
3 Q50	Belastungsbeginn	1.91	24	62	12.4	34	20	-57	56	-51	24965	6:56
	Belastungsende	1.91	49	109	12.2	57	32	-100	91	-87	25339	7:02
	Messbeginn	1.91	47	104	12.2	58	32	-95	85	-78	27214	7:34
	Messende	1.91	46	102	12.2	58	32	-94	83	-74	30119	8:22
4 Q75	Belastungsbeginn	1.91	43	95	12.2	56	31	-88	77	-65	75431	20:57
	$z_C = \text{konstant}$	1.91	63	141	11.8	74	43	-123	111	-99	75909	21:05
	Belastungsende	1.91	73	140	11.5	85	43	-138	109	-97	76119	21:09
	Messbeginn	1.91	71	137	11.5	85	43	-133	107	-93	76809	21:20
5 Q100	Belastungsbeginn	1.92	69	132	11.5	85	43	-130	101	-84	87248	24:14
	Belastungsende	1.92	97	143	10.5	114	42	-175	113	-104	87864	24:24
	Messbeginn	1.92	94	141	10.5	114	42	-170	111	-101	88809	24:40
6 Q125	Belastungsbeginn	1.91	92	134	10.4	114	42	-166	104	-90	96557	26:49
	Belastungsende	1.91	122	143	8.9	147	42	-212	113	-105	97211	27:00
	Messbeginn	1.91	117	139	8.8	147	42	-205	109	-98	98104	27:15
7 Q150	Belastungsbeginn	1.91	117	133	8.8	147	42	-202	103	-89	104847	29:07
	Belastungsende	1.91	146	141	6.7	183	41	-248	111	-104	105395	29:17
	Messbeginn	1.91	141	137	6.6	183	41	-240	108	-98	106864	29:41
8 Bruch	Belastungsbeginn	1.91	140	130	6.6	183	41	-236	101	-86	117220	32:34
	Bruchbeginn 1	1.92	164	141	4.6	210	41	-275	111	-104	117841	32:44
	Bruchende 1	1.92	163	139	4.4	211	41	-273	109	-100	117849	32:44
	Höchstlast	1.91	170	137	3.3	222	41	-283	107	-98	118055	32:48
	Bruchende 2	1.93	159	116	2.9	222	42	-261	85	-58	118091	32:48
	Messbeginn	1.91	156	112	2.7	222	42	-256	81	-51	120480	33:28
9 Q200	Belastungsbeginn	1.91	156	110	2.6	222	42	-255	79	-48	126954	35:16
	Belastungsende	1.91	195	118	-3.0	267	41	-316	87	-64	128212	35:37
	Messbeginn	1.91	192	116	-3.1	267	41	-311	86	-62	128944	35:49
10 Q260	Belastungsbeginn	1.91	190	113	-3.2	267	41	-307	83	-56	133731	37:09
	Belastungsende	1.92	253	113	-19.4	357	39	-403	83	-61	142390	39:33
	Messbeginn	1.91	249	113	-19.5	357	39	-397	83	-60	142973	39:43
	Messende	1.91	247	111	-19.6	357	39	-394	81	-58	144178	40:03
11	Entlastungsbeginn	1.91	243	105	-19.6	356	38	-386	75	-49	184748	51:19
	Wechsel Q zu T	1.91	51	59	14.0	143	43	-86	29	40	186775	51:53
	Entlastungsende	0.00	-1	-1	-4.5	212	50	-15	11	-13	187130	51:59
	Versuchsende	0.00	-1	-1	-4.5	212	50	-15	11	-13	187135	51:59

Tabelle 4.7 Ablauf des Versuchs T3.

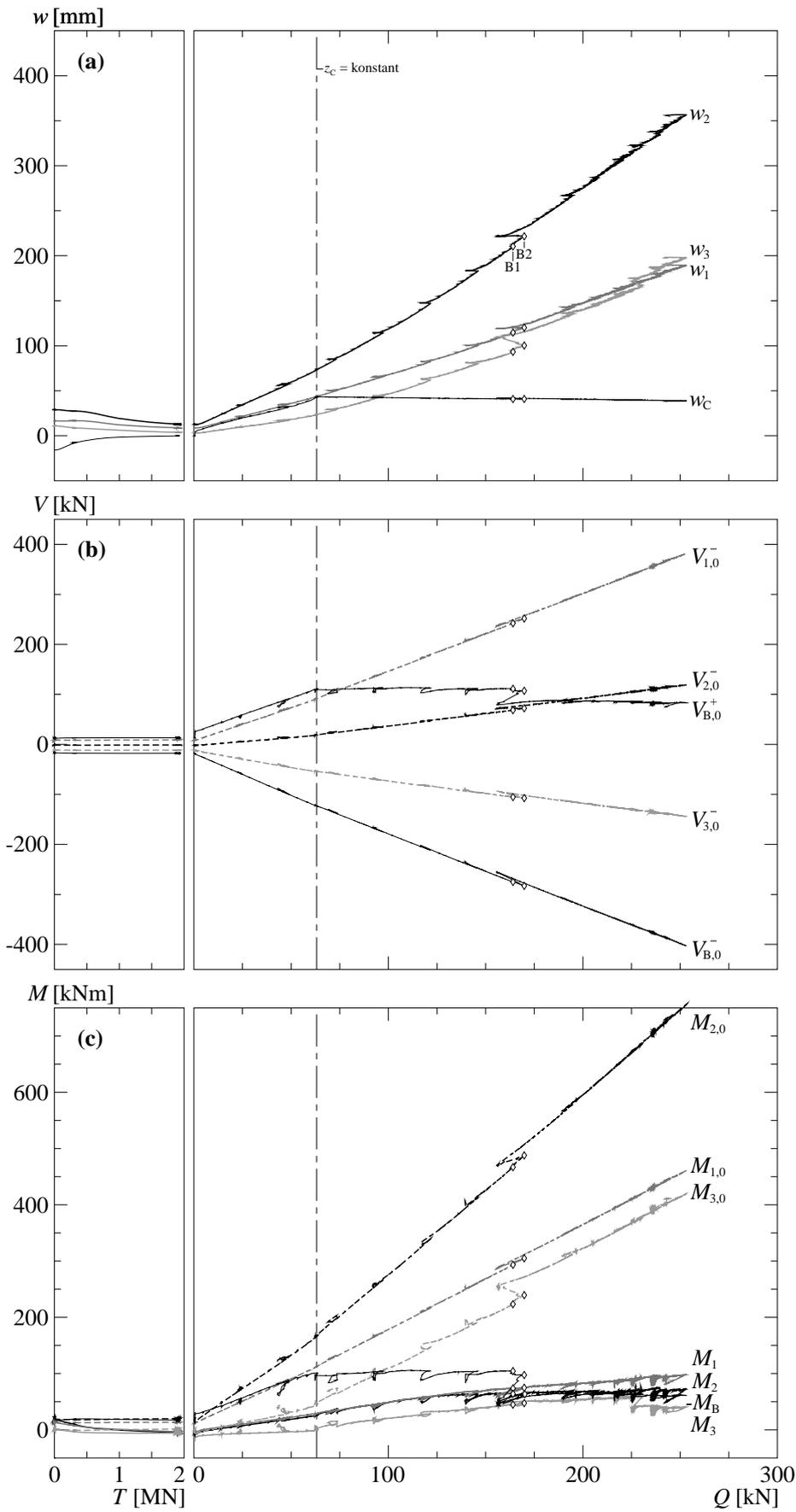


Bild 4.36 Resultate der ständigen Messungen des Versuchs T3:
 (a) Durchbiegungen; (b) Querkräfte; (c) Momente.

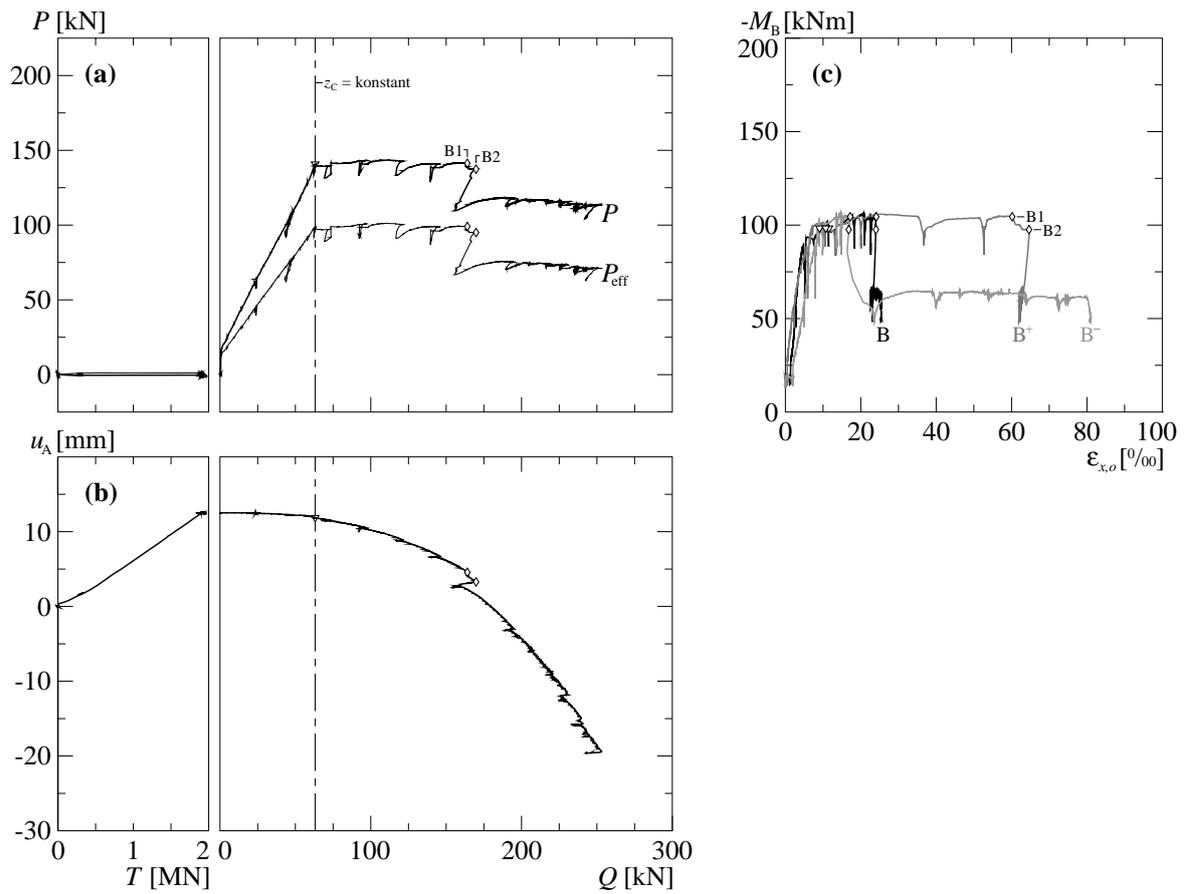


Bild 4.37 Resultate der ständigen Messungen des Versuchs T3: (a) Verhältnis P zu Q ; (b) Verschiebung des Lagers A; (c) Dehnungen an der Plattenoberseite in Längsrichtung über dem Zwischenaufleger B.

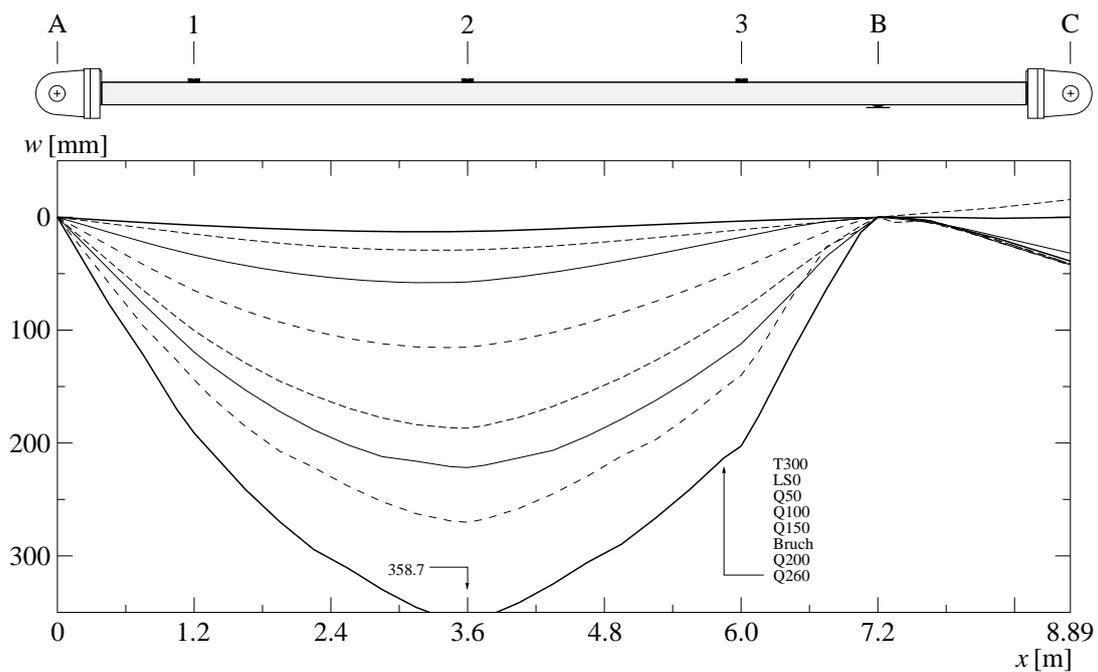


Bild 4.38 T3: Durchbiegungen

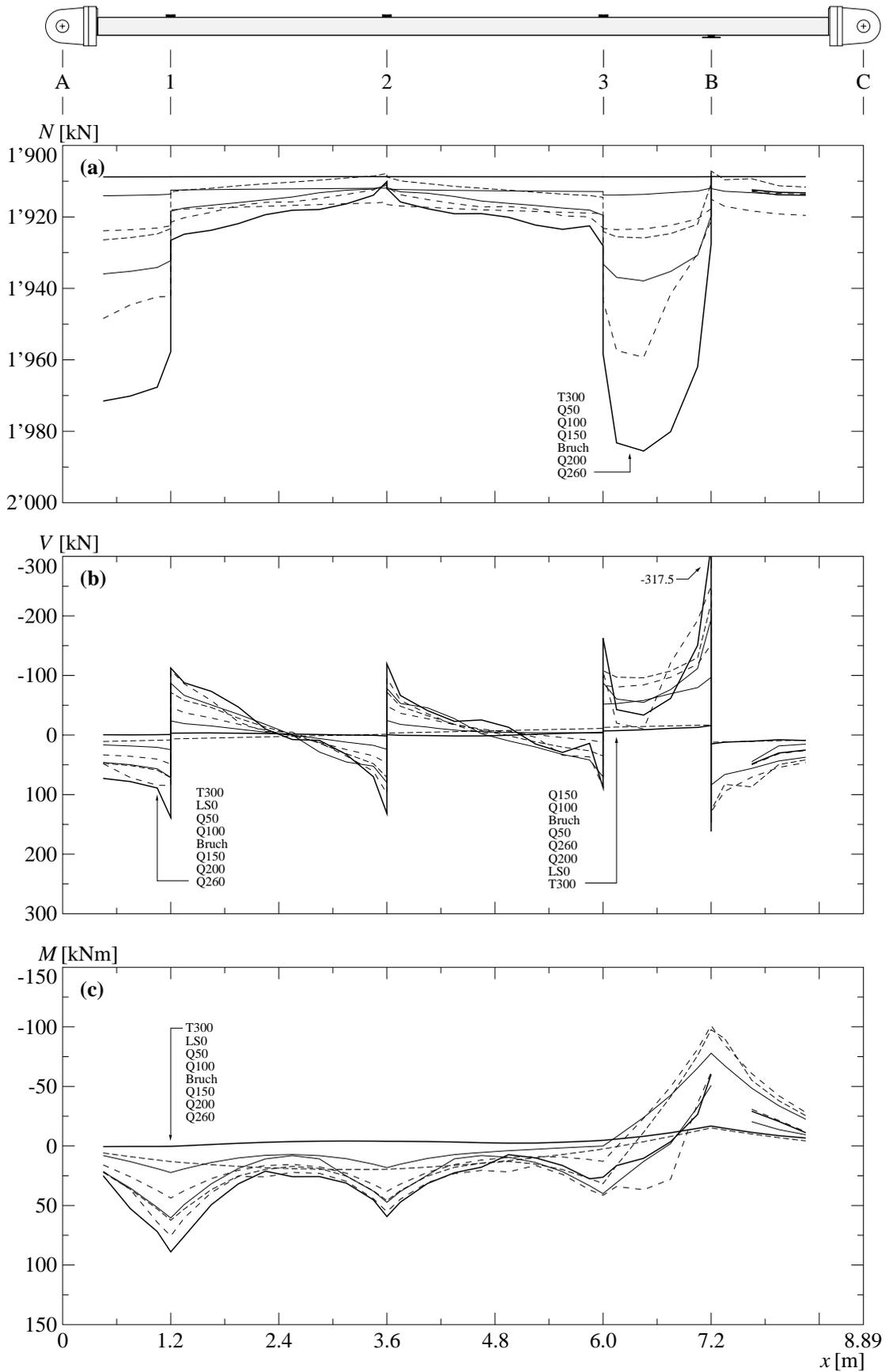


Bild 4.39 T3: (a) berechnete Normalkräfte; (b) berechnete Querkräfte; (c) berechnete Biegemomente.

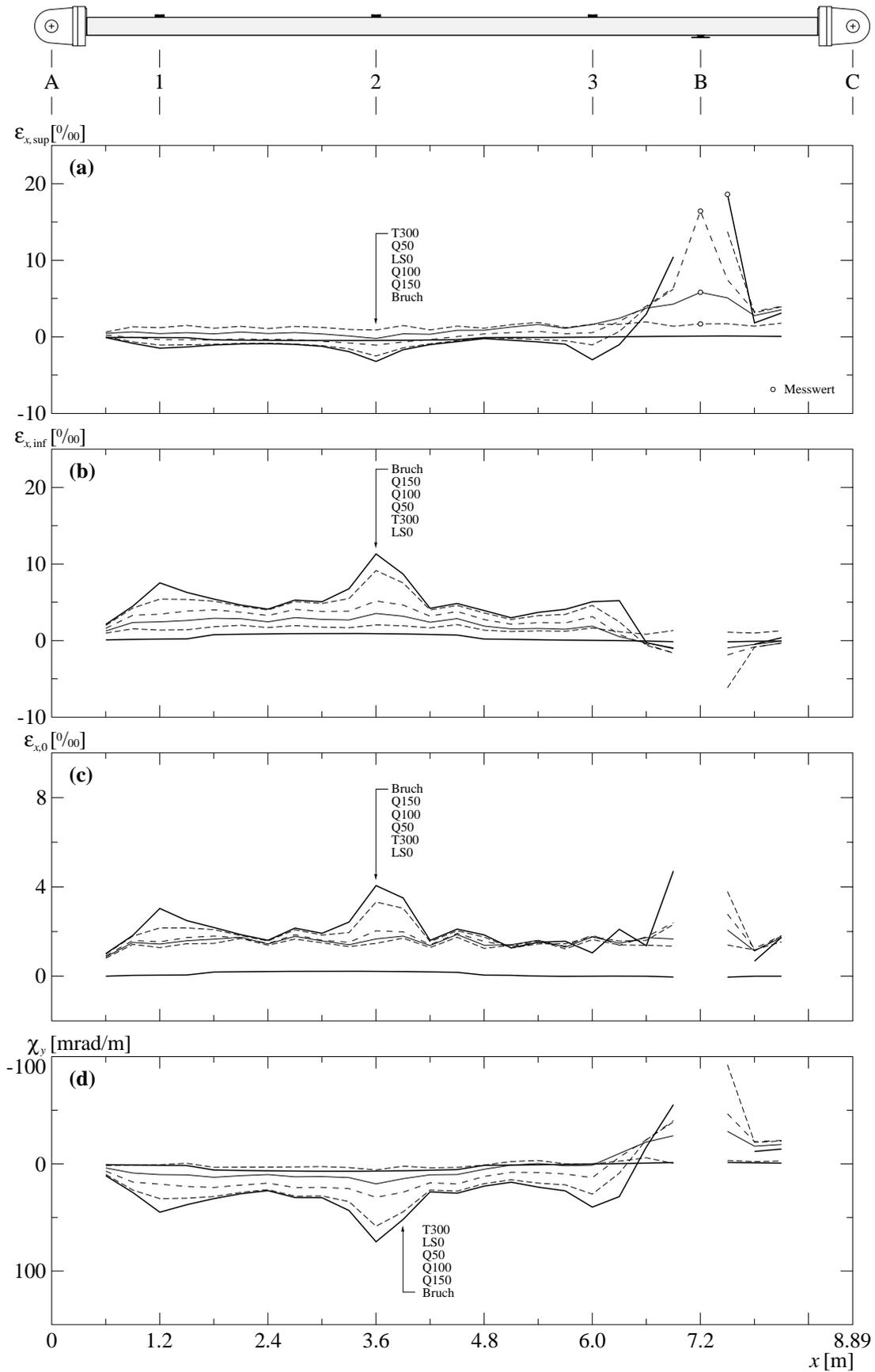


Bild 4.40 T3: (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Längsdehnungen unten; (c) berechnete Längsdehnungen der Schwerachse; (d) berechnete Krümmungen.

