

Versuche zum Querkraftwiderstand und zum Verformungsvermögen von Stahlbetonplatten

Monograph**Author(s):**

Jäger, Thomas; Marti, Peter

Publication date:

2006

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005195576>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Originally published in:

IBK Bericht 294

Versuche zum Querkraftwiderstand und zum Verformungsvermögen von Stahlbetonplatten

Thomas Jäger, Dipl. Bau-Ing. ETH/HTL
Prof. Dr. Peter Marti

Institut für Baustatik und Konstruktion
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Zürich
Dezember 2005

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Versuchsprogramm	3
2 Versuchskörper	5
2.1 Abmessungen und Bewehrung	5
2.1.1 Versuchsserie A	5
2.1.2 Versuchsserie B	9
2.2 Herstellung	15
2.3 Baustoffe	16
2.3.1 Beton	16
2.3.2 Betonstahl	21
3 Versuchsdurchführung	27
3.1 Versuchsserie A	27
3.1.1 Versuchsanlage	27
3.1.2 Deformettermessungen	27
3.1.3 Kontinuierliche Messungen	31
3.1.4 Versuchsvorbereitung	39
3.1.5 Versuchsablauf	39
3.2 Versuchsserie B	39
3.2.1 Versuchsanlage	39
3.2.2 Deformettermessungen	43
3.2.3 Kontinuierliche Messungen	48
3.2.4 Versuchsvorbereitung	48
3.2.5 Versuchsablauf	48
4 Versuchsresultate Serie A	51
4.1 Auswertung und Darstellung der Messdaten	51
4.1.1 Bezeichnungen	51
4.1.2 Deformettermessungen	51
4.1.3 Kontinuierliche Messungen	52
4.1.4 Darstellung der Resultate	54
4.2 Versuchskörper A1	55
4.2.1 Versuch A1V1	55
4.2.2 Versuch A1V2	63
4.3 Versuchskörper A2	71
4.3.1 Versuch A2V1	71
4.3.2 Versuch A2V2	81
4.4 Versuchskörper A3	89
4.4.1 Versuch A3V1	89
4.4.2 Versuch A3V2	97
4.5 Versuchskörper A4	105
4.5.1 Versuch A4V1	105
4.5.2 Versuch A4V2	113

4.6 Versuchskörper A5	121
4.6.1 Versuch A5V1	121
4.6.2 Versuch A5V2	131
4.7 Versuchskörper A6	139
4.7.1 Versuch A6V1	139
4.7.2 Versuch A6V2	149
4.8 Versuchskörper A7	157
4.8.1 Versuch A7V1	157
4.8.2 Versuch A7V2	167
5 Versuchsergebnisse Serie B	175
5.1 Auswertung und Darstellung der Messdaten	175
5.1.1 Bezeichnungen	175
5.1.2 Deformettermessungen	175
5.1.3 Kontinuierliche Messungen	177
5.1.4 Darstellung der Resultate	179
5.2 Versuchskörper B1	181
5.2.1 Versuch B1V1	181
5.2.2 Versuch B1V2	189
5.3 Versuchskörper B2	201
5.3.1 Versuch B2V1	201
5.3.2 Versuch B2V2	213
5.4 Versuchskörper B3	225
5.4.1 Versuch B3V1	225
5.4.2 Versuch B3V2	235
5.5 Versuchskörper B4	249
5.5.1 Versuch B4V1	249
5.5.2 Versuch B4V2	259
5.6 Versuchskörper B5	271
5.6.1 Versuch B5V1	271
5.6.2 Versuch B5V2	281
5.7 Versuchskörper B6	293
5.7.1 Versuch B6V1	293
5.7.2 Versuch B6V2	305
5.8 Versuchskörper B7	317
5.8.1 Versuch B7V1	317
5.8.2 Versuch B7V2	327
6 Zusammenfassung - Summary	339
6.1 Zusammenfassung	339
6.2 Summary	344
Verdankungen	355
Bezeichnungen	356
Literatur	357

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Bezüglich Querkrafttragsicherheit und zugehörigen Verformungen lassen die zur Verfügung stehenden Bemessungsvorschriften für Stahlbetonplatten diverse Fragen offen. Die Anwendung der Plastizitätstheorie setzt einen ausreichenden Querkraftwiderstand und genügend Verformungsvermögen der plastischen Verformungsbereiche voraus. Damit der plastische Tragwiderstand erreicht werden kann, muss ein vorzeitiges Versagen aufgrund eines spröden Schubbruchs oder einer kritischen Verformung ausgeschlossen werden.

Ausser bei konzentrierten Lasteinleitungen und Stützen ist die Querkraftbeanspruchung von Stahlbetonplatten normalerweise gering. Im Gegensatz zu Stabtragwerken, bei welchen in der Regel eine Mindestquerkraftbewehrung eingelegt wird, wird bei Platten oft auf eine Querkraftbewehrung verzichtet. Die Abtragung der Querkräfte beruht dann auf der Zugfestigkeit des Betons und der Kornverzahnung im gerissenen Betongefüge.

Querkraftversuche an Stahlbetonbalken ohne Querkraftbewehrung [5, 6, 7] haben gezeigt, dass einerseits die nominellen Schubspannungen beim Bruch mit zunehmender Tragerhöhe abnehmen (Massstabseffekt) und andererseits der Biegebewehrungsgehalt einen bedeutenden Einfluss auf den Querkraftwiderstand hat. In neueren Arbeiten [3, 16, 17] wurde das Schubbruchverhalten in Korrelation mit dem Rissbild, der Beanspruchung der Biegebewehrung und den zugehörigen Rissbreiten gebracht. Obwohl damit wertvolle Ergebnisse vorliegen, lassen sich bezüglich Querkrafttragsicherheit von Stahlbetonplatten keine Verallgemeinerungen vornehmen. Insbesondere fehlen Versuche, die sowohl den Einfluss der Plattendicke als auch den Einfluss einer Abweichung der Hauptquerkraft- und Hauptmomentenrichtungen von den Bewehrungsrichtungen auf den Querkraftwiderstand und das Verformungsvermögen aufzeigen. Die Plattensteifigkeit nach dem Reissen, und damit das Rissverhalten, wird durch diese Einflüsse jedoch wesentlich beeinflusst.

Der Einfluss einer Querkraftbewehrung auf das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonplatten wurde bislang kaum erforscht. Insbesondere stellt sich die Frage, welcher minimale Querkraftbewehrungsgehalt erforderlich ist, so dass der Massstabseffekt bei dicken Platten eliminiert werden kann beziehungsweise ein duktiles Tragverhalten erreicht wird. Zudem fehlen experimentelle Untersuchungen, die den Einfluss verschiedener Querkraftbewehrungsgehalte auf das Verformungsvermögen aufzeigen.

Die Biegebemessung von Stahlbetonplatten erfolgt heute in der Regel auf der Grundlage des unteren Grenzwertsatzes der Plastizitätstheorie unter Verwendung der Normalmomenten-Fliessbedingung [14, 15]. Experimentelle Untersuchungen [11] und theoretische Betrachtungen [9, 10] haben gezeigt, dass die Normalmomenten-Fliessbedingung bei hohen Biegebewehrungsgehalten mit grosser Drillmomentbeanspruchung bezüglich der Bewehrungsrichtungen zu einer Überschätzung des Tragwiderstands führt. Obwohl mit der Entwicklung des Sandwichmodells [13] ein Bemessungsverfahren zur Verfügung steht, das diese Einflüsse erfasst und auch Betrachtungen zum Verformungsvermögen gestattet, existiert bis heute keine widerspruchsfreie, experimentell

abgestützte Theorie, die das Trag- und Verformungsverhalten von dicken, hochbewehrten Platten mit und ohne Querkraftbewehrung beschreibt.

Bei der Beurteilung bestehender Platten oder bei der Bemessung von Platten für Schutzbauten [1] mit dem Fliessgelenklinienverfahren, das auf dem oberen Grenzwertsatz der Plastizitätstheorie basiert, wird in der Praxis ein ausreichendes Rotationsvermögen der plastischen Biegegelenke vorausgesetzt. Die Frage, ob die gewünschte Tragwirkung durch plastische Umlagerung der inneren Kräfte erreicht werden kann, bleibt dabei unbeantwortet.

Im Rahmen des Forschungsprojekts "Verformungsvermögen von Massivbautragwerken" wird nach Möglichkeiten gesucht, die offenen Fragen bezüglich Querkraftwiderstand und Verformungsvermögen von Stahlbetonplatten zu beantworten. Die experimentellen Untersuchungen [4] sollen einen Beitrag zum besseren Verständnis des Trag- und Verformungsverhaltens leisten und der Praxis neue Erkenntnisse für die Bemessung und konstruktive Durchbildung zugänglich machen.

1.2 Zielsetzung

Ziel der im vorliegenden Bericht beschriebenen Versuche ist es, den Einfluss einiger wesentlicher Parameter (Plattendicke, Biegebewehrungsgehalt, Biegebewehrungsrichtung, Querkraftbewehrungsgehalt, Biegebewehrungsabstufung) auf den Querkraftwiderstand und das Verformungsvermögen von Stahlbetonplatten zu untersuchen. Im Vordergrund stehen dabei die Einflüsse der Plattendicke und der Abweichung der Hauptquerkraft- und Hauptmomentenrichtungen von den Bewehrungsrichtungen.

Um den Massstabseffekt experimentell zuverlässig erfassen zu können, wurden grossmassstäbliche Versuche an 200 mm und 500 mm dicken Platten durchgeführt. Die geometrischen Verhältnisse der Bewehrungs- und Plattenabmessungen sowie die Schubspannweitenverhältnisse wurden bei allen Versuchen konstant gehalten. Die Versuchskörper der Serie A entsprachen 40 %-Modellen der Versuchskörper der Serie B.

Es wurden hohe Biegebewehrungsgehalte gewählt, so dass bei den Versuchskörpern ohne Querkraftbewehrung spröde Schubbrüche zu erwarten waren. Um den Einfluss einer Druckbewehrung auf den Querkraftwiderstand auszuschliessen, wurde bei allen Versuchskörpern auf eine Druckbewehrung verzichtet. Mit der Variation des Querkraftbewehrungsgehalts sollte aufgezeigt werden, dass bereits mit einer minimalen Querkraftbewehrung ein duktiles Biegeversagen erzwungen werden kann.

Zur Sicherstellung des Gleichgewichts ist bei einer Abweichung der Hauptmomentenrichtung von den Bewehrungsrichtungen in den Sandwichdeckeln ein einachsiales Druckfeld im Beton erforderlich. Die durch die zugbeanspruchte Bewehrung aufgezwungene Querdehnung im Beton führt zu einer signifikanten Reduktion der Druckfestigkeit [8, 14, 19]. Als Folge ist bei den Versuchskörpern, die unterschiedliche Hauptmomenten- und Bewehrungsrichtungen aufweisen, mit einem Betonversagen in der Biegezugzone zu rechnen.

Bei allen Versuchen sollte das Trag- und Verformungsverhalten bis zum Kollaps der Versuchskörper untersucht werden. Dabei wurden aufgebrachte Kräfte und Verschiebungen kontinuierlich, mittlere Dehnungen und Rissbreiten periodisch gemessen und aufgezeichnet.

1.3 Versuchsprogramm

Die vorliegende Versuchsserie umfasste 28 Bruchversuche an 14 Stahlbetonplatten, nämlich 14 Versuche an 7 Platten mit einer Dicke von 200 mm (Serie A) und 14 Versuche an 7 Platten mit einer Dicke von 500 mm (Serie B). Aus wirtschaftlichen Überlegungen wurden die Versuchskörper für die Durchführung von je zwei Versuchen konzipiert, wozu die beiden Enden der Platten unterschiedlich bewehrt wurden. Entsprechend der Bewehrungsauslegung sind die Versuchskörper in die Bereiche Kragarm K1, Mittelfeld und Kragarm K2 unterteilt.

Der Versuchskörper A1, welcher eine gegenüber den Plattenrändern schräg verlaufende Biegebewehrung aufwies, wurde im Rahmen eines Vorversuchs geprüft. Der Versuch sollte Aufschluss über die Wirksamkeit der oberflächennahen Biegebewehrungsverankerung mit aufgeschweißten Ankerplatten geben.

Die Versuchskörper der Serie A wurden entsprechend dem in Bild 1.1 (a) dargestellten Versuchskonzept belastet. Die entsprechenden Bezeichnungen und die Versuchsparameter sind in Tabelle 1.1 zusammengestellt. Beim ersten Versuch handelte es sich dabei um einen Vierpunkt-Biegeversuch (Einfeldträger mit beidseitigen Auskragungen), bei dem der schwächere Kragarm K2 bis zum Kollaps belastet wurde. Anschliessend musste die Belastungseinrichtung für den zweiten Versuch umgebaut werden, so dass der stärkere Kragarm K1 in einem Dreipunkt-Biegeversuch (Einfeldträger mit einseitiger Auskragung) bis zum Kollaps weiterbelastet werden konnte.

Die Versuchskörper der Serie B wurden entsprechend dem in Bild 1.1 (b) dargestellten Versuchskonzept belastet. Die entsprechenden Bezeichnungen und die Versuchsparameter sind in Tabelle 1.2 zusammengestellt. Es handelte sich dabei um Dreipunkt-Biegeversuche (Einfeldträger mit einseitiger Auskragung). Die Versuchskörper wurden zwischen den beiden Versuchen um 180° gedreht.

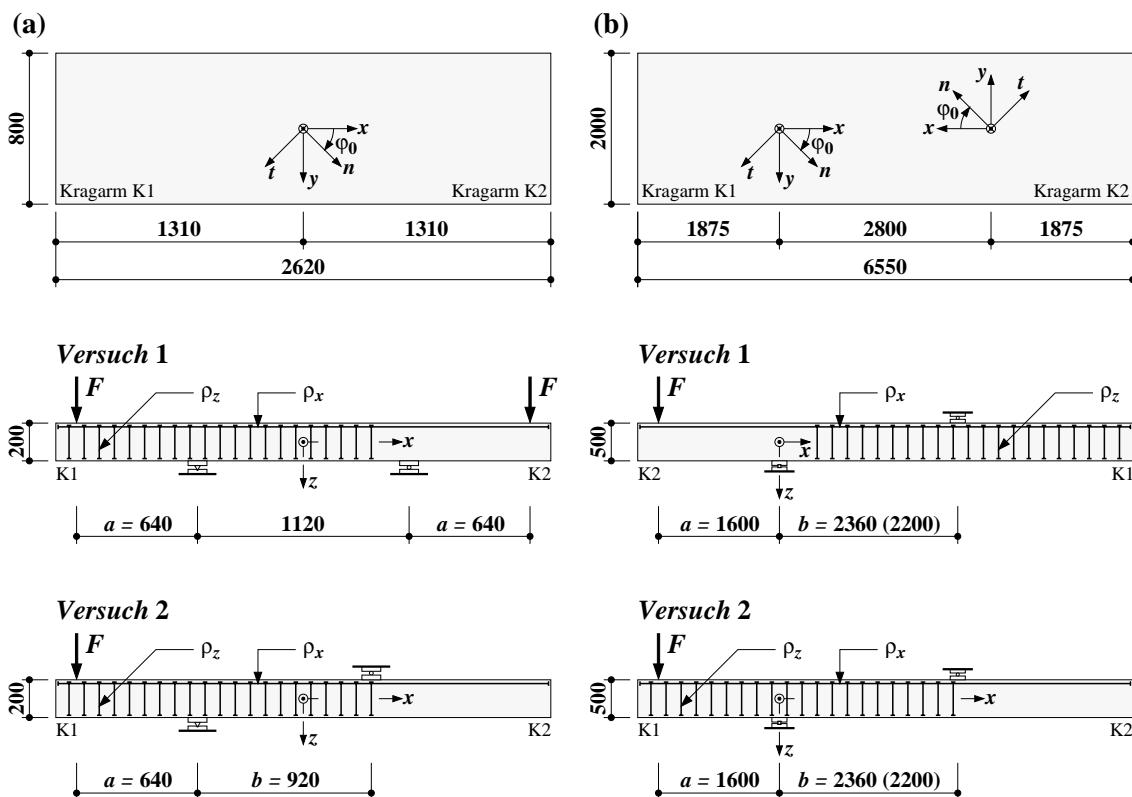


Bild 1.1: Versuchskonzept: (a) Serie A; (b) Serie B. Abmessungen in mm.

Einleitung

Die Versuchskörper A6, A7, B6 und B7 mit einer abgestuften Biegebewehrung wurden auf der Grundlage einfacher Spannungsfelder mit unterschiedlichen Neigungen der Betondruckdiagonalen bemessen. Dabei betragen die der Bemessung zugrunde gelegten Druckfeldneigungen im Sandwichkern 45° ($\cot \theta = 1$) und $26,6^\circ$ ($\cot \theta = 2$). Um den Aufbau der Zugkräfte in den Bewehrungsstäben sicherzustellen, wurden Verankerungslängen von 35 Ø für die geraden Stäbe angenommen.

Bei den Versuchskörpern mit einer Biegebewehrungsrichtung $\varphi_0 = 45^\circ$ wurde für den Biegebewehrungsgehalt in x -Richtung die Bezeichnung “fiktiver” Biegebewehrungsgehalt ρ_x verwendet. Wegen den Verankerungsbereichen der in n - und t -Richtung verlaufenden Biegebewehrungsstäbe an den Plattenrändern ist das orthogonal angeordnete Bewehrungsnetz nicht über die gesamte Versuchskörperbreite wirksam. Die mitwirkende Breite in y -Richtung des in x -Richtung beanspruchten Zuggurts verringert sich infolge der Verankerungszonen auf 84,9 % der Versuchskörperbreite, während der Druckgurt über die gesamte Versuchskörperbreite wirksam ist. Der “fiktive” Biegebewehrungsgehalt ρ_x entspricht dem Bewehrungsgehalt einer bezüglich Zugwiderstand des Zuggurts äquivalenten, in x -Richtung angeordneten Biegebewehrung.

Versuchskörper	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Plattendicke h [mm]	200	200	200	200	200	200	200
Biegebewehrungsrichtung φ_0 [$^\circ$]	45	45	0	45	0	45	0
Mittlere statische Höhe d_{xm} [mm]	156	156	162	168	174	168	174
(Fiktiver) Biegebewehrungsgehalt ρ_x [%]	1,538	1,538	1,745	0,952	1,056	0,952	1,056
Kragarm K1: Abstufung Biegebewehrung	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja $\cot \theta = 2$	Ja $\cot \theta = 2$
Kragarm K2: Abstufung Biegebewehrung	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja $\cot \theta = 1$	Ja $\cot \theta = 1$
Kragarm K1: Querkraftbewehrungsgehalt $\rho_{z(K1)}$ [%]	0,611	0,302	0,309	0,156	0,155	0,156	0,155
Kragarm K2: Querkraftbewehrungsgehalt $\rho_{z(K2)}$ [%]	0	0,156	0	0	0	0,156	0,155

Tabelle 1.1: Versuchsparameter Serie A.

Versuchskörper	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Plattendicke h [mm]	500	500	500	500	500	500	500
Biegebewehrungsrichtung φ_0 [$^\circ$]	45	45	0	45	0	45	0
Mittlere statische Höhe d_{xm} [mm]	390	390	405	420	435	420	435
(Fiktiver) Biegebewehrungsgehalt ρ_x [%]	1,538	1,538	1,745	0,952	1,056	0,952	1,056
Kragarm K1: Abstufung Biegebewehrung	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja $\cot \theta = 2$	Ja $\cot \theta = 2$
Kragarm K2: Abstufung Biegebewehrung	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja $\cot \theta = 1$	Ja $\cot \theta = 1$
Kragarm K1: Querkraftbewehrungsgehalt $\rho_{z(K1)}$ [%]	0,611	0,327	0,308	0,154	0,154	0,154	0,154
Kragarm K2: Querkraftbewehrungsgehalt $\rho_{z(K2)}$ [%]	0	0,163	0	0	0	0,154	0,154

Tabelle 1.2: Versuchsparameter Serie B.

2 Versuchskörper

2.1 Abmessungen und Bewehrung

2.1.1 Versuchsserie A

Die Abmessungen der Versuchskörper der Serie A und deren Bewehrung können den Bildern 2.1 bis 2.7 entnommen werden. Alle 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 Hönggerberg entsprachen. Ausserdem sollte das gewählte Schubspannweitenverhältnis $a/h = 3,2$ eine Direktabstützung ausschliessen.

Bei der Biegebewehrung handelte es sich um Stäbe $\varnothing 12$ mm mit aufgeschweißten Endverankerungsplatten. Die Abmessungen der Ankerplatten aus Stahl S235 betrugen $12 \times 40 \times 40$ mm bei den Versuchskörpern mit einer Bewehrungslage pro Bewehrungsrichtung und $15 \times 25 \times 65$ mm bei jenen mit zwei Bewehrungslagen pro Bewehrungsrichtung. Die Betonüberdeckung der äussersten Bewehrungsstäbe wurde zu 20 mm festgelegt. Ausser bei den Versuchskörpern A6 und A7 wurden über die gesamte Grundrissfläche konstante Bewehrungsquerschnitte eingelegt.

Die Querkraftbewehrung bestand aus Stäben $\varnothing 6$ mm mit beidseitig aufgeschweißten Ankerplatten $6 \times 25 \times 25$ mm für Bereiche mit Querkraftbewehrungsgehalten von 0,15 % und 0,3 % beziehungsweise aus Stäben $\varnothing 8$ mm (Versuchskörper A1) mit beidseitig aufgeschweißten Ankerplatten $8 \times 30 \times 30$ mm für Bereiche mit einem Querkraftbewehrungsgehalt von 0,6 %. Im Mittelfeld wurden die Querkraftbewehrungsgehalte gegenüber dem stärkeren Kragarm K1 leicht erhöht. Für die Ankerplatten wurde Stahl S235 gewählt. Der lichte Abstand zwischen den Ankerplatten betrug 160 mm.

Die Endverankerungen der einzelnen Bewehrungsstäbe mussten eine vollständige Einleitung der Bruchzugkraft gewährleisten. Verschiedene Schweissverbindungen der Ankerplatten wurden vorgängig auf ihre Eignung geprüft. Da bei allen Versuchskörpern auf eine Bewehrung in der Biegedruckzone verzichtet wurde, sollte mit dem als Vorversuch geprüften Versuchskörper A1 die Wirkungsweise der Querkraftbewehrung und die oberflächennahe Verankerung der Biegbewehrung aufgezeigt werden.

Mit der Abstufung der Biegebewehrung bei den Versuchskörpern A6 und A7 wurde versucht, dem Verlauf der Zugkräfte im oberen Sandwichdeckel möglichst exakt zu folgen. Die Ausbreitung der Längszugkräfte wurde mit einem 45° -Spannungsfeld ($\cot \theta = 1$) beziehungsweise mit einem $26,6^\circ$ -Spannungsfeld ($\cot \theta = 2$) berücksichtigt, wobei für die Verankerungslänge der geraden Stäbe 35 \varnothing angenommen wurde.

Die Bewehrung wurde neben der Schalung auf einer speziellen Lehre mit Punktschweissungen zu einem Korb vorfabriziert und anschliessend als Ganzes in die Schalung gehoben.

Versuchskörper

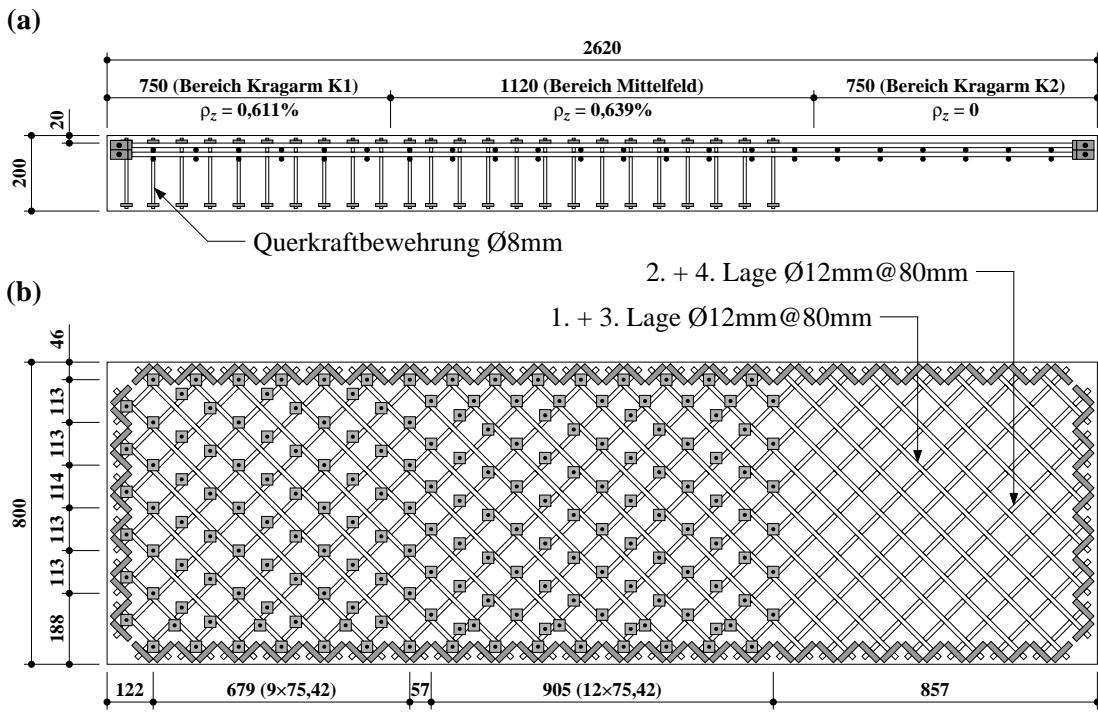


Bild 2.1: Geometrie und Bewehrung Versuchskörper A1: (a) Längsschnitt; (b) Grundriss. Abmessungen in mm.

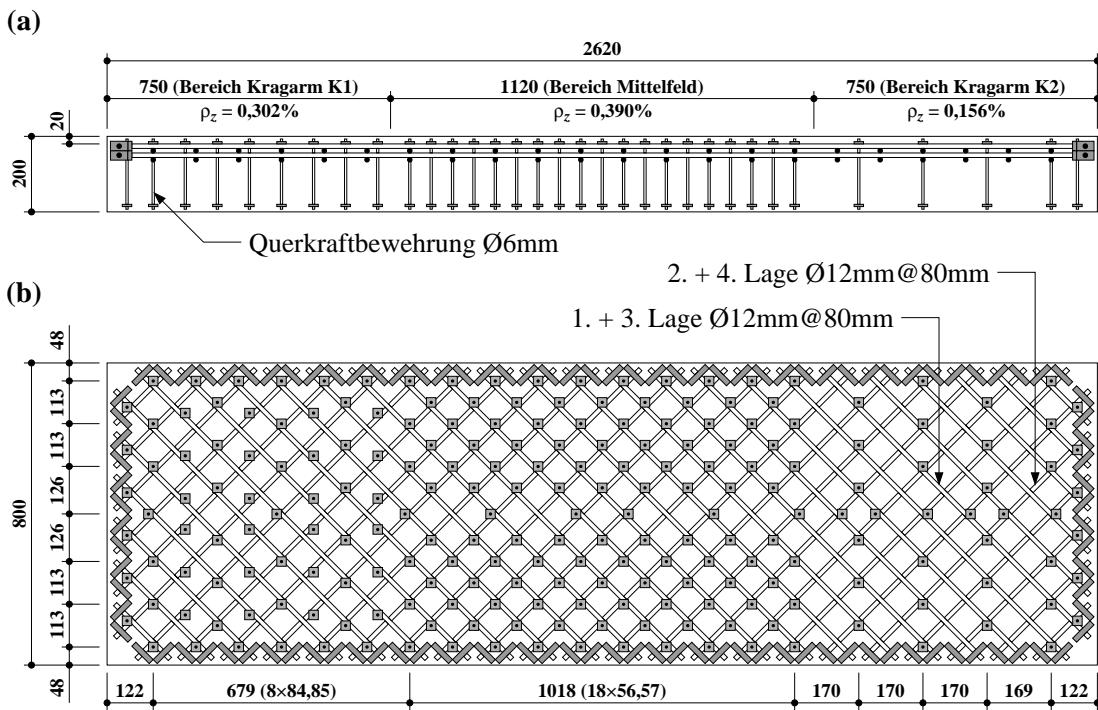


Bild 2.2: Geometrie und Bewehrung Versuchskörper A2: (a) Längsschnitt; (b) Grundriss. Abmessungen in mm.

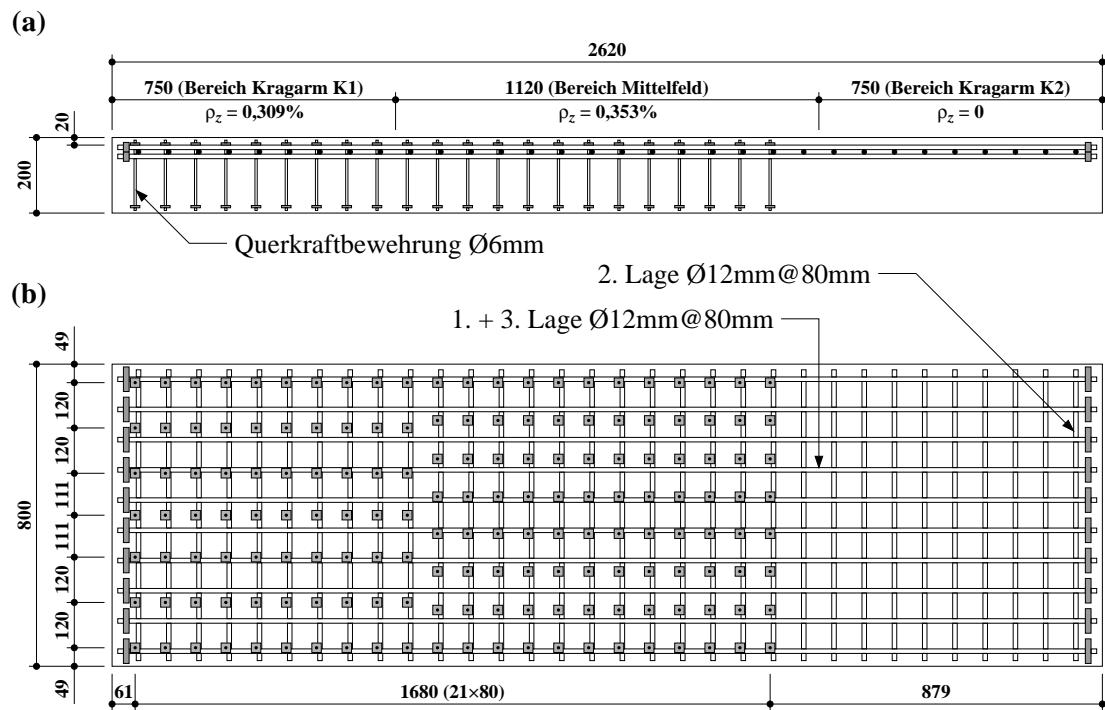


Bild 2.3: Geometrie und Bewehrung Versuchskörper A3: (a) Längsschnitt; (b) Grundriss. Abmessungen in mm.