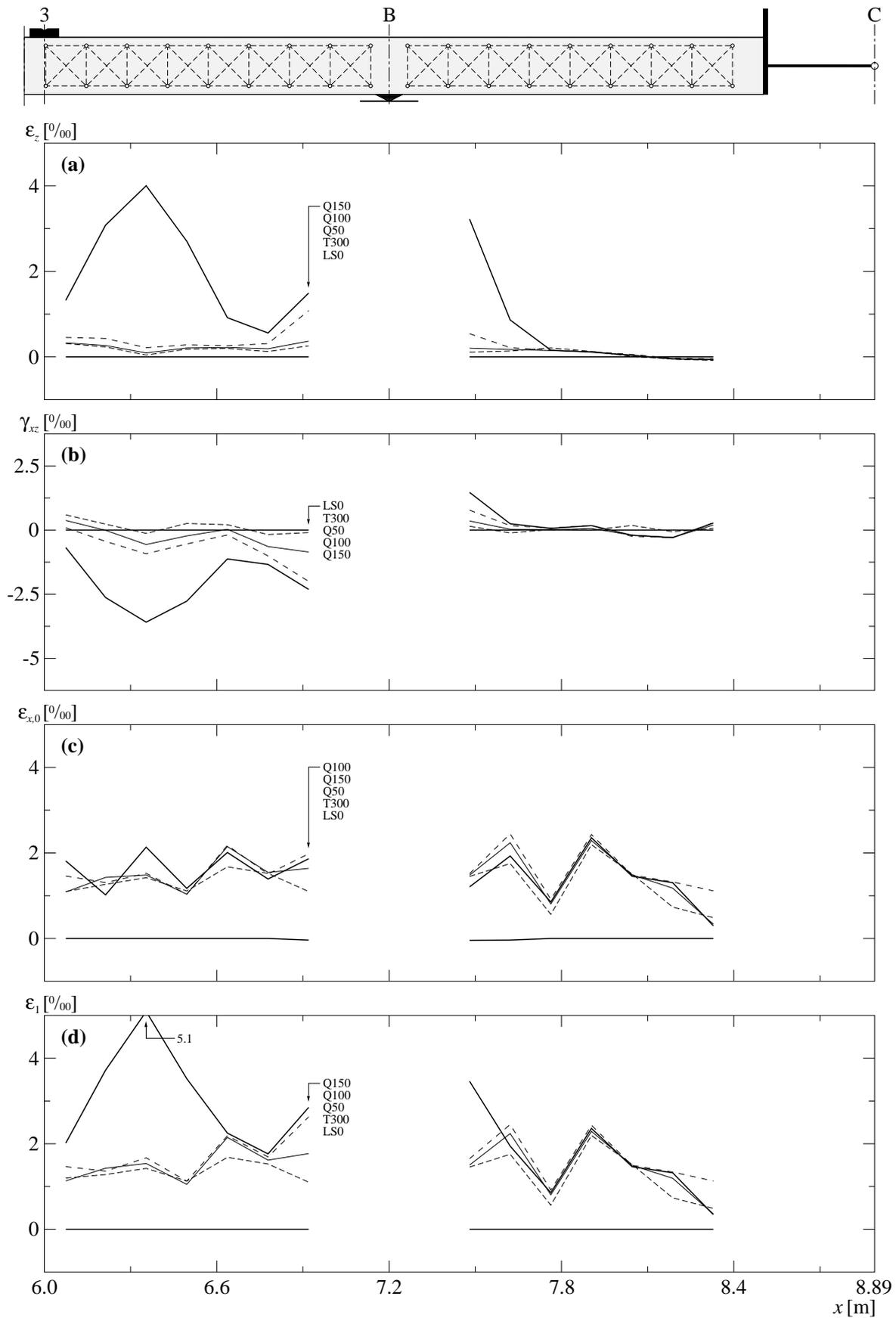


Bild 4.41 T3: (a) Mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (b) mittlere Schiebungen seitlich; (c) mittlere Längsdehnungen seitlich; (d) berechnete Hauptdehnungen seitlich.

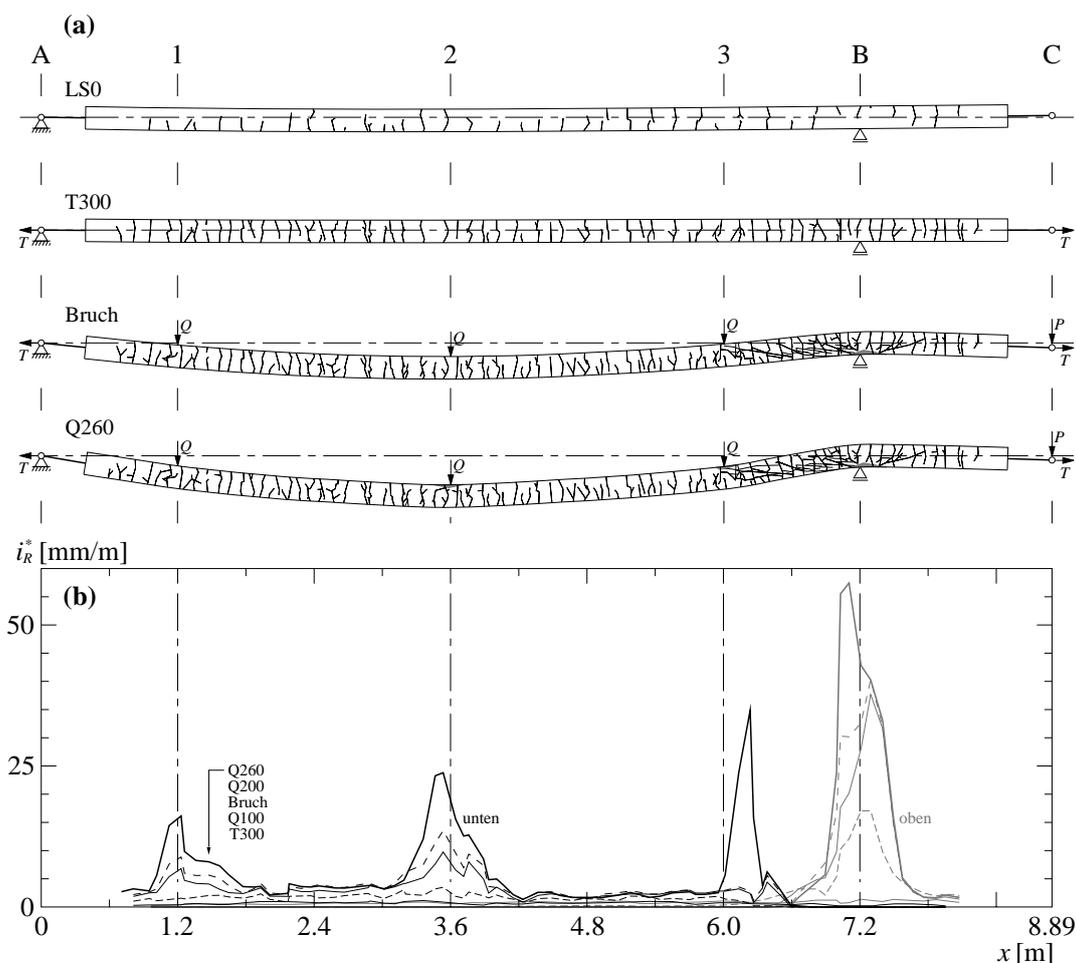


Bild 4.42 Risse bei Versuch T3: (a) Rissbilder ausgewählter Laststufen; (b) mittlere Rissintensität.

LS	Seite	Anzahl	Rissbreite			Rissabstand			
			t_R [mm]	$\sigma(t_R)$ [mm]	$t_{R,max}$ [mm]	S_R [mm]	$\sigma(S_R)$ [mm]	$S_{R,min}$ [mm]	$S_{R,max}$ [mm]
0	oben	18 ¹⁾	0.03	0.00	0.05	220	77	85	440
	unten	35 ²⁾	0.03	0.00	0.05	177	55	20	255
1 T300	oben	60	0.10	0.06	0.25	126	47	30	235
	unten	57	0.08	0.06	0.25	129	53	20	255
3 Q50	oben	52	0.15	0.15	0.55	128	50	35	235
	unten	50	0.13	0.08	0.40	116	57	15	255
5 Q100	oben	33	0.33	0.50	2.0	130	52	35	235
	unten	58	0.17	0.11	0.5	99	43	10	210
7 Q150	oben	20	0.75	1.02	4.0	97	31	35	165
	unten	62	0.25	0.22	1.3	92	38	10	210
8 Bruch	oben	18	0.96	1.23	4.0	96	32	35	165
	unten	63	0.30	0.27	1.4	91	38	10	210
9 Q200	oben	18	1.12	1.35	4.5	96	32	35	165
	unten	65	0.36	0.32	1.6	91	38	10	210
10 Q260	oben	18	1.40	1.80	5.0	96	32	35	165
	unten	66	0.53	0.72	4.0	91	38	10	210

Tabelle 4.8 T3: Risscharakteristika für ausgewählte Laststufen.
^{1), 2)} Rissabstandswerte basierend auf 16 bzw. 34 Rissen.

4.6.4 Bilder

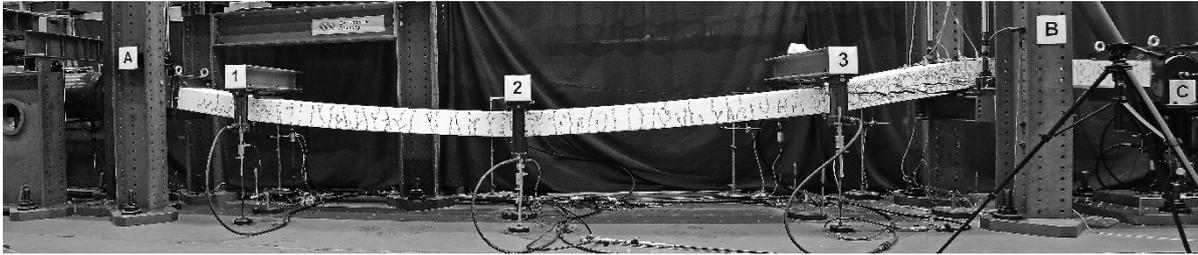


Bild 4.43 Versuchskörper T3 bei maximaler Verformung (LS10).

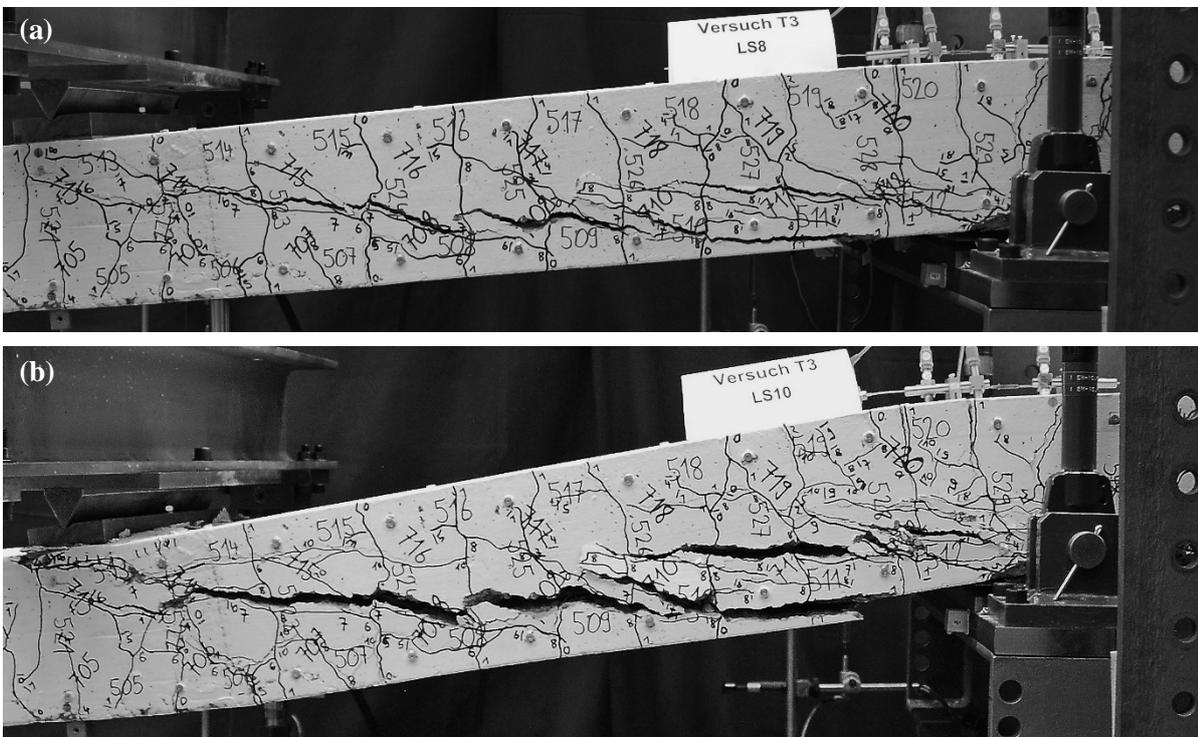
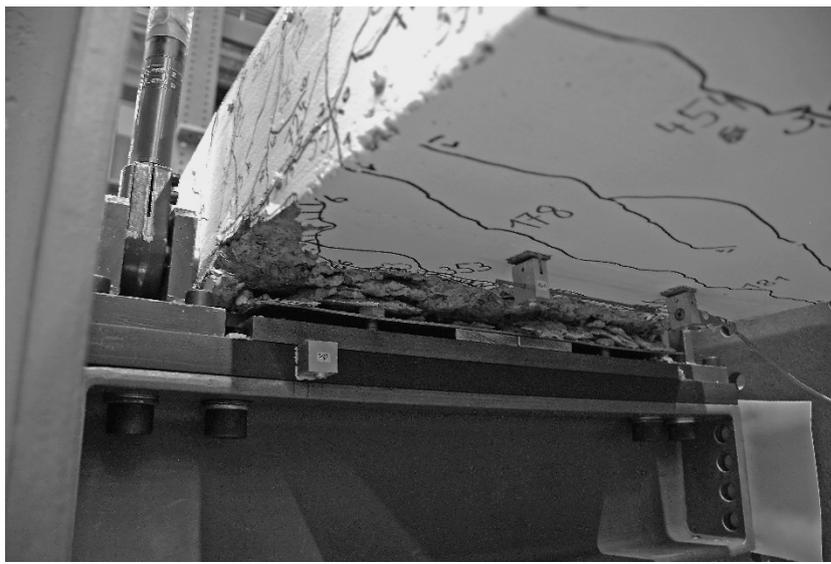
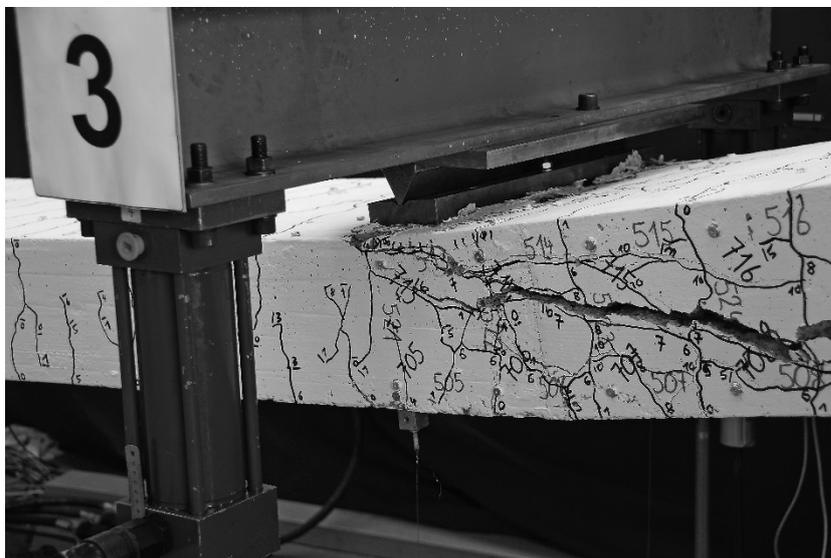


Bild 4.44 Bereich Joch 3 - Zwischenauflager B des Versuchskörpers T3: (a) unmittelbar nach dem Bruch (LS8); (b) bei Maximallast (LS10).

(a)



(b)



(c)

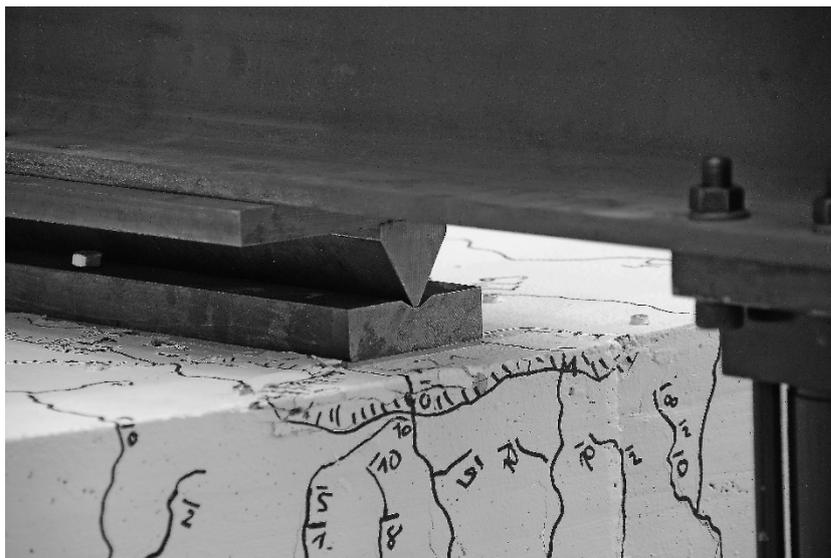


Bild 4.45 Bruchzonen des Versuchskörpers T3; (a) C-seitig des Zwischenauflagers B bei LS8; (b) bei Joch 3 bei LS10; (c) bei Joch 2 bei LS10.

4.7 Versuch T4

Der Versuch T4 war als Vergleichsversuch zu den Versuchen T1 und T5 konzipiert. Der Versuch T4 sollte den Einfluss einer kräftigen Querkraftbewehrung auf das Trag- und Verformungsverhalten aufzeigen. Zwei doppelschnittige Bügel $\varnothing 8$ mm waren in einem Abstand von 100 mm angeordnet. Der geometrische Querbewehrungsgehalt betrug $\rho_z = 0.34 \%$.

4.7.1 Versuchsablauf

Der vorbereitete Versuchskörper wurde am 29. Mai 2012 in die Versuchsanlage eingebaut. Am Vormittag des 4. Juni wurden die temporären Halterungen und Unterstützungen entfernt, zwei Nullmessungen durchgeführt und am Nachmittag mit dem Aufbringen der Längszugkraft begonnen. Während der Laststeigerung fiel die Längszugkraft bei $T \approx 200$ kN plötzlich auf $T = 0$ ab. Als Ursache wurde ein Dichtungsdefekt im Hydraulikzylinder eruiert, und der Versuch musste abgebrochen werden. Der Versuchskörper wurde erneut temporär unterstützt, der Hydraulikzylinder ausgebaut und ein anderer, baugleicher Zylinder eingebaut.

Am Nachmittag des 11. Juni wurden die temporären Halterungen und Unterstützungen entfernt und die beiden manuellen Nullmessungen wiederholt. Am 12. Juni, dem ersten Versuchstag, wurde um 08:00 Uhr die kontinuierliche Messung gestartet und nach dem Nullstellen aller Kanäle mit dem Aufbringen der Längszugkraft begonnen. Während der Laststeigerung fiel die Längszugkraft plötzlich und von einem Pfeifen begleitet von 416 kN auf 7 kN ab, um sich anschliessend wieder zu erholen (Ereignis 1 in Bild 4.46). Die Ursache war das Reißen einer Membran eines der beiden Ausgleichsgefässe am Hydraulikzylinder. Zum erneuten Druckaufbau musste dieses Ausgleichsgefäss zuerst mit Hydrauliköl gefüllt werden, was einige Minuten dauerte. Beim Kontrollrundgang nach Erreichen einer Längszugkraft von 1.91 MN wurde festgestellt, dass das Kalottenlager an der Zugstange F13 am Joch 2 auf die Unterseite des Aufspannbodens gespannt war. Darauf wurde die Mutter an der Zugstange soweit gelöst, bis das Kalottenlager wieder frei war (Ereignis 2) und anschliessend eine vollständige Messung durchgeführt (LS1 / T300). Danach wurden die Längszugkraft nachjustiert und die Querbewehrungen P und Q auf eine erste Stufe gesteigert (LS2 / Q50). Um 15:30 Uhr war die Dokumentation der Laststufe abgeschlossen. Der Versuchskörper blieb über Nacht belastet.

Am 13. Juni um 07:45 Uhr wurden die Querbewehrungen P und Q auf die nächste Laststufe gesteigert (LS3 / Q75). Während dieser Laststufe wurde ein Abfallen des Widerstands beim Betätigen der P -Handpumpe festgestellt. Die Absperrventile zu den P -Zylindern wurden geschlossen und damit die Kolbenposition dieser Zylinder fixiert (Linie " $z_c = \text{konstant}$ "). Fortan wurde nur noch Q gesteigert. Nach einer vollständigen Messung wurde die Querbewehrung Q im Feld in vier Stufen weiter gesteigert (LS4 / Q100, LS5 / Q150, LS6 / Q200, LS7 / Q250). Zuletzt wurde Q nochmals leicht erhöht, bis die Kapazität der Versuchsanlage erschöpft war (LS8 / Q260). Bei dieser letzten Laststufe wurden nur noch die Stabdeformationsmessungen durchgeführt. Nach Beendigung der Dokumentation wurde festgestellt, dass das Konstantdruck-Aggregat erheblich leckte, und es wurde beschlossen, den Versuchskörper umgehend zu entlasten. Dazu wurde zuerst die Querbewehrung Q im Feld reduziert, bis sie kleiner war als die Bruchlast im Versuch T0. Anschliessend wurde, bei geschlossenen Absperrventilen in den Q - und P -Hydrauliksystemen, die Längszugkraft abgelassen. Am 14. Juni um 01:00 Uhr waren die Entlastung beendet und die Arbeiten abgeschlossen.