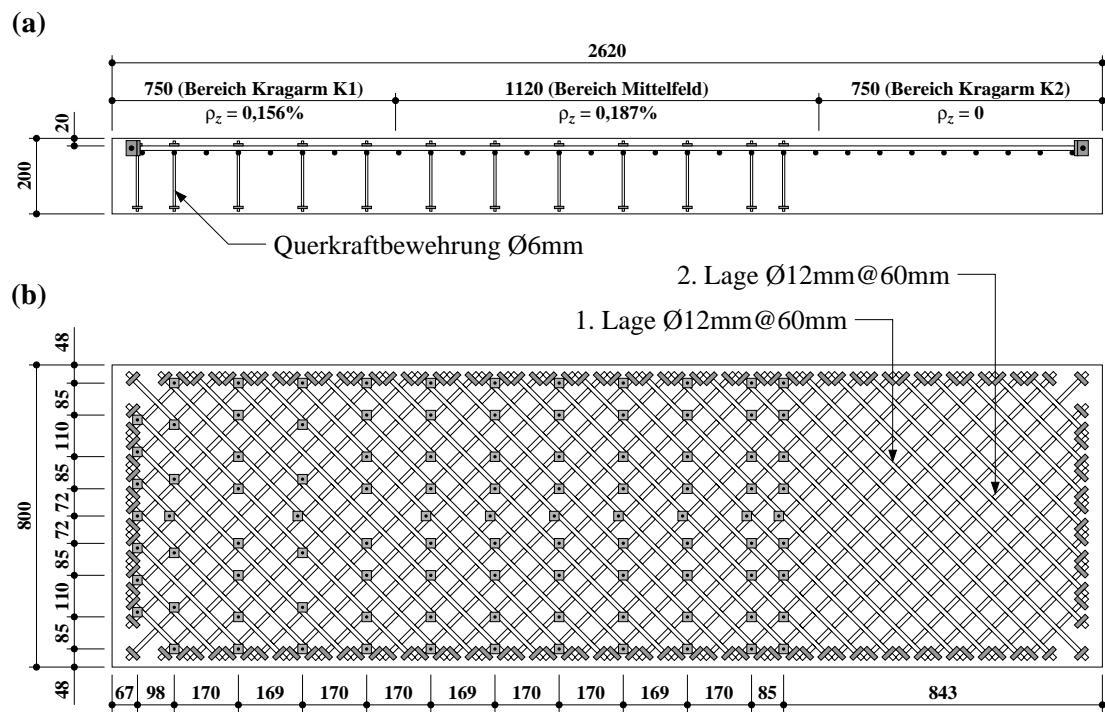


Bild 2.4: Geometrie und Bewehrung Versuchskörper A4: (a) Längsschnitt; (b) Grundriss. Abmessungen in mm.

Versuchskörper

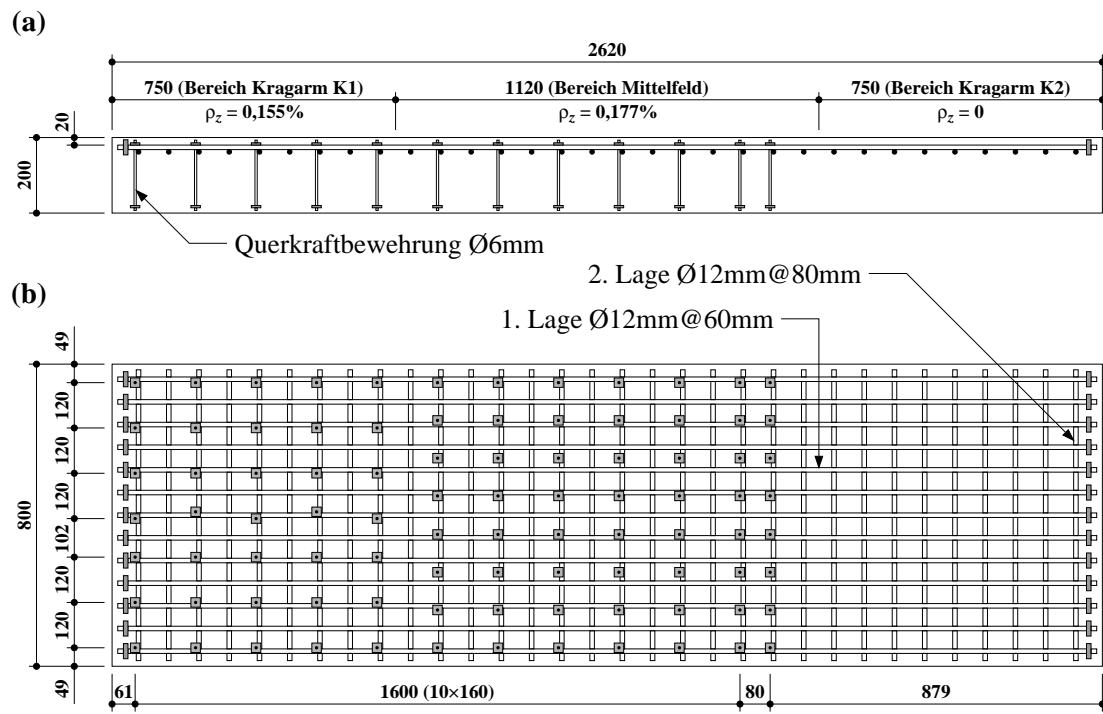


Bild 2.5: Geometrie und Bewehrung Versuchskörper A5: (a) Längsschnitt; (b) Grundriss. Abmessungen in mm.

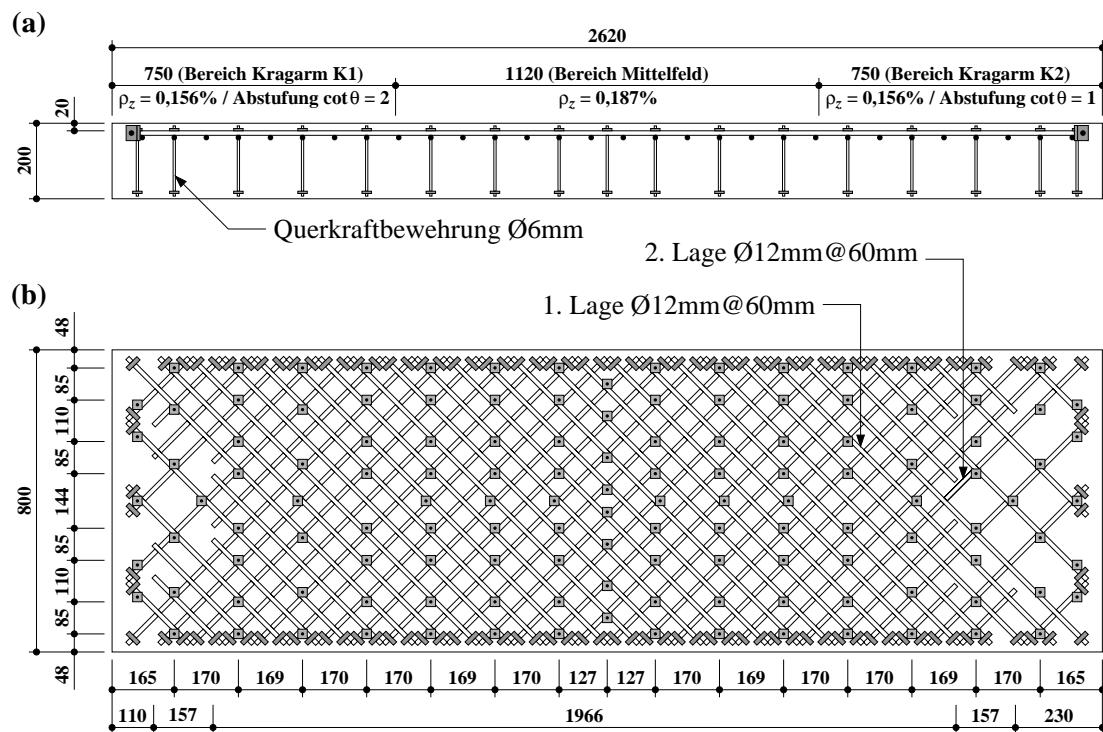


Bild 2.6: Geometrie und Bewehrung Versuchskörper A6: (a) Längsschnitt; (b) Grundriss. Abmessungen in mm.

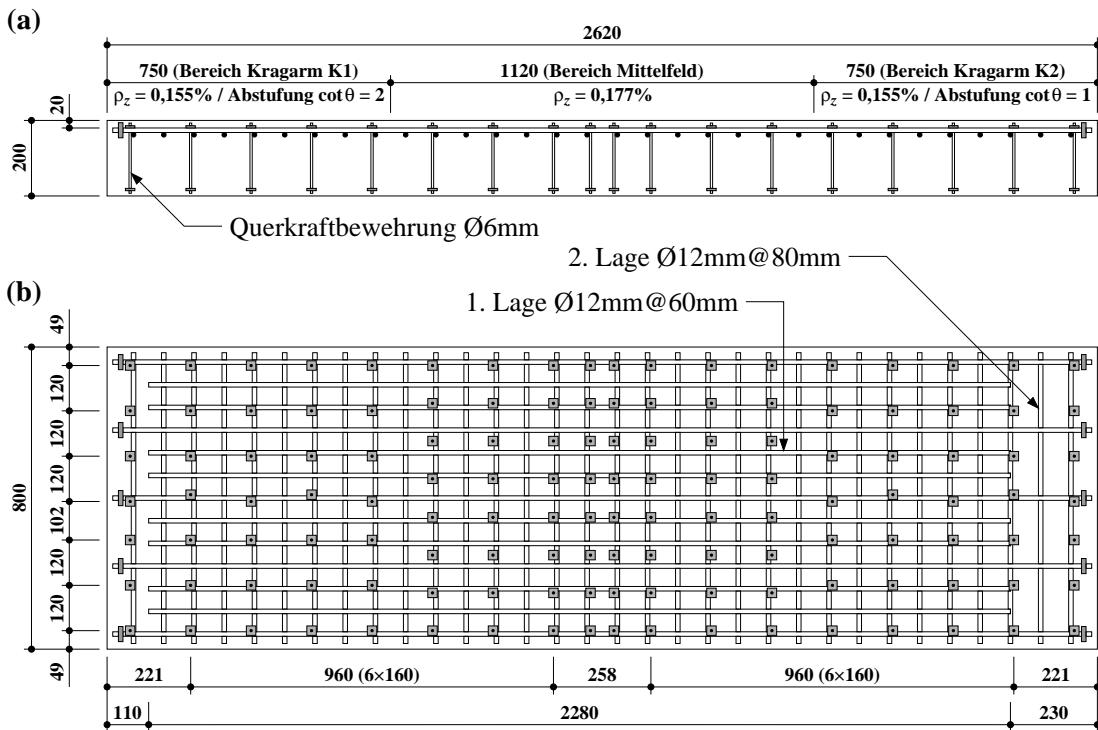


Bild 2.7: Geometrie und Bewehrung Versuchskörper A7: (a) Längsschnitt; (b) Grundriss. Abmessungen in mm.

2.1.2 Versuchsserie B

Die Bilder 2.8 bis 2.11 zeigen typische Details der Schalung und Bewehrung von Versuchskörpern der Serie B.

Die Abmessungen der Versuchskörper der Serie B und deren Bewehrung können den Bildern 2.12 bis 2.18 entnommen werden. Alle Versuchskörper wiesen identische Abmessungen auf. Die Grösse wurde so gewählt, dass möglichst aussagekräftige, auf reale Bauteile übertragbare Resultate erzielt werden konnten. Die Versuchskörper der Serie A entsprachen 40 %-Modellen der Versuchskörper der Serie B. Die Kapazitäten der Versuchseinrichtungen und der Krananlage in der Versuchshalle sowie die durch den Transport gegebenen Beschränkungen setzten obere Grenzen der Versuchskörpergrösse.

Bei der Biegebewehrung handelte es sich um Stäbe Ø 30 mm mit aufgeschweißten Endverankerungsplatten. Die Abmessungen der Ankerplatten aus Stahl S235 betragen 30×100×100 mm bei den Versuchskörpern mit einer Bewehrungslage pro Bewehrungsrichtung und 35×60×165 mm bei jenen mit zwei Bewehrungslagen pro Bewehrungsrichtung. Die Betonüberdeckung der äussersten Bewehrungsstäbe wurde zu 50 mm festgelegt. Ausser bei den Versuchskörpern B6 und B7 wurden über die gesamte Grundrissfläche konstante Bewehrungsquerschnitte eingelegt.

Die Querkraftbewehrung bestand aus Stäben Ø 14 mm mit beidseitig aufgeschweißten Ankerplatten 15×55×55 mm für Bereiche mit Querkraftbewehrungsgehalten von 0,15 % und 0,3 % beziehungsweise aus Stäben Ø 20 mm (Versuchskörper B1) mit beidseitig aufgeschweißten Ankerplatten 20×75×75 mm für Bereiche mit einem Querkraftbewehrungsgehalt von 0,6 %. Im Mittelfeld wurden die Querkraftbewehrungsgehalte gegenüber dem stärkeren Kragarm K1 leicht erhöht. Für die Ankerplatten wurde Stahl S235 gewählt. Der lichte Abstand zwischen den Ankerplatten betrug 400 mm.

Versuchskörper



Bild 2.8: Versuchskörper B1: Schalung und Bewehrung.

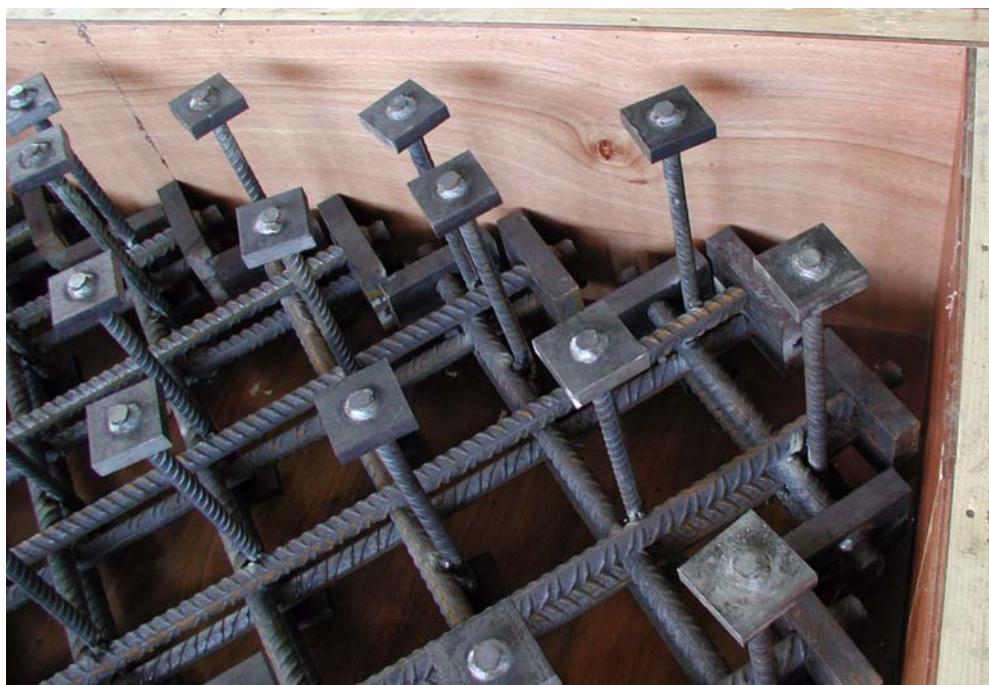


Bild 2.9: Versuchskörper B1: Detail der Querkraftbewehrungsstäbe und Endverankerungen der Biegebewehrung im Kragarm K1.



Bild 2.10: Versuchskörper B1: Detail der Biegebewehrung im Kragarm K2.

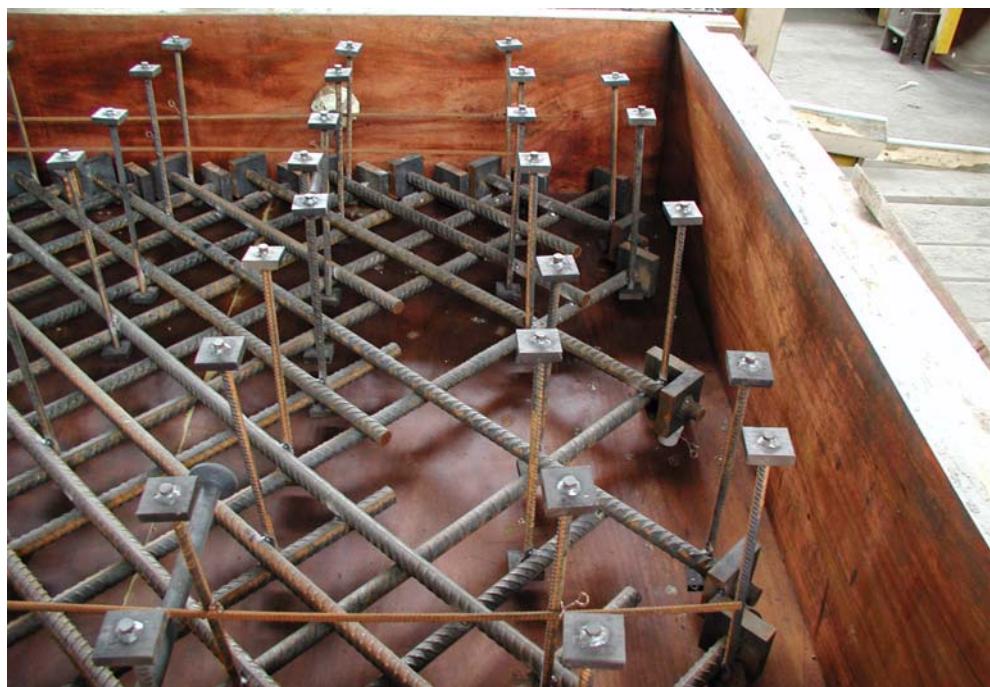


Bild 2.11: Versuchskörper B6: Detail der Abstufung und Endverankerung der Biegebewehrung im Kragarm K1.

Versuchskörper

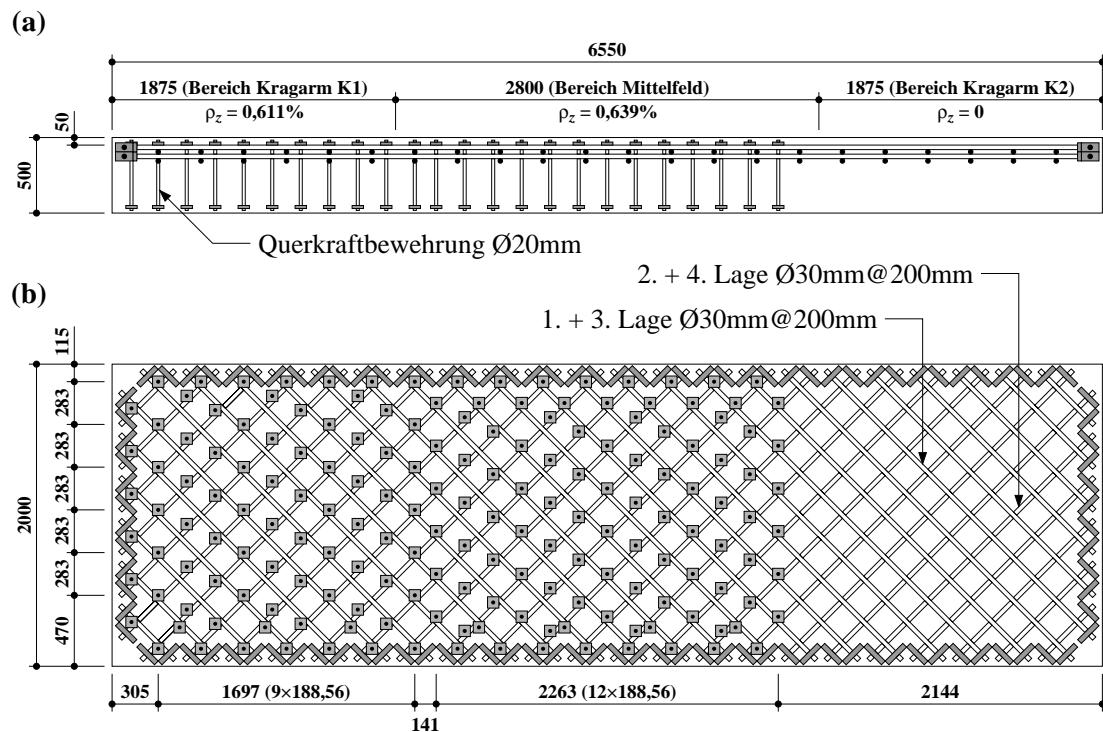


Bild 2.12: Geometrie und Bewehrung Versuchskörper B1: (a) Längsschnitt; (b) Grundriss. Abmessungen in mm.

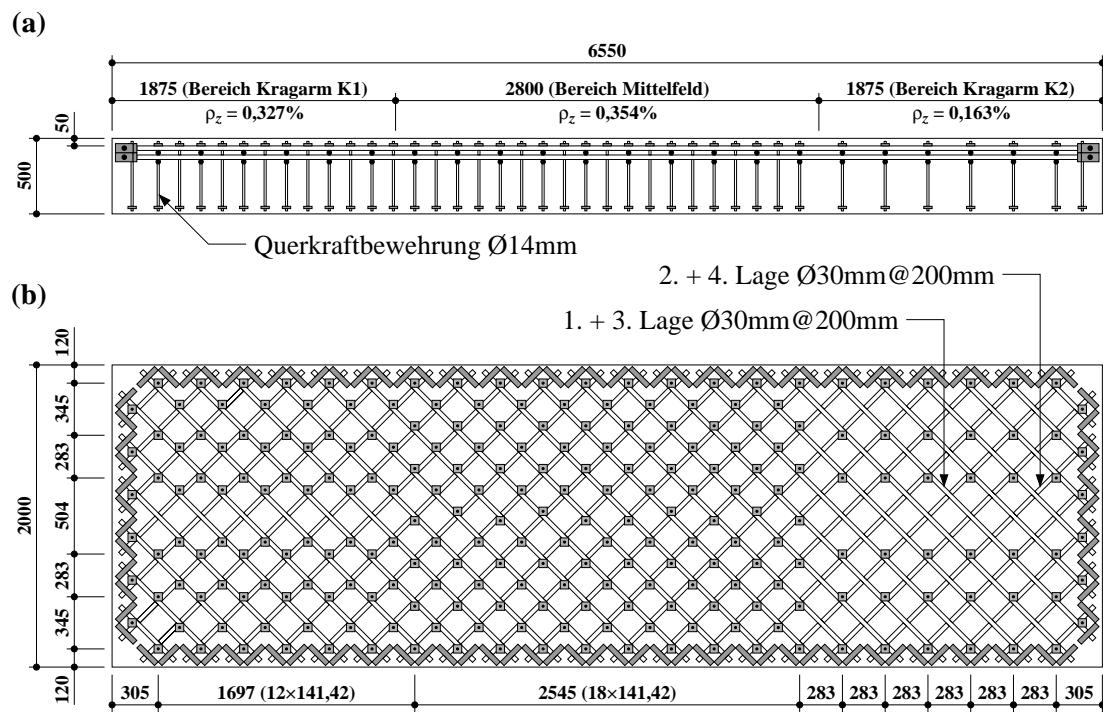


Bild 2.13: Geometrie und Bewehrung Versuchskörper B2: (a) Längsschnitt; (b) Grundriss. Abmessungen in mm.

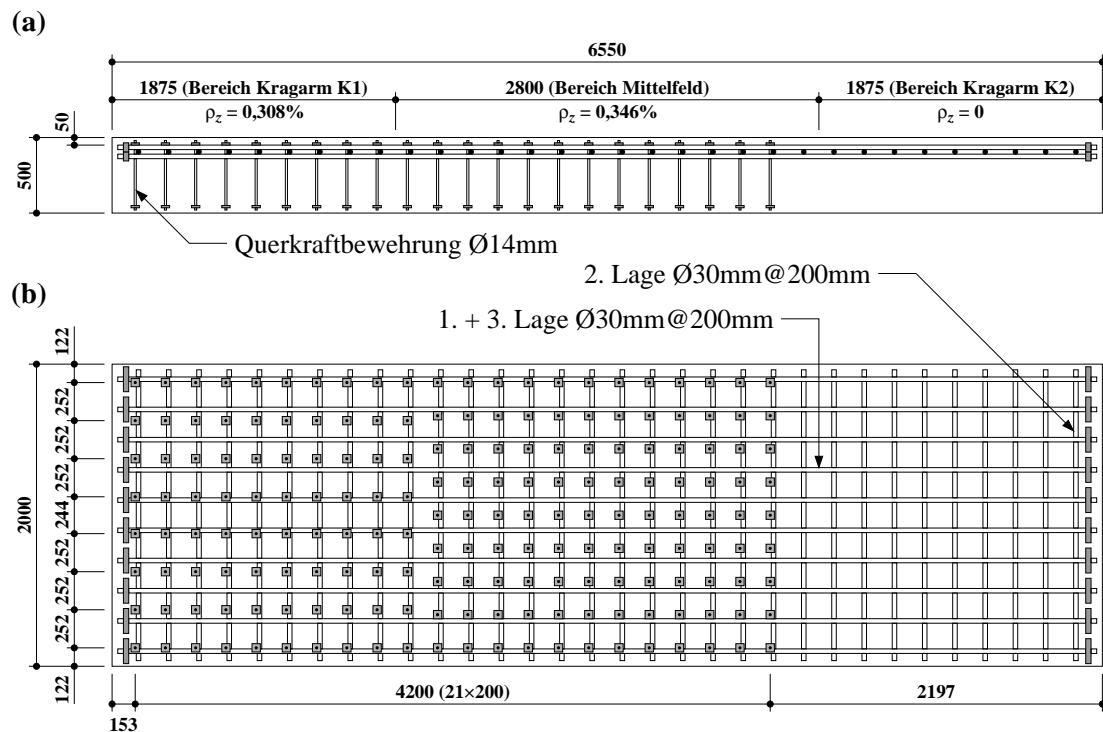


Bild 2.14: Geometrie und Bewehrung Versuchskörper B3: (a) Längsschnitt; (b) Grundriss. Abmessungen in mm.

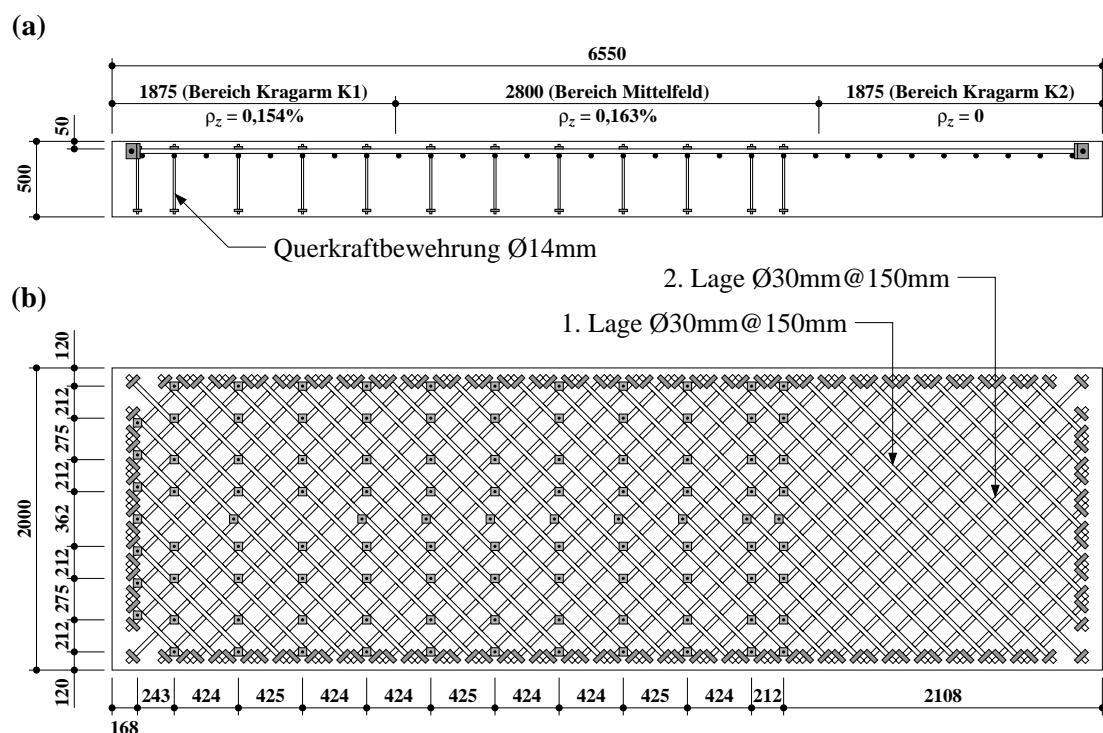


Bild 2.15: Geometrie und Bewehrung Versuchskörper B4: (a) Längsschnitt; (b) Grundriss. Abmessungen in mm.

Versuchskörper

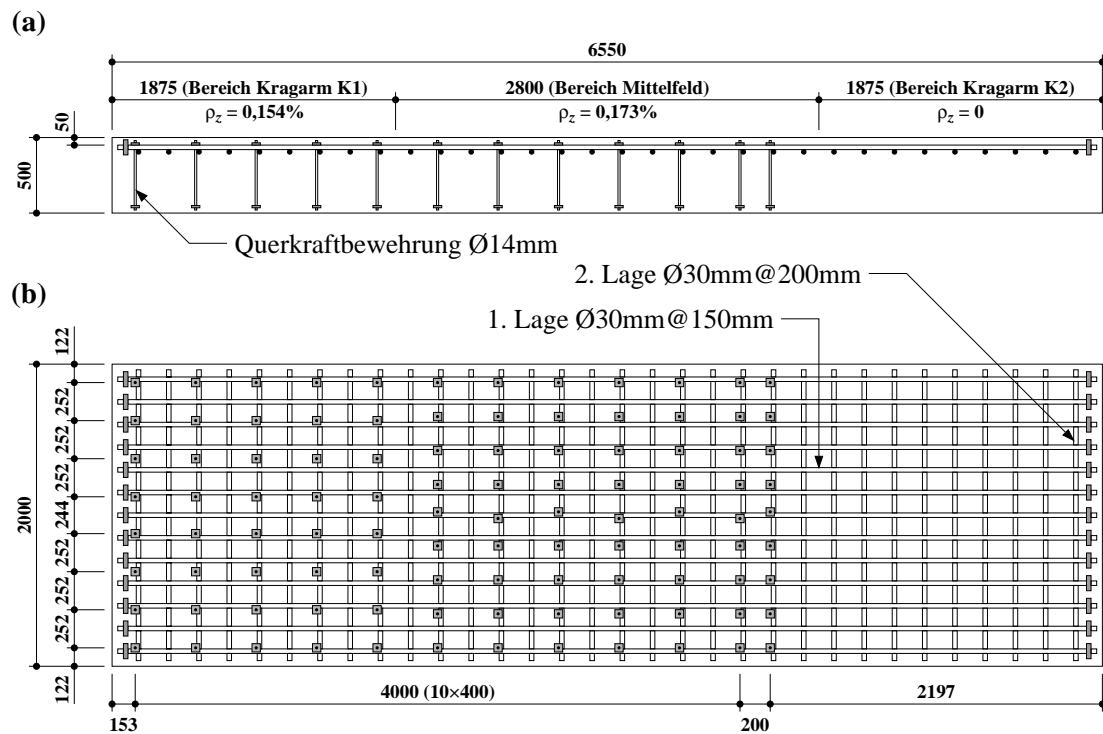


Bild 2.16: Geometrie und Bewehrung Versuchskörper B5: (a) Längsschnitt; (b) Grundriss. Abmessungen in mm.

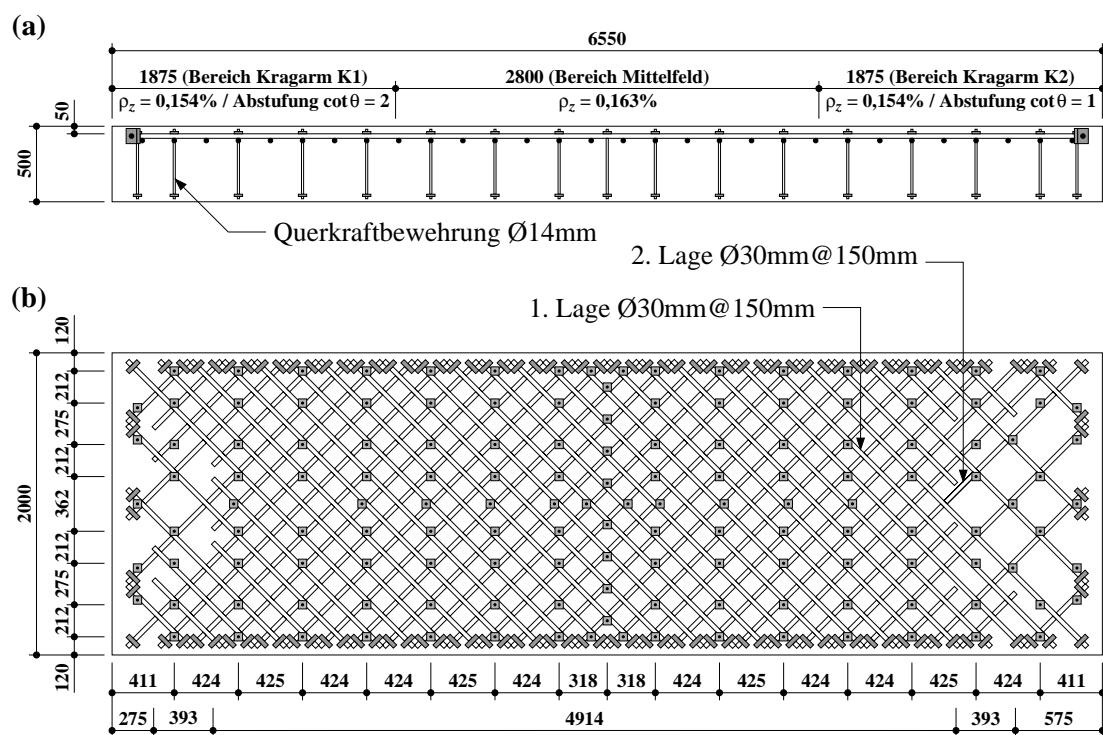


Bild 2.17: Geometrie und Bewehrung Versuchskörper B6: (a) Längsschnitt; (b) Grundriss. Abmessungen in mm.

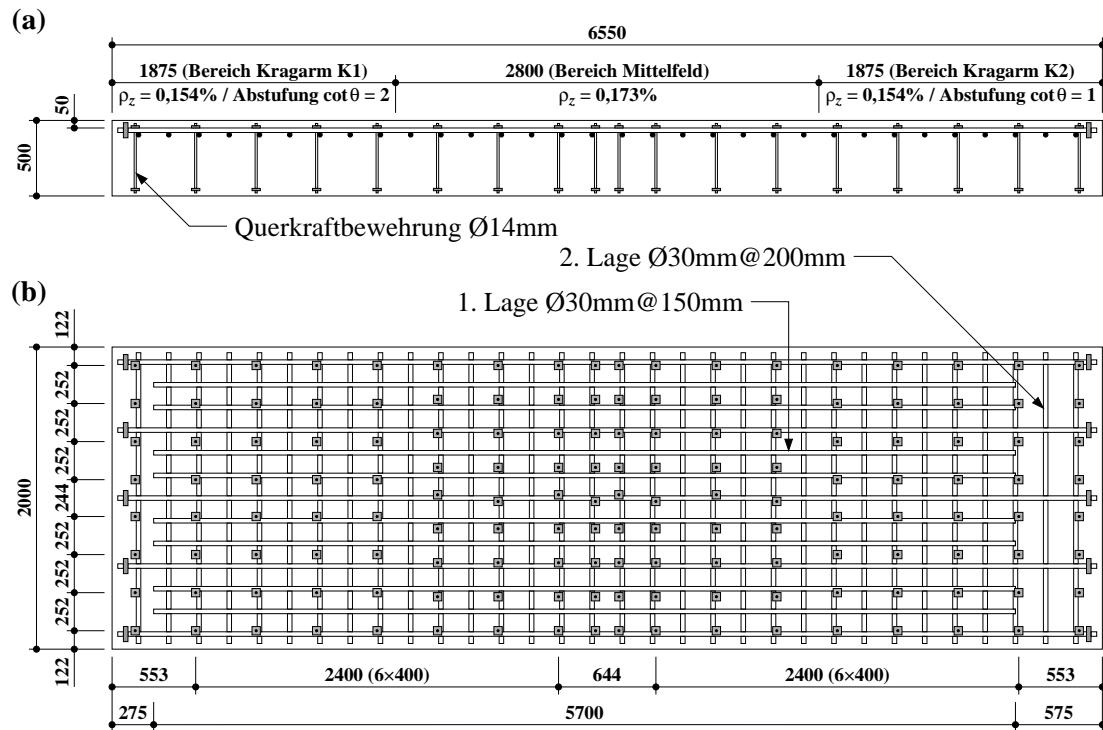


Bild 2.18: Geometrie und Bewehrung Versuchskörper B7: (a) Längsschnitt; (b) Grundriss. Abmessungen in mm.

Mit der Abstufung der Biegebewehrung bei den Versuchskörpern B6 und B7 wurde versucht, dem Verlauf der Zugkräfte im oberen Sandwichdeckel möglichst exakt zu folgen. Die Ausbreitung der Längszugkräfte wurde mit einem 45° -Spannungsfeld ($\cot \theta = 1$) beziehungsweise mit einem $26,6^\circ$ -Spannungsfeld ($\cot \theta = 2$) berücksichtigt, wobei für die Verankerungslänge der geraden Stäbe 35 Ø angenommen wurde.

Die Bewehrung wurde neben der Schalung auf einer speziellen Lehre mit Punktschweisungen zu einem Korb vorfabriziert und anschliessend als Ganzes in die Schalung gehoben.

2.2 Herstellung

Alle Versuchskörper wurden im Vorfabrikationswerk der Firma Stüssi AG in Dällikon hergestellt. In der Regel konnte die Bewehrung innerhalb von zwei bis drei Tagen zu Körben geschweisst werden. An den Längsseiten aller Versuchskörper wurden je vier Transportanker angebracht. Anschliessend wurden die Versuchskörper kopfüber (Biegebewehrung unten) in einem Guss betoniert. Bei den Versuchskörpern der Serie A wurde der Beton mit Hilfe von Schalungsrüttlern, bei jenen der Serie B mit Vibriernadeln verdichtet.

Nach dem Ausschalen wurden die Versuchskörper mit den parallel dazu hergestellten Betonprüfkörpern bis zum Abtransport im Freien zwischengelagert und während der ersten zwei Wochen durch eine Sprinkleranlage feucht gehalten. Durch die Nachbehandlungsmassnahmen konnten trotz der kurzen Ausschalfrist von zwei Tagen Risse in den jungen Betonkörpern vermieden werden. Die Daten der Herstellung, des Transports sowie der Versuchsdurchführungen sind in den Tabellen 2.1 und 2.2 zusammengestellt.

Versuchskörper	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Betonierdatum	01.03.02	15.07.02	02.10.02	22.07.02	30.09.02	26.07.02	03.10.02
Transport an die ETH	07.03.02	25.07.02	01.10.02	25.07.02	01.10.02	01.10.02	01.10.02
Versuchsbeginn – Versuch 1	03.04.02	22.05.03	05.06.03	30.06.03	16.06.03	19.11.02	25.11.02
Versuchsende – Versuch 1	05.04.02	26.05.03	10.06.03	01.07.03	19.06.03	21.11.02	28.11.02
Versuchsbeginn – Versuch 2	09.04.02	02.06.03	11.06.03	02.07.03	25.06.03	22.11.02	29.11.02
Versuchsende – Versuch 2	09.04.02	02.06.03	12.06.03	03.07.03	25.06.03	22.11.02	29.11.02
Materialversuche (Beton)	12.04.02	10.07.03	10.07.03	10.07.03	10.07.03	02.12.02	02.12.02

Tabelle 2.1: Daten der Herstellung und Prüfung der Versuchskörper Serie A.

Versuchskörper	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Betonierdatum	16.05.02	01.07.02	23.07.02	10.07.02	22.08.02	17.07.02	29.07.02
Transport an die ETH	13.06.02	25.07.02	03.04.03	01.10.02	31.10.02	08.01.03	25.02.03
Versuchsbeginn – Versuch 1	08.07.02	12.08.02	22.04.03	14.10.02	03.12.02	21.01.03	13.03.03
Versuchsende – Versuch 1	09.07.02	15.08.02	28.04.03	16.10.02	05.12.02	27.01.03	17.03.03
Versuchsbeginn – Versuch 2	01.07.02	19.08.02	05.05.03	23.10.02	12.12.02	30.01.03	20.03.03
Versuchsende – Versuch 2	03.07.02	21.08.02	14.05.03	25.10.02	18.12.02	05.02.03	25.03.03
Folgeversuch – Versuch 2	24.07.02	22.08.02	19.05.03	29.10.02	–	–	–
Materialversuche (Beton)	11.07.02	28.08.02	25.04.03	28.10.02	06.02.03	06.02.03	28.03.03

Tabelle 2.2: Daten der Herstellung und Prüfung der Versuchskörper Serie B.

2.3 Baustoffe

2.3.1 Beton

Die Betonrezeptur des Frischbetons ist für alle Versuchskörper in den Tabellen 2.3 und 2.4 zusammengestellt. Die Zusammenstellung der Rezeptur erfolgte aufgrund der angenommenen mittleren Rohdichten von 2650 kg/m³ für die Zuschlagstoffe und 3150 kg/m³ für den Zement, sowie eines angenommenen Luftporengehalts des Frischbetons von 1 %.

Als Zuschlagstoff wurde gewaschener rolliger Kiessand mit einem Größtkorn von 16 mm und einer Korngrößenverteilung gemäss Bild 2.19 verwendet. Der Eigenfeuchtigkeitsgehalt der Zuschlagstoffe variierte je nach Witterung stark. Als Bindemittel wurde hochwertiger Portlandzement CEM I 42.5 verwendet. Die Wasserbeigabe erfolgte aufgrund der visuellen Beurteilung der Frischbetonkonsistenz.

Der Beton wurde in einem horizontalen Zwangsmischer in Chargen von 0,5 m³ gemischt. Die Dosierung der Zuschlagstoffe und des Zements erfolgte mit handgesteuerten Waagen, während die Zugabe des Anmachwassers mit einer Wasseruhr kontrolliert wurde.

Zur Ermittlung der Festigkeitswerte und des Spannungs-Dehnungsverhaltens wurden pro Versuchskörper fünf Zylinder (\varnothing 150 mm, h = 300 mm) und drei Würfel (Kantenlänge 150 mm) her-

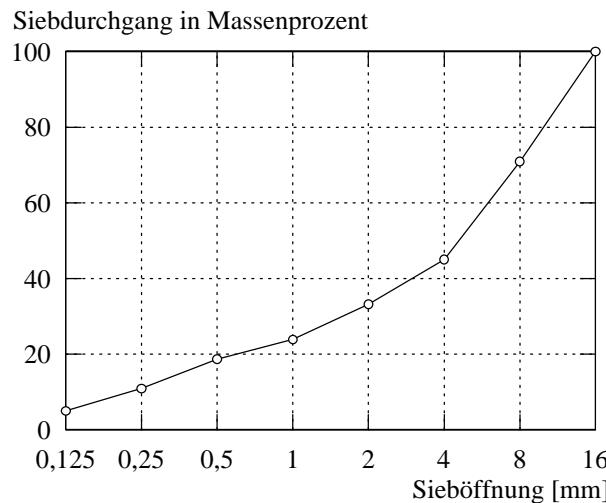


Bild 2.19: Korngrößenverteilung der Zuschlagstoffe.

gestellt. Die Würfel und drei Zylinder dienten zur Bestimmung der einachsialen Druckfestigkeit, während an den drei Zylindern auch der Elastizitätsmodul bestimmt wurde. Die restlichen zwei Zylinder wurden in Hälften zersägt, an welchen mittels Stempelversuchen die Spaltzugfestigkeit

Versuchskörper		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Kiessand (trocken)	[kg/m ³]	1830	1941	1877	1913	1933	1933	1904
Eigenfeuchte Kiessand	[%]	2,6	1,3	2,4	1,2	0,6	1,2	2,0
Kiessand (feucht)	[kg/m ³]	1879	1966	1922	1936	1944	1957	1942
Wasserzugabe	[l/m ³]	146	126	130	140	142	128	125
Wasser total	[l/m ³]	194	150	175	163	153	152	164
Zement CEM I 42,5	[kg/m ³]	332	338	336	332	338	342	339
W/Z-Wert (gebrannt)	[–]	0,58	0,44	0,52	0,49	0,45	0,44	0,48
Rohdichte Frischbeton	[kg/m ³]	2356	2429	2388	2408	2424	2427	2407

Tabelle 2.3: Betonrezeptur der Versuchskörper Serie A.

Versuchskörper		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Kiessand (trocken)	[kg/m ³]	1934	1903	1863	1929	1854	1866	1861
Eigenfeuchte Kiessand	[%]	0,8	2,3	2,0	0,8	2,5	2,6	2,6
Kiessand (feucht)	[kg/m ³]	1949	1947	1901	1945	1900	1915	1909
Wasserzugabe	[l/m ³]	137	120	143	137	139	131	136
Wasser total	[l/m ³]	152	164	180	153	184	180	184
Zement CEM I 42,5	[kg/m ³]	340	340	335	342	334	334	326
W/Z-Wert (gebrannt)	[–]	0,45	0,48	0,54	0,45	0,55	0,54	0,56
Rohdichte Frischbeton	[kg/m ³]	2426	2407	2379	2425	2372	2379	2371

Tabelle 2.4: Betonrezeptur der Versuchskörper Serie B.

Versuchskörper

ermittelt werden konnte. In den Tabellen 2.5 und 2.6 sind die Resultate der Festigkeitsprüfungen sowie der E-Modulversuche zusammengefasst.

Mit Ausnahme der verformungsgesteuerten Versuche zur Bestimmung der Zylinderdruckfestigkeiten der Versuchskörper A2, A3, A4, A5, A6, A7, B3, B5, B6 und B7 erfolgte die Versuchsteuerung über die Kraft. Die Wahl der Belastungsgeschwindigkeit ergab einen Spannungszuwachs von $0,5 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$ bei den Versuchen zur Ermittlung der Druckfestigkeiten. Bei den Stempeldruckversuchen betrug der auf die gesamte Querschnittsfläche des Zylinders bezogene Spannungszuwachs $0,02 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$, was einem fiktiven Zugspannungszuwachs von ca. $0,5 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min})$ entspricht. Die Spaltzugfestigkeit kann näherungsweise mit der in Bild 2.21 (c) gegebenen und in [2] und [12] erläuterten Beziehung ermittelt werden, wobei F_u die Stempelkraft

Versuchskörper		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Alter der Prüfkörper	[d]	42	360	281	353	283	129	60
Rohdichte ρ_c	[kg/m ³] $\pm 0,9 \%$	2372 $\pm 0,6 \%$	2373 $\pm 0,4 \%$	2363 $\pm 0,5 \%$	2371 $\pm 0,4 \%$	2352 $\pm 1,4 \%$	2366 $\pm 0,5 \%$	2373 $\pm 2,6 \%$
Würfeldruckfestigkeit f_{cw}	[N/mm ²] $\pm 1,5 \%$	58,1 $\pm 5,6 \%$	57,3 $\pm 4,1 \%$	63,3 $\pm 1,1 \%$	58,5 $\pm 4,6 \%$	59,1 $\pm 4,6 \%$	61,2 $\pm 3,5 \%$	59,0 $\pm 2,6 \%$
Zylinderdruckfestigkeit f_{cc}	[N/mm ²] $\pm 4,7 \%$	52,4 $\pm 2,6 \%$	48,8 (2) $\pm 6,1 \%$	58,8 $\pm 4,0 \%$	46,8 $\pm 4,3 \%$	56,7 $\pm 0,8 \%$	51,5 $\pm 0,8 \%$	52,3 $\pm 2,3 \%$
Spaltzugfestigkeit f_{cts}	[N/mm ²] $\pm 10,4 \%$	4,56 $\pm 7,8 \%$	4,11 $\pm 6,7 \%$	4,16 $\pm 2,3 \%$	3,62 $\pm 9,3 \%$	4,00 $\pm 4,6 \%$	3,72 $\pm 2,9 \%$	3,91 $\pm 2,9 \%$
Bruchstauchung ε_{cu}	[‰] $\pm 3,0 \%$	— $\pm 3,0 \%$	1,98 (2) $\pm 6,3 \%$	2,30 $\pm 9,0 \%$	1,88 $\pm 8,3 \%$	2,28 $\pm 4,3 \%$	2,02 $\pm 10,0 \%$	2,14 $\pm 10,0 \%$
Elastizitätsmodul E_c	[kN/mm ²] $\pm 2,3 \%$	29,2 $\pm 0,3 \%$	37,5 (2) $\pm 2,3 \%$	37,7 $\pm 2,3 \%$	36,7 $\pm 2,4 \%$	36,1 $\pm 8,5 \%$	38,1 $\pm 2,0 \%$	36,7 $\pm 2,0 \%$

Tabelle 2.5: Mechanische Kennwerte des Betons der Versuchskörper Serie A; Mittelwerte und Variationskoeffizienten (Zahlen in Klammern: Von der Regel abweichende Anzahl Prüfkörper).

Versuchskörper		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Alter der Prüfkörper	[d]	56	55	276	110	168	204	242
Rohdichte ρ_c	[kg/m ³] $\pm 0,6 \%$	2384 $\pm 1,0 \%$	2390 $\pm 0,6 \%$	2359 $\pm 0,4 \%$	2369 $\pm 0,4 \%$	2358 $\pm 0,5 \%$	2341 $\pm 0,6 \%$	2361 $\pm 4,9 \%$
Würfeldruckfestigkeit f_{cw}	[N/mm ²] $\pm 3,0 \%$	58,7 $\pm 6,4 \%$	59,3 $\pm 1,8 \%$	59,5 $\pm 1,9 \%$	61,3 $\pm 3,1 \%$	59,4 $\pm 4,4 \%$	53,7 $\pm 0,3 \%$	56,9 $\pm 7,3 \%$
Zylinderdruckfestigkeit f_{cc}	[N/mm ²] $\pm 6,6 \%$	52,4 $\pm 4,6 \%$	49,5 $\pm 1,7 \%$	53,7 $\pm 1,4 \%$	54,2 $\pm 2,7 \%$	51,8 (2) $\pm 0,3 \%$	47,4 (2) $\pm 19,6 \%$	49,2 $\pm 5,0 \%$
Spaltzugfestigkeit f_{cts}	[N/mm ²] $\pm 3,8 \%$	4,29 $\pm 7,4 \%$	3,64 $\pm 6,9 \%$	3,90 $\pm 6,1 \%$	3,75 $\pm 5,5 \%$	4,14 $\pm 4,9 \%$	3,79 $\pm 4,9 \%$	4,12 $\pm 6,8 \%$
Bruchstauchung ε_{cu}	[‰] $\pm 2,4 \%$	— $\pm 2,4 \%$	— $\pm 2,4 \%$	2,12 $\pm 1,6 \%$	— $\pm 1,6 \%$	2,45 (2) $\pm 5,5 \%$	2,39 (2) $\pm 4,7 \%$	2,18 $\pm 8,1 \%$
Elastizitätsmodul E_c	[kN/mm ²] $\pm 1,2 \%$	31,8 $\pm 6,3 \%$	29,9 $\pm 4,3 \%$	36,0 $\pm 1,6 \%$	35,4 $\pm 1,6 \%$	33,9 (2) $\pm 5,5 \%$	34,8 (2) $\pm 4,7 \%$	35,2 $\pm 2,5 \%$

Tabelle 2.6: Mechanische Kennwerte des Betons der Versuchskörper Serie B; Mittelwerte und Variationskoeffizienten (Zahlen in Klammern: Von der Regel abweichende Anzahl Prüfkörper).

beim Bruch des Körpers bezeichnet. Die weiteren Bezeichnungen und die übliche Versagensart können Bild 2.21 entnommen werden.

Die Versuche zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls wurden ebenfalls kraftgesteuert durchgeführt. Der Spannungszuwachs betrug $0,5 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$. Als Elastizitätsmodul wird der Sekantenmodul zwischen einer Unterspannung von $0,5 \text{ N}/\text{mm}^2$ und einer Oberspannung von einem Drittel der Würfeldruckfestigkeit angegeben [18]. Die Stauchungen des Betons zur Berechnung des E-Moduls wurden in der Mitte des Zylinders mit zwei induktiven Wegmessungen über eine Messbasis von 150 mm bestimmt.

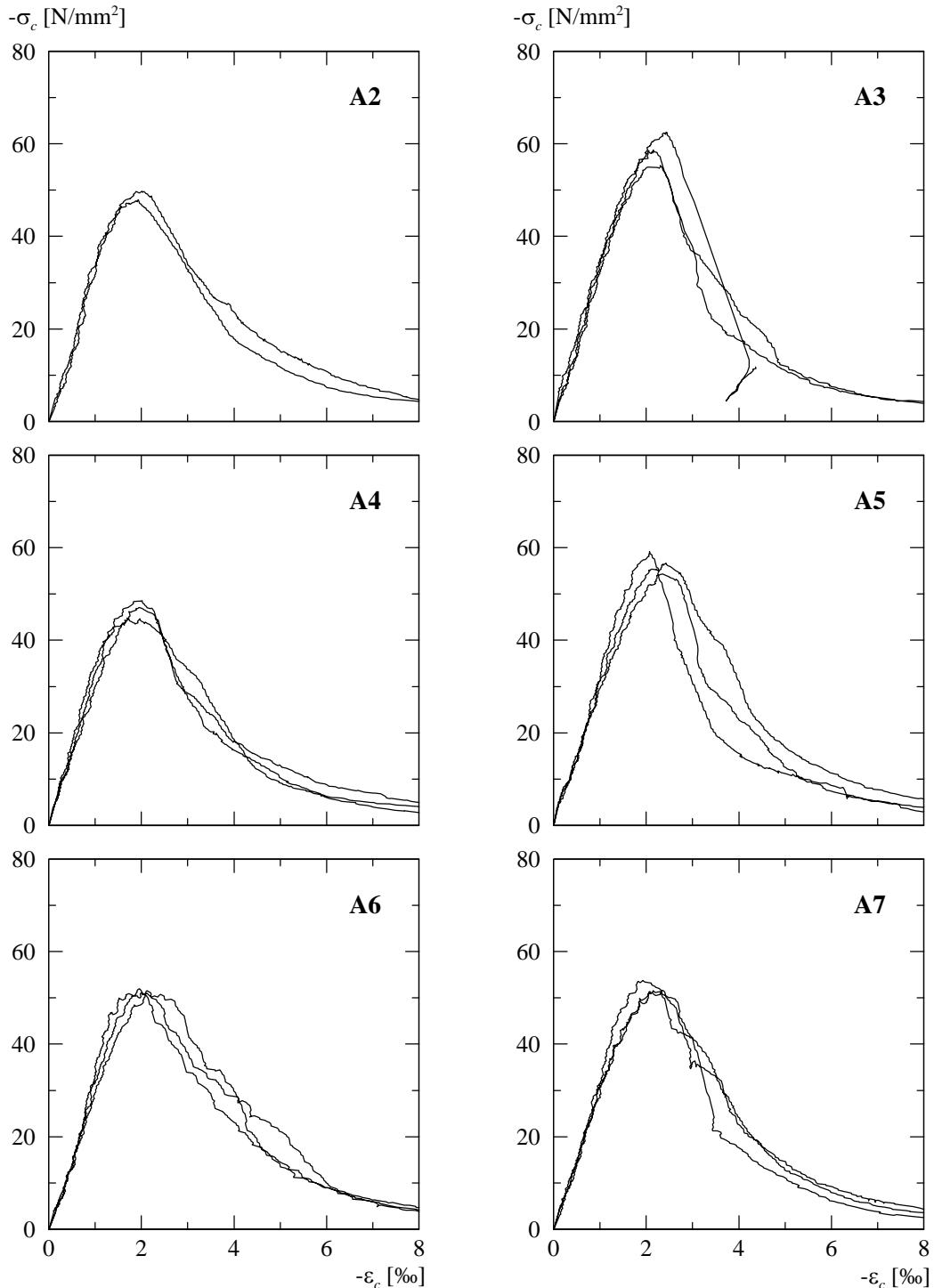


Bild 2.20: Spannungs-Stauchungsdiagramme des Betons der Versuchskörper Serie A.

Versuchskörper

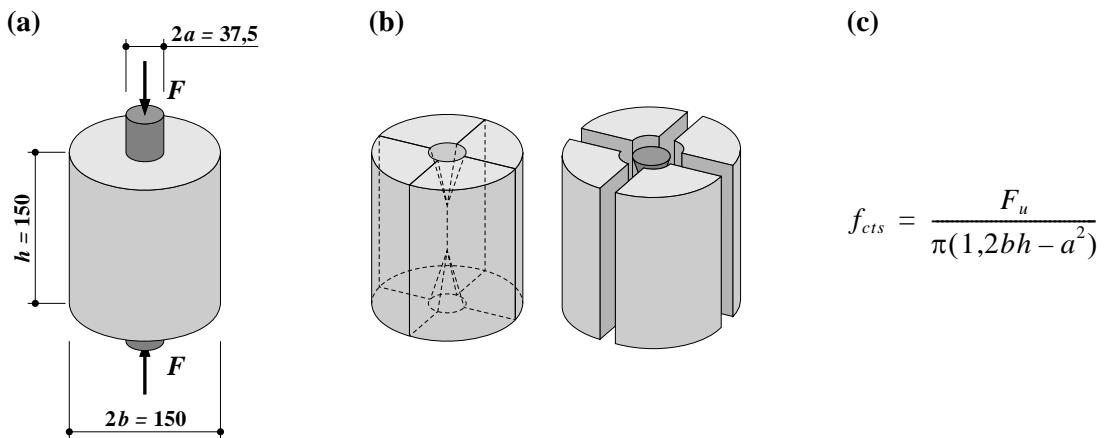


Bild 2.21: Stempelversuch: (a) Versuchsanordnung; (b) übliches Bruchbild; (c) Formel zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit. Abmessungen in mm.

Die Zylinderdruckfestigkeit der Versuchskörper A2, A3, A4, A5, A6, A7, B3, B5, B6 und B7 wurde durch einen verformungsgesteuerten Versuch ermittelt. Die Kolbengeschwindigkeit betrug 5 $\mu\text{m}/\text{s}$, was einem Druckspannungszuwachs von ca. 0,5 N/(mm 2 ·s) entsprach. In den Bildern 2.20

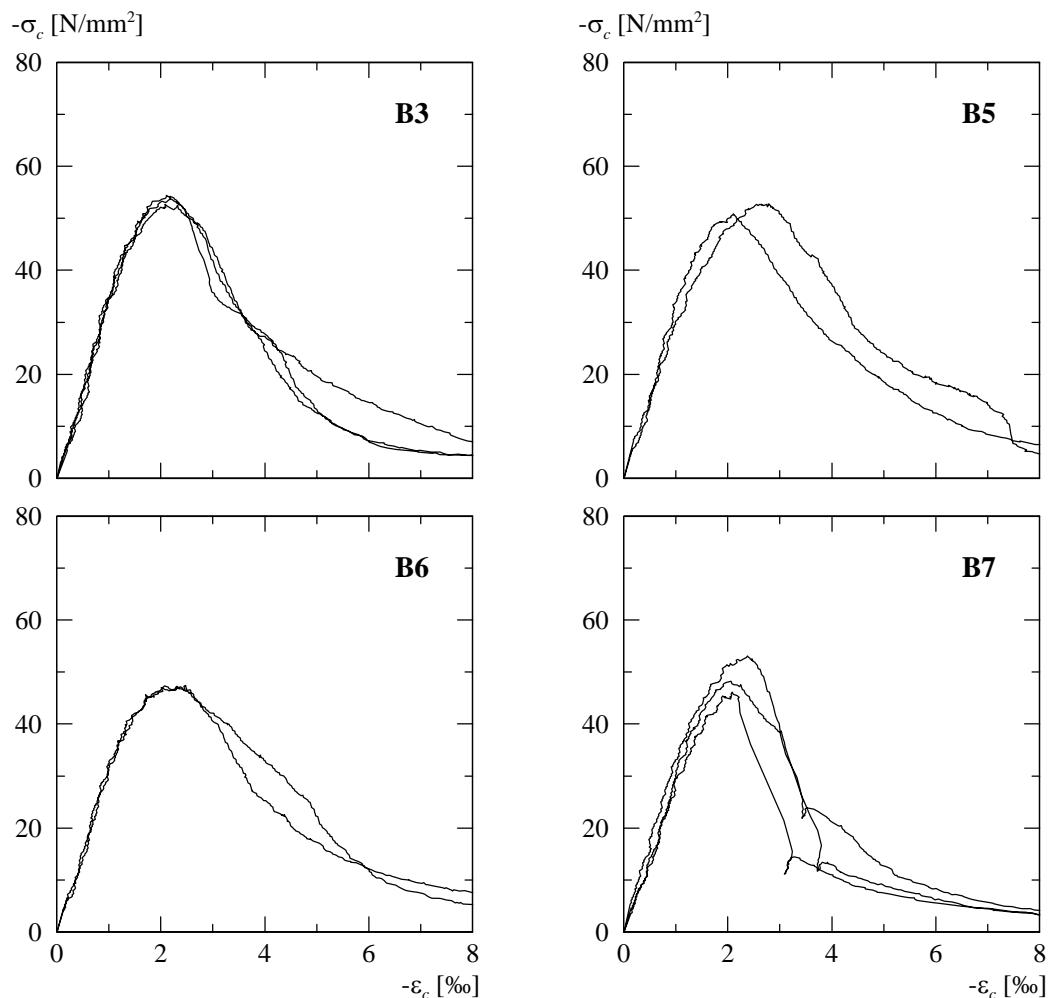


Bild 2.22: Spannungs-Stauchungsdiagramme des Betons der Versuchskörper Serie B.

und 2.22 sind die Spannungs-Stauchungsdiagramme dargestellt. Die Bruchstauchungen des Betons sowie die Spannungs-Stauchungsbeziehungen wurden aus dem Kolbenweg bestimmt. Dabei wurde die Elastizität der Prüfmaschine bei der Berechnung der Stauchungen berücksichtigt.

2.3.2 Betonstahl

Ausser für die Querkraftbewehrungsstäbe Ø 6 mm, für welche kaltverformtes, geripptes Ringmaterial roll-R der Stahl Gerlafingen AG verwendet wurde, kamen für alle Versuchskörper ausschliesslich aus der Walzhitze vergütete, gerippte Bewehrungsstäbe zur Anwendung. Bei den Stäben Ø 8 mm und bei den Stäben Ø 12 mm des Versuchskörpers A1 handelte es sich um warmgewalztes Ringmaterial topar-R der Stahl Gerlafingen AG, bei den Stäben Ø 12 mm um Stabmaterial BSW Tempcore der Badischen Stahlwerke GmbH und bei den Stäben Ø 14, 20 und 30 mm um Stabmaterial topar-S 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/m³. Anschliessend wurden die Stäbe verformungsgesteuert bis zum Bruch belastet (siehe Bilder 2.23 und 2.25). Ausser der Zugkraft und dem Kolbenweg der Prüfmaschine wurde die Dehnung in Stabmitte mit einem induktiven Wegmesser über

Nomineller Durchmesser [mm]	6	8	12 (A1)	12	14	20	30
Anzahl Prüfkörper [-]	11	8	8	20	20	12	20
Effektiver Durchmesser [mm] (durch Wägung bestimmt)	5,89 ± 0,1 %	8,04 ± 0,1 %	12,02 ± 0,1 %	11,93 ± 0,4 %	13,99 ± 0,1 %	20,26 ± 0,0 %	30,14 ± 0,4 %
Freie Prüflänge [mm]	750	750	750	750	750	750	1100
Dynamische Fliessgrenze $f_{sy,dyn}$ [N/mm ²]	594,6 ¹⁾ ± 0,7 %	530,2 ¹⁾ ± 0,5 %	501,1 ¹⁾ ± 1,4 %	567,3 ± 2,0 %	538,7 ± 2,0 %	518,1 ± 0,9 %	556,1 ± 2,9 %
Statische Fliessgrenze $f_{sy,stat}$ [N/mm ²]	573,9 ± 1,0 %	511,4 ± 0,5 %	480,8 ± 1,5 %	546,0 ± 2,3 %	519,0 ± 1,9 %	495,3 ± 0,8 %	533,6 ± 3,0 %
Dynamische Zugfestigkeit $f_{su,dyn}$ [N/mm ²]	623,2 ± 1,1 %	620,0 ± 0,6 %	605,6 ± 0,4 %	678,9 ± 2,0 %	617,6 ± 1,7 %	612,5 ± 0,4 %	656,6 ± 2,1 %
Statische Zugfestigkeit $f_{su,stat}$ [N/mm ²]	583,4 ± 0,6 %	573,4 ± 0,6 %	558,7 ± 0,4 %	630,3 ± 2,2 %	571,4 ± 1,9 %	569,4 ± 0,7 %	613,7 ± 2,3 %
Dehnung bei Verfestigungsbeginn ε_{sv} [%]	—	—	—	14,9 ± 20,5 %	29,5 ± 2,4 %	26,3 ± 7,0 %	17,6 ± 13,8 %
Dehnung bei Höchstlast A_{gt} [%]	22,8 ± 22,3 %	54,3 ± 7,0 %	67,4 ± 8,2 %	95,5 ± 6,6 %	108,8 ± 6,2 %	131,0 ± 3,1 %	108,1 ± 2,5 %
Bruchdehnung ε_{su} [%]	26,5 ± 23,1 %	68,0 ± 13,2 %	89,0 ± 9,5 %	111,7 ± 9,2 %	120,4 ± 5,0 %	147,6 ± 4,7 %	124,7 ± 3,7 %
Gleichmassdehnung $\varepsilon_{sg} = 2\varepsilon_{10} - \varepsilon_5$ [%]	37,6 ± 34,2 %	80,4 ± 28,2 %	97,6 ± 18,9 %	107,9 ± 11,1 %	120,8 ± 9,7 %	133,0 ± 6,3 %	82,7 ± 16,7 %
Vergleichsgrösse $\varepsilon'_{sg} = 2\varepsilon_{20} - \varepsilon_{10}$ [%]	34,3 ± 32,3 %	62,5 ± 41,5 %	79,9 ± 15,6 %	95,4 ± 13,8 %	108,0 ± 11,4 %	112,5 ± 5,9 %	94,0 ± 4,6 %
Elastizitätsmodul E_s [kN/mm ²]	209,4 ± 1,4 %	207,0 ± 0,8 %	202,2 ± 2,1 %	200,0 ± 2,9 %	203,1 ± 2,8 %	201,9 ± 2,8 %	209,8 ± 2,3 %

Tabelle 2.7: Mechanische Kennwerte des Betonstahls; Mittelwerte und Variationskoeffizienten.