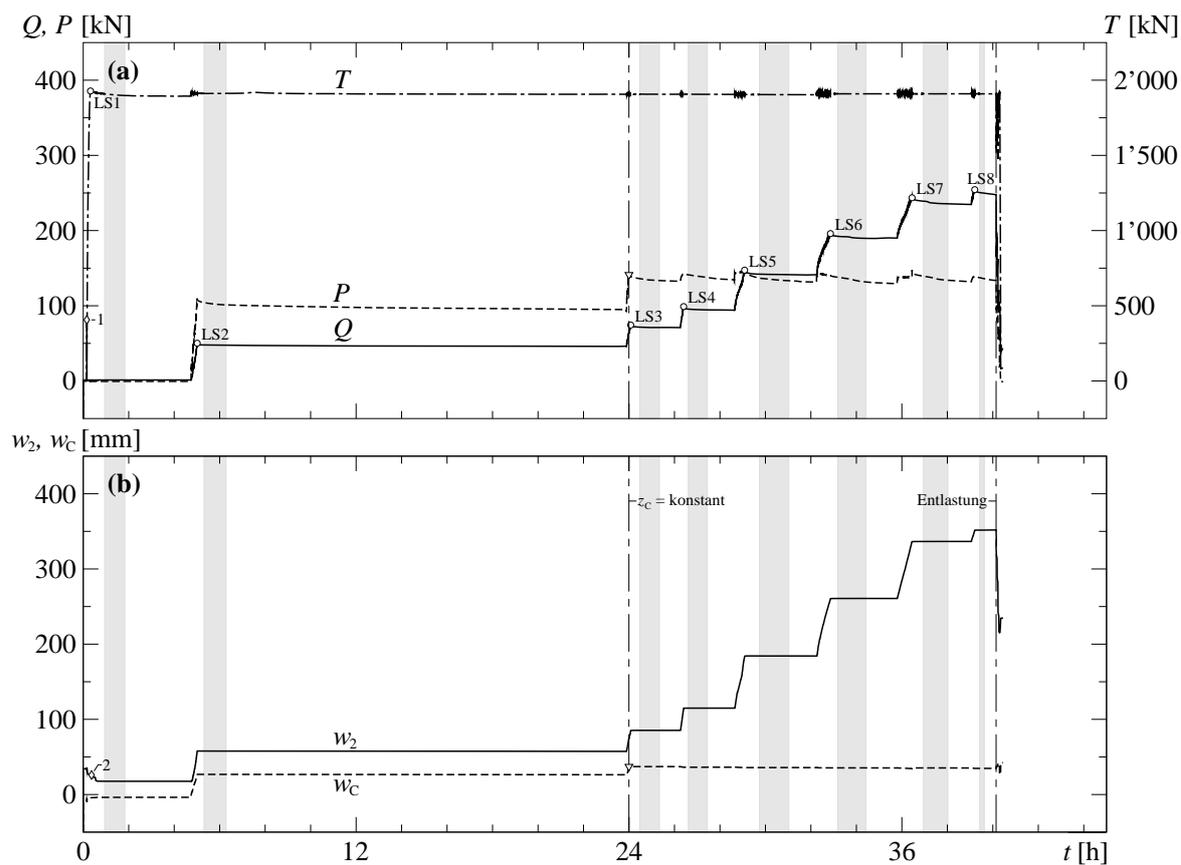


Bild 4.46 Ablauf des Versuchs T4: (a) Zeitverlauf der aufgebrauchten Lasten T , Q und P ; (b) Zeitverlauf der Durchbiegungen w_2 und w_C . Graue Bereiche markieren die Messphasen. Rauten mit Zahlen markieren Ereignisse, welche im Text beschrieben sind.

Ab LS6 konnten aufgrund der grossen Dehnungen die Deformetermessungen auf der Oberseite des Versuchskörpers über dem Zwischenauflager B nicht mehr durchgeführt werden. Für LS7 waren zudem die Deformetermessungen an der Unterseite des Versuchskörpers unmittelbar C-seitig des Zwischenauflagers B aufgrund von Betonabplatzungen sowie unter dem Belastungsjoch 2 aufgrund grosser Dehnungen nicht mehr durchführbar. Für diese Laststufe konnten zudem die vertikalen Deformetermessungen auf den Seitenflächen des Versuchskörpers unmittelbar C-seitig des Zwischenauflagers B nicht mehr durchgeführt werden.

4.7.2 Beobachtungen

Während der Laststeigerung zu LS4 begann sich bei $Q = 94$ kN eine Biegedruckbruchzone C-seitig des Zwischenauflagers B auszubilden. Während der Laststeigerung zu LS5 fielen bei $Q = 130$ kN erste kleine Betonteile aus der Bruchzone zu Boden. Die Querdehnungen zeigen, dass die Biegedruckbruchzone bei einer Querbelastung von $Q = 116$ kN in der Achse der Messung v_9 und bei $Q = 124$ kN auf der Achse der Messung v_8 , also A-seitig des Lagers, ausgebildet war. Bei der weiteren Laststeigerung lösten sich immer wieder weitere kleine Teile aus dieser Zone, siehe Bild 4.56(c). Während der Laststeigerung zu LS7 konnte bei $Q = 215$ kN eine Biegedruckbruchzone unter Joch 2 (Bild 4.56(b)) und bei $Q = 220$ kN eine Biegedruckzone A-seitig des Jochs 3 beobachtet werden. Bei der Dokumentation von Laststufe LS8 / Q260 wurde C-seitig des Jochs 1 ebenfalls eine Druckbruchzone festgestellt, siehe Bild 4.56(a).

Bei Versuchsbeginn waren Risse unten im Feld und oben über dem Zwischenauflager vorhanden. Diese Risse standen senkrecht zur Versuchskörperachse. Durch das Aufbringen der Zugkraft entstanden Trennrisse in regelmässigem Abstand über die ganze Länge des Versuchskörpers. Durch die Querbelastung änderten sich die Rissbreiten, und einige Risse wurden so wieder geschlossen. Bis zur Laststufe LS4 / Q100 änderte sich das Rissbild nur geringfügig, und es entstanden nur vereinzelt neue Risse. Mit zunehmender Belastung bildeten sich im Bereich 3 - B schräge, gegen A ansteigende Risse aus. Beginn und Ende dieser Risse waren häufig in der Seitenfläche und erstreckten sich nicht bis an die Ober- bzw. Unterseite des Versuchskörpers. Die mittlere Neigung dieser Risse lag zwischen 15° und 45° . Die Schrägrisse waren bei LS7 / Q250 bis 0.4 mm weit geöffnet. Im Bereich B - C bildeten sich ab LS4 / Q100 ebenfalls Schrägrisse. Diese stiegen von der Druckbruchzone bei B gegen C hin an mit einer mittleren Neigung zwischen 5° und 65° und waren bei LS7 / Q250 bis 2 mm weit geöffnet.

4.7.3 Versuchsergebnisse

Tabelle 4.9 gibt eine Übersicht über die Belastungs- und Verformungsgeschichte des Versuchs T4. Die folgenden Bilder und Tabelle 4.10 zeigen Auswertungen der kontinuierlichen Messungen, der Deformiermessungen und der Rissaufnahmen.

LS	Bezeichnung	Lasten			Verschiebungen			Schnittgrößen			Zeit	
		T [MN]	Q [kN]	P [kN]	u_A [mm]	w_2 [mm]	w_C [mm]	$V_{B,0}^-$ [kN]	$V_{B,0}^+$ [kN]	M_B [kNm]	t [s]	t [h:min]
0	Versuchsbeginn	0.00	0	0	0.0	34	-9	-17	12	-15	0	0:00
1 T300	Belastungsbeginn	0.00	0	0	0.0	34	-9	-17	12	-15	451	0:08
	Belastungsende	1.92	0	-1	12.0	26	-4	-19	16	-30	1147	0:19
	Messbeginn	1.91	0	-1	12.2	18	-4	-19	16	-28	3397	0:57
2 Q50	Belastungsbeginn	1.89	0	-1	12.2	18	-4	-19	16	-28	17001	4:43
	Belastungsende	1.91	49	110	12.2	58	27	-102	95	-104	18044	5:01
	Messbeginn	1.91	47	104	12.2	58	27	-98	89	-95	19126	5:19
	Messende	1.91	46	101	12.2	58	27	-96	86	-90	22607	6:17
3 Q75	Belastungsbeginn	1.91	45	95	12.2	57	26	-93	81	-81	85997	23:53
	$z_C = \text{konstant}$	1.91	63	142	11.7	75	37	-126	117	-121	86392	23:60
	Belastungsende	1.91	73	139	11.4	85	37	-140	114	-116	86672	24:5
	Messbeginn	1.91	70	136	11.4	85	37	-135	111	-111	88097	24:28
4 Q100	Belastungsbeginn	1.91	70	132	11.4	85	37	-134	107	-105	94544	26:16
	Belastungsende	1.91	98	142	10.5	115	36	-178	117	-124	95055	26:24
	Messbeginn	1.91	94	141	10.5	115	36	-173	116	-122	95792	26:37
5 Q150	Belastungsbeginn	1.91	93	135	10.5	115	36	-169	110	-111	103070	28:38
	Belastungsende	1.91	146	144	7.0	184	36	-252	119	-127	104706	29:05
	Messbeginn	1.91	141	137	6.9	184	36	-242	111	-115	107057	29:44
6 Q200	Belastungsbeginn	1.90	140	132	6.9	184	36	-239	106	-106	116042	32:14
	Belastungsende	1.91	195	140	0.1	260	35	-323	115	-120	118295	32:52
	Messbeginn	1.91	191	138	0.0	261	35	-317	113	-117	119445	33:11
7 Q250	Belastungsbeginn	1.91	189	129	0.0	261	35	-312	104	-103	128854	35:48
	Belastungsende	1.91	242	147	-9.9	336	35	-397	122	-133	131213	36:27
	Messbeginn	1.91	238	139	-10.1	337	35	-388	113	-119	133031	36:57
8 Q260	Belastungsbeginn	1.91	233	132	-10.2	337	35	-380	106	-107	140603	39:03
	Belastungsende	1.91	253	139	-12.4	351	35	-411	113	-119	141138	39:12
	Messbeginn	1.91	249	137	-12.5	352	35	-405	111	-117	141937	39:26
9	Entlastungsbeginn	1.91	247	134	-12.7	352	35	-400	108	-110	144520	40:09
	Entlastungsende	0.20	15	-1	-2.4	235	42	-37	7	2	145317	40:22
	Versuchsende	0.21	16	-1	-2.5	235	42	-38	7	3	145630	40:27

Tabelle 4.9 Ablauf des Versuchs T4.

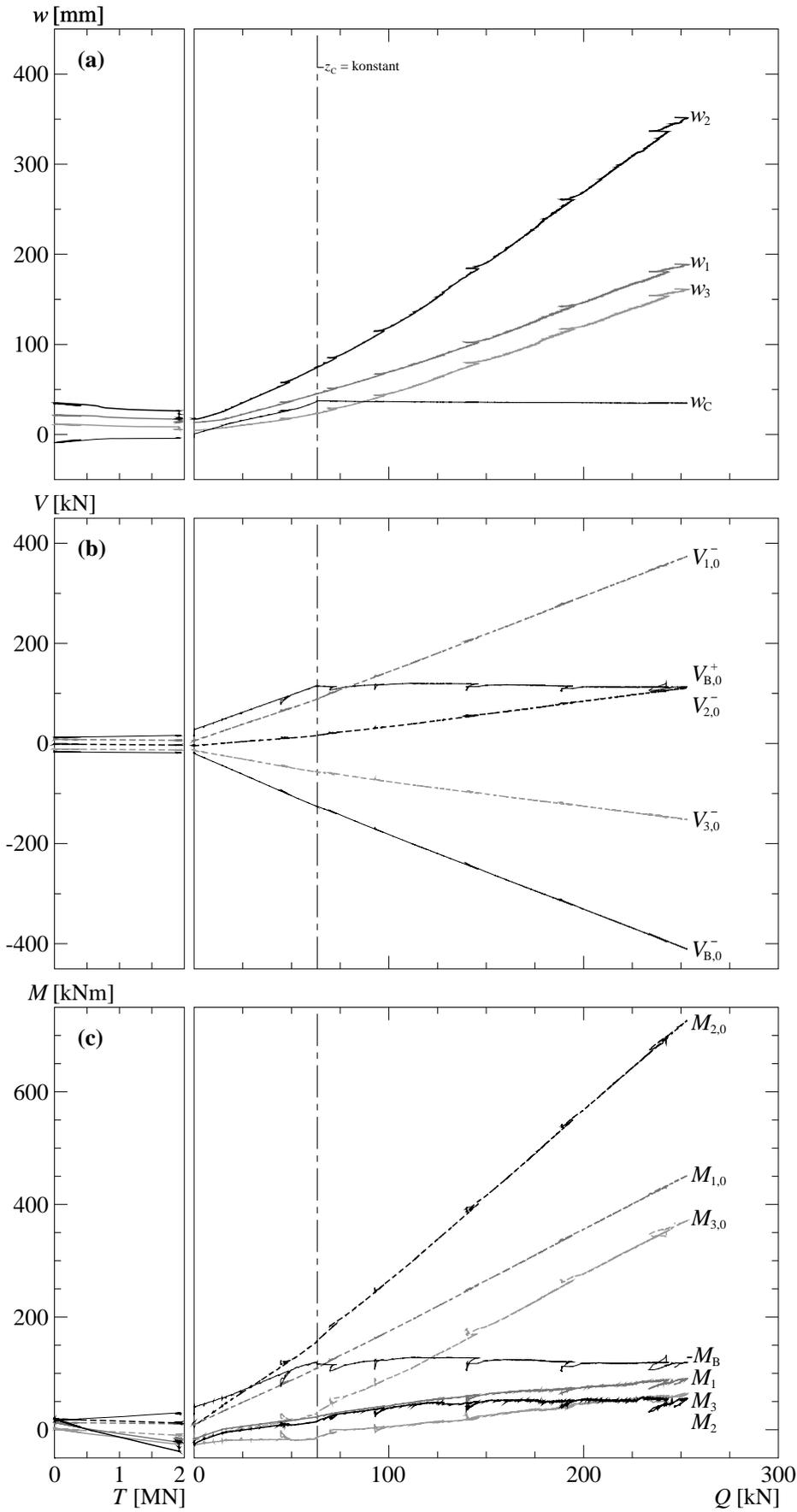


Bild 4.47 Ergebnisse der ständigen Messungen des Versuchs T4:
 (a) Durchbiegungen; (b) Querkräfte; (c) Momente.

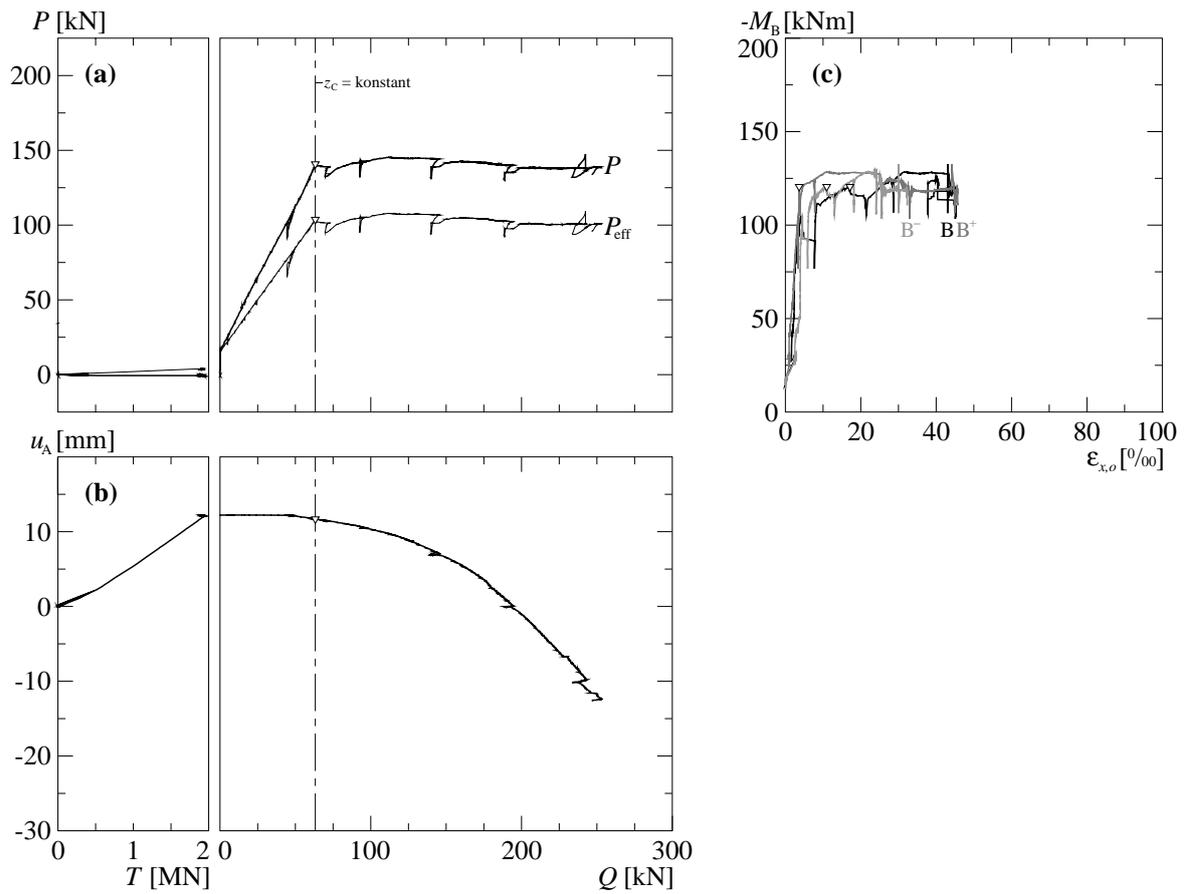


Bild 4.48 Resultate der ständigen Messungen des Versuchs T4: (a) Verhältnis P zu Q ; (b) Verschiebung des Lagers A; (c) Dehnungen an der Plattenoberseite in Längsrichtung über dem Zwischenaufleger B.

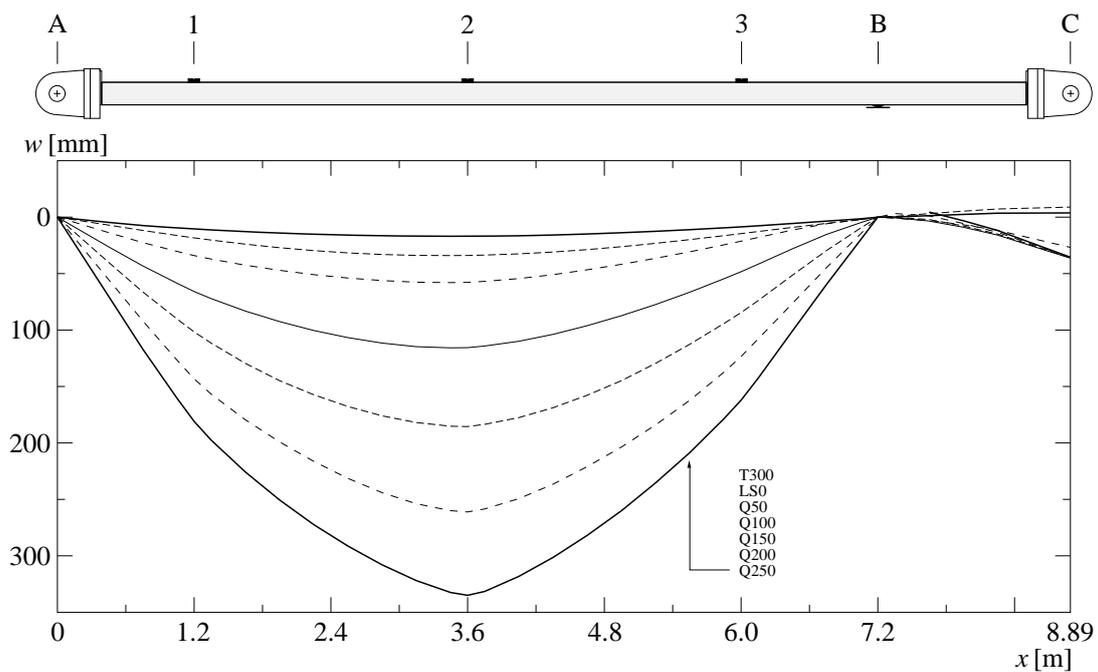


Bild 4.49 T4: Durchbiegungen

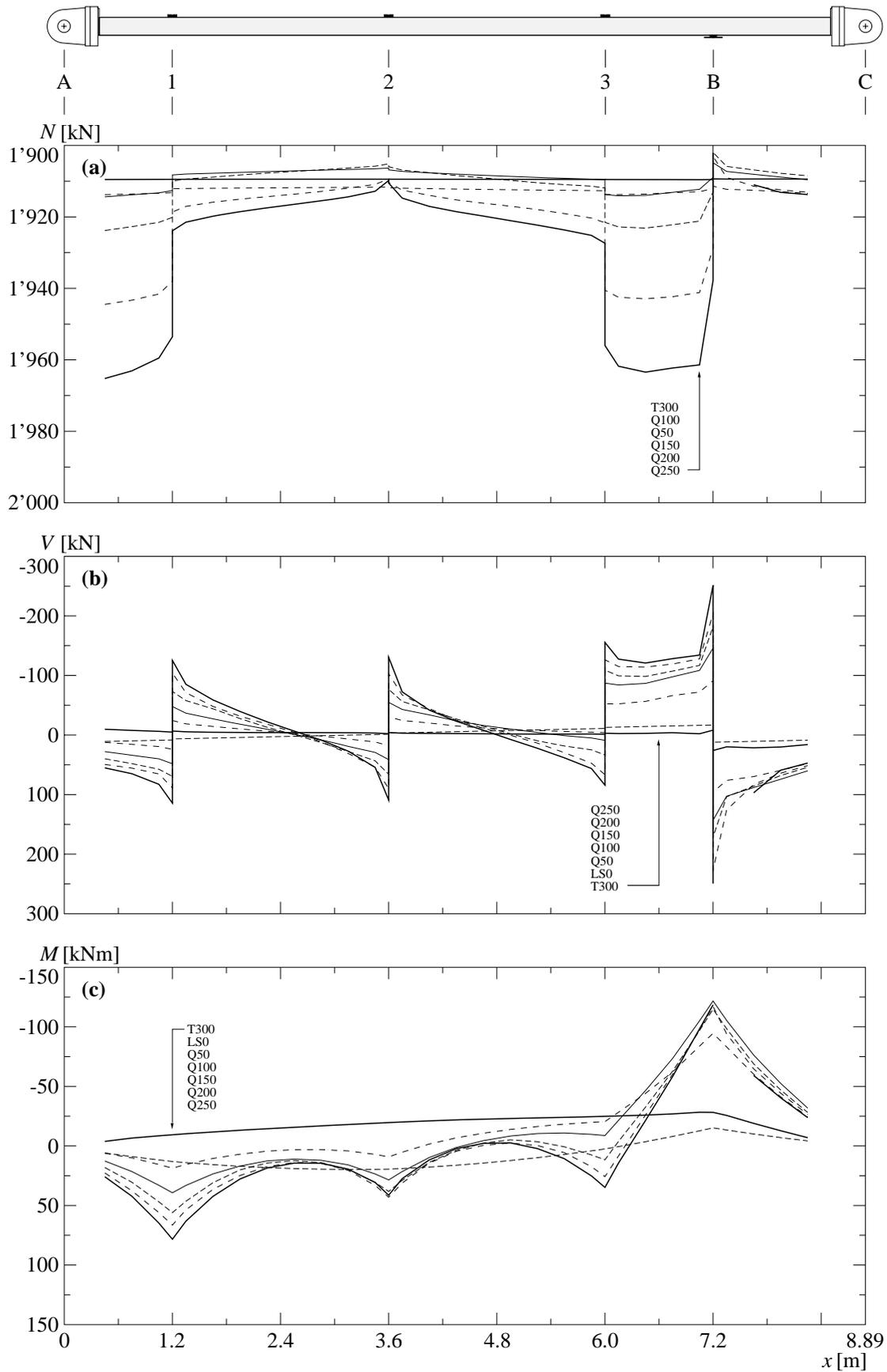


Bild 4.50 T4: (a) berechnete Normalkräfte; (b) berechnete Querkkräfte; (c) berechnete Biegemomente.

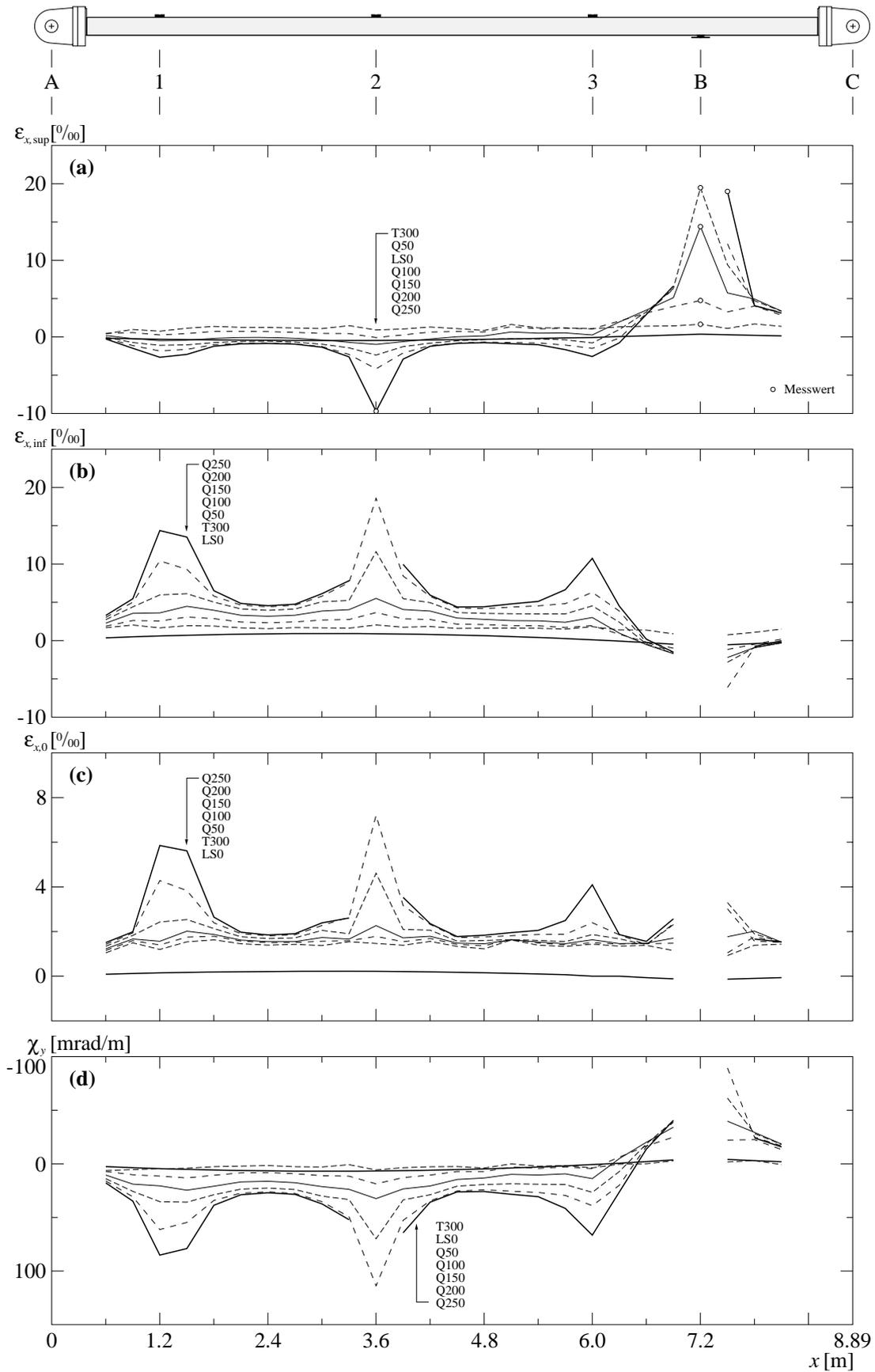


Bild 4.51 T4: (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Längsdehnungen unten; (c) berechnete Längsdehnungen der Schwerachse; (d) berechnete Krümmungen.

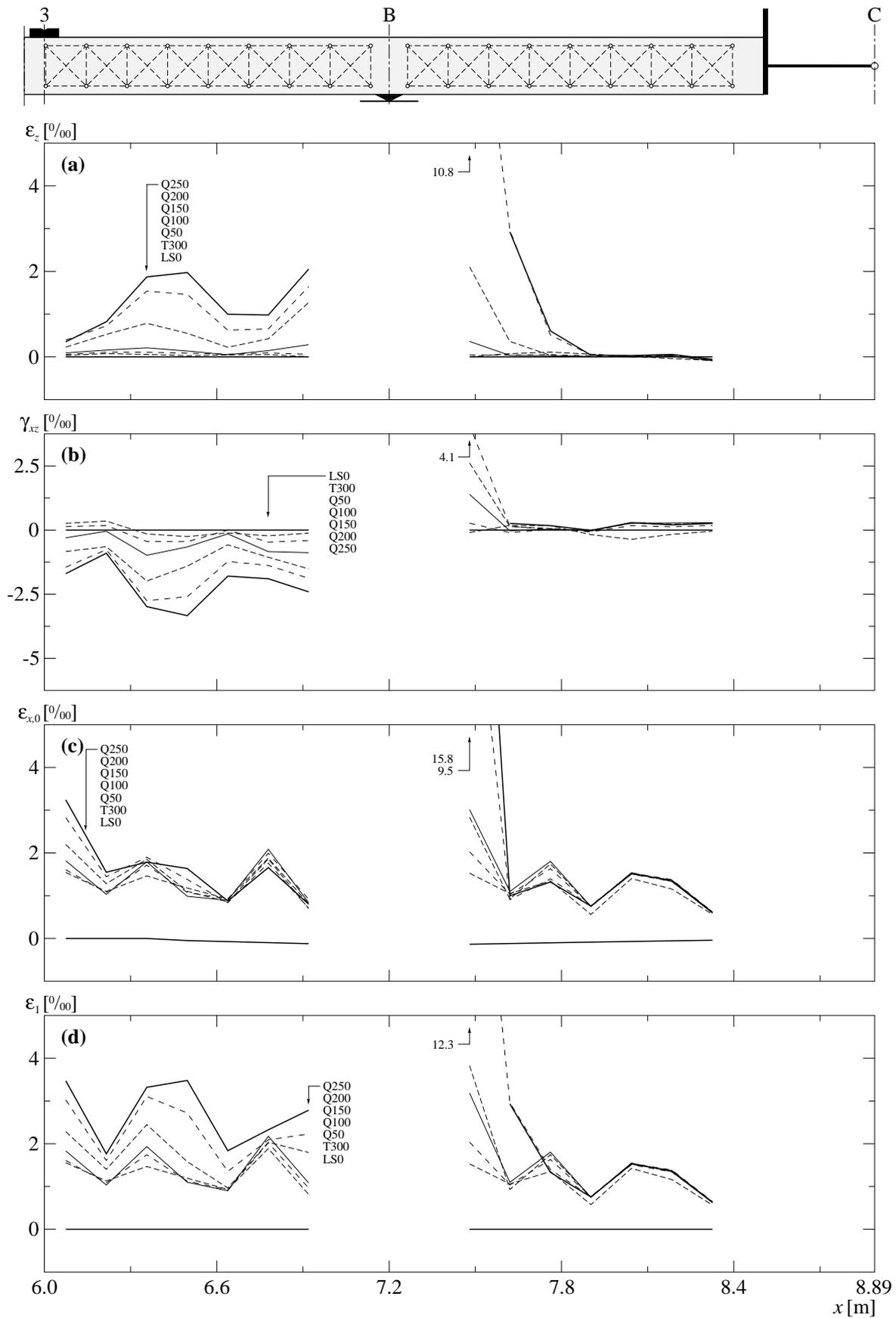


Bild 4.52 T4: (a) Mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (b) mittlere Schiebungen seitlich; (c) mittlere Längsdehnungen seitlich; (d) berechnete Hauptdehnungen seitlich.

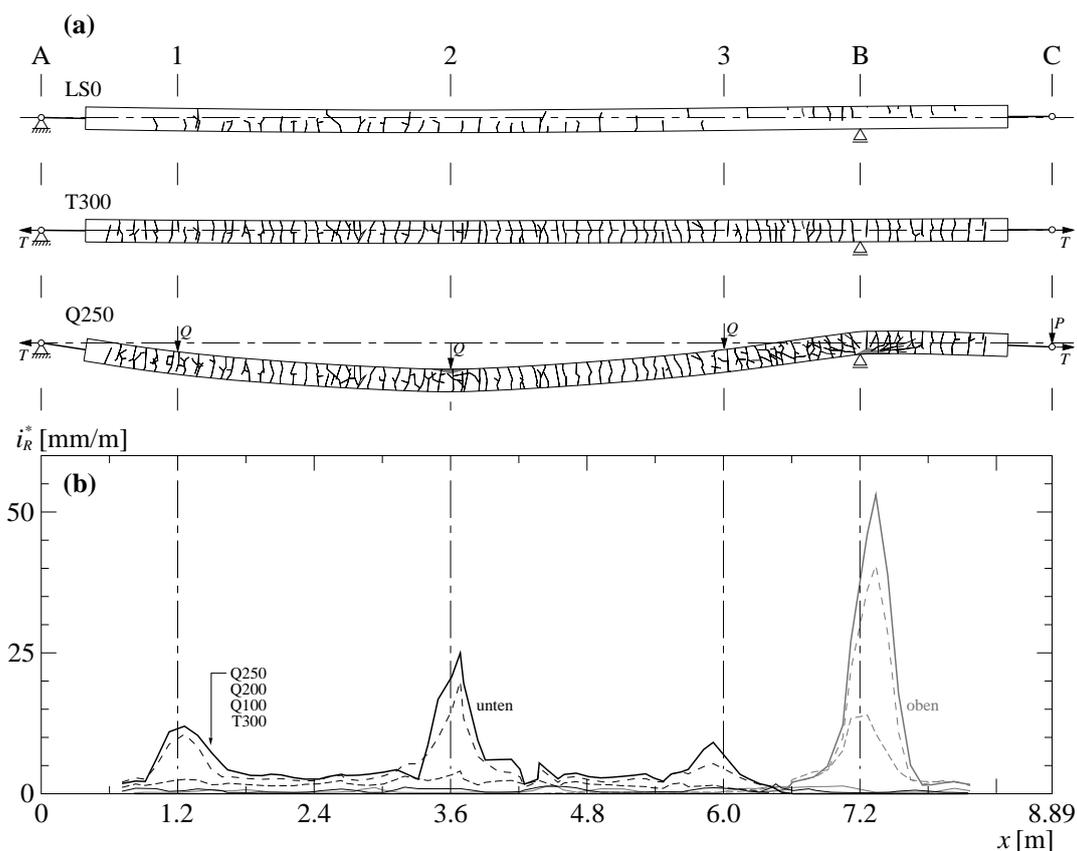


Bild 4.53 Risse bei Versuch T4: (a) Rissbilder ausgewählter Laststufen; (b) mittlere Rissintensität.

LS	Seite	Anzahl	Rissbreite			Rissabstand			
			t_R [mm]	$\sigma(t_R)$ [mm]	$t_{R,max}$ [mm]	S_R [mm]	$\sigma(S_R)$ [mm]	$S_{R,min}$ [mm]	$S_{R,max}$ [mm]
0	oben	15 ¹⁾	0.03	0.00	0.05	147	48	70	230
	unten	31	0.03	0.02	0.10	161	67	50	355
1 T300	oben	74	0.05	0.02	0.20	104	32	35	190
	unten	69	0.06	0.03	0.25	112	41	40	235
2 Q50	oben	61	0.11	0.10	0.50	102	31	40	190
	unten	55	0.15	0.05	0.35	110	38	40	235
4 Q100	oben	39	0.25	0.48	1.80	102	31	40	190
	unten	60	0.17	0.10	0.50	97	30	30	200
5 Q150	oben	21	0.67	1.06	3.50	104	33	40	190
	unten	62	0.27	0.24	1.40	96	31	15	200
6 Q200	oben	18	0.99	1.42	4.50	113	29	70	190
	unten	61	0.39	0.40	2.00	96	31	15	200
7 Q250	oben	18	1.26	1.83	5.50	113	29	70	190
	unten	61	0.51	0.52	3.00	96	31	15	200

Tabelle 4.10 T4: Risscharakteristika für ausgewählte Laststufen.

¹⁾ Rissabstandswerte basierend auf 11 Rissen.

4.7.4 Bilder

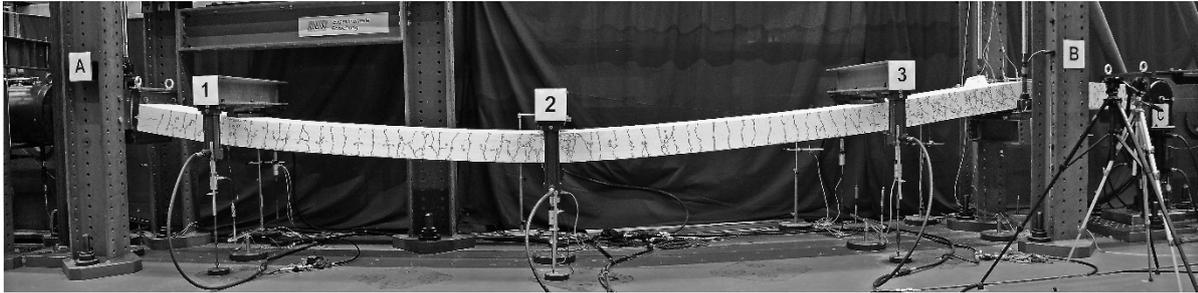


Bild 4.54 Versuchskörper T4 bei maximaler Verformung.

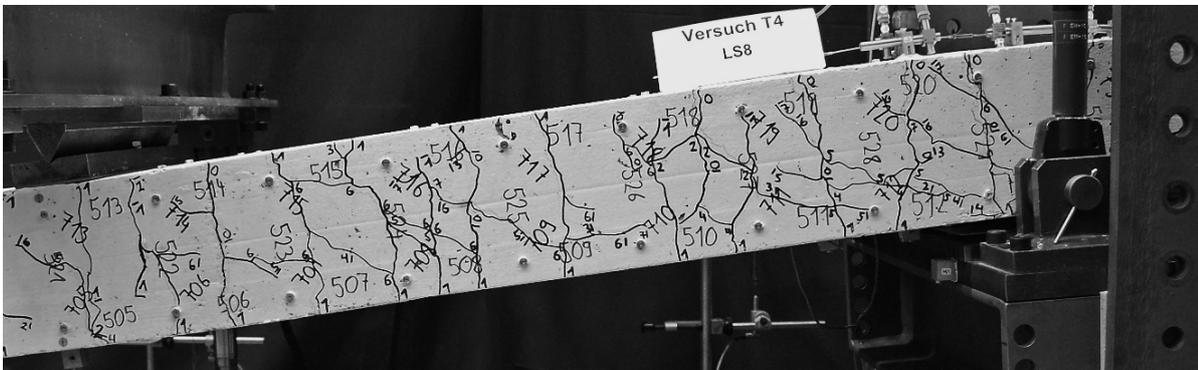


Bild 4.55 Bereich Joch 3 - Zwischenaufleger B des Versuchskörpers T4 bei maximaler Verformung.

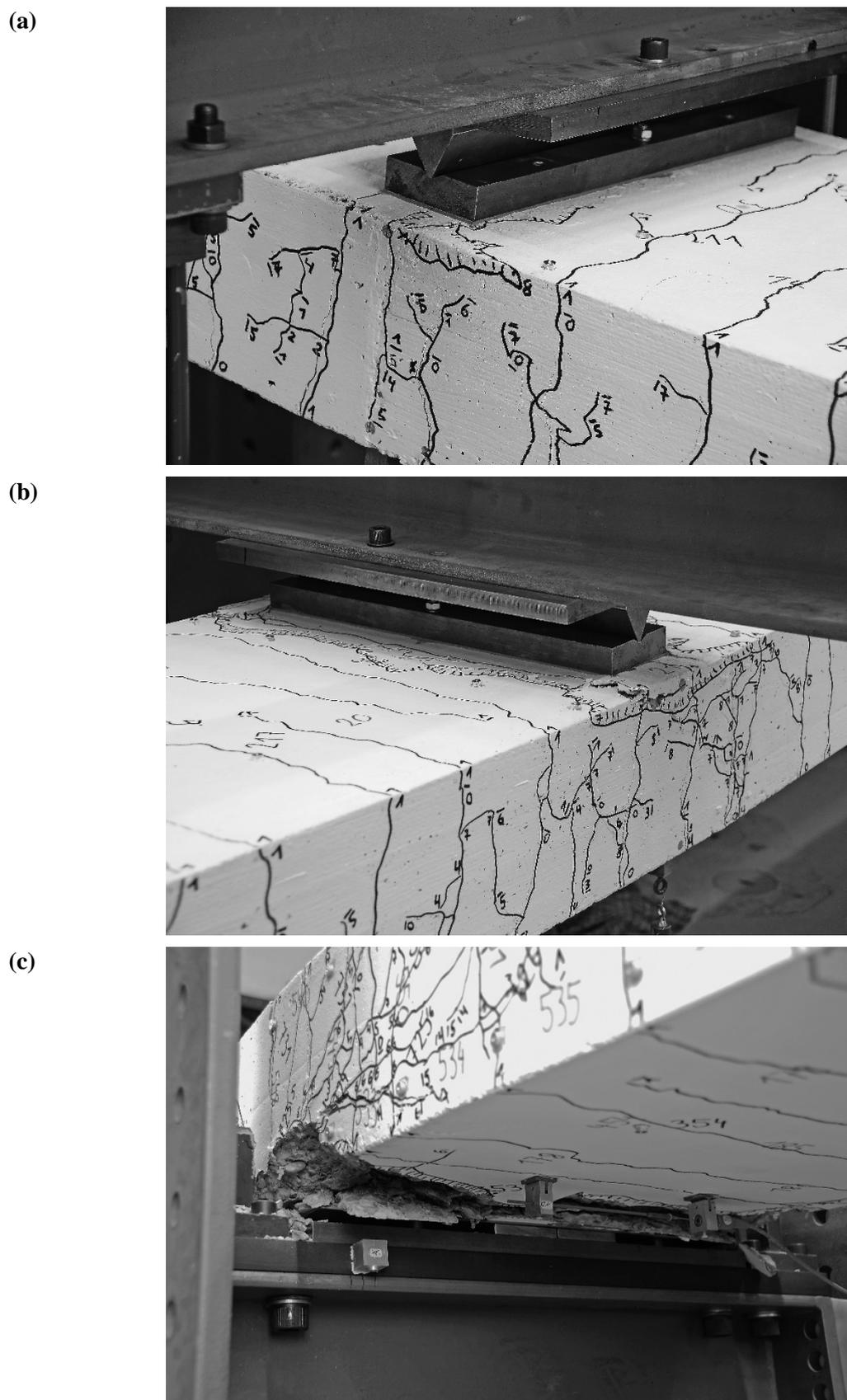


Bild 4.56 Bruchzonen des Versuchskörpers T4 vor dem Ausbau; (a) bei Joch 1; (b) bei Joch 2; (c) bei Zwischenaufleger B.

4.8 Versuch T5

Der Versuch T5 war als Vergleichsversuch zu den Versuchen T1 und T4 konzipiert. Der Versuch T5 sollte den Einfluss einer geringen Querkraftbewehrung auf das Trag- und Verformungsverhalten aufzeigen. Zwei doppelschnittige Bügel $\varnothing 8$ mm waren in einem Abstand von 200 mm angeordnet. Der geometrische Querkraftbewehrungsgehalt betrug $\rho_z = 0.17$ %.

4.8.1 Versuchsablauf

Der vorbereitete Versuchskörper wurde am 16. Juni 2012 in die Versuchsanlage eingebaut. Am Nachmittag des 18. Juni wurden die temporären Halterungen und Unterstützungen entfernt und die beiden manuellen Nullmessungen durchgeführt.

Am 19. Juni, dem ersten Versuchstag, wurde um 08:30 Uhr die kontinuierliche Messung gestartet und nach dem Nullstellen aller Kanäle mit dem Aufbringen der Längszugkraft von 1.91 MN begonnen (LS1 / T300). Während der Laststeigerung fiel die Längszugkraft plötzlich von 330 kN auf 100 kN ab, um sich anschliessend wieder zu erholen (Ereignis 1 in Bild 4.57). Die Ursache hierfür wurde nicht herausgefunden. Nach der Nachjustierung der Längszugkraft wurden die Querbewehrungen P und Q auf eine erste Stufe gesteigert (LS2 / Q50). Beim anschliessenden Kontrollrundgang wurde festgestellt, dass das Konstantdruck-Aggregat leicht leckte. Als Massnahme wurde während des restlichen Versuchsverlaufs periodisch Öl in das Aggregat nachgefüllt. Dieses Nachfüllen bewirkte jeweils kurzfristige Schwankungen der Längszugkraft von bis zu ± 100 kN. Um 16:30 Uhr war die Dokumentation der Laststufe abgeschlossen. Der Versuchskörper blieb über Nacht belastet.