¹⁾ 0,2 % - Dehngrenze

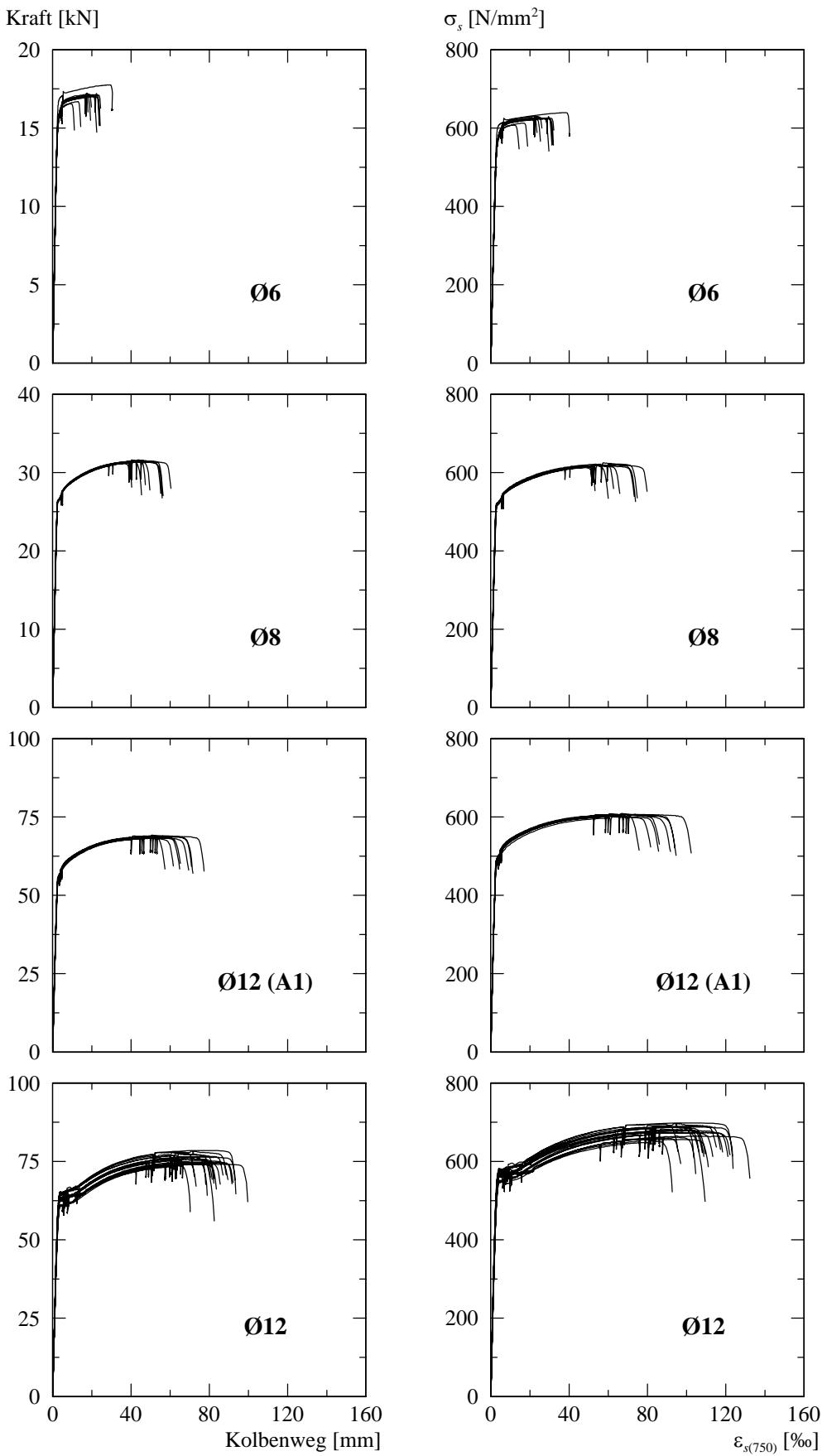


Bild 2.23: Kraft-Verformungs- und Spannungs-Dehnungsdiagramme des Betonstahls.

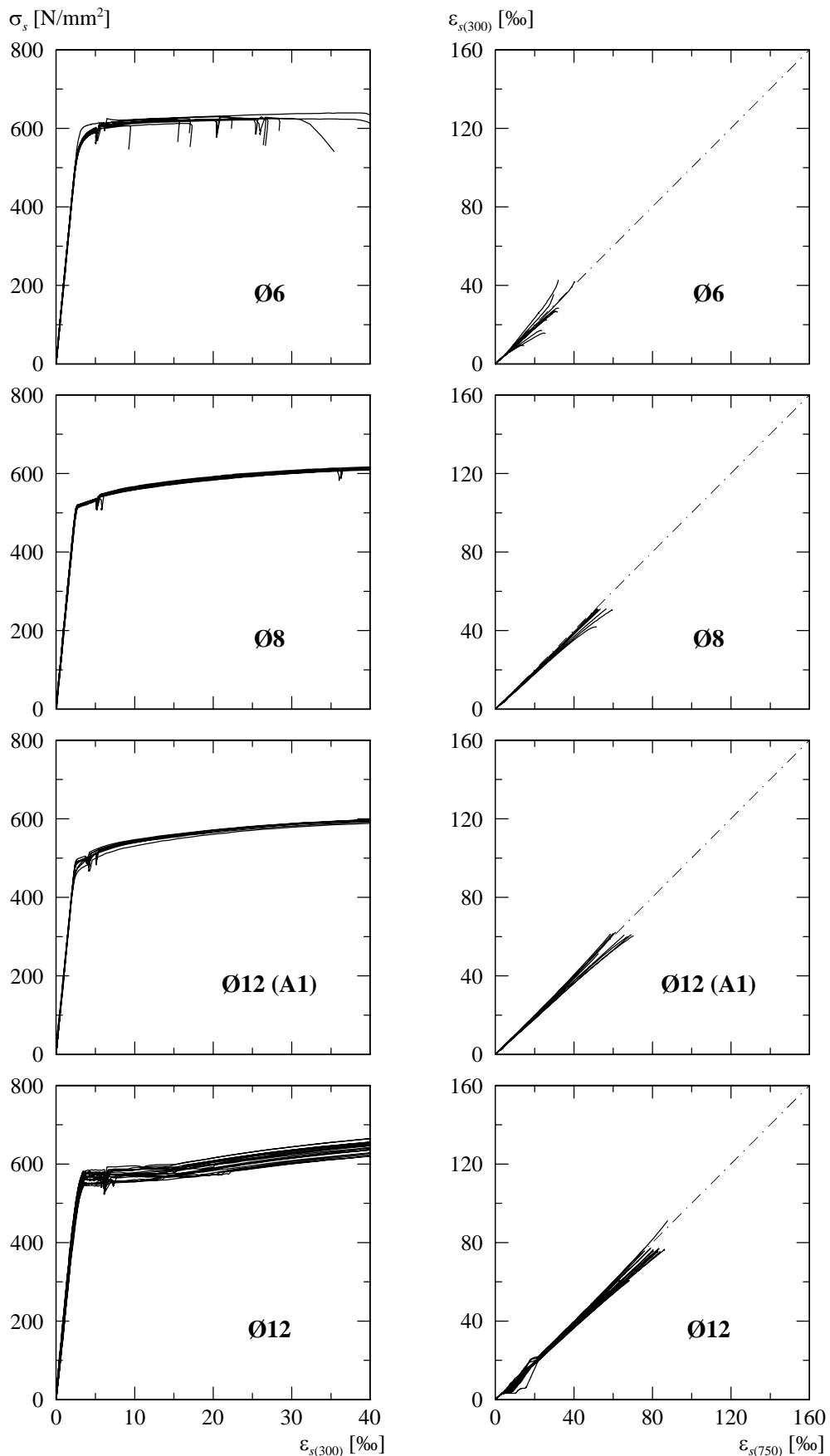


Bild 2.24: Spannungs-Dehnungsdiagramme des Betonstahls und Vergleich der mittleren Dehnungen im Bereich des Feindehnungsgebers mit jenen über die ganze freie Prüflänge.

eine Basislänge von 300 mm gemessen. Die Kolbengeschwindigkeit entsprach bis zum Erreichen der Fliessgrenze einem Zugspannungszuwachs von 10 N/(mm²·s). Bei einer Stahldehnung von ca. 5,5 %o wurde der Kolbenweg während zwei Minuten konstant gehalten, bevor der Versuch mit der zehnfachen Kolbengeschwindigkeit fortgesetzt wurde, was einer Dehnungsgeschwindigkeit von ca. 30 %o/min entsprach. Vor dem Überschreiten der Maximallast wurde der Kolbenweg ein zweites Mal während zweien Minuten konstant gehalten, ehe die Probe mit der gleichen Geschwindigkeit

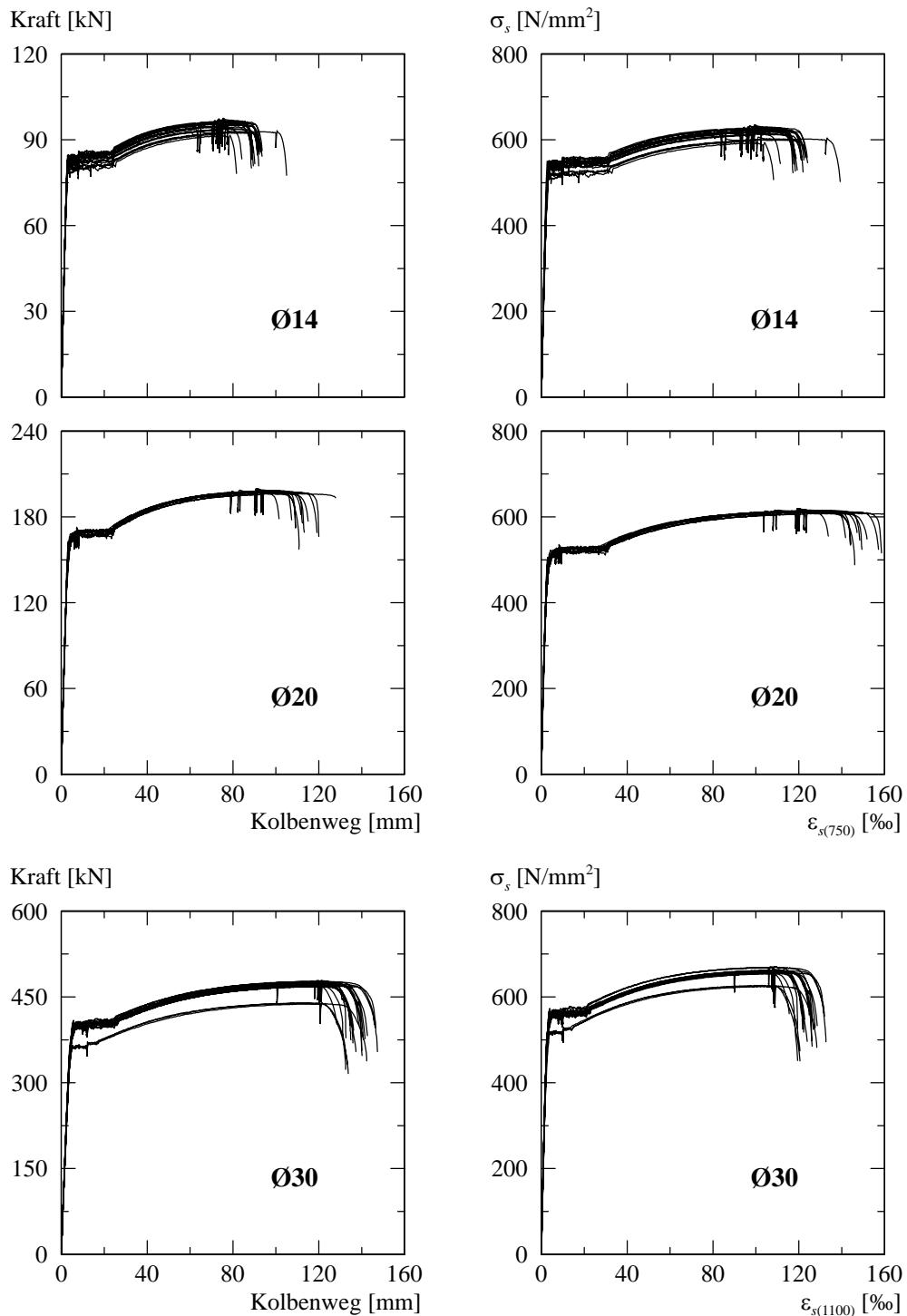


Bild 2.25: Kraft-Verformungs- und Spannungs-Dehnungsdiagramme des Betonstahls.

bis zum Bruch belastet wurde. Die Bilder 2.24 und 2.26 zeigen die Stahlkennlinien im Verfestigungsbereich und einen Vergleich der Dehnungen $\varepsilon_{s(300)}$ im Messbereich des Feindehnungsgebers mit dem Mittel $\varepsilon_{s(750)}$, beziehungsweise $\varepsilon_{s(1100)}$ über die ganze freie Prüflänge.

Sämtliche in Tabelle 2.7 zusammengestellten Festigkeitswerte wurden unter Verwendung des effektiven Stabdurchmessers berechnet. Die statischen Werte der Fliessgrenze und der Zugfestigkeit wurden durch Reduktion der dynamischen Festigkeitswerte um den Spannungsabfall nach

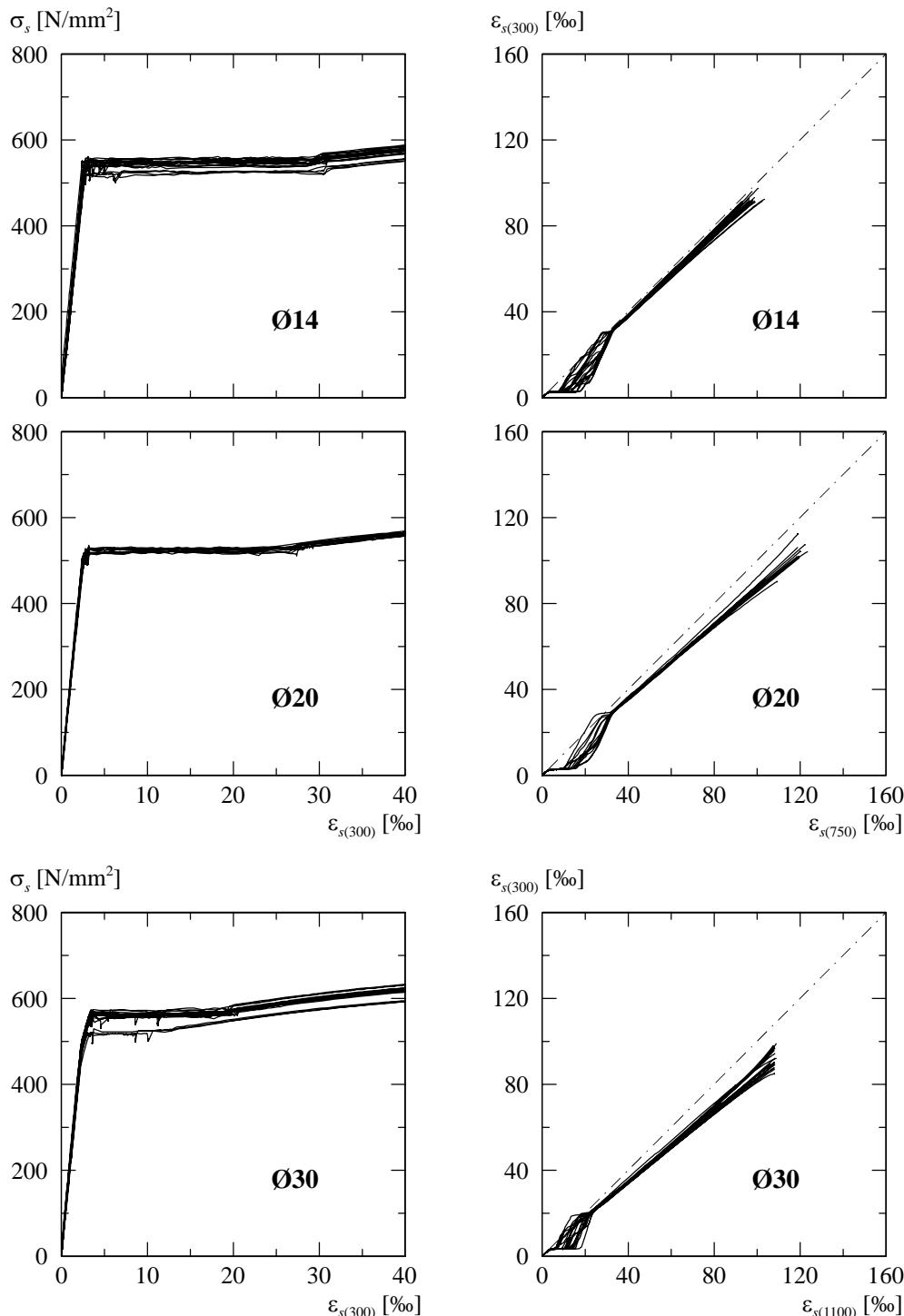


Bild 2.26: Spannungs-Dehnungsdiagramme des Betonstahls und Vergleich der mittleren Dehnungen im Bereich des Feindehnungsgebers mit jenen über die ganze freie Prüflänge.

zwei Minuten beim ersten beziehungsweise beim zweiten Zwischenhalt ermittelt. Die Dehnungen bei Höchstlast und die Bruchdehnungen wurden aus dem Kolbenweg bestimmt, die Dehnungen bei Verfestigungsbeginn aus den Feindehnungsmessungen. Die Elastizität der Prüfmaschine wurde bei der Berechnung der Dehnungen berücksichtigt. Die Gleichmassdehnungen wurden nach Versuchsende unter Zuhilfenahme einer Schiebelehre bestimmt. Die Dehnungen ε_5 , ε_{10} und ε_{20} beziehen sich auf symmetrisch zur Bruchstelle angenommene Basislängen von 5 Ø, 10 Ø und 20 Ø. Als Elastizitätsmodul des Betonstahls ist die mittlere Steigung der Stahlkennlinie zwischen 100 und 400 N/mm² angegeben.

3 Versuchsdurchführung

3.1 Versuchsserie A

3.1.1 Versuchsanlage

Die Versuchsanlage wurde auf dem Aufspannboden der Versuchshalle HIF der ETH Hönggerberg aufgebaut und ist in den Bildern 3.1 und 3.2 dargestellt. Damit die Rissbildung während der Versuchsdurchführung besser beobachtet werden konnte und die Deformettermessungen in der Zugzone leichter zugänglich waren, wurden die Versuchskörper kopfüber geprüft.

Beim ersten Versuch wurde der Versuchskörper auf zwei Linienkipplager gesetzt, wovon das eine in Längsrichtung beweglich war. Die Versuchskörper wurden so eingebaut, dass der schwächere Kragarm K2 über das bewegliche Lager auskragte. Beide Lager wurden in ein Mörtelbett auf zwei auf dem Aufspannboden stehende Betonsockel versetzt. Der Abstand der Lager betrug 1,12 m. Zur Belastung der Versuchskörper wurden vier hydraulische Zylinder verwendet, welche paarweise durch Stahlträger HEB 360 zu zwei Belastungsjochen zusammengeschlossen wurden. Die Stahlträger wurden über ein Gelenk mit den Zylindern verbunden, die wiederum mit hochfesten DYWIDAG-Zugstangen Ø 32 mm im Aufspannboden verankert waren. Die zwei Stahlträger zur Lasteinleitung übertrugen die Pressenkräfte über stählerne Linienkipplager, welche mit den Stahlträgern verschraubt waren. Um ein Abrutschen der Linienkipplager auf den Versuchskörpern zu verhindern, wurden diese mit je 4 Segmentankern M10 gesichert. Die Erzeugung und Steuerung des Öldrucks der vier Zylinder erfolgte mit einer Handpumpe.

Für den zweiten Versuch musste die Belastungseinrichtung umgebaut werden. Das Belastungsjoch auf dem schwächeren Kragarm K2 wurde dabei um 0,84 m nach innen versetzt. Der Versuchskörper war in der Folge auf dem festen Linienkipplager gelagert. Das bewegliche Lager diente lediglich als Hilfsstützung vor und nach der Versuchsdurchführung. Die beiden Belastungsjosche wurden über je einen Ölkreislauf betrieben. Die eigentliche Steuerung des Versuchs erfolgte über das Belastungsjoch auf dem Kragarm K1, während das zweite Belastungsjoch als elastisch gebettetes Lager wirkte, mit welchem lediglich kleinere Lagekorrekturen vorgenommen wurden. Der Öldruck der beiden Kreisläufe mit je zwei Zylindern wurde mit zwei Handpumpen erzeugt und gesteuert.

3.1.2 Deformettermessungen

Die mittleren Verzerrungen auf der Betonoberfläche und die Durchbiegungen der Versuchskörper wurden in allen Versuchen mit Setzdehnungsmessgeräten (Deformetern) ermittelt. Die Messung erfolgte durch Aufsetzen des Messgeräts in die Zentrierbohrungen der an den Betonoberflächen und auf dem Aufspannboden aufgeklebten Aluminiumbolzen, die als Marken des Messrasters dienten. Die Anordnung der Bolzen und die Nummerierung der Messstellen beim ersten Versuch

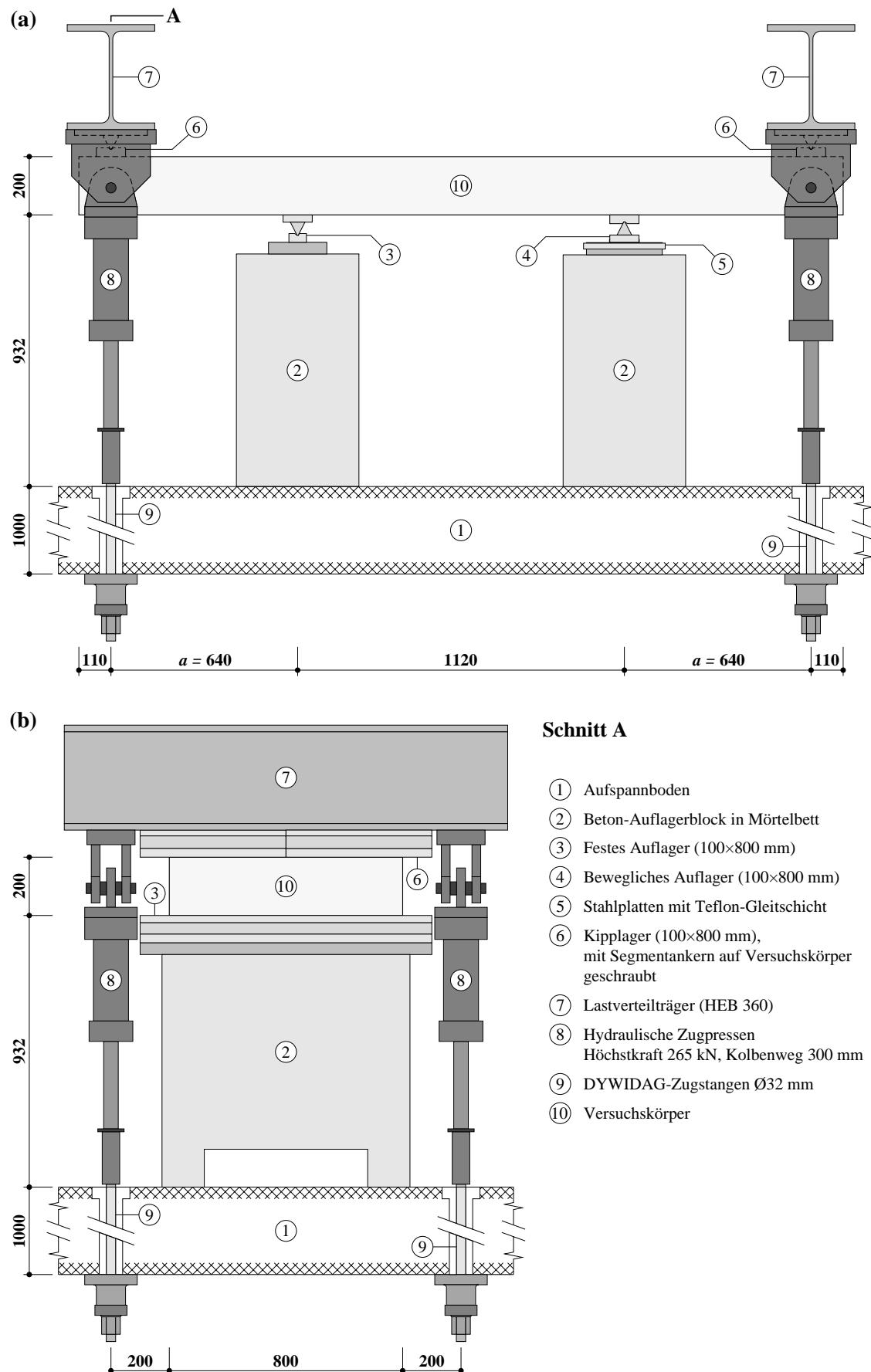


Bild 3.1: Schema der Versuchsanlage für die Versuchsserie A – Versuch 1: (a) Längsschnitt; (b) Schnitt A. Abmessungen in mm.

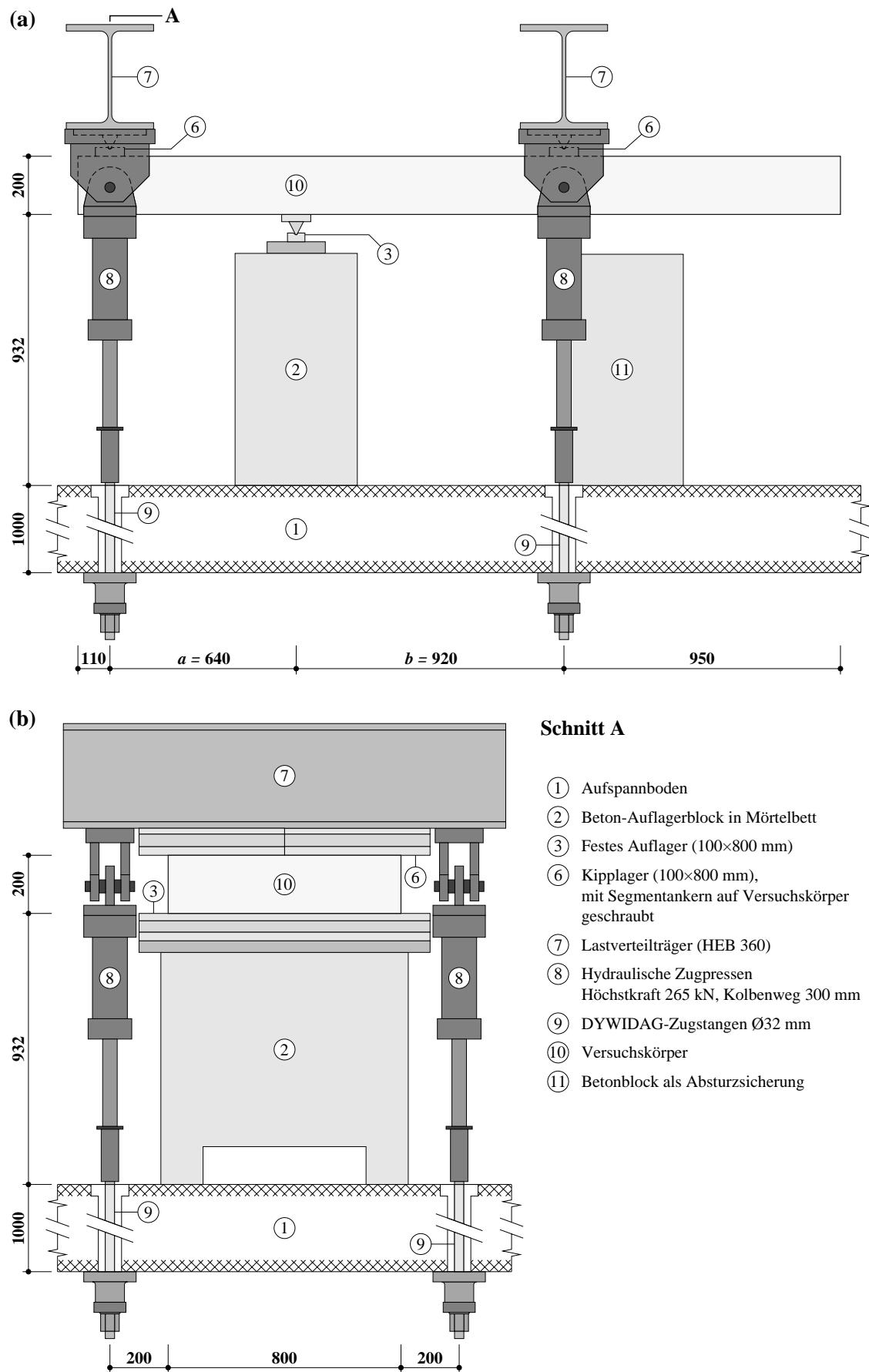


Bild 3.2: Schema der Versuchsanlage für die Versuchsserie A – Versuch 2: (a) Längsschnitt; (b) Schnitt A. Abmessungen in mm.

Messungen	Basislänge	Ort	Richtung	Anzahl
10...30 32...52 91...96 108...128 130...150	141 mm	Oberseite	längs	90
54...73 75...89 97...106 152...166 168...187	141 mm	Oberseite	quer	80
190...203 212...213 217...230	141 mm	Vorderseite	horizontal	30
204...210 214...215 231...237	141 mm	Vorderseite	vertikal	16
240...253 262...263 267...280	141 mm	Hinterseite	horizontal	30
254...260 264...265 281...287	141 mm	Hinterseite	vertikal	16
290...297 308...317 324...333 341...348	141 mm	Unterseite	längs	36
298...306 318...323 334...339 349...357	141 mm	Unterseite	quer	30
410...430 432...459 461...481 483...492 494...514 516...543 545...565	200 mm	Oberseite	diagonal	150
568...581 583...584 586...599	200 mm	Vorderseite	diagonal	30
602...615 617...618 620...633	200 mm	Hinterseite	diagonal	30
636...643 645...664 666...673	200 mm	Unterseite	diagonal	36
710...721 723...732 734...745	890 mm	Unterseite (Durchbiegung)	vertikal	34

Tabelle 3.1: Deformettermessungen Versuchsserie A – Versuch 1.

können den Bildern 3.3 und 3.4 entnommen werden. Die Bilder 3.5 und 3.6 zeigen das reduzierte Messraster und die entsprechende Nummerierung der Messstellen beim zweiten Versuch.

Die Deformettermessungen wurden bei jeder Laststufe durchgeführt, wobei während der Messwelterfassung die Durchbiegungen möglichst konstant gehalten wurden. Vor dem ersten Versuch wurden bei jedem Versuchskörper zwei Nullmessungen zur Bestimmung des initialen, verzerrungsfreien Zustandes durchgeführt, wovon die zweite Nullmessung sowohl für den Versuch 1 als auch für den Versuch 2 als Referenzmessung verwendet wurde. Eine dritte Nullmessung vor dem zweiten Versuch diente zur Festlegung der nach dem ersten Versuch resultierenden plastischen Verformungen. Die Nummerierung der Laststufen beim ersten und zweiten Versuch ist fortlaufend. Für die Messungen wurden drei verschiedene Messgeräte eingesetzt:

- Deformeter mit einer Basislänge von 141 mm, Messbereich ± 10 mm,
Messgenauigkeit $\pm 1 \mu\text{m}$;
- Deformeter mit einer Basislänge von 200 mm, Messbereich ± 10 mm,
Messgenauigkeit $\pm 1 \mu\text{m}$;

- Deformeterstab mit einer Basislänge von 890 mm, Messbereich ± 50 mm,
Messgenauigkeit $\pm 5 \mu\text{m}$.

Um die Grösse der durch die Temperaturschwankungen entstehenden systematischen Messfehler zu bestimmen und eventuelle Defekte im Messgerät festzustellen, wurde nach maximal 32 Messungen eine Referenzmessung auf einem Invarstab durchgeführt. Die Intervalle wurden nicht grösser gewählt, um dem Temperaturverlauf möglichst genau zu folgen.

Messungen	Basislänge	Ort	Richtung	Anzahl
10...30 32...52 91...96	141 mm	Oberseite	längs	48
54...73 75...89 97...106	141 mm	Oberseite	quer	45
190...203 212...213	141 mm	Vorderseite	horizontal	16
204...210 214...215	141 mm	Vorderseite	vertikal	9
240...253 262...263	141 mm	Hinterseite	horizontal	16
254...260 264...265	141 mm	Hinterseite	vertikal	9
290...297 308...317 324...333	141 mm	Unterseite	längs	28
298...306 318...323 334...339	141 mm	Unterseite	quer	21
410...430 432...459 461...481 483...492	200 mm	Oberseite	diagonal	80
568...581 583...584	200 mm	Vorderseite	diagonal	16
602...615 617...618	200 mm	Hinterseite	diagonal	16
636...643 645...664	200 mm	Unterseite	diagonal	28
710...721 723...732	890 mm	Unterseite (Durchbiegung)	vertikal	22

Tabelle 3.2: Deformermessungen Versuchsserie A – Versuch 2.

Pro Laststufe wurden beim ersten Versuch 608 Messungen (Tabelle 3.1) und beim zweiten Versuch 354 Messungen (Tabelle 3.2) mit Setzdehnungsmessgeräten ausgeführt. Die Messresultate wurden in einem Messcomputer gespeichert, der die Signale des Messverstärkers in Mikrometer umrechnete und zur Kontrolle am Bildschirm anzeigte. Anschliessend an die Deformermessungen jeder Laststufe wurden sämtliche Rissbreiten mit einem Rissmassstab gemessen und der Versuchskörper fotografiert. Diese Arbeiten beanspruchten beim Versuch 1 jeweils etwa 120 Minuten, beim Versuch 2 etwa 70 Minuten.

3.1.3 Kontinuierliche Messungen

Zur kontinuierlichen Aufzeichnung der Verformungen und Kräfte wurden 15 (Versuch 1) respektive 11 (Versuch 2) fest verdrahtete Messstellen eingesetzt. Die Messungen wurden von einem zweiten Computer automatisch alle 2 Sekunden an einem Messverstärker ausgelöst, wobei die Messwerte zur Versuchssteuerung und zu Kontrollzwecken auf dem Bildschirm digital und grafisch dargestellt wurden. Nach dem Erreichen einer Laststufe wurden die Messresultate jeweils auf der Festplatte des Messcomputers gespeichert.

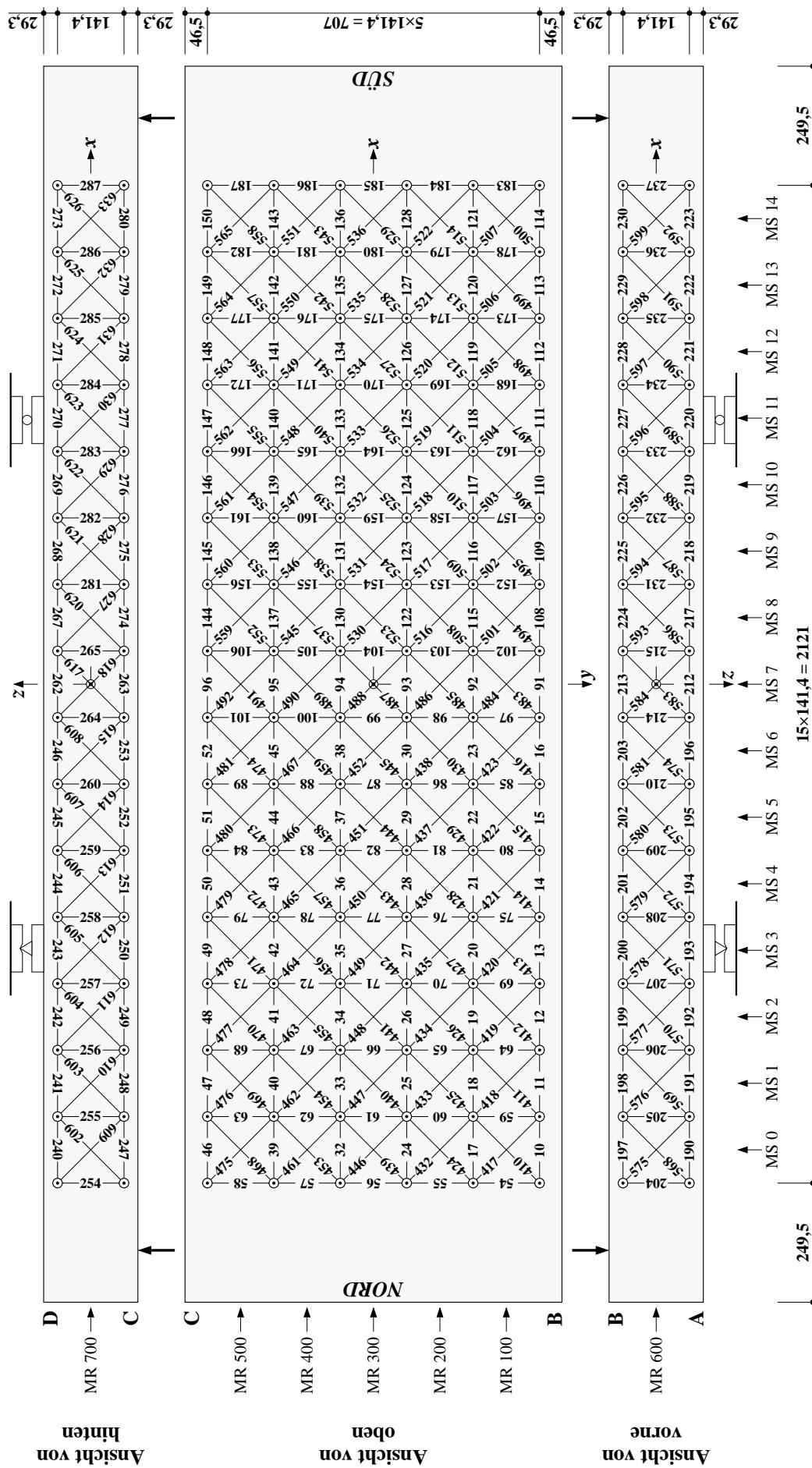


Bild 3.3: Anordnung und Nummerierung der Deformettermessungen bei der Versuchsserie A – Versuch 1. Abmessungen in mm.

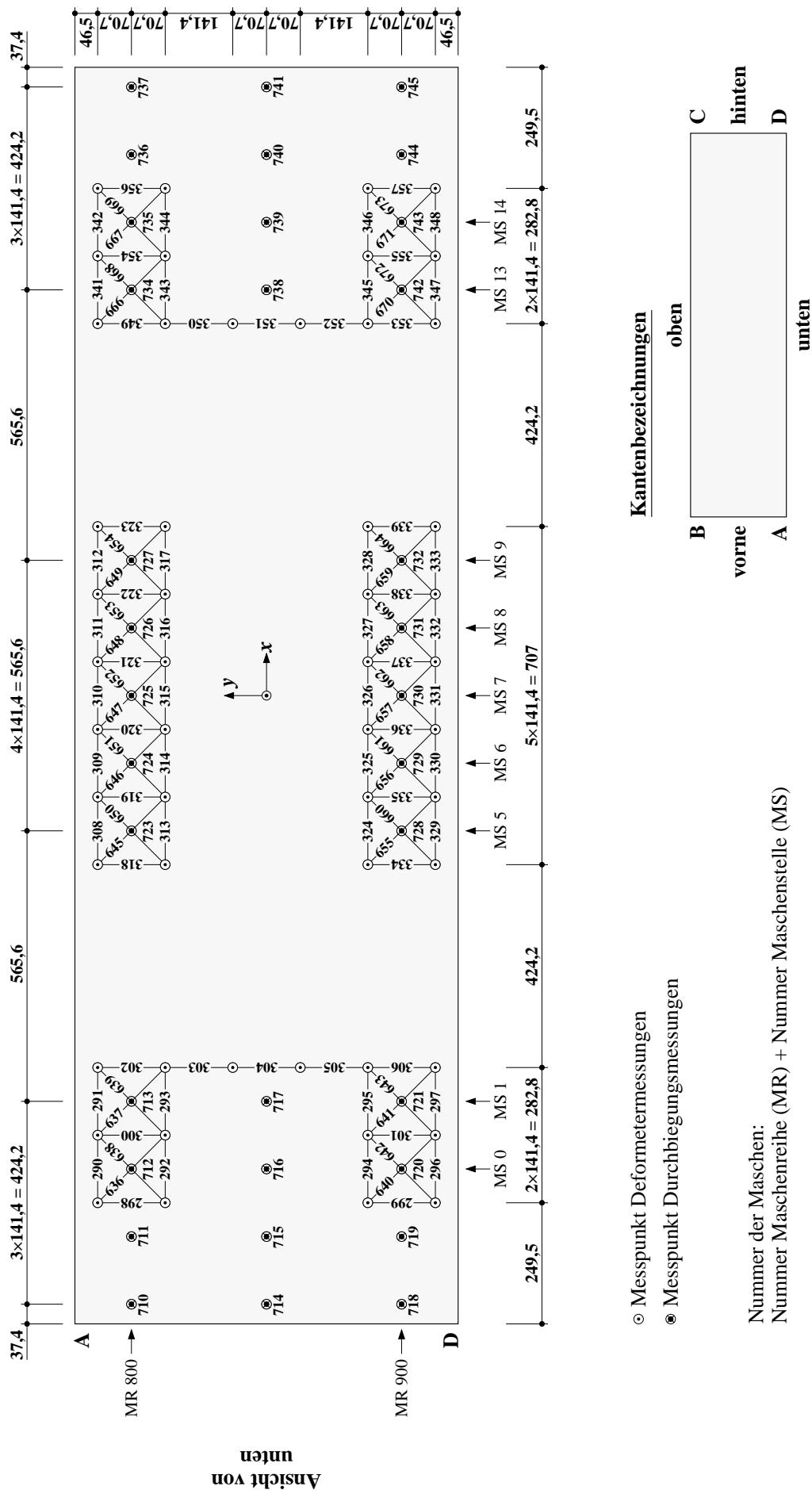


Bild 3.4: Anordnung und Nummerierung der Deformermessungen bei der Versuchsserie A – Versuch 1. Abmessungen in mm.

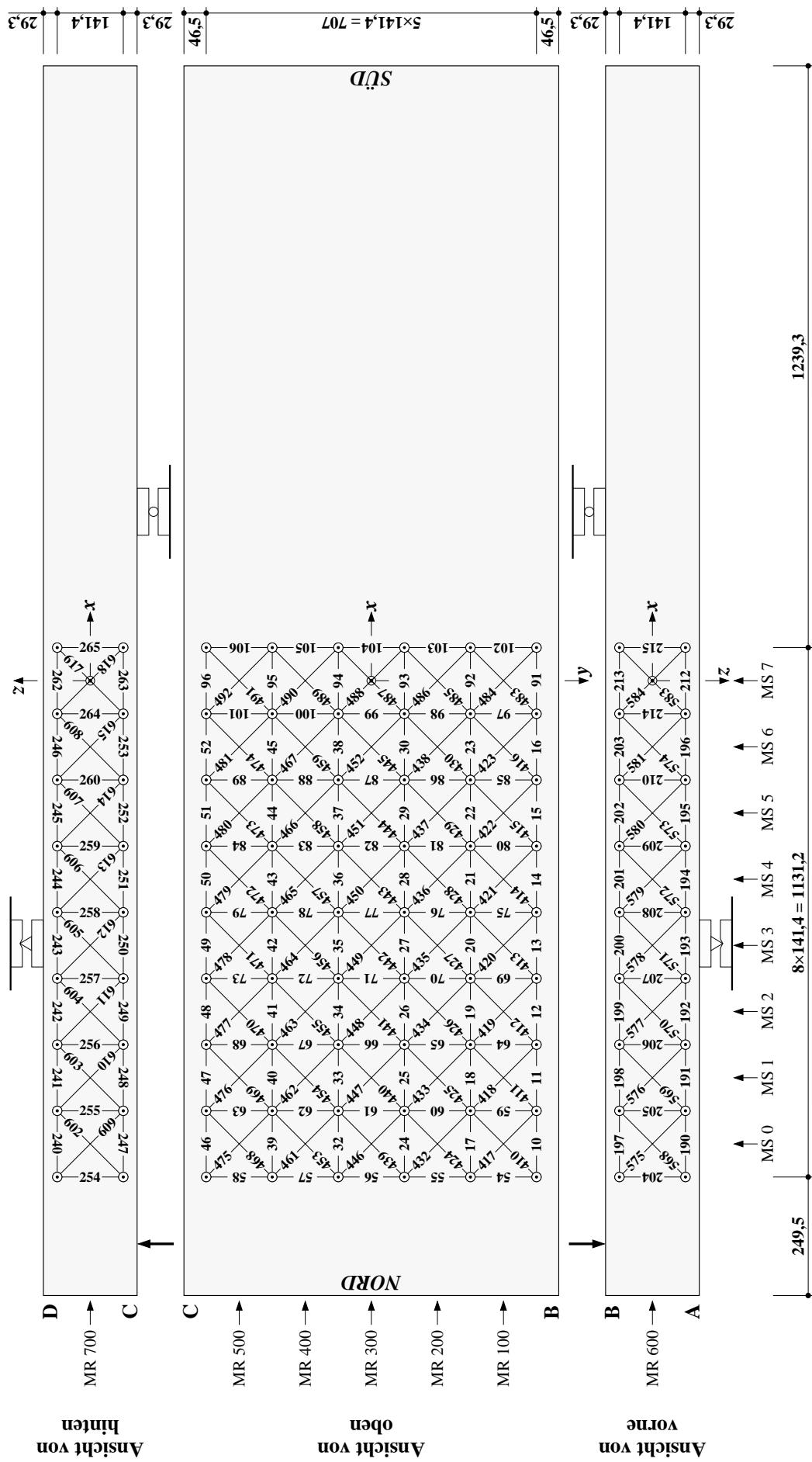


Bild 3.5: Anordnung und Nummerierung der Deformationsmessungen bei der Versuchsserie A – Versuch 2. Abmessungen in mm.

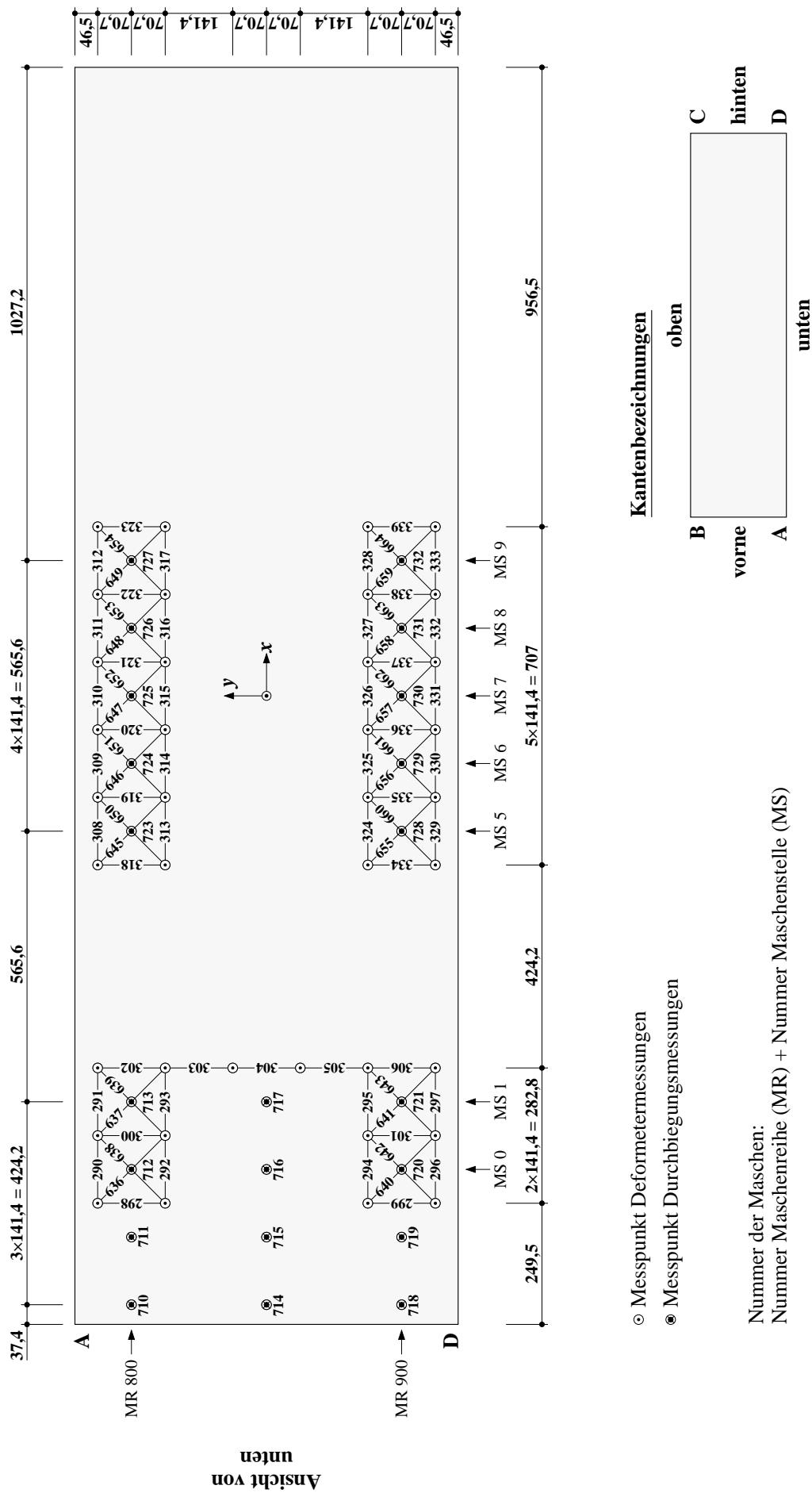
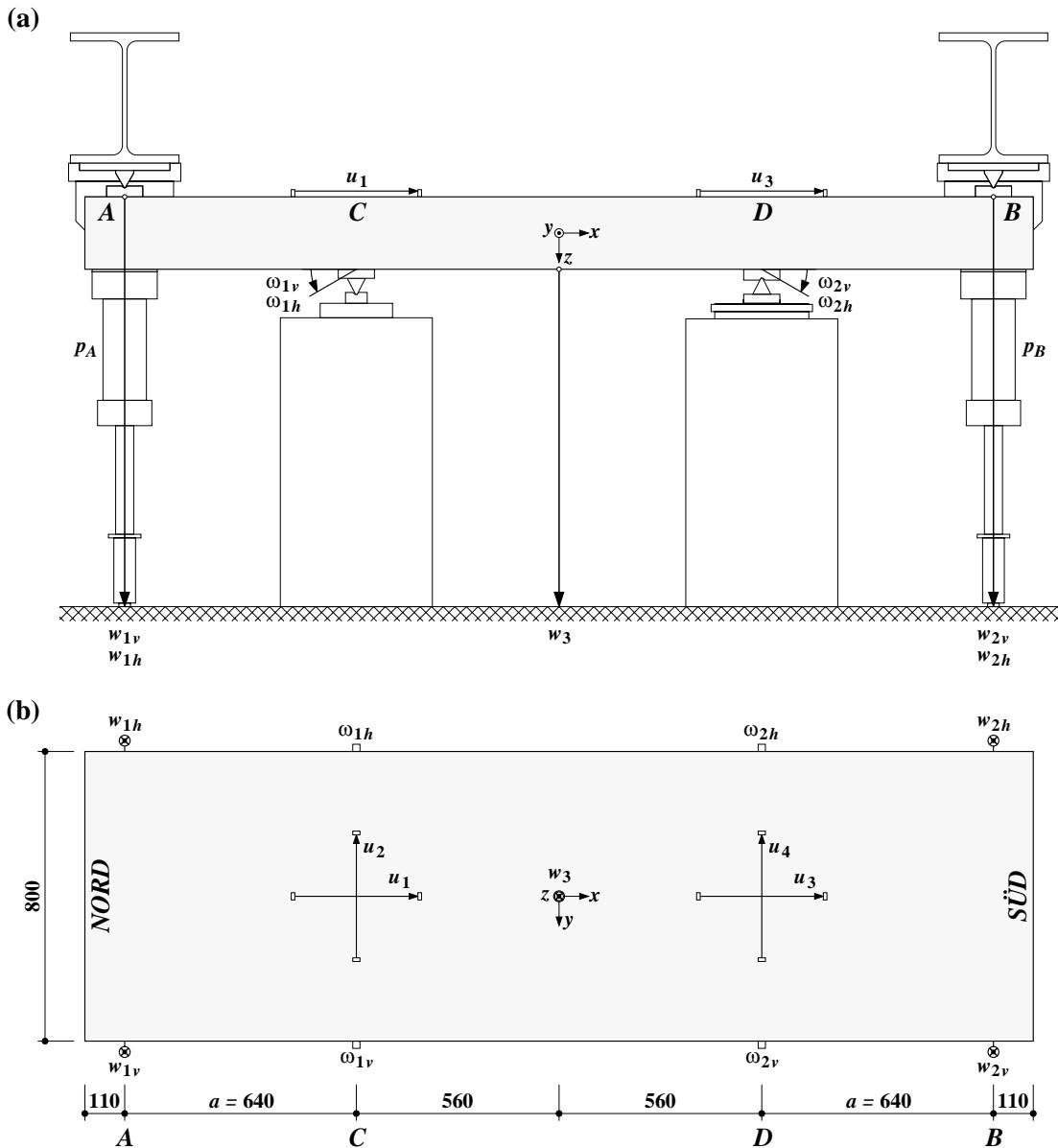


Bild 3.6: Anordnung und Nummerierung der Deformettermessungen bei der Versuchsserie A – Versuch 2. Abmessungen in mm.

Die Anordnung der fest verdrahteten Messungen ist in den Bildern 3.7 und 3.8 dargestellt. Die Indizes v und h in den Bezeichnungen der Messgeber stehen für Messungen an der Vorder- und Hinterseite. Die gemessenen Größen w_1 bis w_3 entsprechen den Mittelwerten der vorderen und hinteren Messwerte.

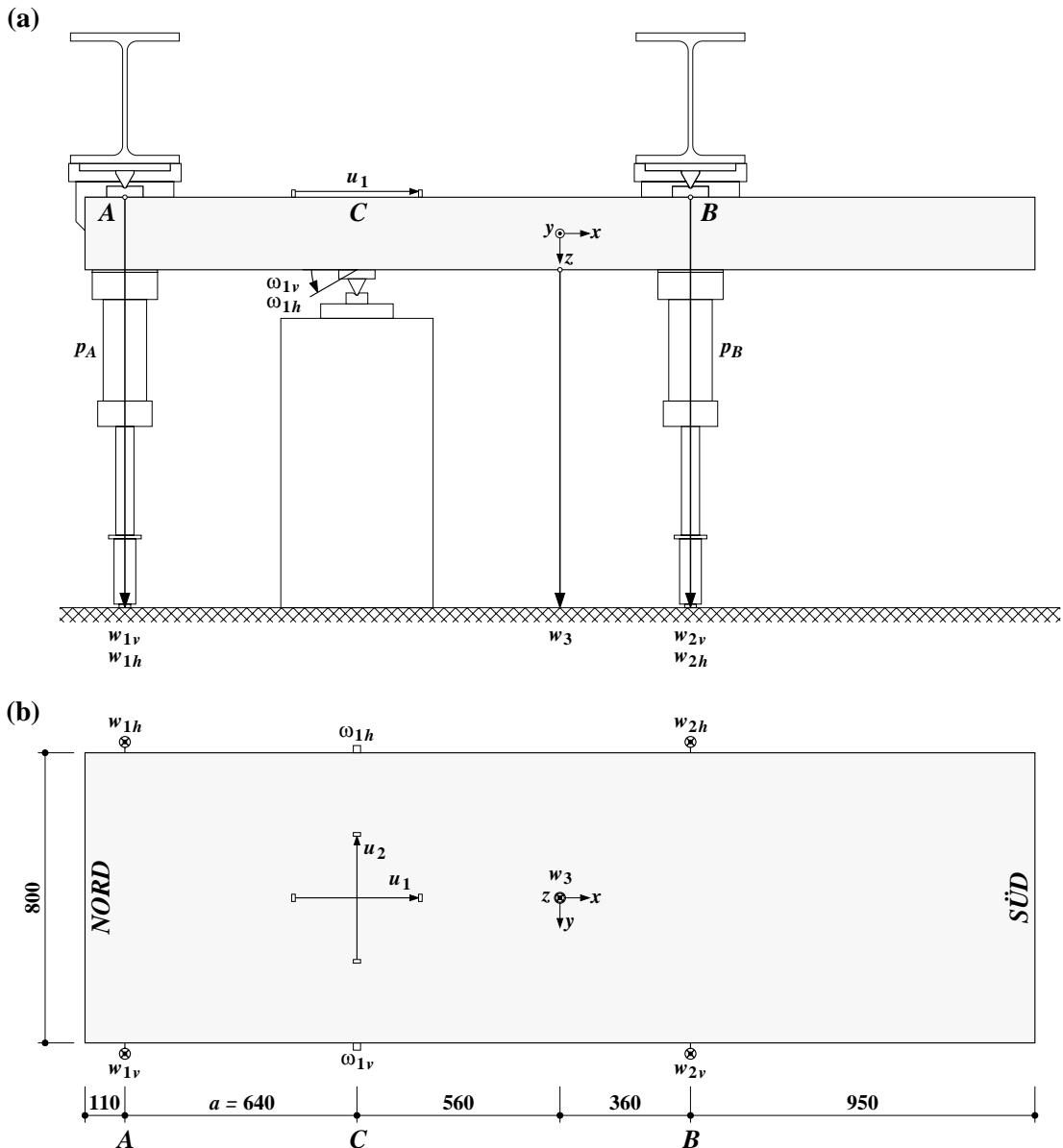
Beim ersten Versuch waren bei den Versuchskörpern A1, A6 und A7 acht, bei den Versuchskörpern A2, A3, A4 und A5 neun Messstellen mit induktiven Wegaufnehmern bestückt. Vier dieser Messungen erfassten die Durchbiegungen bei den beiden Belastungsjochen (w_{1v} , w_{1h} , w_{2v} und w_{2h}) und vier die horizontalen Verformungen auf der Oberseite der Versuchskörper in Längs- und



Bezeichnungen	Messgeber	Gemessene Größen
$w_{1v}, w_{1h}, w_{2v}, w_{2h}, w_3$	Induktive Wegaufnehmer ± 50 mm	Durchbiegungen \bar{w}_1 bis \bar{w}_3
u_1, u_2, u_3, u_4	Induktive Wegaufnehmer ± 10 mm	Verformungen Zugseite in C und D (Basislänge 350 mm)
$\omega_{1v}, \omega_{1h}, \omega_{2v}, \omega_{2h}$	Neigungsmesser $\pm 10^\circ$	Neigung Lagerplatten in C und D
p_A, p_B	Flüssigkeitsdruckgeber 400 bar	Öldruck Pressen in A und B (Pressenkraft F_A und F_B)

Bild 3.7: Anordnung der kontinuierlichen Messungen bei der Versuchsserie A – Versuch 1:
(a) Längsschnitt; (b) Ansicht von oben. Abmessungen in mm.

Querrichtung (u_1 , u_2 , u_3 und u_4). Damit die Durchbiegungsmessungen durch Verschiebungen senkrecht zur Messrichtung möglichst unbeeinflusst blieben, wurden die Messpunkte oben am Rand der Versuchskörper befestigt. Bei den Versuchskörpern A2, A3, A4 und A5 wurde außerdem die Mittendurchbiegung (w_3) gemessen. Die aufgebrachten Kräfte (F_A und F_B) wurden über den mit einem Flüssigkeitsdruckgeber gemessenen Öldruck an der Handpumpe bestimmt. Eine zusätzliche Messung des Öldrucks diente als Kontrolle der ermittelten Pressenkräfte. Bei den Versuchskörpern A2, A3, A4 und A5 wurde zudem die Verkippung der Lagerplatten in C und D (ω_{1v} , ω_{1h} , ω_{2v} und ω_{2h}) mit vier Neigungsmessern aufgezeichnet.

**Bezeichnungen** $w_{1v}, w_{1h}, w_{2v}, w_{2h}, w_3$ u_1, u_2 ω_{1v}, ω_{1h} p_A p_B **Messgeber**Induktive Wegaufnehmer ± 50 mmInduktive Wegaufnehmer ± 10 mmNeigungsmesser $\pm 10^\circ$

Flüssigkeitsdruckgeber 400 bar

Flüssigkeitsdruckgeber 400 bar

Gemessene GrößenDurchbiegungen \bar{w}_1 bis \bar{w}_3

Verformungen Zugseite in C (Basislänge 350 mm)

Neigung Lagerplatte in C

Öldruck Pressen in A (Pressenkraft F_A)Öldruck Pressen in B (Pressenkraft F_B)

Bild 3.8: Anordnung der kontinuierlichen Messungen bei der Versuchsserie A – Versuch 2:
(a) Längsschnitt; (b) Ansicht von oben. Abmessungen in mm.

(a)



(b)



Bild 3.9: Ansicht der Versuchsanlage für die Versuchsserie A: (a) Versuch 1; (b) Versuch 2.