Bei Wiederaufnahme der Arbeiten am 20. Juni um 07:30 Uhr wurde festgestellt, dass der Keilriemen des Konstantdruck-Aggregats gerissen war (aufgrund des T -Verlaufs kann davon ausgegangen werden, dass dies am 19. Juni um ca. 23:30 Uhr passiert war; Ereignis 2). Um den Keilriemen zu ersetzen, wurde als erstes der Hydraulikkreislauf zur Erzeugung der Längszugkraft durch das Schliessen der beiden Absperrventile unterbrochen. Anschliessend wurde der Druck im Konstantdruck-Aggregat abgelassen. Nach dem Ersetzen des Keilriemens wurden der Druck im Aggregat wieder aufgebaut und die beiden Absperrventile wieder geöffnet (Ereignis 3). Nach abgeschlossener Reparatur wurden die Querbewehrungen P und Q auf die nächste Laststufe gesteigert (LS3 / Q75). Während dieser Laststufe wurde ein Abfallen des Widerstands beim Betätigen der P -Handpumpe festgestellt. Die Absperrventile zu den P -Zylindern wurden geschlossen und damit die Kolbenposition dieser Zylinder fixiert (Linie " $z_c = \text{konstant}$ "). Fortan wurde nur noch Q gesteigert. Nach einer vollständigen Messung wurde die Querbewehrung Q im Feld in vier Stufen weiter gesteigert (LS4 / Q100, LS5 / Q150, LS6 / Q200, LS7 / Q250). Zuletzt wurde Q nochmals leicht erhöht, bis die Kapazität der Versuchsanlage erschöpft war (LS8 / Q260). Für diese und alle weiteren Laststufen wurden nur noch die Stabdeformermessungen durchgeführt. Kurz nach Erreichen der Maximallast riss der Keilriemen des Konstantdruck-Aggregats erneut (Ereignis 4). Er wurde jedoch erst nach der Entlastung (LS9) ersetzt. Bei der Entlastung wurde zuerst die Querbewehrung Q im Feld reduziert, bis sie kleiner war als die Bruchlast im Versuch T0. Eine Fehlmanipulation bewirkte, dass kurzzeitig auch ein Ölfluss in den P -Zylindern möglich war. Anschliessend wurde, bei geschlossenen Absperrventilen in den Q - und P -Hydrauliksystemen, die Längszugkraft abgelassen. Um 23:00 war die Dokumentation des entlasteten Zustands (LS9) abgeschlossen.

Am Folgetag, dem 21. Juni, wurde der Versuchskörper um 10:30 Uhr in einer Stufe auf die Maximallast wiederbelastet. Dabei wurde bei geschlossenen P - und Q -Zylindern die Längszugkraft aufgebracht, anschliessend die Kolbenposition der P -Zylinder wiederhergestellt und der Druck in den Q -Zylindern bis zur Maximallast des Vortages erhöht. Nach zwei Stunden unter dieser Belastung wurde der Versuchskörper endgültig entlastet (LS11).

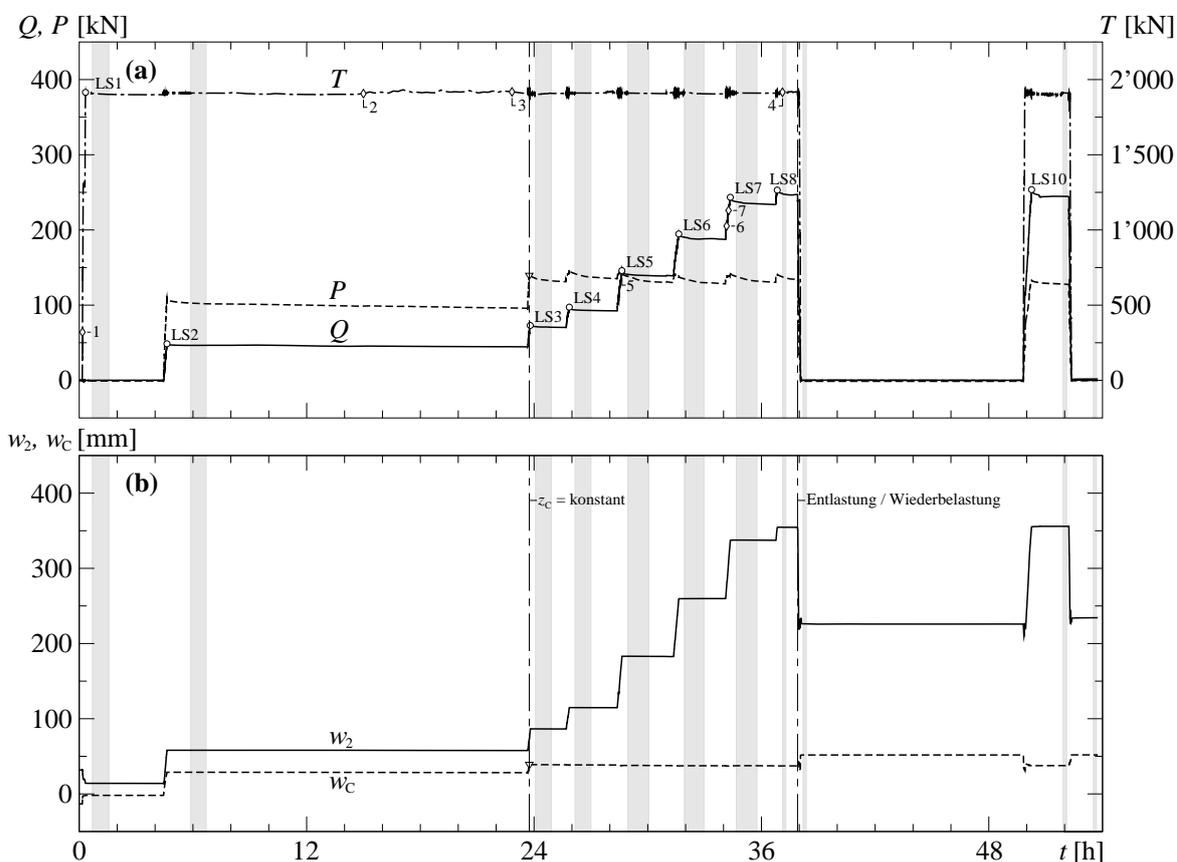


Bild 4.57 Ablauf des Versuchs T5: (a) Zeitverlauf der aufgebrachten Lasten T , Q und P ; (b) Zeitverlauf der Durchbiegungen w_2 und w_c . Graue Bereiche markieren die Messphasen. Rauten mit Zahlen markieren Ereignisse, welche im Text beschrieben sind.

Ab LS5 konnten aufgrund der grossen Dehnungen die Deformetermessungen auf der Oberseite des Versuchskörpers über dem Zwischenaufleger B nicht mehr durchgeführt werden.

4.8.2 Beobachtungen

Nach Erreichen der Laststufe LS5 / Q150 fielen erste kleine Betonteile aus der Biegedruckbruchzone C-seitig des Zwischenauflegers B auf den Boden (Ereignis 5). Die Querdehnungen zeigen, dass die Biegedruckbruchzone schon bei einer Querbelastung von $Q = 123$ kN ausgebildet war. Bei der weiteren Laststeigerung lösten sich immer wieder weitere kleine Teile aus dieser Zone (Bild 4.67(c)). Eine erhöhte Frequenz war zwischen $Q = 160$ kN und 185 kN zu beobachten. Bei $Q = 205$ kN (Ereignis 6) war ein Knacken im Versuchskörper bei Joch 2 hörbar, und bei $Q = 226$ kN (Ereignis 7) zeichnete sich die Biegedruckbruchzone bei Joch 2 visuell ab, siehe Bild 4.67(b). Während der Dokumentation der Laststufe LS7 / Q250 wurde festgestellt, dass sich auch unter Joch 1 ein Biegedruckbruch ereignet hatte, siehe Bild 4.67(a).

Bei Versuchsbeginn waren Risse unten im Feld und oben über dem Zwischenaufleger vorhanden. Diese Risse standen senkrecht zur Versuchskörperachse. Durch das Aufbringen der Zugkraft entstanden Trennrisse in regelmässigem Abstand über die ganze Länge des Versuchskörpers. Durch die Querbelastung änderten sich die Rissbreiten, und einige Risse wurden so wieder geschlossen. Bis zur Laststufe LS4 / Q100 änderte sich das Rissbild nur geringfügig, und es entstanden nur vereinzelt neue Risse. Mit zunehmender Belastung bildeten sich im Bereich 3 - B schräge, gegen A ansteigende, leicht S-förmige Risse aus. Beginn und Ende dieser Risse waren häufig in der Seitenfläche und erstreckten sich nicht bis an die Ober- bzw. Unterseite des Versuchskörpers. Die mittlere Neigung dieser Risse betrug bei Laststufe LS7 / Q250 23° , wobei sie im Bereich der Versuchskörperachse bei 28° lag. Die Schrägrisse waren bis 3.5 mm weit geöffnet.

4.8.3 Versuchsergebnisse

Tabelle 4.11 gibt eine Übersicht über die Belastungs- und Verformungsgeschichte des Versuchs T5. Die folgenden Bilder und Tabelle 4.12 zeigen Auswertungen der kontinuierlichen Messungen, der Deformometermessungen und der Rissaufnahmen.

Man beachte in Bild 4.63 die im Vergleich zu den übrigen Versuchen geänderten Skalierungen der ε_z - und ε_1 -Achsen.

LS	Bezeichnung	Lasten			Verschiebungen			Schnittgrößen			Zeit	
		T [MN]	Q [kN]	P [kN]	u_A [mm]	w_2 [mm]	w_C [mm]	$V_{B,0}^-$ [kN]	$V_{B,0}^+$ [kN]	M_B [kNm]	t [s]	t [h:min]
0	Versuchsbeginn	0.00	0	0	0.0	32	-13	-17	12	-15	0	0:00
T300	Belastungsbeginn	0.00	0	0	0.0	32	-13	-17	12	-15	530	0:09
	Belastungsende	1.92	0	-1	12.9	14	-2	-17	13	-20	1192	0:20
	Messbeginn	1.91	0	-1	13.0	14	-2	-18	13	-20	2489	0:41
2	Belastungsbeginn	1.90	0	-1	13.0	14	-2	-18	13	-20	15851	4:24
	Belastungsende	1.91	49	110	12.3	58	29	-101	93	-96	16659	4:38
	Messbeginn	1.91	47	103	12.3	58	29	-96	85	-84	21180	5:53
	Messende	1.91	47	102	12.3	58	29	-96	84	-82	24109	6:42
3	Belastungsbeginn	1.91	45	96	12.3	58	28	-92	79	-74	85193	23:40
	$z_C = \text{konstant}$	1.90	63	140	11.9	74	39	-124	112	-109	85500	23:45
	Belastungsende	1.91	73	139	11.6	86	39	-139	111	-108	85676	23:48
	Messbeginn	1.90	71	136	11.5	87	39	-136	108	-102	86689	24:05
4	Belastungsbeginn	1.91	70	131	11.5	87	39	-133	104	-96	92463	25:41
	Belastungsende	1.91	97	147	10.6	115	39	-178	119	-122	93102	25:52
	Messbeginn	1.91	94	142	10.6	115	39	-171	114	-113	94199	26:10
5	Belastungsbeginn	1.91	92	135	10.6	115	39	-167	107	-102	102205	28:23
	Belastungsende	1.91	146	144	7.0	183	38	-250	116	-118	103099	28:38
	Messbeginn	1.91	141	138	6.9	183	38	-241	110	-108	104229	28:57
6	Belastungsbeginn	1.91	139	130	6.8	183	38	-237	102	-96	112859	31:21
	Belastungsende	1.91	195	138	-0.4	259	37	-322	110	-109	113897	31:38
	Messbeginn	1.91	190	135	-0.5	260	38	-315	107	-104	114949	31:56
7	Belastungsbeginn	1.91	187	128	-0.6	260	38	-309	101	-93	122749	34:06
	Belastungsende	1.91	243	143	-11.3	337	37	-396	115	-118	123687	34:21
	Messbeginn	1.91	238	138	-11.5	338	38	-386	110	-109	124829	34:40
8	Belastungsbeginn	1.91	234	130	-11.5	337	37	-379	102	-96	132318	36:45
	Belastungsende	1.91	253	141	-14.5	354	37	-410	113	-113	132611	36:50
	Messbeginn	1.92	248	138	-14.6	355	37	-402	109	-107	133639	37:07
9	Entlastungsbeginn	1.92	247	135	-14.6	355	37	-400	106	-102	136464	37:54
	Entlastungsende	0.00	0	-1	-3.9	227	52	-16	11	-13	137162	38:06
	Messbeginn	0.00	0	-1	-3.8	226	52	-16	11	-13	137515	38:12
	Messende	0.00	0	-1	-3.8	226	52	-17	11	-13	138113	38:22
10 (Q260)	Belastungsbeginn	0.00	0	-1	-3.8	226	52	-17	11	-13	179307	49:48
	Belastungsende	1.91	254	133	-14.3	355	38	-409	105	-100	180926	50:15
	Messbeginn	1.91	245	128	-14.8	356	38	-394	100	-91	186929	51:55
11	Entlastungsbeginn	1.91	245	127	-14.8	356	38	-394	99	-90	188003	52:13
	Entlastungsende	0.00	1	0	-4.5	234	52	-19	12	-14	188525	52:22
	Messbeginn	0.00	2	0	-4.7	234	52	-19	12	-15	192659	53:31
	Versuchsende	0.00	2	0	-4.7	234	52	-19	12	-15	193566	53:46

Tabelle 4.11 Ablauf des Versuchs T5.

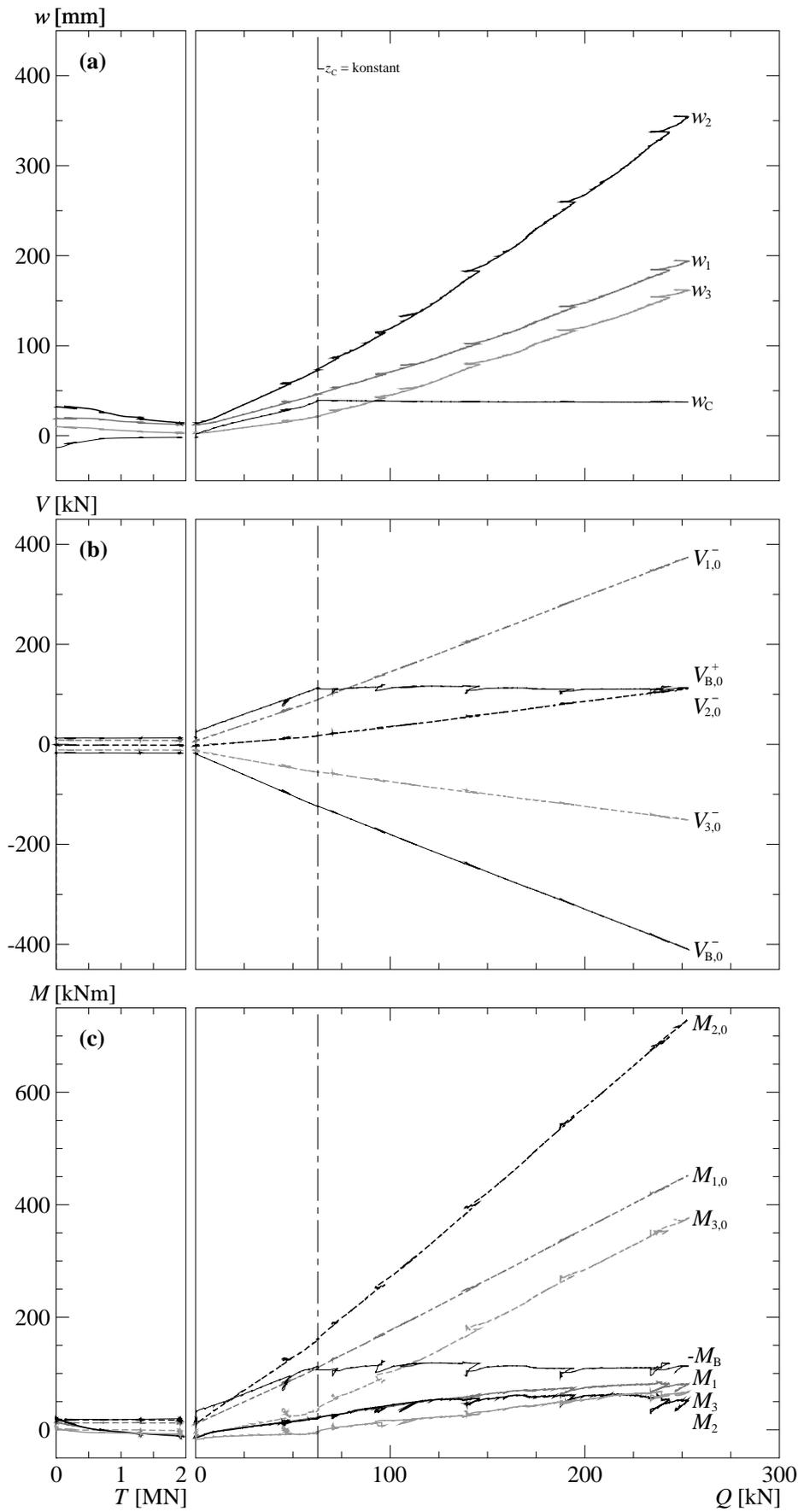


Bild 4.58 Resultate der ständigen Messungen des Versuchs T5:
 (a) Durchbiegungen; (b) Querkräfte; (c) Momente.

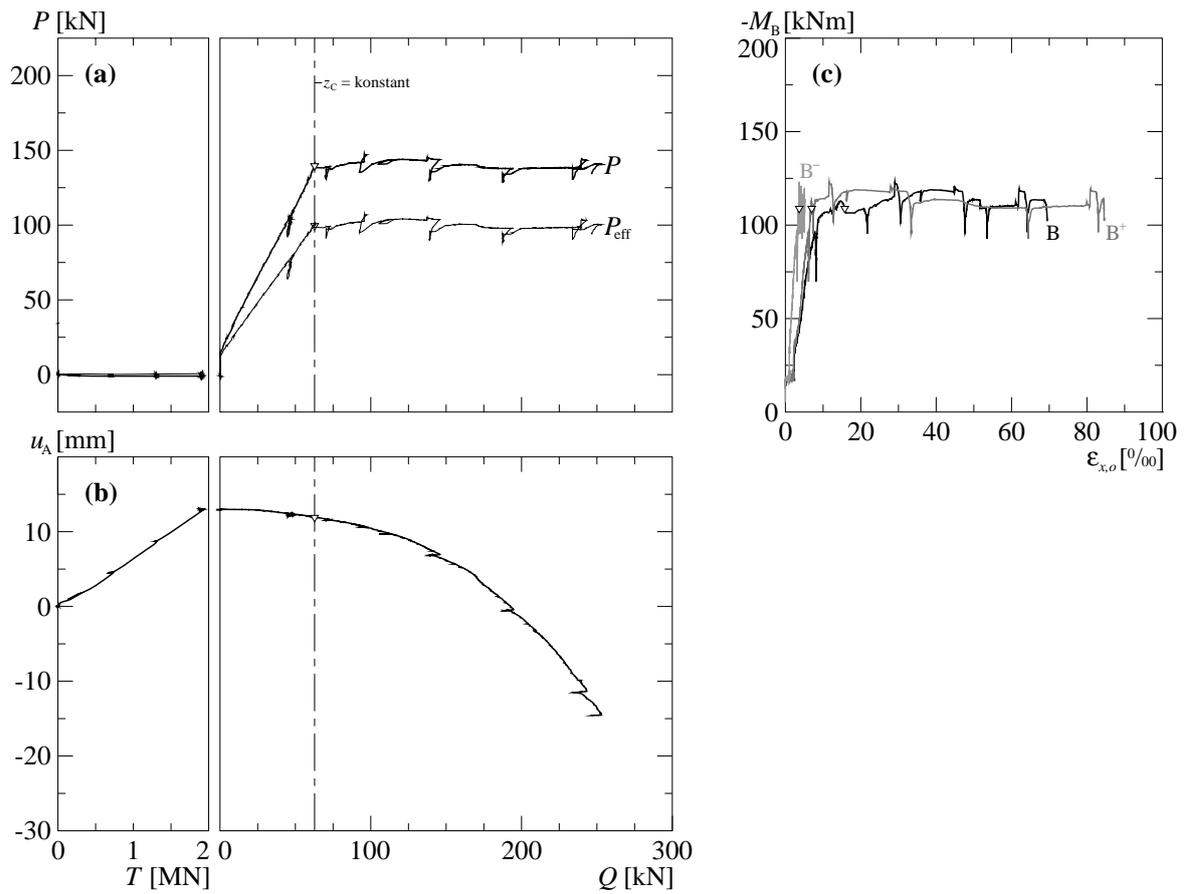


Bild 4.59 Resultate der ständigen Messungen des Versuchs T5: (a) Verhältnis P zu Q ; (b) Verschiebung des Lagers A; (c) Dehnungen an der Plattenoberseite in Längsrichtung über dem Zwischenaufleger B.

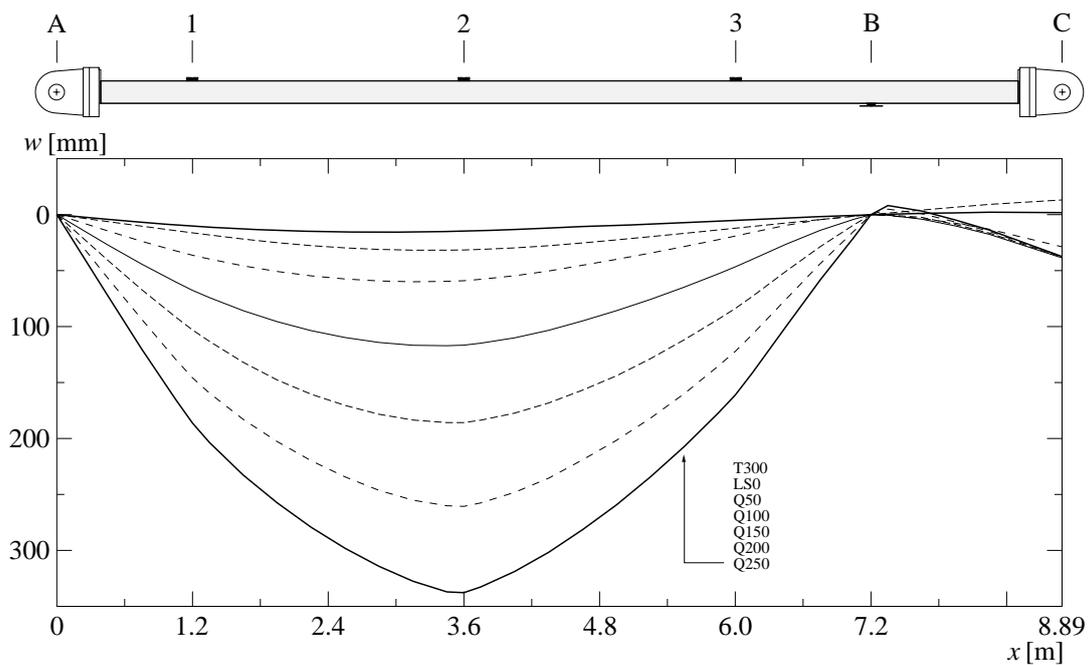


Bild 4.60 T5: Durchbiegungen

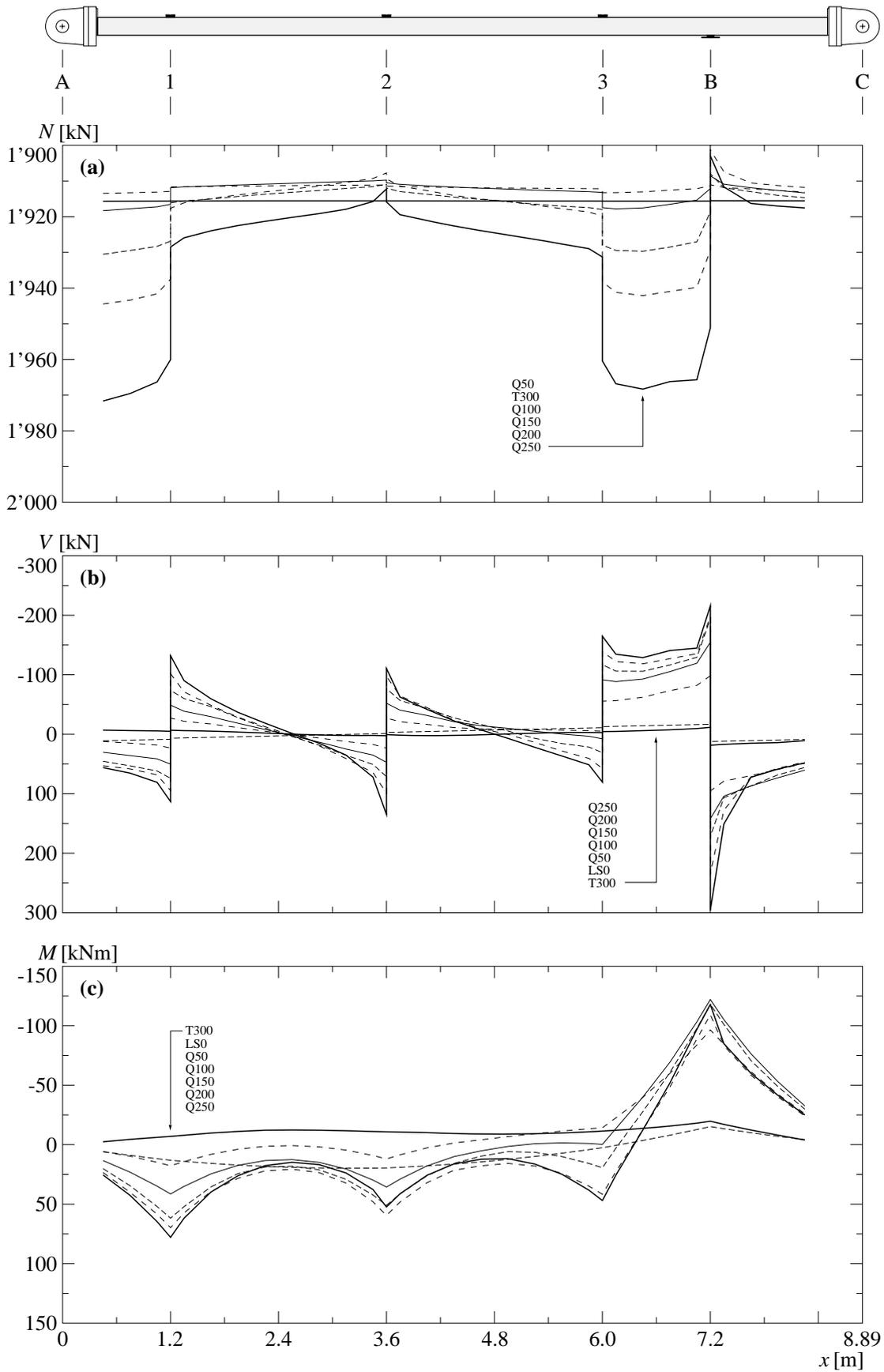


Bild 4.61 T5: (a) berechnete Normalkräfte; (b) berechnete Querkkräfte; (c) berechnete Biegemomente.

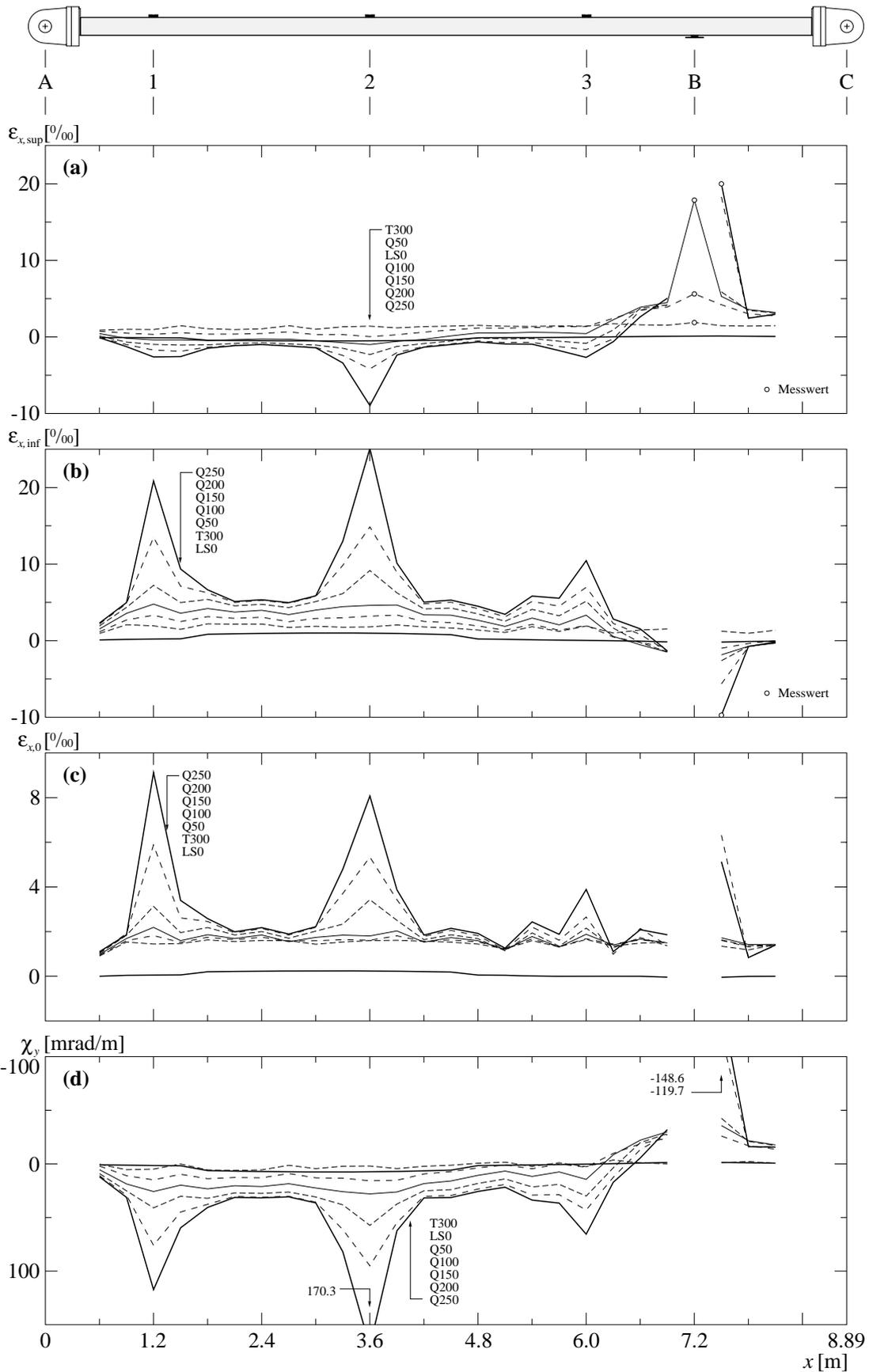


Bild 4.62 T5: (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Längsdehnungen unten; (c) berechnete Längsdehnungen der Schwerachse; (d) berechnete Krümmungen.

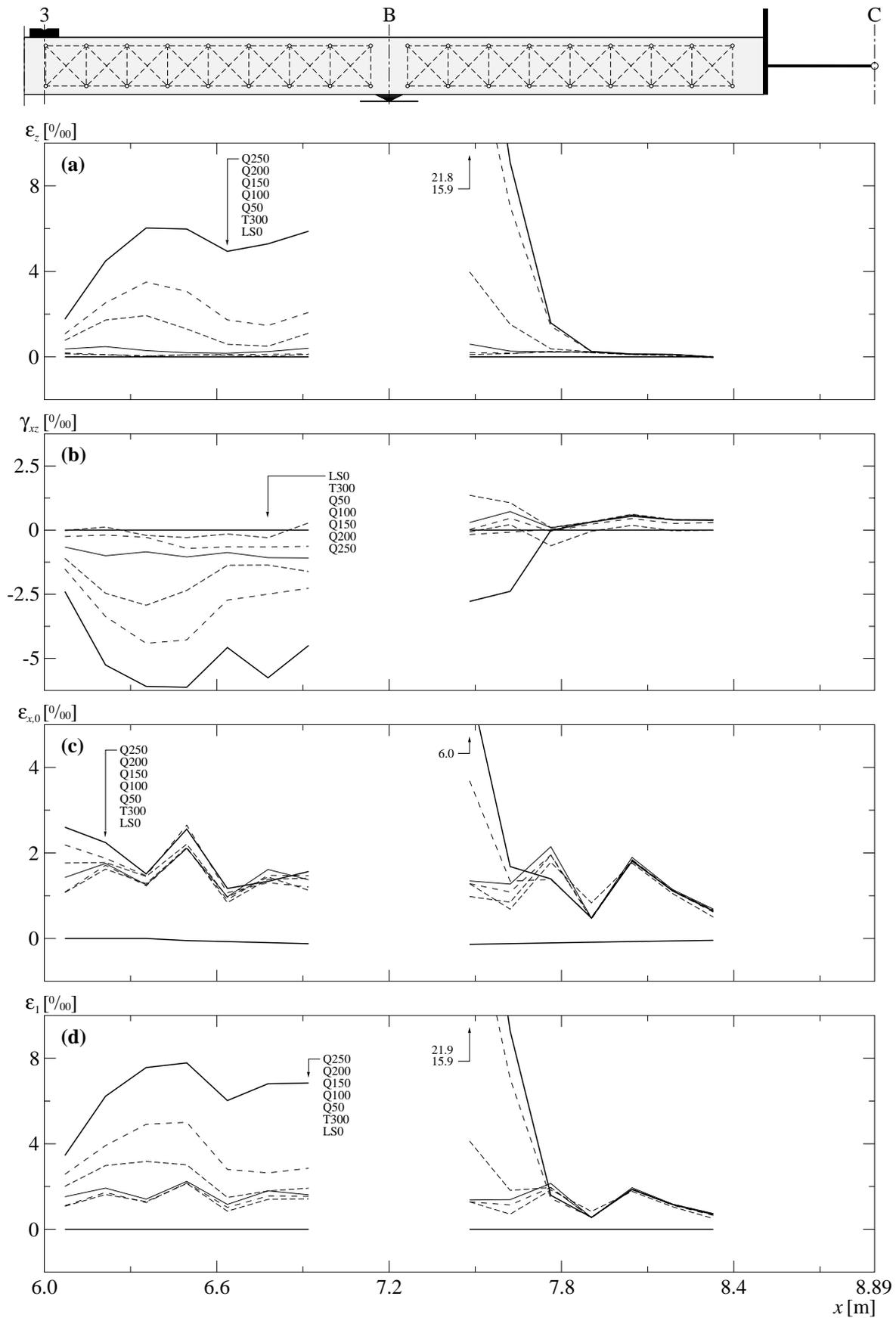


Bild 4.63 T5: (a) Mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (b) mittlere Schiebungen seitlich; (c) mittlere Längsdehnungen seitlich; (d) berechnete Hauptdehnungen seitlich.

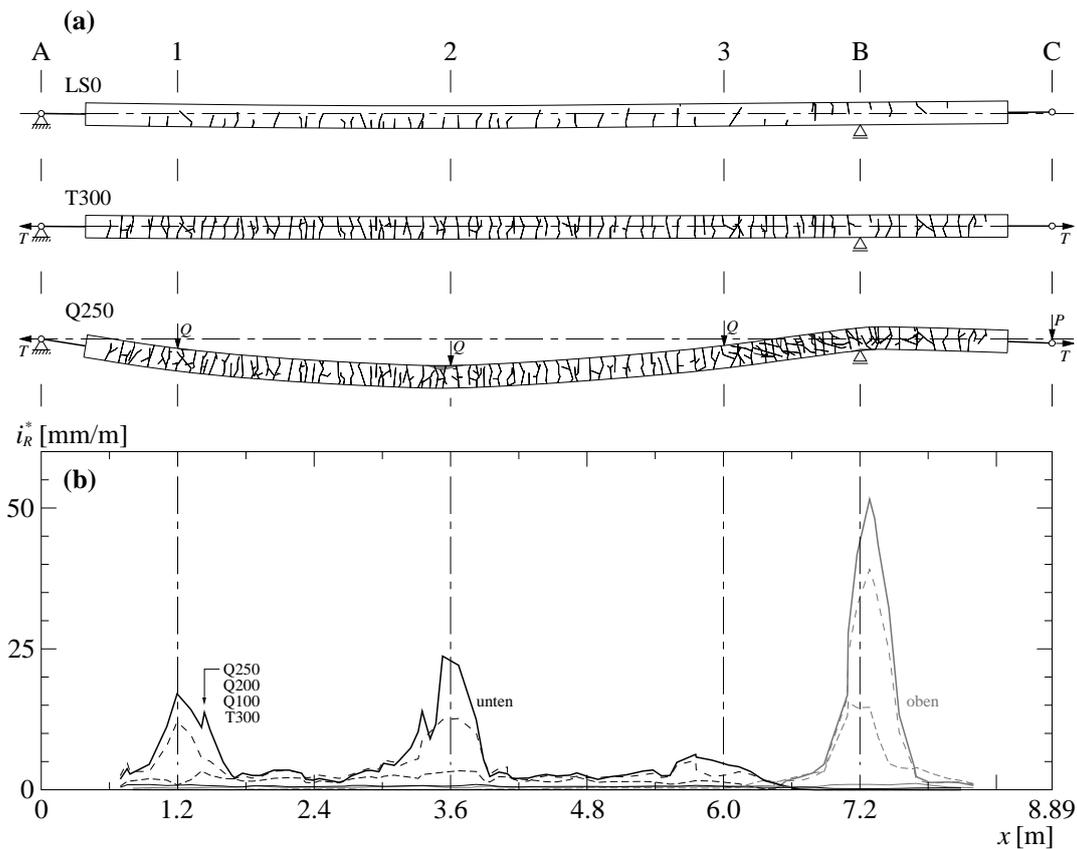


Bild 4.64 Risse bei Versuch T5: (a) Rissbilder ausgewählter Laststufen; (b) mittlere Rissintensität.

LS	Seite	Anzahl	Rissbreite			Rissabstand			
			t_R [mm]	$\sigma(t_R)$ [mm]	$t_{R,max}$ [mm]	S_R [mm]	$\sigma(S_R)$ [mm]	$S_{R,min}$ [mm]	$S_{R,max}$ [mm]
0	oben	8 ¹⁾	0.03	0.00	0.05	198	46	150	275
	unten	38	0.04	0.00	0.05	151	72	35	310
1 T300	oben	70	0.06	0.04	0.20	110	31	30	195
	unten	66	0.07	0.04	0.20	117	53	35	365
2 Q50	oben	68	0.10	0.13	0.60	105	31	20	175
	unten	55	0.12	0.09	0.35	107	51	35	365
4 Q100	oben	49	0.21	0.44	2.25	102	33	7	175
	unten	58	0.18	0.13	0.50	101	40	35	225
5 Q150	oben	24	0.55	0.78	3.50	90	34	7	175
	unten	65	0.24	0.20	1.05	92	44	92	92
6 Q200	oben	22	0.81	1.08	4.00	90	34	7	175
	unten	67	0.37	0.43	2.00	89	44	89	89
7 Q250	oben	21	1.06	1.42	5.00	89	35	7	175
	unten	69	0.47	0.67	3.50	87	41	5	225

Tabelle 4.12 T5: Risscharakteristika für ausgewählte Laststufen.

¹⁾ Rissabstandswerte basierend auf 7 Rissen.

4.8.4 Bilder

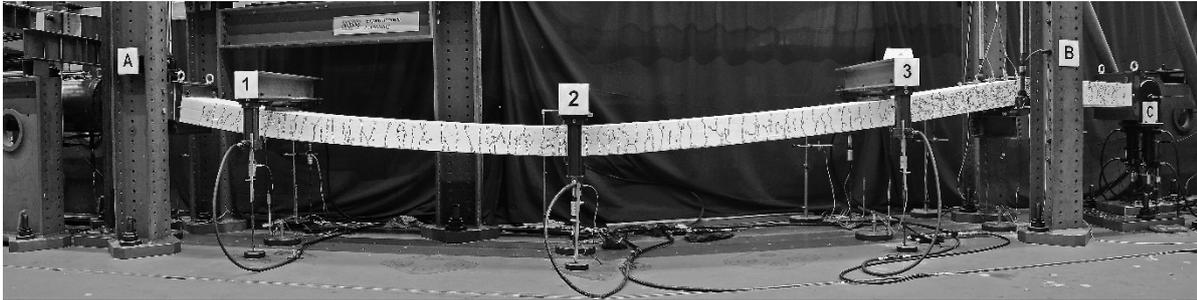


Bild 4.65 Versuchskörper T5 bei maximaler Verformung.

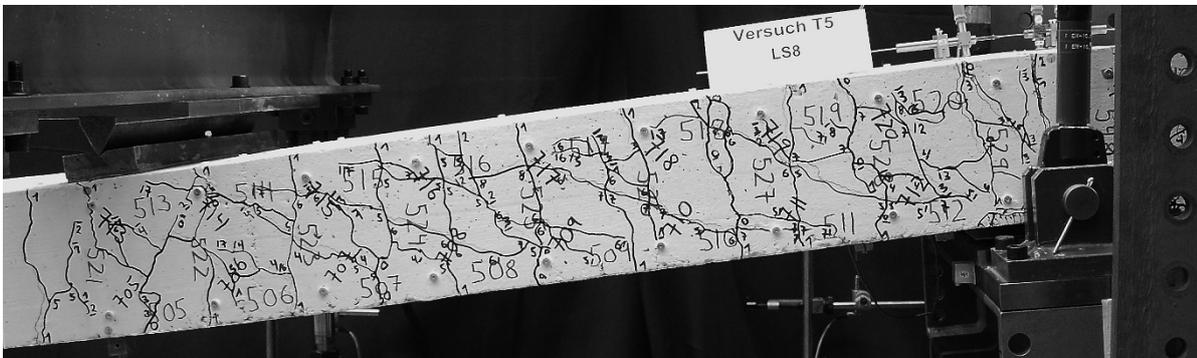
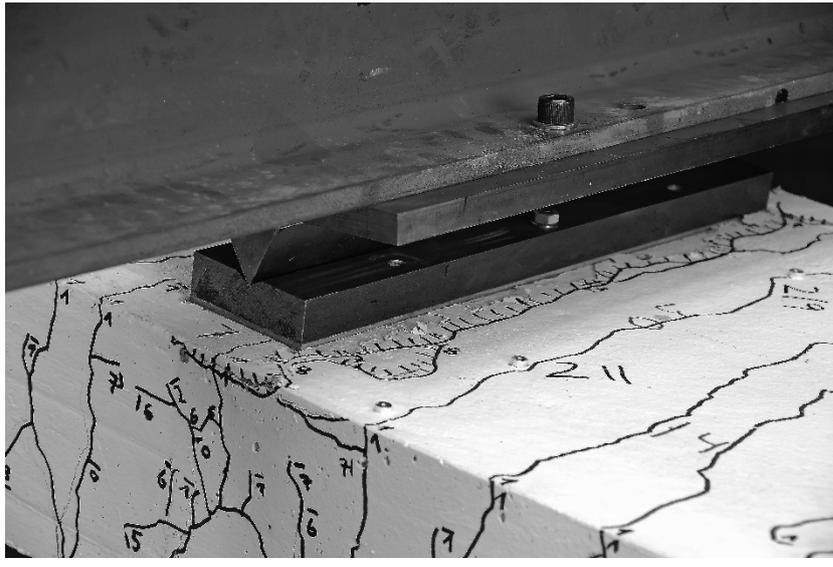
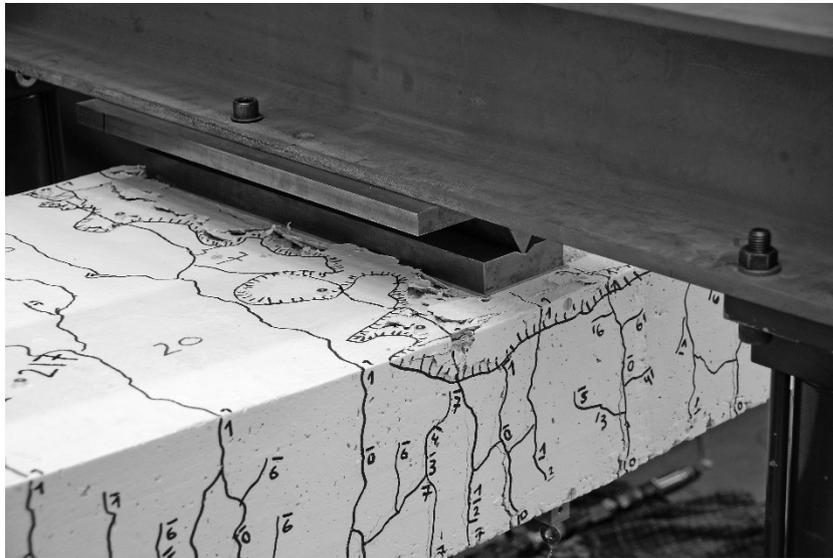


Bild 4.66 Bereich Joch 3 - Zwischenaufleger B des Versuchskörpers T5 bei maximaler Verformung.