Beim zweiten Versuch waren bei den Versuchskörpern A1, A6 und A7 sechs, bei den Versuchskörpern A2, A3, A4 und A5 sieben Messstellen mit induktiven Wegaufnehmern bestückt. Im Gegensatz zum ersten Versuch entfielen beim beweglichen Lager die beiden Messungen der horizontalen Verformungen auf der Oberseite der Versuchskörper (u_3 und u_4). Bei den Versuchskörpern A2, A3, A4 und A5 konnte zusätzlich auf die Messungen der Lagerverkippung (ω_{2v} und ω_{2h}) verzichtet werden. Die aufgebrachten Kräfte in A (F_A) und B (F_B) wurden über den an den beiden Handpumpen gemessenen Öldruck bestimmt. Die Messung der beiden Öldrücke in A und B ermöglichte eine Kontrolle der entsprechenden Pressenkräfte anhand der Gleichgewichtsbedingungen.

3.1.4 Versuchsvorbereitung

Die Versuchsvorbereitungen dauerten jeweils etwa vier Tage. Zuerst wurden die Messmarken für die Deformettermessungen auf die Betonoberfläche aufgeklebt, der Versuchskörper mit weisser Kalkfarbe gestrichen und die Messstellen beschriftet. Nach dem Einbau in die Versuchsanlage und der Montage der Belastungseinrichtungen wurden die Messgeber der kontinuierlichen Messungen installiert, mit dem Messverstärker verbunden und auf ihre Funktionstüchtigkeit geprüft.

Zwischen den beiden Versuchen wurden die Belastungseinrichtung umgebaut (siehe Bild 3.9) und die überzähligen Messgeber der kontinuierlichen Messungen entfernt.

3.1.5 Versuchsablauf

Die Versuche dauerten in der Regel eineinhalb bis vier Tage. Vor der Belastung wurden alle fest verdrahteten Messgeber zu Null abgeglichen und zwei vollständige Nullmessungen mit den Deformetern durchgeführt, wobei bei der späteren Auswertung die zweite als Bezugsmessung verwendet wurde.

Die wichtigsten Steuergrößen waren die aus den Messwerten der Flüssigkeitsdruckgeber ermittelten Pressenkräfte und die Kragarmdurchbiegungen. Die Belastungsgeschwindigkeit war durch den Kolbenhub der Handpumpe beschränkt und bei allen Versuchen ungefähr konstant. Pro Versuchstag wurden bis zu vier Laststufen aufgebracht. Zwischen den einzelnen Versuchstagen blieben die Versuchskörper belastet. Nach der letzten vollständigen Messung wurden die Versuchskörper durch weiteres Steigern der Verformungen bis zum Bruch geführt.

Die Messungen innerhalb einer Laststufe wurden erst begonnen, nachdem die Verformungen des Versuchskörpers während ungefähr 10 Minuten konstant gehalten worden waren. Eine vollständige Messung beinhaltete außer der Durchführung der Deformettermessungen auch das Anzeichnen neu entstandener Risse, das Protokollieren der Rissbreiten sowie das Fotografieren des Rissbildes. Eine Auflistung der Belastungsschritte und der Rissbreiten kann den Tabellen 4.2 bis 4.29 entnommen werden.

3.2 Versuchsserie B

3.2.1 Versuchsanlage

Die Versuchsanlage wurde auf dem Aufspannboden der Versuchshalle HIF der ETH Hönggerberg aufgebaut und ist in den Bildern 3.10 bis 3.12 dargestellt. Damit die Rissbildung während der

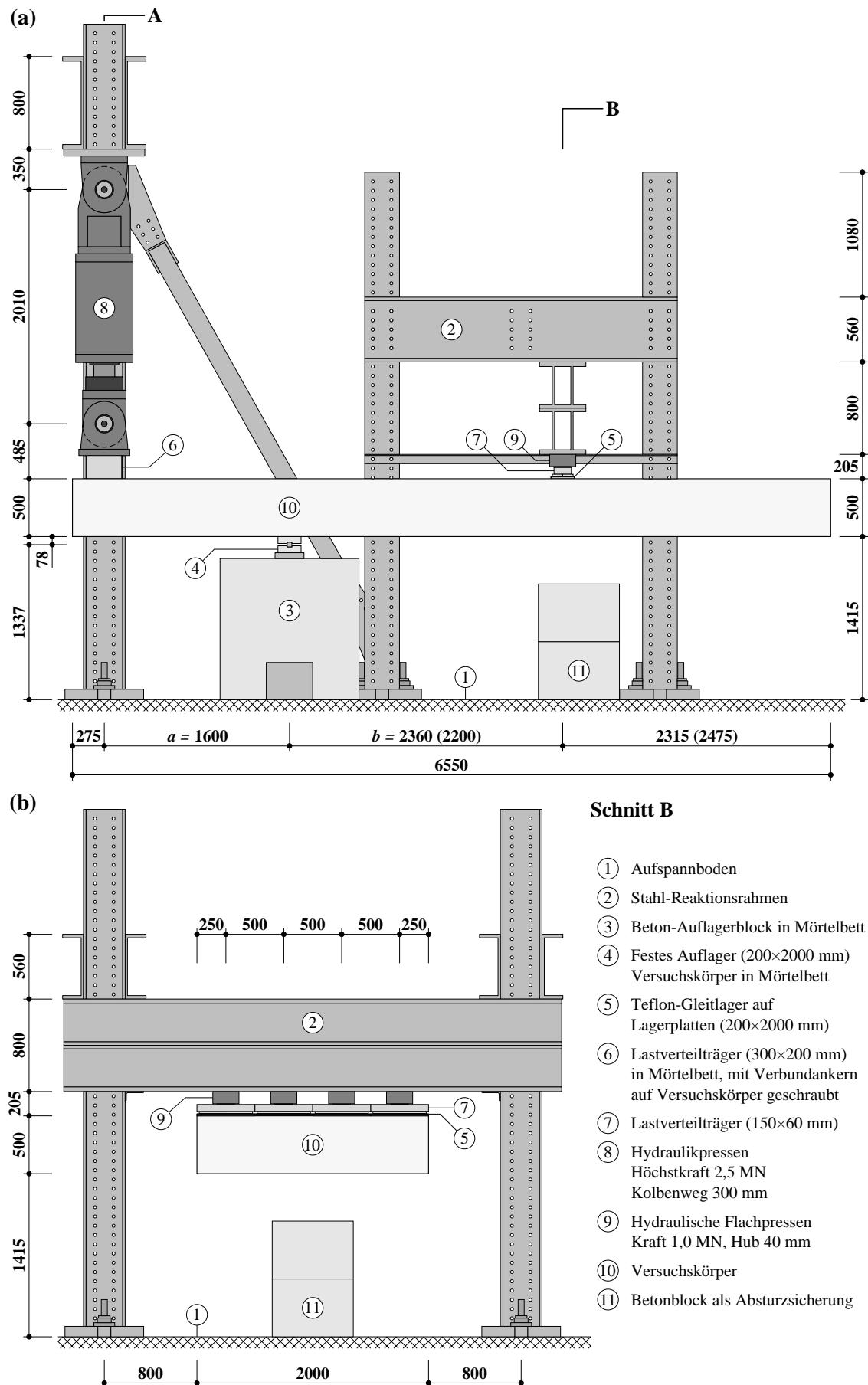


Bild 3.10: Schema der Versuchsanlage für die Versuchsserie B – Grundversuch: (a) Längsschnitt; (b) Schnitt B. Abmessungen in mm.

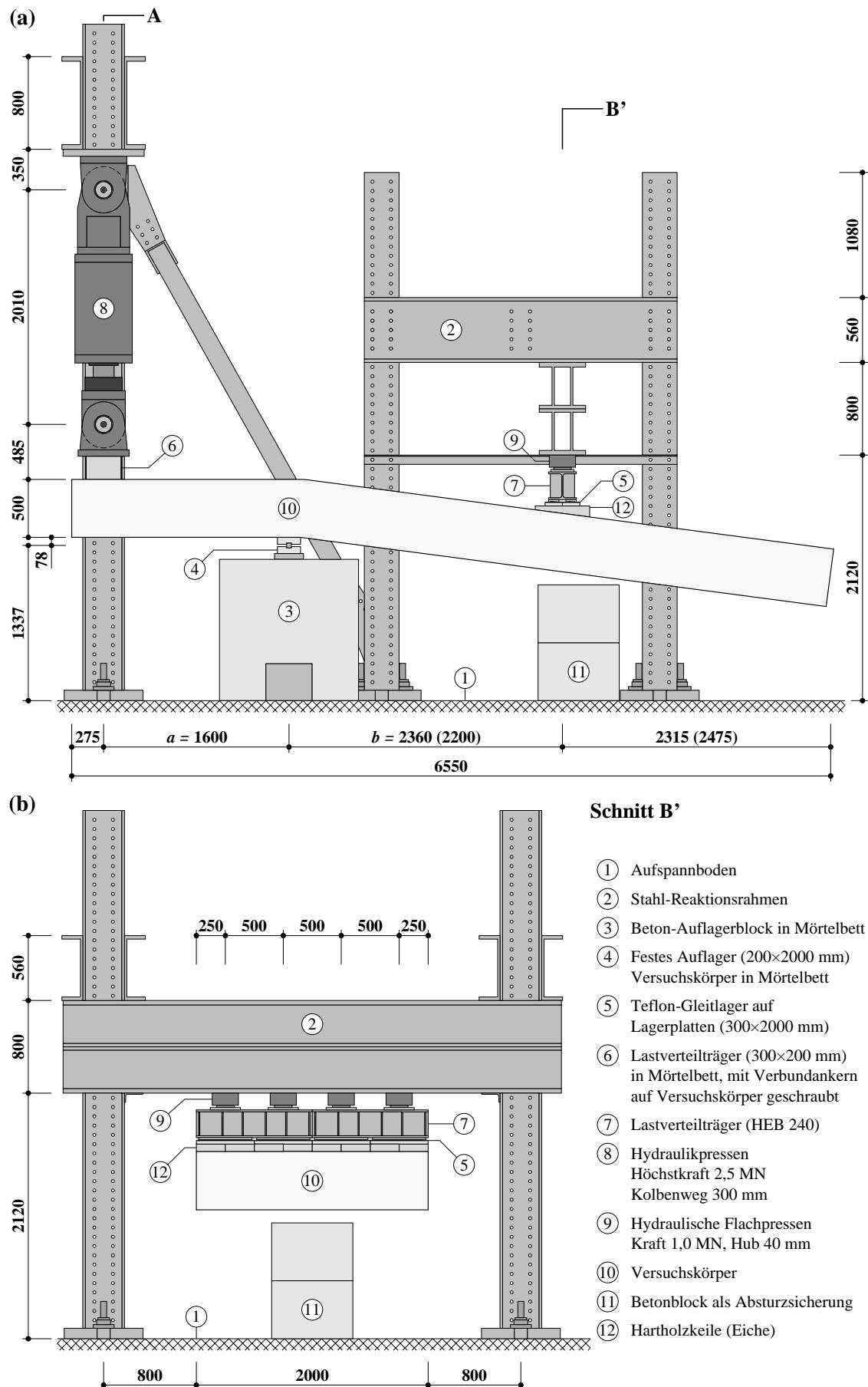


Bild 3.11: Schema der Versuchsanlage für die Versuchsserie B – Folgeversuch: (a) Längsschnitt; (b) Schnitt B'. Abmessungen in mm.

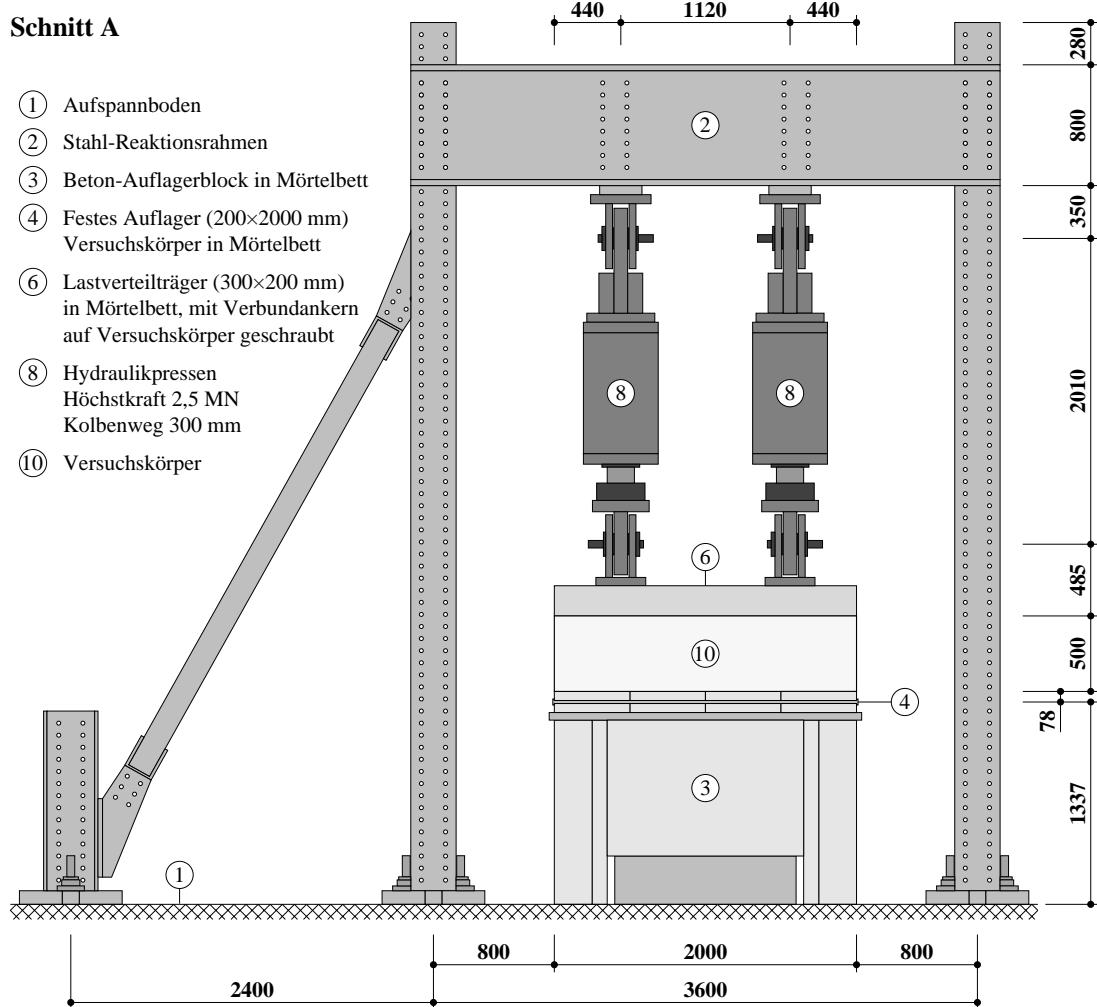


Bild 3.12: Schema der Versuchsanlage für die Versuchsserie B: Schnitt A. Abmessungen in mm.

Versuchsdurchführung besser beobachtet werden konnte und die Deformationsmessungen in der Zugzone leichter zugänglich waren, wurden die Versuchskörper kopfüber geprüft.

Beim Grundversuch wurde der Versuchskörper auf ein festes Linienkipplager und eine Hilfsabstützung im Bereich des beweglichen Lagers gesetzt. Das feste Auflager wurde in ein Mörtelbett auf einem auf dem Aufspannboden stehenden Betonsockel versetzt. Auf der Lagerplatte war eine Mörtelappretur erforderlich, um die Oberflächenunebenheiten der Versuchskörper auszugleichen. Das horizontal bewegliche Lager bestand aus einem auf die Versuchskörper aufgesetzten Teflon-Gleitlager. Um möglichst gleichmässige Pressungen im Gleitlager zu erzielen, wurde die Auflagerkraft über vier Lastverteilträger (Vollstahlprofile 150×60 mm) auf vier hydraulische Flachpressen verteilt, die in Längsrichtung eine Lagerverdrehung von ungefähr $\pm 4^\circ$ erlaubten. Ausser bei den Versuchen B1V1 und B6V2 (Lagerabstand 2,20 m) betrug der Abstand der Lager 2,36 m. Die Pressenkräfte wurden auf einen massiven Stahl-Reaktionsrahmen übertragen, der mit vorgespannten Stangen im Aufspannboden verankert war. Am freien Ende des Kragarms befand sich ein weiterer Stahl-Reaktionsrahmen, an dem zwei hydraulische Zylinder aufgehängt waren, mit denen die Versuchskörper belastet wurden. Die Aufhängung erlaubte eine Verdrehung der Zylinder in Längsrichtung der Versuchskörper. Die Zylinder übertrugen die Kraft über einen gelenkig angeschlossenen Lastverteilträger (Vollstahlprofil 300×200 mm) auf die Versuchskörper. Der Verteilträger wurde in ein Mörtelbett auf der Plattenoberseite versetzt. Um ein Abrutschen des Lastverteilträgers auf den Versuchskörpern zu verhindern, wurde dieser mit bis zu fünf Verbundankern M20, bestehend aus eingeklebten Gewindehülsen und hochfesten Gewindestan-

gen, gesichert. Der maximale Zylinderhub von 300 mm führte dazu, dass bei den Versuchen mit grossem Verformungsvermögen der Grundversuch nach Erreichen des maximalen Kolbenweges abgebrochen werden musste.

Für den Folgeversuch musste die Versuchsanlage umgebaut werden. Der Versuchskörper wurde dabei um die Achse des festen Linienkipplagers gedreht, bis die Zylinder wieder vollständig eingefahren waren. Beim horizontal beweglichen Lager wurden Hartholzkeile aus Eiche auf die geneigte Versuchskörperoberfläche aufgesetzt, um eine horizontale Ebene für die Teflon-Gleitlager zu schaffen. Die Auflagerkraft wurde über zwei Lastverteilträger HEB 240 auf je zwei Flachpressen verteilt.

Die Steuerung des Versuchs erfolgte über die beiden Zylinder auf dem Kragarm, während das bewegliche Auflager mit den vier Flachpressen als elastisch gebettetes Lager wirkte, mit welchem lediglich kleinere Lagekorrekturen vorgenommen wurden. Der Öldruck der beiden Zylinder wurde mit einem von Hand geregelten Pendelmanometer erzeugt und gesteuert. Die Erzeugung und Steuerung des Öldrucks der vier Flachpressen erfolgte mit einer Handpumpe.

Für den zweiten Versuch am Kragarm K1 wurde der Versuchskörper nach der Durchführung des ersten Versuches am Kragarm K2 ausgebaut und um 180° gedreht.

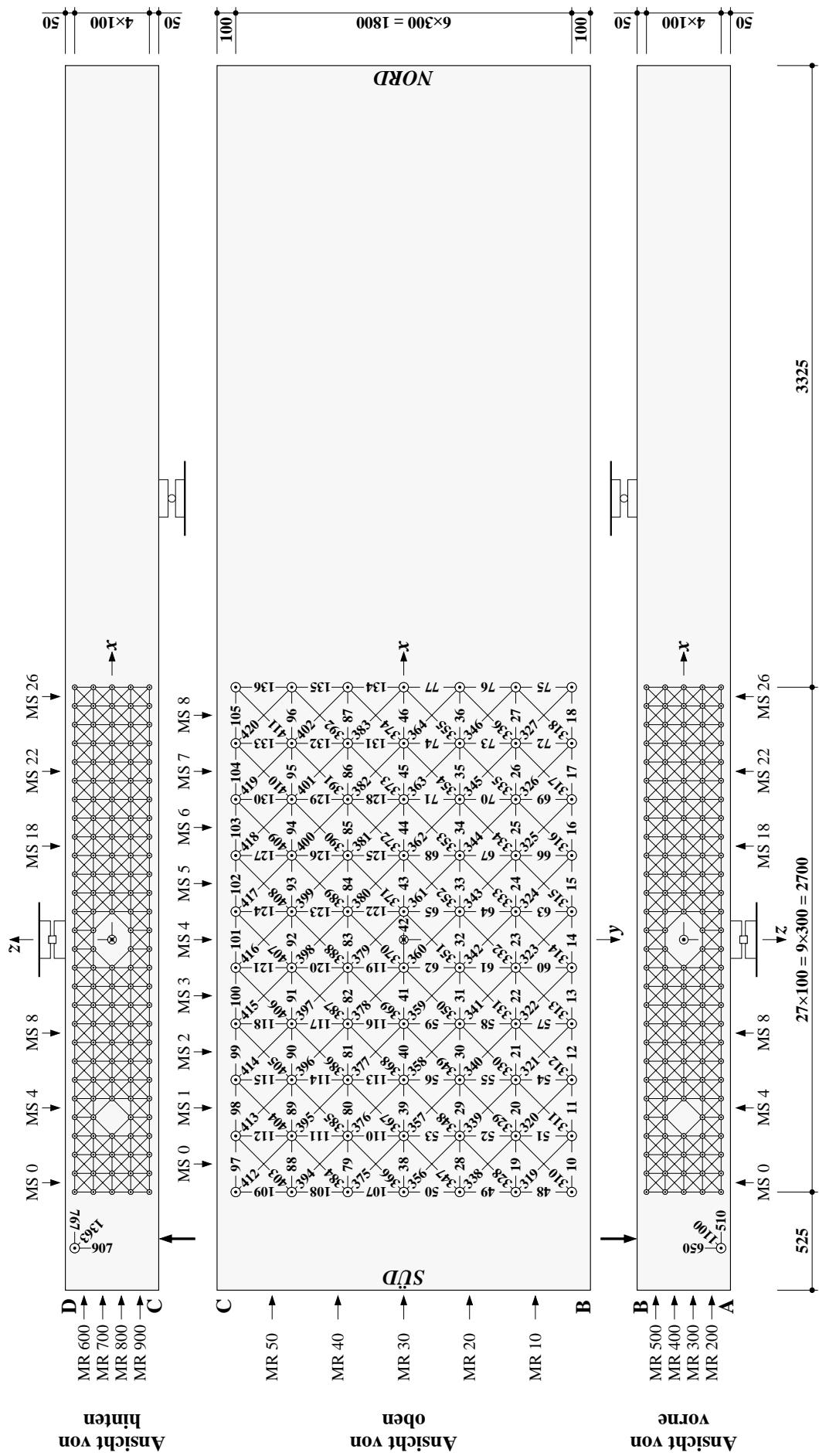
3.2.2 Deformettermessungen

Die mittleren Verzerrungen auf der Betonoberfläche und die Durchbiegungen der Versuchskörper wurden in allen Versuchen mit Setzdehnungsmessgeräten (Deformetern) ermittelt. Die Messung erfolgte durch Aufsetzen des Messgeräts in die Zentrierbohrungen der an den Betonoberflächen und auf dem Aufspannboden aufgeklebten Aluminiumbolzen, die als Marken des Messrasters dienten. Die Anordnung der Bolzen und die Nummerierung der Messstellen können den Bildern 3.13 bis 3.15 entnommen werden.

Die Deformettermessungen wurden bei jeder Laststufe durchgeführt, wobei während der Messwerterfassung die Durchbiegungen möglichst konstant gehalten wurden. Vor jedem Versuch wurden zwei Nullmessungen zur Bestimmung des initialen, verzerrungsfreien Zustandes durchgeführt, wovon die zweite Nullmessung als Referenzmessung verwendet wurde. Für die Messungen wurden fünf verschiedene Messgeräte eingesetzt:

- Deformeter mit einer Basislänge von 100 mm, Messbereich ± 10 mm,
Messgenauigkeit $\pm 1 \mu\text{m}$;
- Deformeter mit einer Basislänge von 141 mm, Messbereich ± 10 mm,
Messgenauigkeit $\pm 1 \mu\text{m}$;
- Deformeter mit einer Basislänge von 300 mm, Messbereich ± 10 mm,
Messgenauigkeit $\pm 1 \mu\text{m}$;
- Deformeter mit einer Basislänge von 424 mm, Messbereich ± 20 mm,
Messgenauigkeit $\pm 2 \mu\text{m}$;
- Deformeterstab mit einer Basislänge von 1340 mm, Messbereich ± 100 mm,
Messgenauigkeit $\pm 10 \mu\text{m}$.

Um die Grösse der durch die Temperaturschwankungen entstehenden systematischen Messfehler zu bestimmen und eventuelle Defekte im Messgerät festzustellen, wurde nach maximal 30 Messungen eine Referenzmessung auf einem Invarstab durchgeführt. Die Intervalle wurden nicht grösser gewählt, um dem Temperaturverlauf möglichst genau zu folgen.



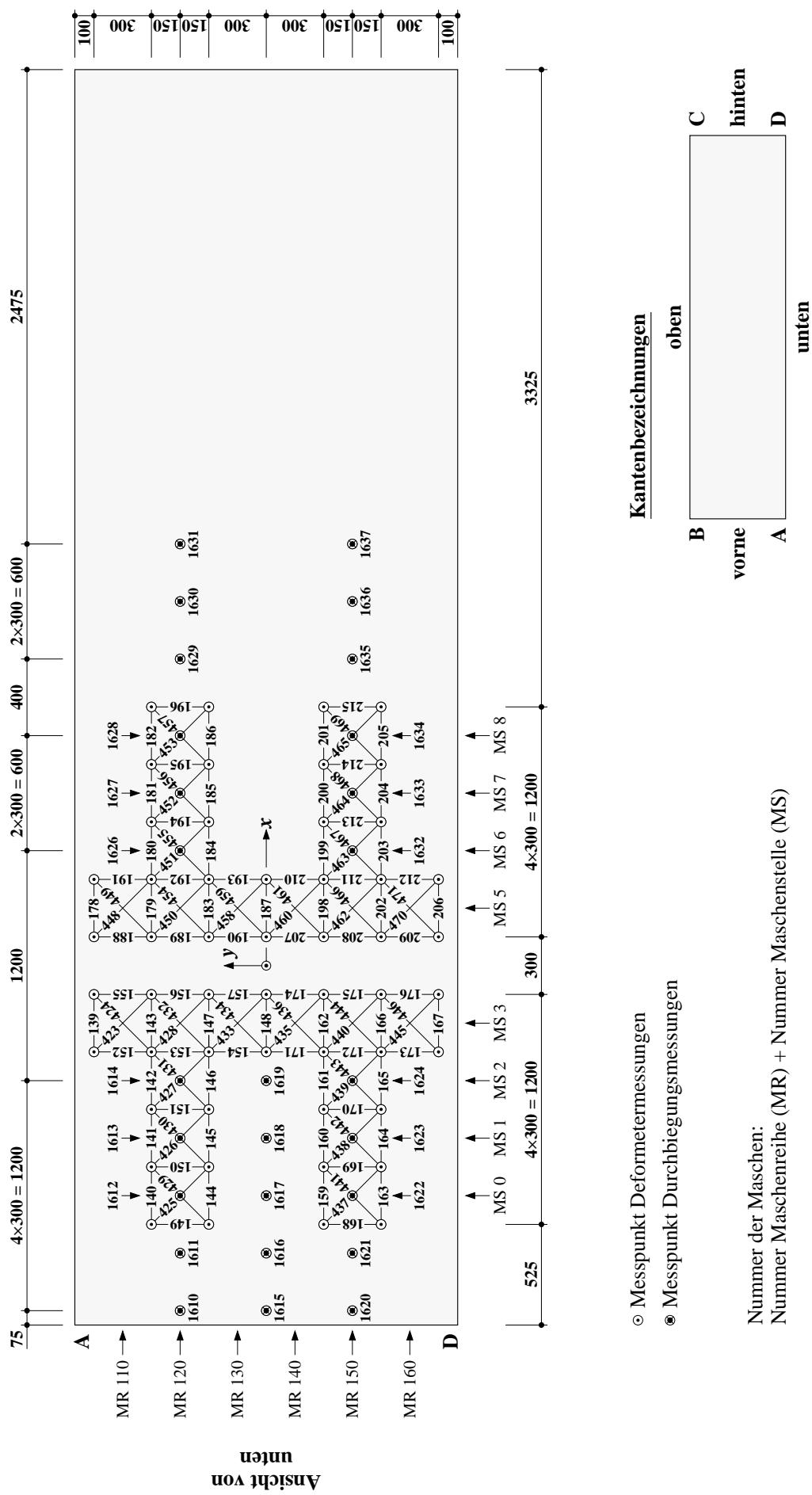


Bild 3.14: Anordnung und Nummerierung der Deformettermessungen bei der Versuchsserie B. Abmessungen in mm.

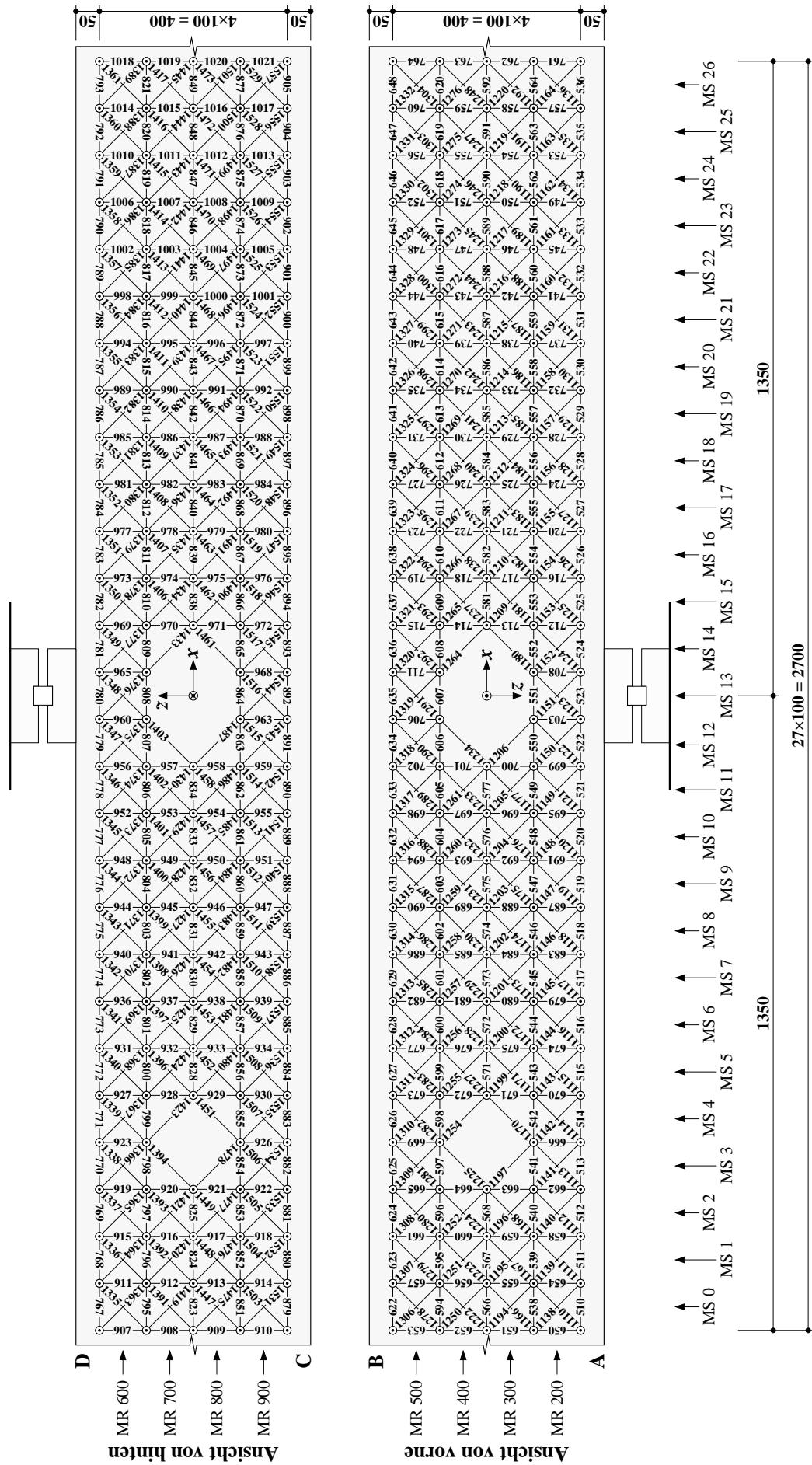


Bild 3.15: Anordnung und Nummerierung der Deformettermessungen bei der Versuchsserie B: Seitliche Ansichten. Abmessungen in mm.