(a)



(b)



(c)



Bild 4.67 Bruchzonen des Versuchskörpers T5 vor dem Ausbau; (a) bei Joch 1; (b) bei Joch 2; (c) bei Zwischenaufleger B.

5. Zusammenfassung

5.1 Zusammenfassung

Mit den in diesem Bericht beschriebenen Grossversuchen wurde das Tragverhalten von Stahlbetonplattenstreifen unter Längszug und Querbelastung experimentell untersucht. Im Vordergrund stand die Frage, inwiefern der Längszug den Querkrafttragwiderstand solcher Bauteile beeinflusst.

Bei den ersten drei Versuchskörpern handelte es sich um nominell identische, längsbewehrte Stahlbetonplattenstreifen. Die entsprechenden Versuche unterschieden sich in der aufgetragenen Längszugkraft, welche von $T=0$ bis 1.91 MN variierte. Die maximale Längszugkraft (1.91 MN) war derart gewählt, dass sie eine mittlere Zugspannung (300 N/mm^2) in der Längsbewehrung verursachte, was etwa der Hälfte der Zugfestigkeit des Bewehrungsstahls entsprach. Die letzten drei Versuchskörper wurden mit einer Längszugkraft von $T=1.91 \text{ MN}$ belastet und unterschieden sich von den ersten Versuchskörpern durch eine zusätzliche Querbewehrung. Beim vierten Versuchskörper wurden aussenliegende Querbewehrungsstäbe eingelegt und bei den letzten beiden Bügel mit unterschiedlichem Stababstand. Die zweimal sechs Längsbewehrungsstäbe $\text{Ø}26 \text{ mm}$ aller Versuchskörper waren etwas länger als die Versuchskörper selbst, so dass Stösse vermieden werden konnten. Die Längszugkraft wurde über die mittels Muttern und aufgestauchten Gewinden auf eine Adapterplatte gespannten Enden der Längsbewehrungsstäbe auf den Versuchskörper aufgebracht. Bild 5.1 und Tabelle 5.1 geben eine Übersicht der Versuchsanlage und des Versuchsprogramms. Die wichtigsten Resultate und ausgewählte Verläufe sind in Tabelle 5.3 sowie den Bildern 5.2 und 5.3 dargestellt.

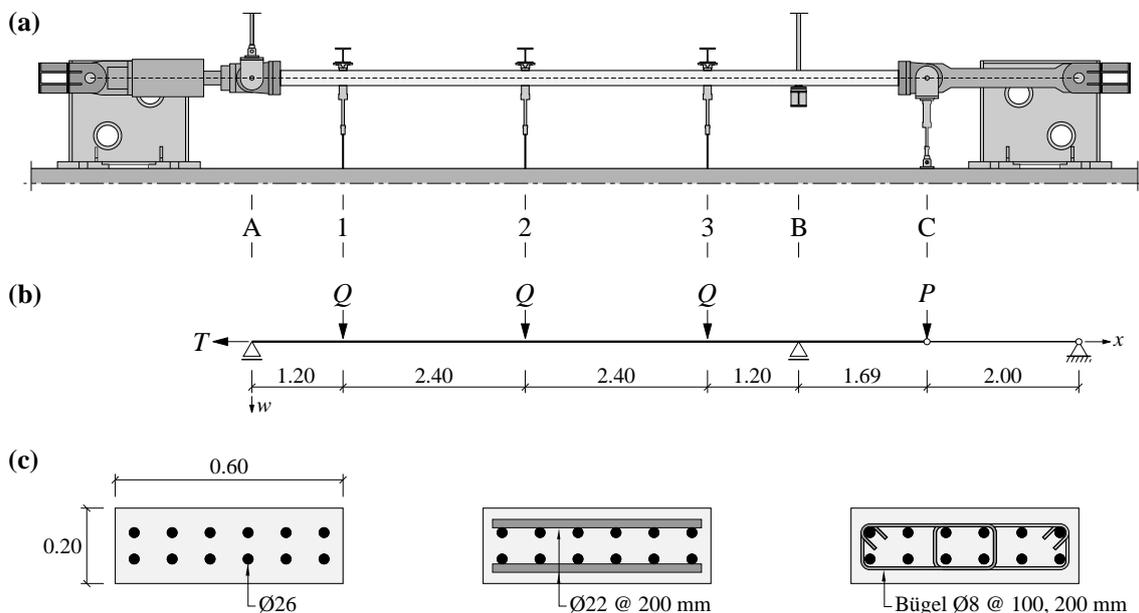


Bild 5.1 Übersicht: (a) Versuchsaufbau und Bezeichnungen; (b) statisches System; (c) Versuchskörperquerschnitte: Grundquerschnitt – Querschnitt mit Querstäben – Querschnitt mit Bügeln. Abmessungen in m bzw. mm.

Längszugkraft	$T = 0 \text{ kN}$	$T = 956 \text{ kN}$ ($\sigma_s = 150 \text{ N/mm}^2$)	$T = 1'911 \text{ kN}$ ($\sigma_s = 300 \text{ N/mm}^2$)
Grundquerschnitt	T0	T2	T1
Querschnitt mit Querstäben			T3
Querschnitt mit Bügeln	$s = 100 \text{ mm}$		T4
	$s = 200 \text{ mm}$		T5

Tabelle 5.1 Versuchsprogramm.

Alle Versuchskörper wurden gleichzeitig betoniert und mit Betonstahl aus demselben Herstellungslos je Durchmesser bewehrt. Bei allen Versuchskörpern war die Längsbewehrung identisch. Der erste Versuchskörper wurde 3 Monate und der letzte 6 Monate nach dem Betonieren getestet. Die Versuche zur Baustoffprüfung zeigten, dass für alle Versuchskörper von denselben Betoneigenschaften ausgegangen werden kann. In Tabelle 5.2 sind die wichtigsten Kennwerte der verwendeten Baustoffe zusammengefasst.

Baustoff	Kenngrösse		Einheit	Wert
Beton	Zylinderdruckfestigkeit	f_{cc}	[N/mm ²]	41.2
	Spaltzugfestigkeit	f_{cts}	[N/mm ²]	3.2
	Elastizitätsmodul	E_c	[kN/mm ²]	32.4
	Bruchstauchung	ε_{cu}	[‰]	1.8
Längsbewehrung Ø26	Dynamische Fließgrenze	$f_{s,dyn}$	[N/mm ²]	527
	Dynamische Zugfestigkeit	$f_{su,dyn}$	[N/mm ²]	632
	Bruchdehnung	ε_{su}	[‰]	140
Bügelbewehrung Ø8	Dynamische Fließgrenze	$f_{s,dyn}$	[N/mm ²]	517
	Dynamische Zugfestigkeit	$f_{su,dyn}$	[N/mm ²]	585
	Bruchdehnung	ε_{su}	[‰]	69

Tabelle 5.2 Zusammenfassung der wichtigsten Baustoffkennwerte.

Bei allen Versuchen mit Längszugkraft wurde in der ersten Laststufe die Längszugkraft T aufgebracht und dann die Querbelastung bei konstanter Normalkraft vergrössert. Dabei wurden die Belastungen im Feld (Q) und am Kragarmende (P) proportional gesteigert, bis sich im Versuchskörper über dem Zwischenauflager B ein plastisches Gelenk ausgebildet hatte. Anschliessend wurde die Lage des Kragarmendes konstant gehalten und nur noch die Belastung Q im Feld weiter gesteigert.

Versuch	Bruch / Max		Lasten			Durchbiegung		Schnittgrössen						
	Art	Ort	T [kN]	Q [kN]	P [kN]	w_2 [mm]	w_C [mm]	M_B [kNm]	$M_{2.0}$ [kNm]	M_2 [kNm]	$V_{B,0}^-$ [kN]	$N_{6.15}$ [kN]	$V_{6.15}$ [kN]	$M_{6.15}$ [kNm]
T0	BS	B - C	0	64	103	142	27	-189	125	125	-138 ¹⁾	-	-	-
	B	2	0	67	56	230	31	-110	172	172	-130	-	-	-
T1	$M_{B,max}$		1911	122	145	148	31	-150	317	34	-218	-	-	-
	S	3 - B	1913	149	136	188	32	-131	407	48	-256	1928	-103	-12
	max		1916	165	115	223	32	-94	476	49	-275	-	-	-
T2	$M_{B,max}$		956	68	134	97	43	-164	149	56	-139	-	-	-
	S	3 - B	949	146	111	316	42	-127	399	100	-250	983	-134	30
T3	$M_{B,max}$		1912	110	144	131	42	-106	306	55	-195	-	-	-
	S	3 - B	1915	170	137	222	41	-98	488	63	-283	1930	-108	25
	max		1917	253	113	357	39	-61	756	73	-403	1983	-43	17
T4	$M_{B,max}$		1911	242	147	336	35	-132	688	45	-397	-	-	-
	max		1912	253	139	351	35	-119	727	55	-411	1965	-139	22
T5	$M_{B,max}$		1911	96	148	113	39	-123	253	37	-175	-	-	-
	max		1909	253	133	355	38	-100	737	59	-409	1968	-143	32

Tabelle 5.3 Zusammenfassung der wichtigsten Versuchsergebnisse. B: Biegebruch; S: Schubbruch¹⁾ $V_{B,0}^+ = 115 \text{ kN}$

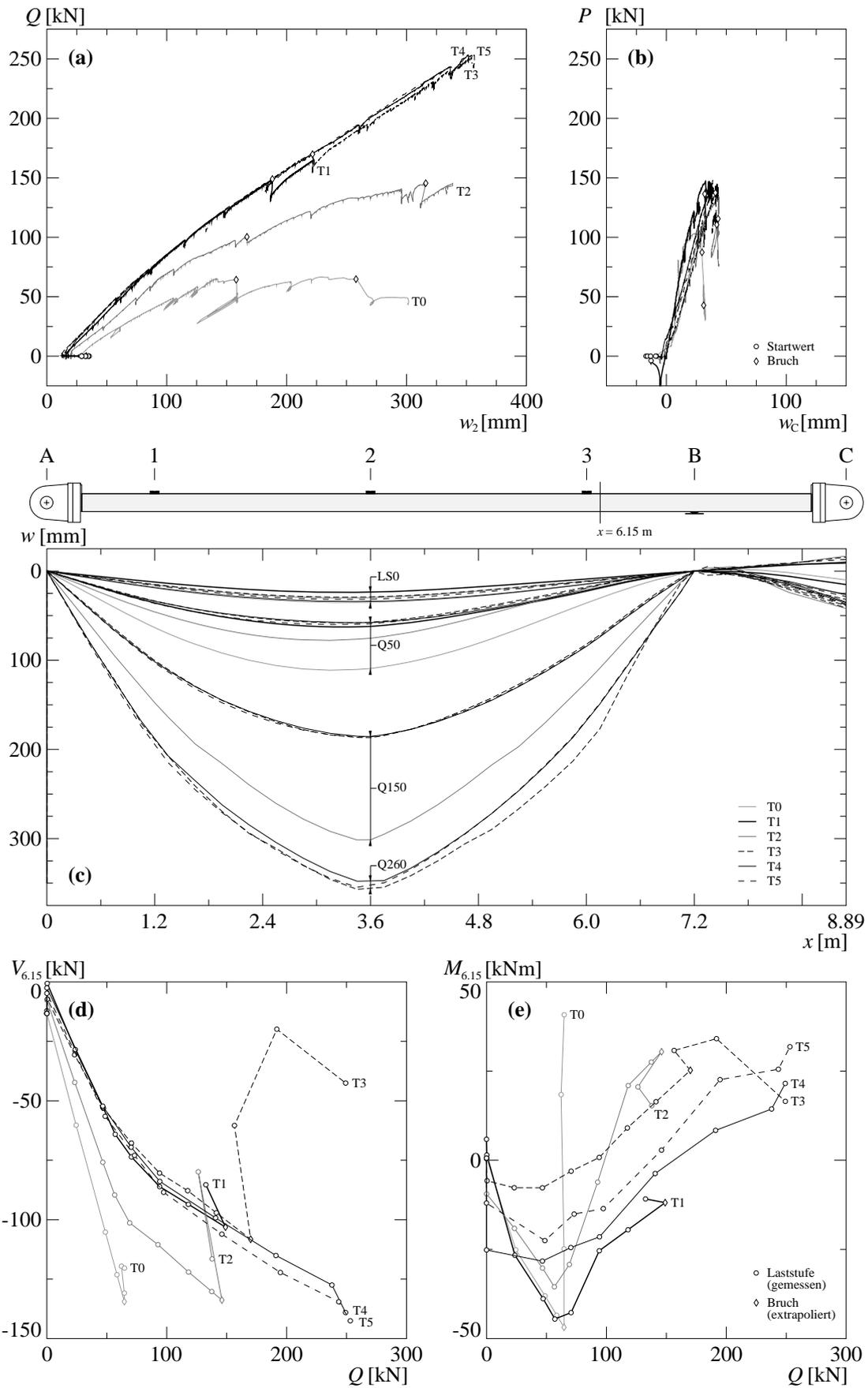


Bild 5.2 Zusammenstellung ausgewählter Versuchsergebnisse: (a) $Q - w_2$; (b) $P - w_c$; (c) Biegelinien; (d) $Q - V_{x=6.15 \text{ m}}$; (e) $Q - M_{x=6.15 \text{ m}}$.

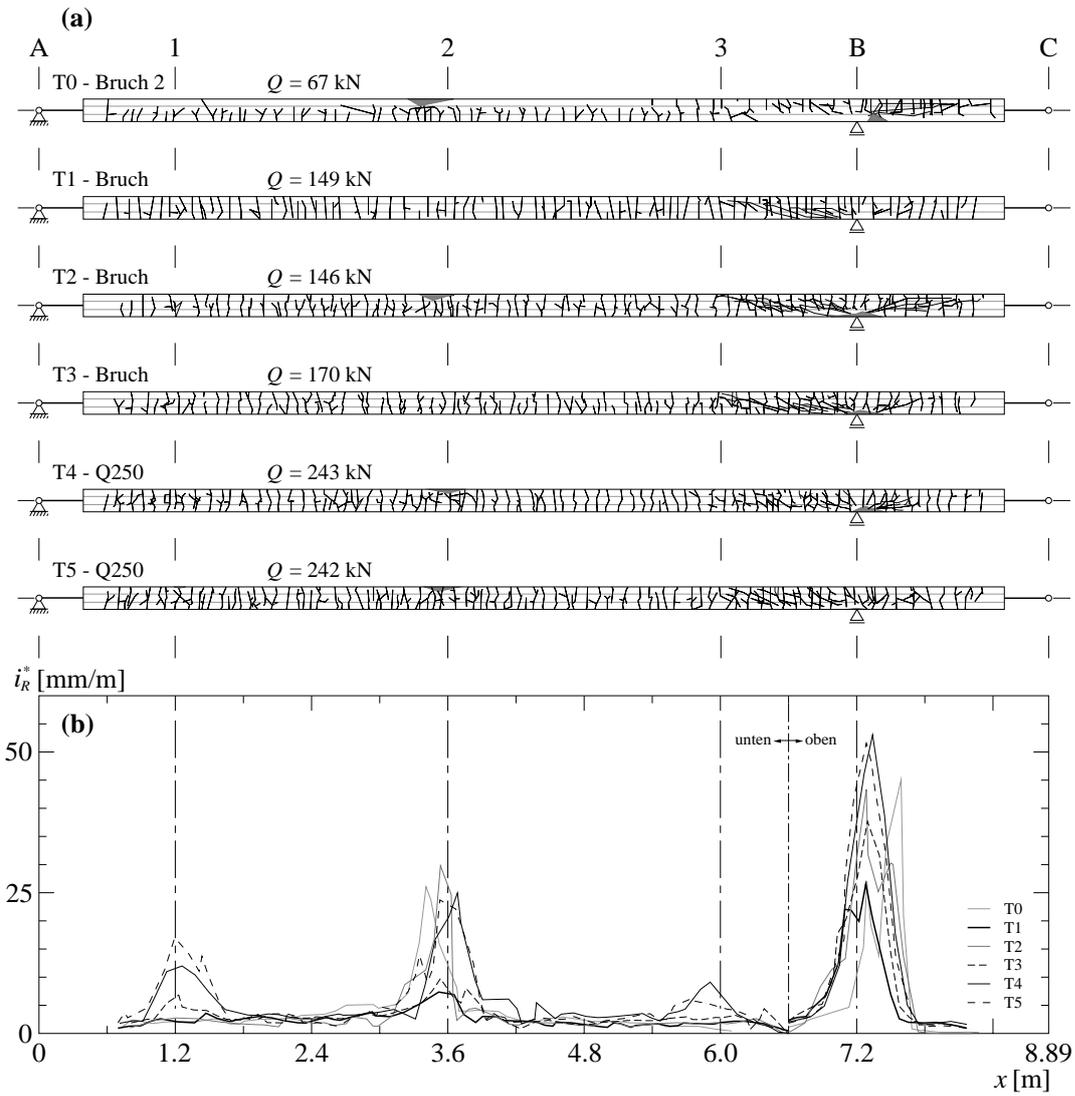


Bild 5.3 Zusammenstellung der Risscharakteristika ausgewählter Laststufen: (a) Rissbilder; (b) mittlere Rissintensitäten.

Die Ergebnisse der Versuche lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die nicht verbügelten Versuchskörper unter Längszug (T1, T2, T3) erlitten ein Schubversagen im Bereich 3 - B. Der Bruch erfolgte spröde und kündigte sich kaum an. Allerdings waren die Verformungen sowie die Rissbreiten der Biegerisse auf der Unterseite im Feld und auf der Oberseite über dem Zwischenaufleger B schon vor dem Bruch sehr gross.
- Der Lastabfall bei den oben erwähnten Schubbrüchen war kleiner als 15 %, und die Last konnte anschliessend über den Bruchwert hinaus gesteigert werden. Der Systemtragwiderstand war nicht durch die Schubbrüche begrenzt.
- Die verbügelten Versuchskörper (T4, T5) erlitten keinen Schubbruch unter den aufgebrachten Lasten (diese waren durch die Kapazität der Versuchsanlage begrenzt).
- Das globale Last - Verformungsverhalten der Versuchskörper mit identischer Längszugkraft (T1, T3, T4, T5) war nahezu gleich. Im Fall eines Schubbruchs nahm die Verformung zwar zu, mit zunehmender Last näherte sich das Verhalten jedoch wieder jenem der Versuchskörper ohne Schubbruch an. Ein Schubbruch bewirkte lokal eine Vergrösserung der Neigung des Versuchskörpers im Bereich des Bruchs.
- Bei grossen Belastungen und Durchbiegungen bildeten sich unter den drei Belastungsjochen sowie über dem Zwischenaufleger plastische Gelenke aus. Das globale Tragverhalten entsprach dann einem Seilpolygon. Dieses Verhalten wurde bei den Versuchen T3, T4 und T5 beobachtet und trat unabhängig von einem allfälligen Schubbruch auf.
- Mit zunehmender Längszugkraft reduzierte sich die Querkraft, unter welcher ein Schubbruch eintrat.
- Je grösser die Längszugkraft und die Durchbiegungen waren, desto kleiner waren die auf den Versuchskörper wirkenden Querkraft- bzw. Momentenanteile im Feld.
- Die Versuchskörper unter Längszug wiesen ein duktiler Systemverhalten auf und erreichten sehr grosse Verformungen (Durchbiegung im Feld bis 1/20 der Spannweite).

5.2 Summary

The large-scale tests described in this report were carried out to analyse the load-bearing behaviour of reinforced concrete (RC) slab strips loaded with an axial tensile force and vertical loads. The study was focused on the question of to what extent an axial tensile force influences the shear resistance of such structural elements.

The first three test specimens consisted in three RC slab strips with the same longitudinal reinforcement. The corresponding tests differed in the applied axial force, which varied between $T = 0$ and 1.91 MN. The maximum axial force (1.91 MN) was chosen to obtain an average tensile stress (300 N/mm^2) in the longitudinal reinforcement equal to half of the steel tensile strength. The second three test specimens were loaded with an axial force of $T = 1.91 \text{ MN}$. In contrast to the first three specimens, they additionally had a transverse reinforcement. The fourth test specimen had transverse reinforcing bars located on the outer sides of the longitudinal reinforcement, while the last two specimens had stirrups with different spacings. All test specimens had two rows of six longitudinal reinforcing bars $\text{Ø}26 \text{ mm}$, which were slightly longer than the specimens themselves to avoid splices. The axial tensile force was applied to the ends of the longitudinal reinforcing bars, which were attached to an anchor plate with nuts and rolled-on threads on the ends of the longitudinal reinforcing bars. Figure 5.4 and Table 5.4 provide an overview of the test set-up and the test program. The main results and selected test curves are illustrated in Table 5.6 and Figures 5.5 and 5.6.

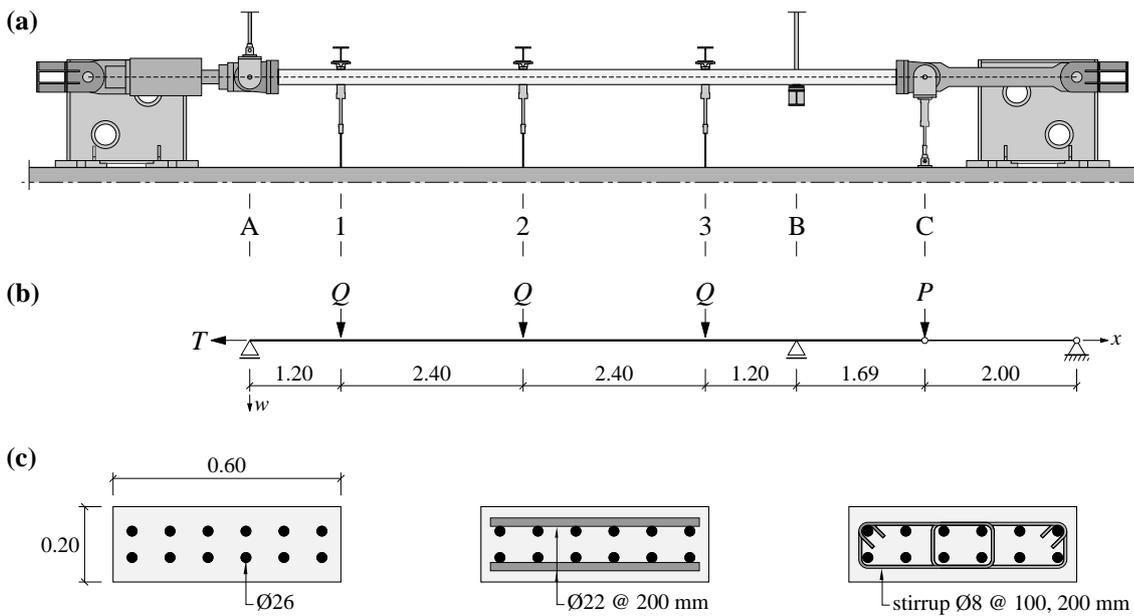


Figure 5.4 Overview: (a) Test set-up and notations; (b) static system; (c) Cross-sections of test specimens: Basic section – Section with transverse reinforcing bars – Section with stirrups. Dimensions in m and mm.

Axial force	$T = 0 \text{ kN}$	$T = 956 \text{ kN}$ ($\sigma_s = 150 \text{ N/mm}^2$)	$T = 1\,911 \text{ kN}$ ($\sigma_s = 300 \text{ N/mm}^2$)
Basic section	T0	T2	T1
Section with transverse reinforcing bars			T3
Section with stirrups			T4
	$s = 100 \text{ mm}$		T5
	$s = 200 \text{ mm}$		

Table 5.4 Test program.

All test specimens were cast at the same time and reinforced with steel from the same production lot for each diameter. The longitudinal reinforcement was identical for all test specimens. The first test specimen was tested three months and the last specimen six months after casting. The material tests show that the same material properties can be assumed for all specimens. Table 5.5 summarizes the main properties of the construction materials.

Material	Property	Unit	Value
Concrete	Cylinder Compressive Strength f_{cc}	[N/mm ²]	41.2
	Splitting Tensile Strength f_{cts}	[N/mm ²]	3.2
	Modulus of Elasticity E_c	[kN/mm ²]	32.4
	Crushing Strain ϵ_{cu}	[‰]	1.8
Longitudinal reinforcement Ø26	Dynamic Yield Strength $f_{sy,dyn}$	[N/mm ²]	527
	Dynamic Tensile Strength $f_{su,dyn}$	[N/mm ²]	632
	Rupture Strain ϵ_{su}	[‰]	140
Shear reinforcement Ø8	Dynamic Yield Strength $f_{sy,dyn}$	[N/mm ²]	517
	Dynamic Tensile Strength $f_{su,dyn}$	[N/mm ²]	585
	Rupture Strain ϵ_{su}	[‰]	69

Table 5.5 Summary of the main material properties.

For all tests the axial tensile force T was applied in the first load step and then maintained constant while the vertical loads were increased. The loads along the span (Q) and at the cantilevering end (P) were increased proportionally until a plastic hinge formed over the support B. Then the position of the cantilevering end was maintained constant, while the vertical loads Q along the span were further increased.

Test	Failure / Max		Load			Deflection		Section Stress Resultants						
	Type	Region	T [kN]	Q [kN]	P [kN]	w_2 [mm]	w_C [mm]	M_B [kNm]	$M_{2,0}$ [kNm]	M_2 [kNm]	V_B^- [kN]	$N_{6.15}$ [kN]	$V_{6.15}$ [kN]	$M_{6.15}$ [kNm]
T0	BS	B+	0	64	103	142	27	-189	125	125	-138 ¹⁾	-	-	-
	B	2	0	67	56	230	31	-110	172	172	-130	-	-	-
T1	$M_{B,max}$	3-B	1911	122	145	148	31	-150	317	34	-218	-	-	-
	S		1913	149	136	188	32	-131	407	48	-256	1928	-103	-12
	max		1916	165	115	223	32	-94	476	49	-275	-	-	-
T2	$M_{B,max}$	3-B	956	68	13	97	43	-164	149	56	-139	-	-	-
	S		949	146	111	316	42	-127	399	100	-250	983	-134	30
T3	$M_{B,max}$	3-B	1912	110	144	131	42	-106	306	55	-195	-	-	-
	S		1915	170	137	222	41	-98	488	63	-283	1930	-108	25
	max		1917	253	113	357	39	-61	756	73	-403	1983	-43	17
T4	$M_{B,max}$		1911	242	147	336	35	-132	688	45	-397	-	-	-
	max		1912	253	139	351	35	-119	727	55	-411	1965	-139	22
T5	$M_{B,max}$		1911	96	148	113	39	-123	253	37	-175	-	-	-
	max		1909	253	133	355	38	-100	737	59	-409	1968	-143	32

Table 5.6 Summary of main test results. B: bending failure; S: shear failure

¹⁾ $V_B^+ = 115$ kN

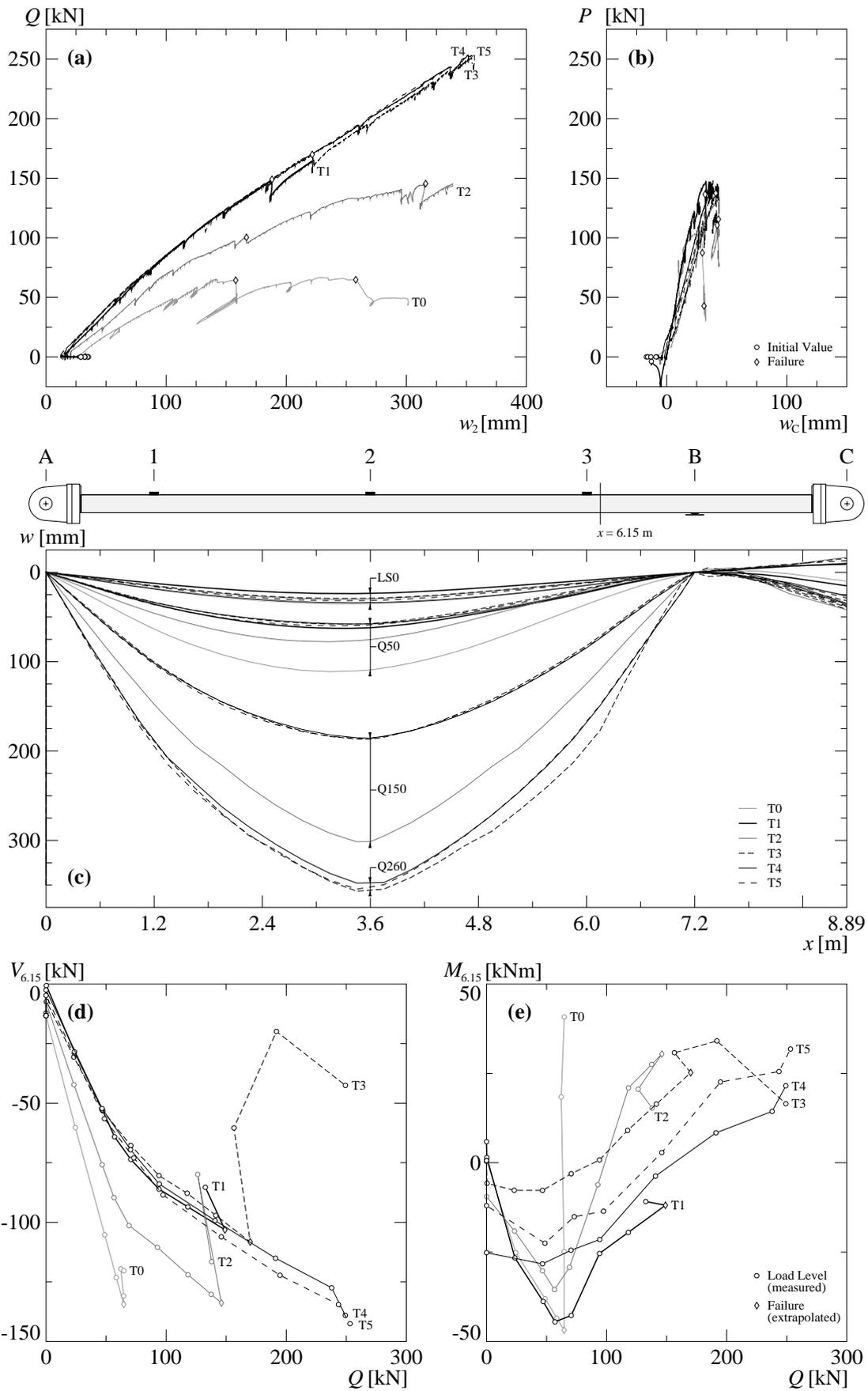


Figure 5.5 Selected test results: (a) $Q - w_2$; (b) $P - w_C$; (c) deflection curves; (d) $Q - V_{x=6.15 \text{ m}}$; (e) $Q - M_{x=6.15 \text{ m}}$.

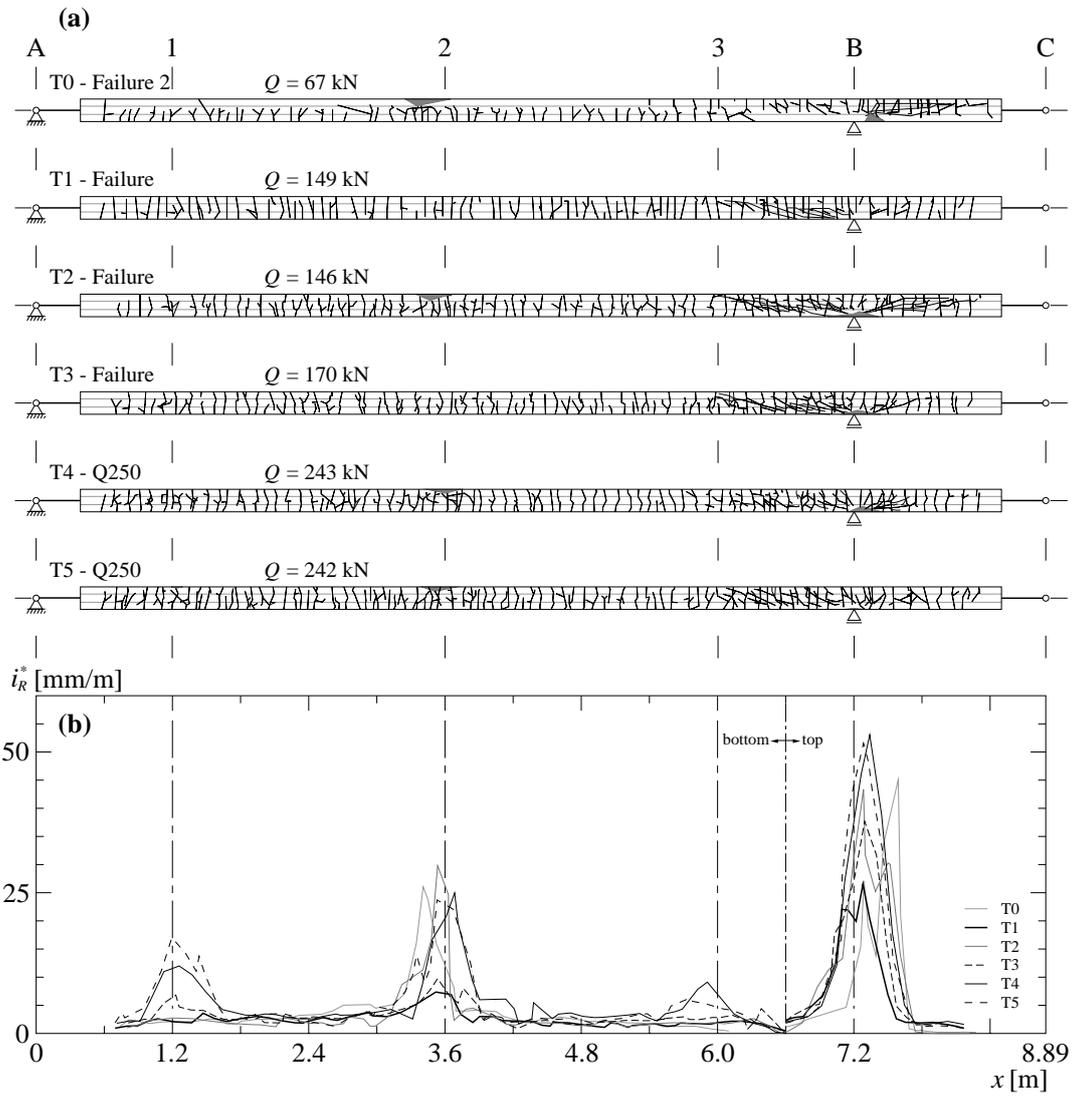


Figure 5.6 Cracking behaviour at selected load levels: (a) crack patterns; (b) averaged crack intensities.

The test results can be summarized as follows:

- The specimens without stirrups, which were loaded with an axial tensile force (T1, T2, T3) failed in shear in the region 3 - B. The failure was brittle without warning. However, the deformations and widths of the bending cracks on the bottom face of the specimen between the supports and on the top face of the specimen over support B were very large before failure.
- The load decrease following the shear failures mentioned above was less than 15 % and subsequently it was possible to increase the load beyond the load at shear failure. The shear failures did not limit the system resistance.
- The test specimens with stirrups (T4, T5) did not fail in shear under the applied loads (which were limited by the capacity of the test set-up).
- The global load-deformation behaviour of the test specimens which were loaded with the same axial force (T1, T3, T4 and T5) was almost identical. In the case of shear failure, the deformations did increase; however, with further loading the deformation behaviour of the test specimens with and without shear failure went back to being similar. Shear failure caused a local increase in the inclination of the test specimen in vicinity of the failure location.
- Under large loads and deformations, plastic hinges were formed under the three loading yokes as well as over the middle support. In this case the global structure behaved as a funicular polygon. This behaviour was observed in tests T3, T4 and T5 and occurred independently of shear failure.
- With increasing axial tensile force, the shear force, at which shear failure occurred, decreased.
- The larger the axial tensile force and the deflections, the smaller the shear force and span moment portions, which acted on the test specimens.
- The test specimens with an axial tensile force showed a ductile system behaviour and reached very large deformations (span deflections up to 1/20 of the span).

Verdankungen

Die Versuchskörper wurden von der Bauunternehmung Tschirren Bau AG, Buchs, hergestellt. Für die angenehme und unkomplizierte Zusammenarbeit sei allen Beteiligten, insbesondere dem Polier Antonio Martins Oliveira, herzlich gedankt.

Die folgenden Firmen lieferten Produkte zur Herstellung der Versuchskörper und zum Komplettieren des Versuchsaufbaus: Ancotech AG, Dielsdorf, Brun-Mech AG, Nebikon und Debrunner Acifer AG, Zürich. Die reibungslose Zusammenarbeit mit den genannten Firmen trug wesentlich zum Gelingen der Versuche bei.

Für den Messfehlerausgleich der Deformermessungen passte die Firma Cubus AG, Zürich dankenswerterweise ihre Stabstatiksoftware unseren Bedürfnissen an.

In der Bauhalle konnte auf die Unterstützung des technischen Personals zurückgegriffen werden. Insbesondere zu erwähnen sind Dominik Werne und Patrik Morf, welche bei der Planung, der Messtechnik und der Hydraulik wertvolle Hilfe leisteten, Christoph Gisler, welcher mit grosser Präzision die vielen Metallbauteile des Versuchsaufbaus bearbeitete und Thomas Jaggi, der uns in praktischen Belangen und bei der Materialprüfung unterstützte. Bei der Planung der Versuche halfen Sebastian Villiger und Stephan Etter, und beim Aufbau der Versuchsanlage und bei der Durchführung der Versuche half Christian Ott. Orlando Monsch dokumentierte die Versuchsanlage und die Versuchskörper nach Versuchsende fotografisch. Für den Versuchsbericht wurden die digitalen Fotografien von Emil Honegger aufgearbeitet. Beim Korrekturlesen der Endfassung half Susanna Schenkel-Würmli. Mit der Übersetzung der Zusammenfassung ins Englische leistete Clare Burns wertvolle Hilfe. Für ihre Mitarbeit sei den Erwähnten herzlichst gedankt.

Für den wertvollen Austausch und das rücksichtsvolle Nebeneinander-Arbeiten in der Bauhalle sei Ammar Mirjan und allen anderen Betroffenen sehr gedankt.

Bezeichnungen

Lateinische Grossbuchstaben

A	Ringfläche eines Hohlkolbenzylinders
A_{6D}	Kolbenfläche pro Hydraulikzylinder zur Erzeugung der Querbelastung P
A_{6Z}	Ringfläche pro Hydraulikzylinder zur Erzeugung der Querbelastung P
A_g	Plastische Dehnung des Betonstahls bei Höchstlast
A_{gt}	Dehnung des Betonstahls bei Höchstlast
A_Q	Ringfläche pro Hydraulikzylinder zur Erzeugung der Querbelastung Q
A_{ZD}	Ringfläche des Hydraulikzylinders zur Erzeugung der Längszugkraft T
A_{ZZ}	Ringfläche des Hydraulikzylinders zur Erzeugung der Längszugkraft T
E_c	Elastizitätsmodul Beton
E_s	Elastizitätsmodul Betonstahl
EI	Biegesteifigkeit
F	Bezeichnung Kraftsensor
F_u	Stempelkraft beim Bruch im Stempeldruckversuch
G	Gewicht Versuchskörper
LS	Laststufe
M	Auf den Versuchskörper wirkendes Biegemoment
M_0	Auf die Verbindungsgerade $z_A - z_B$ bezogenes Biegemoment
M_g	Biegemoment infolge Eigengewicht
M_y	Fliessmoment
N	Normalkraft
P	Durch zwei vertikale Hydraulikzylinder aufgebrauchte Querbelastung am Kragarmende
P_{eff}	Effektiv auf den Versuchskörper wirkende Belastung am Kragarmende
Q	Durch zwei vertikale Hydraulikzylinder an einem Joch aufgebrauchte Querbelastung im Feld
T	Aufgebrauchte Längszugkraft
T0 bis T5	Bezeichnung Versuch und Versuchskörper
V	Auf den Versuchskörper wirkende Querkraft
V_0	Auf die Horizontale bezogene Querkraft

Lateinische Kleinbuchstaben

a	Halber Durchmesser der Stempel im Stempeldruckversuch
b	Halber Durchmesser der Prüfkörper im Stempeldruckversuch
c	Distanz
c_{nom}	Bewehrungsüberdeckung
d	Distanz
f_{cc}	Zylinderdruckfestigkeit Beton
$f_{ct,s}$	Spaltzugfestigkeit Beton
f_{cw}	Würfeldruckfestigkeit Beton
$f_{su,dyn}$	Dynamische Zugfestigkeit Betonstahl
$f_{su,stat}$	Statische Zugfestigkeit Betonstahl
$f_{sy,dyn}$	Dynamische Fließgrenze Betonstahl
$f_{sy,stat}$	Statische Fließgrenze Betonstahl
h	Höhe der Prüfkörper für die Materialversuche des Betons
i_R	Rissintensität

i_R^*	Mittlere Rissintensität
l	Spannweite
p	Bezeichnung Manometer
p_3	Öldruck in den Ringkammern der Hydraulikzylinder zur Erzeugung der Querbelastung Q
p_{6D}	Öldruck in den Kolbenkammern der Hydraulikzylinder zur Erzeugung der Querbelastung P
p_{6Z}	Öldruck in den Ringkammern der Hydraulikzylinder zur Erzeugung der Querbelastung P
p_{ZD}	Öldruck in der Ringkammer des Hydraulikzylinders zur Erzeugung der Längszugkraft T
p_{ZZ}	Öldruck in der Ringkammer des Hydraulikzylinders zur Erzeugung der Längszugkraft T
q	Linienlast
s	Abstand der Bewehrung
s_R	Rissabstand
t	Zeit ab Versuchsbeginn
t_R	Rissbreite
u	Bezeichnung Wegaufnehmer in x -Richtung
u	Horizontale Verschiebung in x -Richtung
v	Bezeichnung Wegaufnehmer in y -Richtung
v	Horizontale Verschiebung in y -Richtung
w	Bezeichnung Wegaufnehmer in z -Richtung
w	Vertikale Durchbiegung des Versuchskörpers exklusive Lagerverschiebungen
x, y, z	Koordinatenachsen im rechtshändigen Koordinatensystem
z	Absolutlage

Griechische Kleinbuchstaben

α	Parameter zur Versuchssteuerung
β	Parameter zur Versuchssteuerung
γ_{xz}	Schiebung, berechnet aus Deformetermessungen an den Seitenflächen
ε_1	Hauptdehnung, berechnet aus Deformetermessungen an den Seitenflächen
ε_c	Dehnung des Betons
ε_{cu}	Bruchstauchung des Betons im Zylinderdruckversuch
$\varepsilon_{s(820)}$	Mittlere Stahldehnung, gemessen über die ganze freie Prüflänge von 820 mm
ε_{su}	Bruchdehnung Betonstahl
ε_{sv}	Dehnung des Betonstahls bei Verfestigungsbeginn
$\varepsilon_{x,0}$	Dehnung in x -Richtung in der Versuchskörperschwerachse, berechnet aus Deformetermessungen
$\varepsilon_{x,inf}$	Dehnung in x -Richtung an der Versuchskörperunterseite, berechnet aus Deformetermessungen
$\varepsilon_{x,o}$	Dehnung in x -Richtung an der Versuchskörperoberseite, berechnet aus kontinuierlichen Messungen
$\varepsilon_{x,sup}$	Dehnung in x -Richtung an der Versuchskörperoberseite, berechnet aus Deformetermessungen
$\varepsilon_{y,u}$	Dehnung in y -Richtung an der Versuchskörperunterseite, berechnet aus kontinuierlichen Messungen
ε_z	Dehnung in z -Richtung, berechnet aus Deformetermessungen an den Seitenflächen
ρ_c	Rohdichte Beton
ρ_z	Geometrischer Querbewehrungsgehalt
σ	Standardabweichung
σ_c	Spannung im Beton
σ_o	Oberspannung zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls des Betonstahls
σ_s	Spannung im Betonstahl
σ_u	Unterspannung zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls des Betonstahls
χ_y	Krümmung, berechnet aus Deformetermessungen

Sonderzeichen

@	Abstand der Bewehrung
Ø	Durchmesser

Literatur

Chen, W.F., 1970, "Double Punch Test for Tensile Strength of Concrete," *ACI Journal Proceedings*, V. 67, No. 12, pp. 993-995.

SIA, 2003, *Norm SIA 262/1, Betonbau – Ergänzende Festlegungen*, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 40 pp.