Messungen	Basislänge	Ort	Richtung	Anzahl
10...36 38...46 79...105	300 mm	Oberseite	längs	63
48...77 107...136	300 mm	Oberseite	quer	60
139...148 159...167 178...187 198...206	300 mm	Unterseite	längs	38
149...157 168...176 188...196 207...215	300 mm	Unterseite	quer	36
310...336 338...364 366...392 394...420	424 mm	Oberseite	diagonal	108
423...446 448...471	424 mm	Unterseite	diagonal	48
510...536 538...564 566...568 571...577 581...592 594...620 622...648	100 mm	Vorderseite	horizontal	130
650...666 669...677 679...703 706 708 711...735 737...764	100 mm	Vorderseite	vertikal	106
767...793 795...821 823...825 828...834 838...849 851...877 879...905	100 mm	Hinterseite	horizontal	130
907...923 926...934 936...960 963 965 968...992 994...1021	100 mm	Hinterseite	vertikal	106
1110...1136 1138...1164 1166...1168 1170...1177 1180...1192 1194...1197 1199...1206 1209...1220 1222...1225 1227...1234 1237...1248 1250...1252 1254...1261 1264...1276 1278...1304 1306...1332	141 mm	Vorderseite	diagonal	204
1335...1361 1363...1389 1391...1394 1396...1403 1406...1417 1419...1421 1423...1430 1433...1445 1447...1449 1451...1458 1461...1473 1475...1478 1480...1487 1490...1501 1503...1529 1531...1557	141 mm	Hinterseite	diagonal	204
1610...1624 1626...1637	1340 mm	Unterseite (Durchbiegung)	vertikal	27

Tabelle 3.3: Deformettermessungen Versuchsserie B.

Pro Laststufe wurden 1260 Messungen (Tabelle 3.3) mit Setzdehnungsmessgeräten ausgeführt. Die Messresultate wurden in einem Messcomputer gespeichert, der die Signale des Messverstärkers in Mikrometer umrechnete und zur Kontrolle am Bildschirm anzeigte. Anschliessend an die Deformettermessungen jeder Laststufe wurden sämtliche Rissbreiten mit einem Rissmassstab gemessen und der Versuchskörper fotografiert. Diese Arbeiten beanspruchten jeweils etwa dreieinhalb Stunden.

3.2.3 Kontinuierliche Messungen

Zur kontinuierlichen Aufzeichnung der Verformungen und Kräfte wurden 11 fest verdrahtete Messstellen eingesetzt. Die Messungen wurden von einem zweiten Computer automatisch alle 2 Sekunden an einem Messverstärker ausgelöst, wobei die Messwerte zur Versuchssteuerung und zu Kontrollzwecken auf dem Bildschirm digital und grafisch dargestellt wurden. Nach dem Erreichen einer Laststufe wurden die Messresultate jeweils auf der Festplatte des Messcomputers gespeichert.

Die Anordnung der fest verdrahteten Messungen ist in Bild 3.16 dargestellt. Die Indizes v und h in den Bezeichnungen der Messgeber stehen für Messungen an der Vorder- und Hinterseite. Die gemessenen Größen \bar{w}_1 und \bar{w}_2 entsprechen den Mittelwerten der vorderen und hinteren Messwerte.

Sieben Messstellen waren mit induktiven Wegaufnehmern bestückt. Vier dieser Messungen erfassten die Durchbiegungen in A und B (w_{1v} , w_{1h} , w_{2v} und w_{2h}) und drei die horizontalen Verformungen auf der Oberseite der Versuchskörper in Längs- und Querrichtung (u_{1v} , u_{1h} , und u_2). Die aufgebrachte Pressenkraft in A (F_A) wurde über den mit einem Flüssigkeitsdruckgeber gemessenen Öldruck am Pendelmanometer bestimmt. Mit der Messung des Öldrucks an der Handpumpe konnte die Flachpressenkraft in B (F_B) ermittelt werden, welche anhand der Gleichgewichtsbedingungen eine Kraftkontrolle ermöglichte. Mit zwei Neigungsmessern wurde zudem die Verkipfung der Lagerplatte in C (ω_{1v} und ω_{1h}) aufgezeichnet.

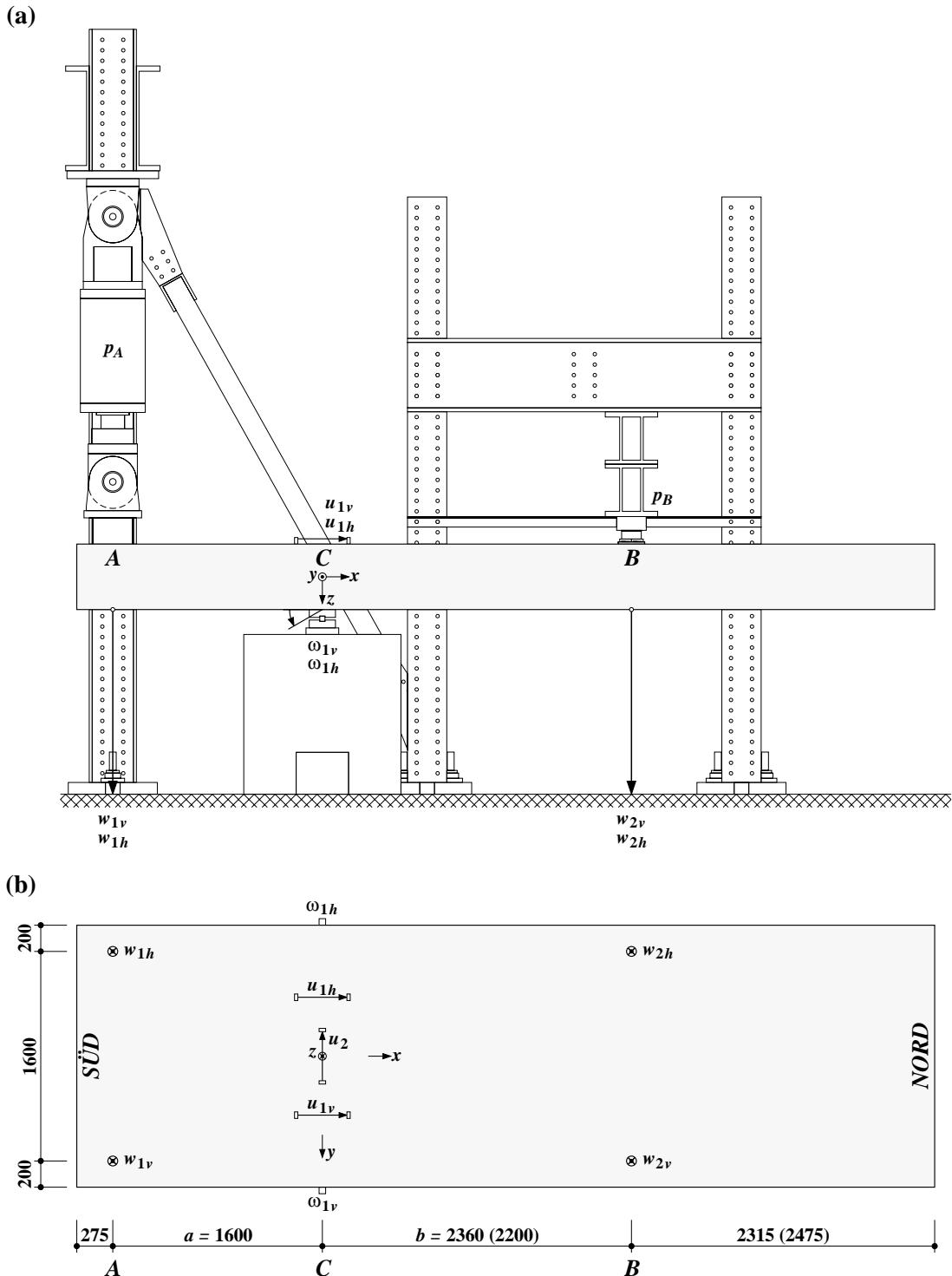
3.2.4 Versuchsvorbereitung

Die Versuchsvorbereitungen dauerten jeweils etwa zwei Wochen. Die Versuchskörper wurden kopfüber (Biegebewehrung unten) aus dem Vorfabrikationswerk angeliefert. Als erstes wurden an der noch oben liegenden Unterseite die Messmarken für die Deformettermessungen aufgeklebt und die Messstellen beschriftet. Anschliessend erfolgte die Drehung der Versuchskörper um ihre Längsachse in die für den Versuch erforderliche Lage, bevor an den restlichen drei Betonoberflächen die Messmarken für die Deformettermessungen aufgeklebt, der Versuchskörper mit weisser Kalkfarbe gestrichen und die Messstellen beschriftet wurden. Nach dem Einbau in die Versuchsanlage und der Montage der Belastungseinrichtungen (inklusive Querträger des Reaktionsrahmens beim beweglichen Lager) wurden die Messgeber der kontinuierlichen Messungen installiert, mit dem Messverstärker verbunden und auf ihre Funktionstüchtigkeit geprüft.

Zwischen den Versuchen an den beiden Kragarmen der Versuchskörper mussten die Belastungseinrichtungen und der Querträger des Stahl-Reaktionsrahmens beim beweglichen Lager ausgebaut werden. Anschliessend wurde der Versuchskörper aus der Versuchsanlage (siehe Bild 3.17) gehoben und um 180° gedreht.

3.2.5 Versuchsablauf

Die Versuche dauerten in der Regel drei bis sechs Tage. Vor der Belastung wurden alle fest verdrahteten Messgeber zu Null abgeglichen und zwei vollständige Nullmessungen mit den Defor-



Bezeichnungen

- w_{1v}, w_{1h}
- w_{2v}, w_{2h}
- u_{1v}, u_{1h}, u_2
- ω_{1v}, ω_{1h}
- p_A
- p_B

Messgeber

- Induktive Wegaufnehmer ± 100 mm
- Induktive Wegaufnehmer ± 50 mm
- Induktive Wegaufnehmer ± 10 mm
- Neigungsmesser $\pm 10^\circ$
- Flüssigkeitsdruckgeber 400 bar
- Flüssigkeitsdruckgeber 400 bar

Gemessene Größen

- Durchbiegung \bar{w}_1
- Durchbiegung \bar{w}_2
- Verformungen Zugseite in C (Basislänge 400 mm)
- Neigung Lagerplatte in C
- Öldruck Pressen in A (Pressenkraft F_A)
- Öldruck Flachpressen in B (Pressenkraft F_B)

Bild 3.16: Anordnung der kontinuierlichen Messungen bei der Versuchsserie B: (a) Längsschnitt; (b) Ansicht von oben. Abmessungen in mm.

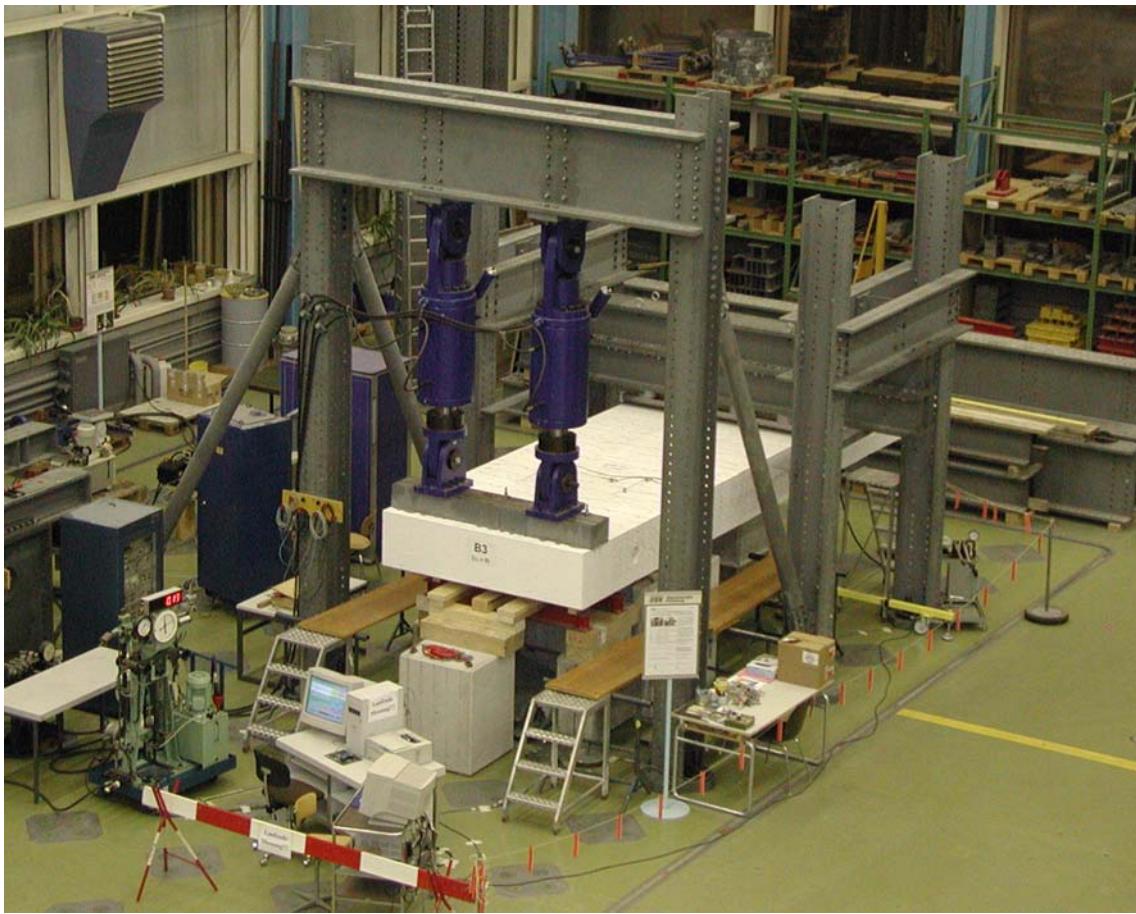


Bild 3.17: Ansicht der Versuchsanlage für die Versuchsserie B.

metern durchgeführt, wobei bei der späteren Auswertung die zweite als Bezugsmessung verwendet wurde.

Die wichtigsten Steuergrößen waren die aus den Messwerten der Flüssigkeitsdruckgeber ermittelten Pressenkräfte und die Kragarmdurchbiegungen. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde von Hand am Pendelmanometer geregelt und war bei allen Versuchen ungefähr konstant. Pro Versuchstag wurden in der Regel zwei bis drei Laststufen aufgebracht. Am Ende eines Versuchstages wurden die Versuchsträger vollständig entlastet. Im entlasteten Zustand wurden jeweils keine Deformettermessungen durchgeführt. Nach der letzten vollständigen Messung wurden die Versuchskörper durch weiteres Steigern der Verformungen bis zum Bruch geführt.

Die Messungen innerhalb einer Laststufe wurden erst begonnen, nachdem die Verformungen des Versuchskörpers während ungefähr 15 Minuten konstant gehalten worden waren. Eine vollständige Messung beinhaltete außer der Durchführung der Deformettermessungen auch das Anzeichnen neu entstandener Risse, das Protokollieren der Rissbreiten sowie das Fotografieren des Rissbildes. Eine Auflistung der Belastungsschritte und der Rissbreiten kann den Tabellen 5.2 bis 5.29 entnommen werden.

4 Versuchsresultate Serie A

4.1 Auswertung und Darstellung der Messdaten

4.1.1 Bezeichnungen

Für die Darstellung der Messresultate und der fotografischen Aufnahmen werden dieselben Blickrichtungen verwendet. Diese entsprechen einer Ansicht von “oben” und von “vorne” auf den Versuchskörper. Der Ursprung des zur Beschreibung der Versuchsresultate verwendeten orthogonalen rechtshändigen Koordinatensystems liegt im Schwerpunkt der Versuchskörper ($x = 0$ in Versuchskörpermitte für Versuch 1 und Versuch 2). Die positive x -Richtung zeigt nach rechts, beziehungsweise von “Norden” nach “Süden”. Die für die Auswertung und Darstellung verwendeten Bezeichnungen sind in den Bildern 4.1 und 4.2 dargestellt.

Die im Text und bei den Deformettermessungen (Bilder 3.3 bis 3.6) verwendeten Bezeichnungen “oben”, “unten”, “vorne” und “hinten” beschreiben den Standort der Messungen und Beobachtungen. Der Kragarm K1 befindet sich auf der “nördlichen Seite” und der Kragarm K2 auf der “südlichen Seite” der Versuchskörper. Die “Vorderseite” entspricht der “Westseite”.

4.1.2 Deformettermessungen

Die Auswertung der Messdaten, die bei jeder Laststufe durch die Deformettermessungen gewonnen wurden, erfolgte in mehreren Schritten. Zuerst wurden die infolge der Erwärmung der Messgeräte entstehenden systematischen Messfehler eliminiert. Dazu wurden die Differenzen der in Kapitel 3.1.2 erwähnten Referenzmessungen am Invarstab linear auf die dazwischenliegenden Messungen verteilt. In einem zweiten Schritt wurden dann für alle Messwerte die Differenzen zur Nullmessung gebildet. Offensichtliche Fehlmessungen wurden anschliessend eliminiert.

Die Messnetze auf den vier Seiten der Versuchskörper waren überbestimmt, so dass die zufälligen Messfehler anhand einer Fehlerausgleichsrechnung, welche der Methode der kleinsten Quadrate entspricht, minimiert werden konnten. Dazu wurden die Messnetze als entsprechende, innerlich statisch unbestimmte, linear elastische Fachwerke mit gelenkigen Knoten modelliert, die mit einer aufgezwungenen Verformung in Form initialer Stabdehnungen belastet wurden. Die initialen Stabdehnungen entsprechen dabei den gemessenen Längenänderungen aus den Defometermessungen. Dividiert man die resultierenden Stabkräfte durch die Stabsteifigkeiten EA/l der entsprechenden Stäbe, so erhält man die Messfehler, welche zu den gemessenen Längenänderungen addiert werden müssen, um die ausgeglichenen Werte der Längenänderungen zu erhalten. Die einzelnen Messwerte haben bei diesem Fehlerausgleich ein zu den Stabsteifigkeiten EA/l proportionales Gewicht. Unterschiedliche Messgenauigkeiten der für die verschiedenen Messstrecken eingesetzten Messgeräte konnten somit durch die entsprechende Wahl der Stabsteifigkeiten berücksichtigt werden. Offensichtliche Fehlmessungen und wegen abgefallener Bolzen fehlende Messungen konnten bei diesem Ausgleichsverfahren dank der Überbestimmtheit des Messnetzes aus den korrekt ausgeführten Messungen ermittelt werden. Dazu wurden die offensichtlichen

Fehlmessungen mit einem Wert der gemessenen Längenänderung von 0 und verschwindend kleiner Stabsteifigkeit EA/l in die Fehlerausgleichsrechnung einbezogen. Die daraus resultierenden Zwangsstabkräfte dividiert durch die Stabsteifigkeiten entsprachen somit direkt den ausgeglichenen Längenänderungen.

Als letzter Schritt wurden die mittleren Verzerrungen ε_x , ε_y und $\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{xy}$ der einzelnen Maschen auf der Ober- und Unterseite sowie ε_x , ε_z und $\varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{xz}$ auf der Vorder- und Hinterseite der Versuchskörper bestimmt. Die entsprechende Maschennummerierung ist in den Bildern 3.3 bis 3.6 dargestellt.

In der Folge werden die Resultate als Mittelwerte der Maschenverzerrungen für ausgewählte Laststufen dargestellt. Auf der Ober- und Unterseite der Versuchskörper wurden dazu die Werte über die Breite gemittelt. Für die seitlichen Verzerrungen wurden die Mittelwerte von den entsprechenden Messreihen und Maschen auf der Vorder- und Hinterseite der Versuchskörper verwendet. Die Krümmungen entlang der Stabachse wurden aus den seitlichen Längsdehnungen der oberen und unteren Messreihen berechnet. Die mittleren seitlichen Dehnungen ε_x , ε_z und die Schiebungen γ_{xz} entsprechen den über die Dicke des Plattenkerns gemittelten Verzerrungen entlang der x -Achse.

4.1.3 Kontinuierliche Messungen

Die Bilder 4.1 und 4.2 zeigen die für die Auswertung der Versuche verwendeten statischen Systeme mit den Bezeichnungen für die Verformungen, Kräfte und Schnittgrößen. Die Eigenlast der Versuchskörper (g_{K1} , g_{K2} und g_M) wurde aus der Rohdichte der Betonprüfkörper und dem Bewehrungsgehalt der einzelnen Bereiche Kragarm K1, Mittelfeld und Kragarm K2 bestimmt. Die entsprechenden Werte sind in der Tabelle 4.1 zusammengestellt. Die Eigenlast der Belastungseinrichtungen (Lastverteilträger und Hydraulikzylinder) wurde mit $G_A = G_B = 4,79 \text{ kN}$ berücksichtigt. Die Messwerte der Durchbiegungen w_1 bis w_3 sowie der Lagerverdrehungen ω_1 und ω_2 entsprechen den Mittelwerten der vorderen und hinteren Messwerte.

Beim ersten Versuch entsprechen die Durchbiegungen w_1 bis w_3 den gemessenen Werten \bar{w}_1 bis \bar{w}_3 und die Lagerverdrehungen ω_1 und ω_2 den Messwerten ω_1 und ω_2 . Die gemessenen Durch-

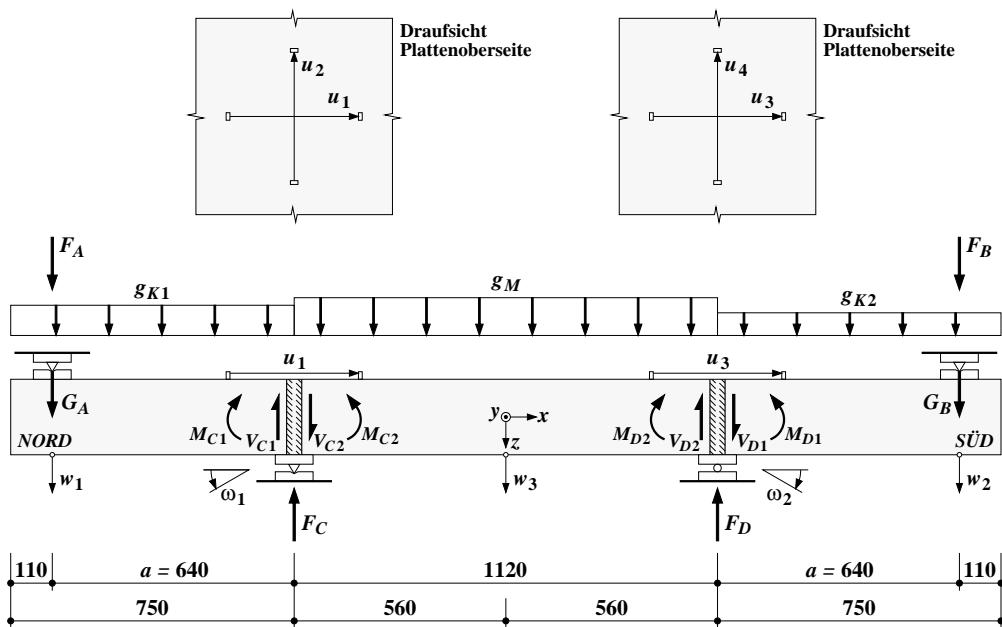


Bild 4.1: Bezeichnungen für die Serie A – Versuch 1. Abmessungen in mm.

Versuchskörper		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Eigenlast Kragarm K1 – g_{K1}	[kN/m]	4,26	4,19	4,04	4,03	3,94	4,00	3,96
Eigenlast Kragarm K2 – g_{K2}	[kN/m]	4,14	4,17	3,98	4,00	3,91	4,00	3,96
Eigenlast Mittelfeld – g_M	[kN/m]	4,25	4,21	4,04	4,04	3,95	4,01	3,97

Tabelle 4.1: Eigenlasten Prüfkörper Serie A (Bezeichnungen gemäss Bild 4.1 und 4.2).

biegungen \bar{w}_1 bis \bar{w}_3 und Lagerverdrehungen $\bar{\omega}_1$ wurden beim zweiten Versuch derart umgeformt, dass die Einsenkung w_2 an der Stelle B (bewegliches Lager) zu Null und die nach dem ersten Versuch resultierende plastische Verformung berücksichtigt wurde. Diese Umformung umfasste eine Starrkörperrotation um das feste Lager. Die initiale Durchbiegung w_1 und die Lagerverdrehung ω_1 beziehen sich auf die mit den Deformetern durchgeföhrten Durchbiegungsmessungen am unbelasteten Versuchskörper zwischen den beiden Versuchen.

Die initialen Verformungen u_1 und u_2 beim zweiten Versuch beziehen sich auf die entsprechenden Messwerte des ersten Versuchs bei Versuchsende.

Ausser den gemessenen Kräften und Verformungen werden auch berechnete Auflagerreaktionen und Schnittgrößen in den Punkten B , C und D der Versuchskörper angegeben. Beim Versuch 1 wurden diese anhand der Beziehungen

$$F_C = F_A + G_A + 1,001 \cdot g_{K1} + 0,56 \cdot g_M - 0,251 \cdot g_{K2} \quad (4.1)$$

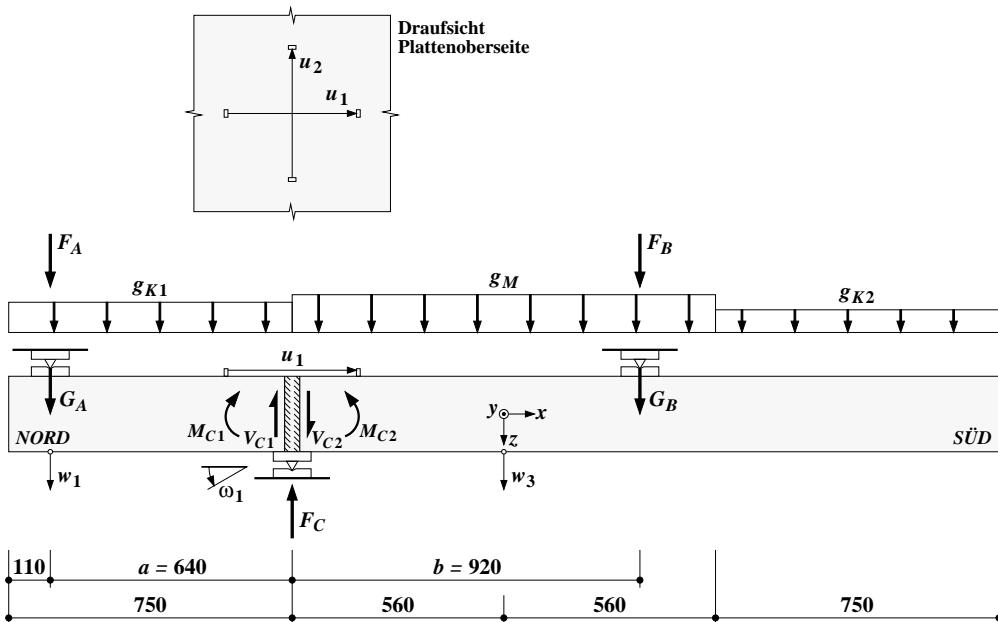
$$F_D = F_B + G_B - 0,251 \cdot g_{K1} + 0,56 \cdot g_M + 1,001 \cdot g_{K2} \quad (4.2)$$

$$-V_{C1} = F_A + G_A + 0,75 \cdot g_{K1} \quad (4.3)$$

$$V_{C2} = F_C + V_{C1} \quad (4.4)$$

$$V_{D1} = F_B + G_B + 0,75 \cdot g_{K2} \quad (4.5)$$

$$-V_{D2} = F_D - V_{D1} \quad (4.6)$$

**Bild 4.2:** Bezeichnungen für die Serie A – Versuch 2. Abmessungen in mm.

$$-M_C = -M_{C1} = -M_{C2} = 0,64 \cdot (F_A + G_A) + 0,281 \cdot g_{K1} \quad (4.7)$$

$$-M_D = -M_{D1} = -M_{D2} = 0,64 \cdot (F_B + G_B) + 0,281 \cdot g_{K2} \quad (4.8)$$

und beim Versuch 2 anhand der Beziehungen

$$F_B = 0,696 \cdot (F_A + G_A) - G_B + 0,306 \cdot g_{K1} - 0,682 \cdot g_M - 1,219 \cdot g_{K2} \quad (4.9)$$

$$F_C = 1,696 \cdot (F_A + G_A) + 1,056 \cdot g_{K1} + 0,438 \cdot g_M - 0,469 \cdot g_{K2} \quad (4.10)$$

$$-V_{C1} = F_A + G_A + 0,75 \cdot g_{K1} \quad (4.11)$$

$$V_{C2} = F_C + V_{C1} \quad (4.12)$$

$$-M_C = -M_{C1} = -M_{C2} = 0,64 \cdot (F_A + G_A) + 0,281 \cdot g_{K1} \quad (4.13)$$

(g_{K1}, g_M, g_{K2} in kN/m; $F_A, F_B, F_C, F_D, G_A, G_B, V_{C1}, V_{C2}, V_{D1}, V_{D2}$ in kN; $M_C, M_{C1}, M_{C2}, M_D, M_{D1}, M_{D2}$ in kNm)

berechnet. In den nachfolgenden Kapiteln ist für jeden Versuch der Versuchsablauf mit den wichtigsten Resultaten tabellarisch dargestellt. Eine vollständige Zusammenstellung aller Kräfte, Verformungen und Schnittgrößen kann der beiliegenden Daten-CD entnommen werden.

4.1.4 Darstellung der Resultate

In der Folge werden die wichtigsten Resultate jedes einzelnen Versuchs dargestellt. Es werden gezeigt:

- Eine tabellarische Zusammenstellung des Versuchsablaufs. Diese beinhaltet die aus den fest verdrahteten Messungen gewonnenen Messwerte und berechneten Größen zu Beginn und Ende der Laststufen sowie bei den Belastungszuständen Höchst- und Bruchlast.
- Kraft-Durchbiegungsdiagramme für die Durchbiegung w_1 mit der entsprechenden Kraft F_A und die Durchbiegung w_2 mit der entsprechenden Kraft F_B an den Stellen der Belastungsjoche für den gesamten Versuchsablauf und als Ausschnitt bis zum Erreichen der Höchstlast.
- Last-Verformungsdiagramme für die horizontalen Verformungen u_1, u_2 (Basislänge $l_0 = 350$ mm) mit der entsprechenden Kraft F_A und die horizontalen Verformungen u_3, u_4 (Basislänge $l_0 = 350$ mm) mit der entsprechenden Kraft F_B auf der Oberseite der Versuchskörper für den gesamten Versuchsablauf.
- Eine tabellarische Zusammenstellung der gemessenen Rissbreiten für ausgewählte Laststufen.
- Biegelinien für ausgewählte Laststufen, ermittelt aus den Messwerten der Deformettermessungen.
- Mittlere Längs- und Querdehnungen auf der Ober- und Unterseite für ausgewählte Laststufen, ermittelt aus den Messwerten der Deformettermessungen (Beim Versuch 2 werden nur die Dehnungen auf der Oberseite gezeigt).
- Mittlere seitliche Längsdehnungen entlang der obersten und untersten Messreihen des Messrasters und die daraus berechneten Krümmungen für ausgewählte Laststufen, ermittelt aus den Messwerten der Deformettermessungen.
- Mittlere seitliche Dehnungen $\varepsilon_x, \varepsilon_z$ und Schiebungen γ_{xz} des Plattenkerns für ausgewählte Laststufen, ermittelt aus den Messwerten der Deformettermessungen.
- Rissbilder von der Ober- und Vorderseite der Versuchskörper.

4.2 Versuchskörper A1

Der Versuchskörper A1 war als Vorversuch konzipiert, mit dem die Wirkungsweise der Querkraftbewehrung und der oberflächennahen Verankerung der Biegebewehrung aufgezeigt werden sollte. Für die Biegebewehrung wurde im Gegensatz zu den übrigen Versuchskörpern der Serie A, bei denen ausschliesslich warmgewalztes Stabmaterial Ø 12 mm zur Anwendung kam, warmgewalztes Ringmaterial Ø 12 mm verwendet. Der fiktive geometrische Bewehrungsgehalt in x -Richtung betrug $\rho_x = 1,538 \%$, und für die Bewehrungsrichtung galt $\varphi_0 = 45^\circ$. In beiden Bewehrungsrichtungen (n - und t -Richtung) waren zwei Bewehrungslagen mit Stäben Ø 12 mm und einem Stababstand von 80 mm angeordnet. Zur Sicherstellung des Gleichgewichts im oberen Sandwichdeckel und der damit verbundenen Krafteinleitung der Bewehrungskraft in das einachsiale Druckfeld im Beton musste die Biegebewehrung bei den Ankerplatten vollständig verankert sein. Die beiden Kragarmbereiche wiesen Querkraftbewehrungsgehalte von $\rho_z = 0 \%$ (Kragarm K2) und 0,611 % (Kragarm K1) auf.

4.2.1 Versuch A1V1

Am ersten Versuchstag wurden die beiden Nullmessungen durchgeführt. Die Laststufen LS 2 und LS 3 folgten am zweiten, die Laststufen LS 4 und LS 5 am dritten Versuchstag. Über Nacht blieb der Versuchsträger jeweils belastet.

Bei einer Kraft von $F_A = F_B \approx 60 \text{ kN}$ wurde die erste Laststufe LS 2 durchgeführt. Der gerissene Bereich erstreckte sich über die ganze Oberseite, und die Risse wiesen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 70 bis 100 mm Breiten zwischen 0,05 und 0,1 mm auf. Auf der Vorder- und Hinterseite des Versuchskörpers hatten sich ungefähr vertikal verlaufende Risse gebildet. Im Mittelfeld und über den Auflagern reichten diese über die oberen zwei Drittel der Versuchskörperhöhe. Für die folgenden Laststufen wurde bis zum Erreichen der Bruchlast ein Belastungsspielraum von $\Delta F_A = \Delta F_B \approx 30 \text{ kN}$ gewählt.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 4 ($F_A = F_B \approx 120 \text{ kN}$) bildeten sich vorwiegend auf der Oberseite weitere Risse. Ausser der neuen Risse bei den Kragarmenden endeten diese vorwiegend in den Bereichen der Biegebewehrungsverankerungen. Im Mittelfeld und über den Auflagern wurden Risse mit Breiten von 0,1 bis 0,2 mm gemessen, deren mittlerer Abstand ungefähr 60 mm betrug. Auf der Vorder- und Hinterseite bildeten sich bei den Kragarmenden je ein neuer Riss, während sich die bereits vorhandenen Risse fortpflanzten. Im Kragarm verliefen diese im oberen Bereich vertikal, setzten sich dann aber im unteren Bereich mit einer flachen Neigung

Laststufe (LS)	$F_A = F_B$ [kN]	V_{D1} [kNm]	$-M_D$ [kNm]	w_1 [mm]	w_2 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	u_3 [mm]	u_4 [mm]	Bemerkungen
1	0	7,9	4,2	0	0	0	0	0	0	Nullmessung
2	61,9 54,1	69,8 62,0	43,8 38,9	6,3 6,4	6,6 6,7	0,83 0,82	-0,05 -0,07	0,66 0,66	-0,07 -0,09	Belastungsende Messende
3	91,1 73,7	99,0 81,6	62,5 51,4	10,5 10,5	11,2 11,1	1,32 1,31	-0,12 -0,12	1,13 1,16	-0,16 -0,17	Belastungsende Messende
4	120,9 110,9	128,8 118,8	81,6 75,2	15,2 15,6	16,1 16,4	1,89 1,93	-0,18 -0,21	1,74 1,77	-0,25 -0,27	Belastungsende Messende
5	150,8 139,9	158,7 147,8	100,8 93,8	20,5 20,9	21,7 22,1	2,54 2,57	-0,28 -0,30	2,30 2,32	-0,35 -0,39	Belastungsende Messende
Bruch K2	161,3	169,2	107,5	22,8	24,2	2,82	-0,32	2,52	-0,41	Schubbruch
Entlastung	65,8 0	73,7 7,9	46,3 4,2	14,3 5,3	44,0 -	1,74 0,63	-0,24 -0,14	1,57 0,70	-0,33 -0,22	Entlastungsbeginn Versuchsende

Tabelle 4.2: A1V1 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 4.1).

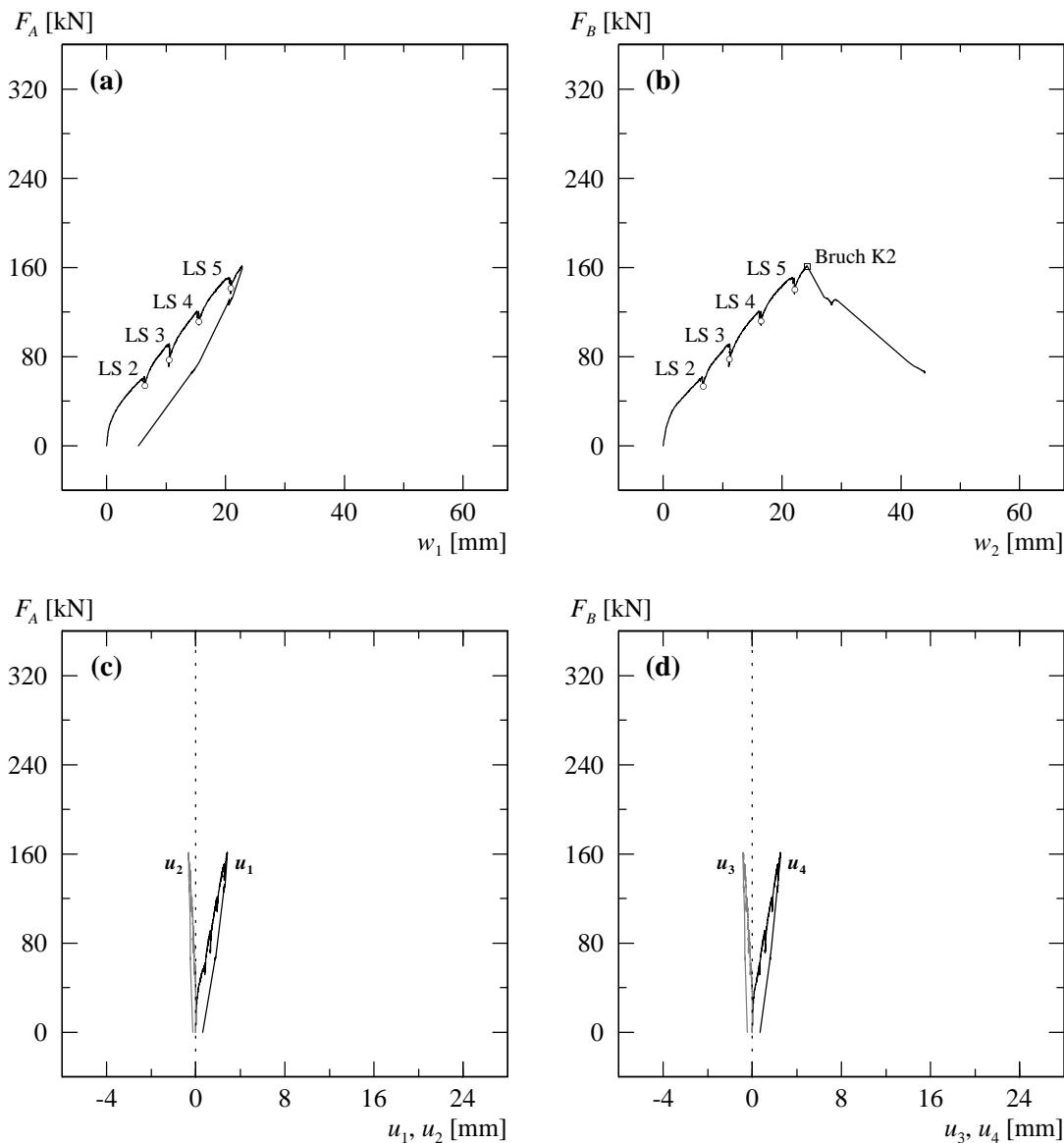


Bild 4.3: A1V1 – (a) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K1; (b) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K2; (c) Verformungen der Zugzone über Auflager NORD; (d) Verformungen der Zugzone über Auflager SÜD.

gegen die Auflager fort, während diejenigen im Mittelfeld ungefähr vertikal verliefen und sich über die oberen drei Viertel der Versuchskörperhöhe erstreckten. Die schrägen Risse wiesen Neigungen von 35 bis 45° gegenüber der x -Achse auf. Im Kragarm K2 ($\rho_z = 0\%$) wurden auf der Höhe der oberen Deformettermessreihe (≈ 30 mm unterhalb der Oberkante) Rissbreiten von 0,15 bis 0,3 mm gemessen. Unterhalb der Bereiche, in denen die Biegebewehrungsverankerungen lagen, verringerten sich die Rissbreiten stark; auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) betrugen sie 0,05 bis 0,1 mm.

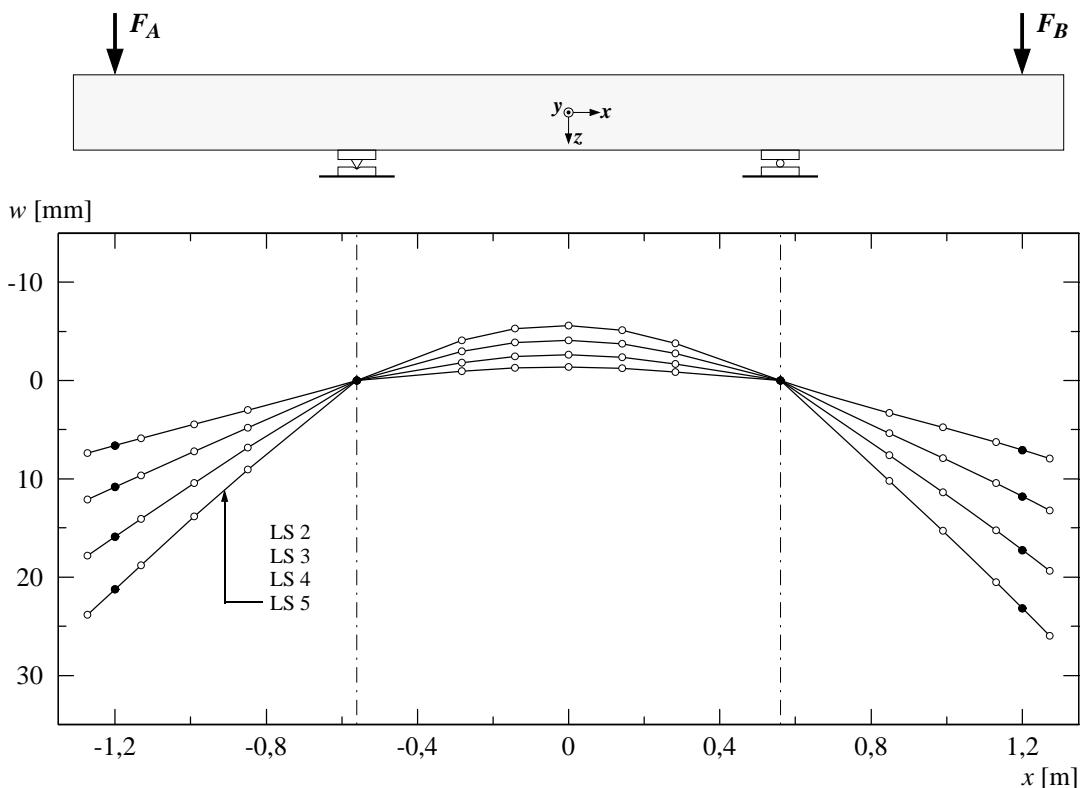
Die letzte Laststufe LS 5 des ersten Versuchs wurde bei einer Kraft von $F_A = F_B \approx 150$ kN durchgeführt. Gegenüber der Laststufe LS 4 hatte sich das Rissbild kaum verändert. Neben einzelnen Verlängerungen und Verästelungen der Risse wurde auf der Oberseite eine Vergrößerung der Rissbreiten beobachtet. Die Rissbreiten betrugen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 60 mm im Mittelfeld und über den Auflagern 0,1 bis 0,3 mm, in den Kragarmen 0,05 bis 0,2 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite erstreckten sich die Risse über die oberen 80 bis 85 % der Versuchskörperhöhe. Die schräg verlaufenden Risse im Kragarm K2 setzten sich nun im unteren Bereich bedeutend flacher fort, während sich die Risse im Kragarm K1 bei gleichbleibender

Laststufe	Oberseite					Vorderseite – Kragarm	
	Kragarm K1 w_{cr} [mm]	Lager NORD w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	Lager SÜD w_{cr} [mm]	Kragarm K2 w_{cr} [mm]	$z \approx -70$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 2	HR...0,05	0,05...0,10	0,05...0,10	0,05...0,10	HR...0,05	0,05...0,10	HR...0,05
LS 3	0,05...0,10	0,05...0,15	0,05...0,15	0,05...0,10	HR...0,10	0,10...0,20	0,05...0,10
LS 4	0,05...0,10	0,10...0,20	0,10...0,20	0,10...0,20	HR...0,10	0,15...0,30	0,05...0,10
LS 5	0,05...0,20	0,10...0,30	0,10...0,30	0,10...0,30	0,05...0,20	0,25...0,60	0,15...0,50

Tabelle 4.3: A1V1 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

Rissneigung fortpflanzten. Im Mittelfeld konnte nur eine geringfügige Verlängerung der ungefähr vertikal verlaufenden Risse beobachtet werden. Die Neigung der Risse betrug auf halber Versuchskörperhöhe in beiden Kragarmen ungefähr 35 bis 45° gegenüber der x -Achse. Im unteren Bereich des Kragarms K2 verringerte sich die Rissneigung schliesslich auf 10 bis 25° . Im Kragarm K2 wurden auf der Höhe der oberen Deformettermessreihe Rissbreiten von $0,25$ bis $0,6$ mm und auf halber Versuchskörperhöhe solche von $0,15$ bis $0,5$ mm gemessen, wobei auf der Hinterseite tendenziell grössere Rissbreiten beobachtet wurden.

Im weiteren Versuchsfortschritt erfolgte bei einer Kraft von $F_A = F_B = 161,3$ kN ein spröder Schubbruch des Kragarms K2. Die dazugehörigen Durchbiegungen betrugen $w_1 = 22,8$ mm beim Kragarm K1 und $w_2 = 24,2$ mm beim Kragarm K2. Bis zum Erreichen der Bruchlast waren keine Anzeichen feststellbar, die auf ein baldiges Versagen hinwiesen. Erst in der letzten Phase vor dem Bruch konnte ein Knistern wahrgenommen und die Bildung der Bruchfläche beobachtet werden. Der eigentliche Bruchprozess verlief relativ langsam, wobei der untere Betonkeil nicht abgetrennt wurde. Die leicht s-förmig gekrümmte Bruchfläche folgte in ihrem mittleren, steil verlaufenden Teil einem vorhandenen Schrägriss. Der untere, weniger geneigte Teil bis zum Auflager und der sich bis zur Krafteinleitung erstreckende Trennriss entlang der Biegebewehrung entstanden unmittelbar beim Bruch. Die Steifigkeit der Versuchsanlage genügte, um ein schlagartiges Abtrennen des unteren Betonkeils zu verhindern.

**Bild 4.4:** A1V1 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

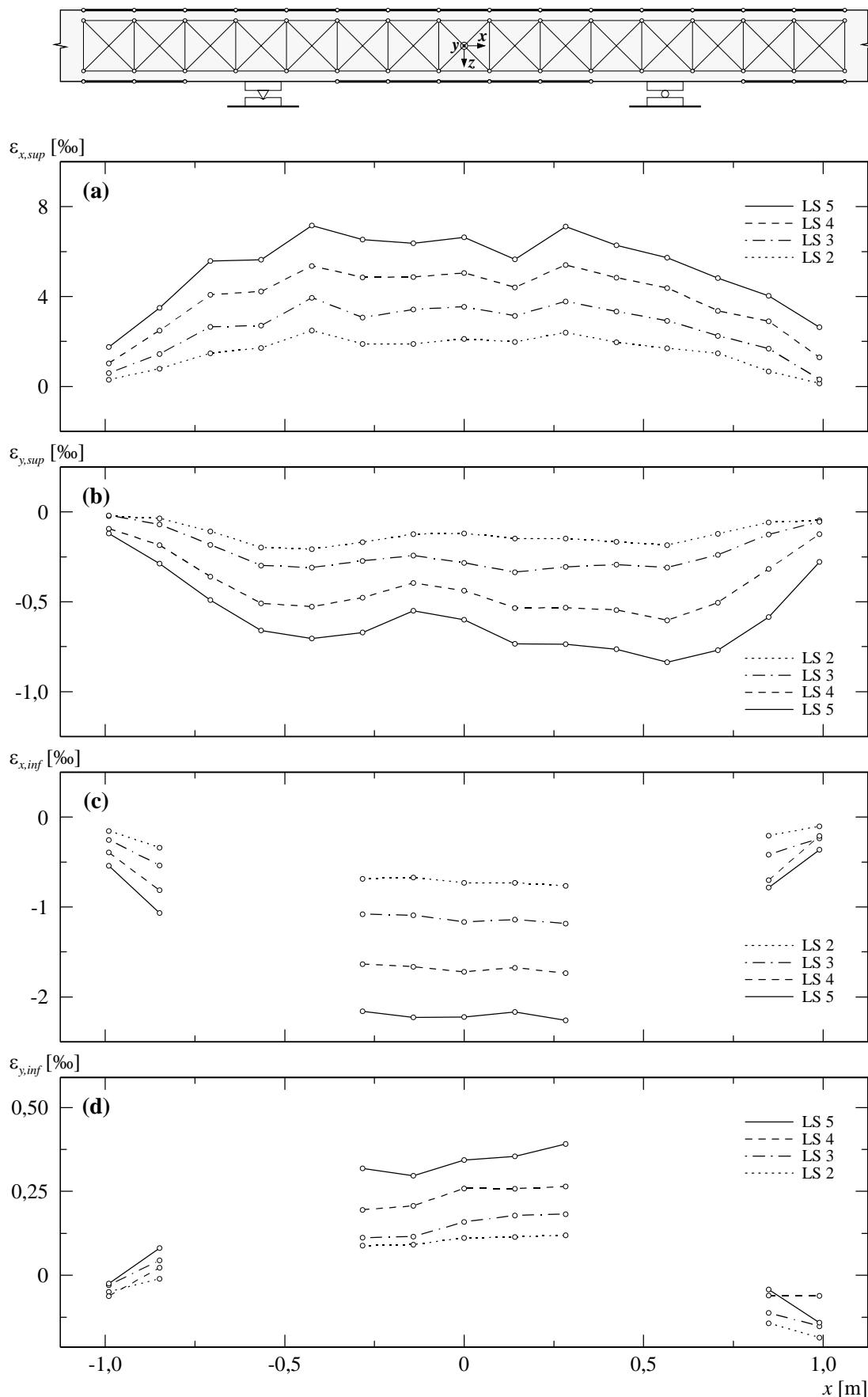


Bild 4.5: A1V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben; (c) mittlere Längsdehnungen unten; (d) mittlere Querdehnungen unten.

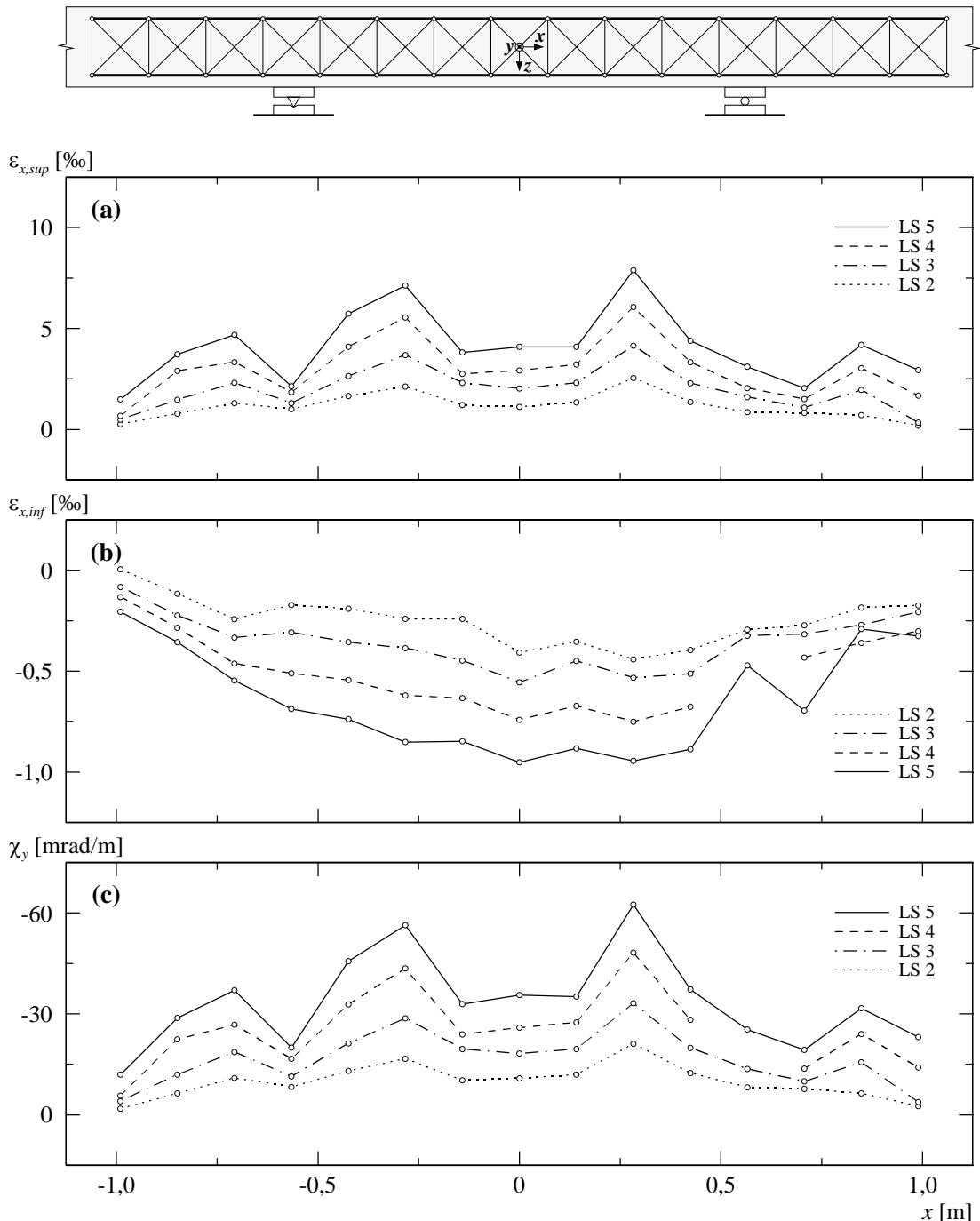


Bild 4.6: A1V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

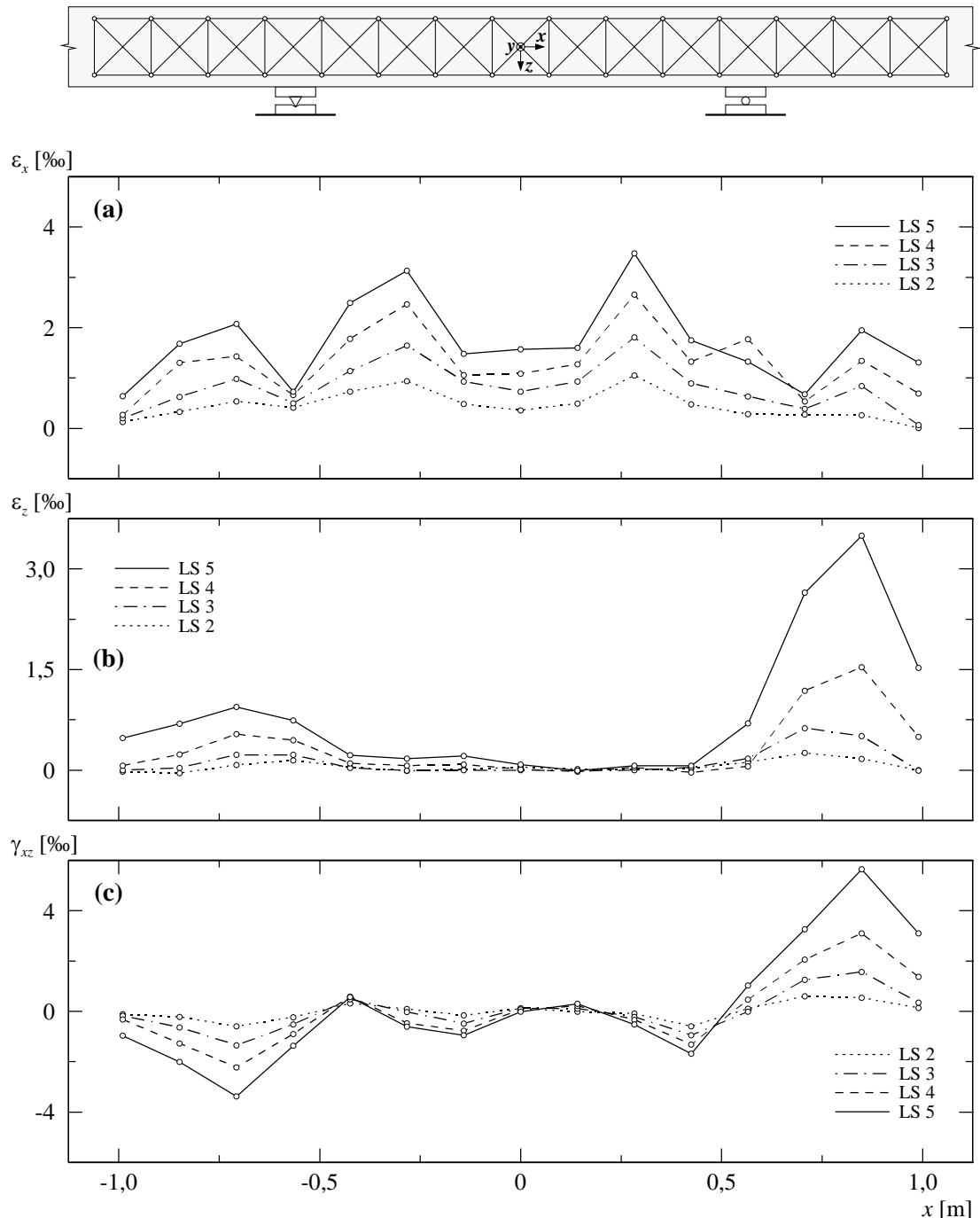
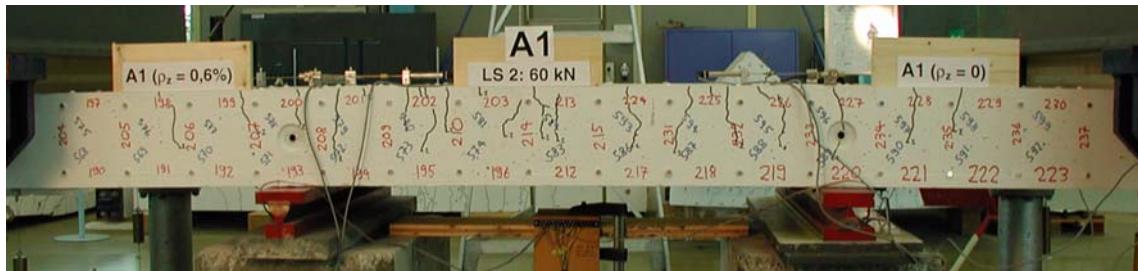


Bild 4.7: A1V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

(a)



(b)

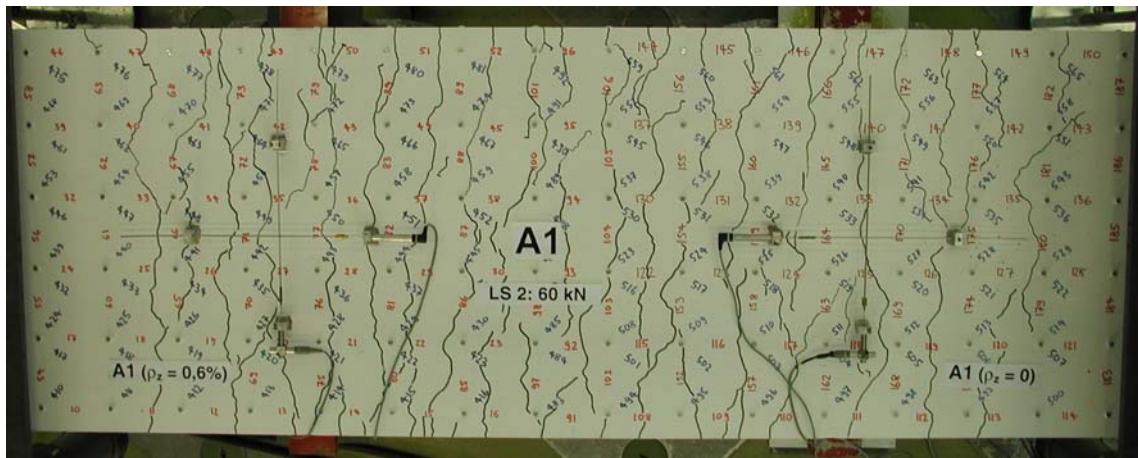
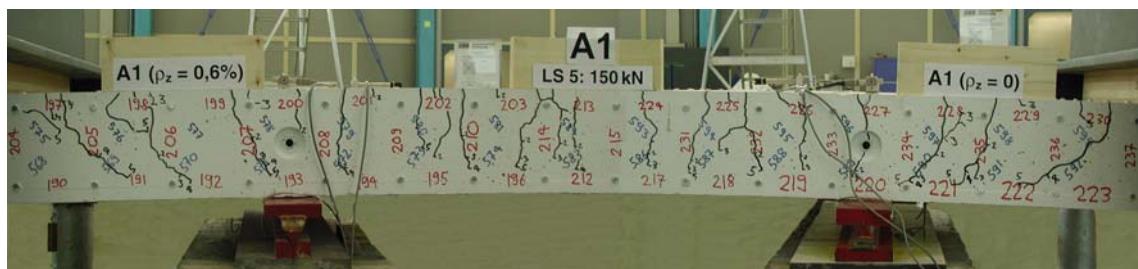


Bild 4.8: A1V1 – Rissbild bei Laststufe LS 2: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

(a)



(b)

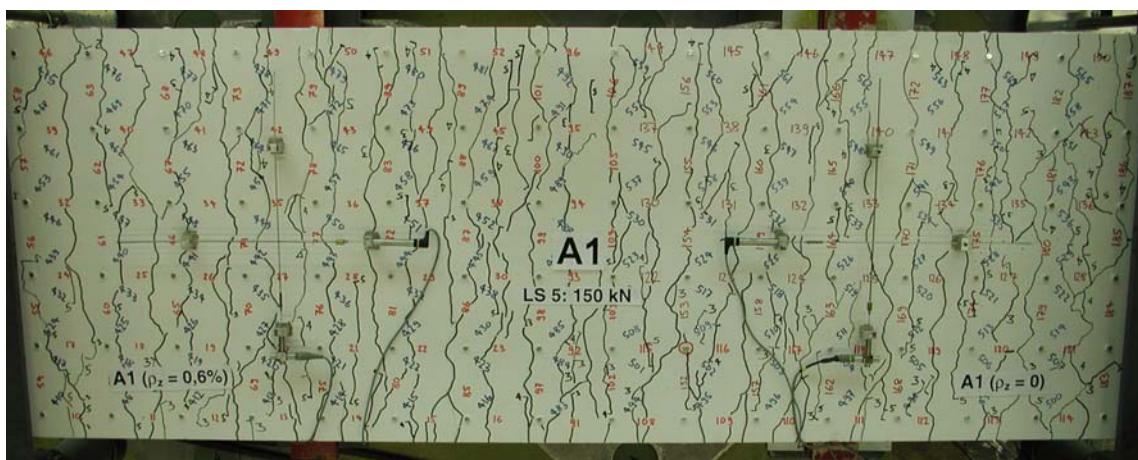


Bild 4.9: A1V1 – Rissbild bei Laststufe LS 5: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

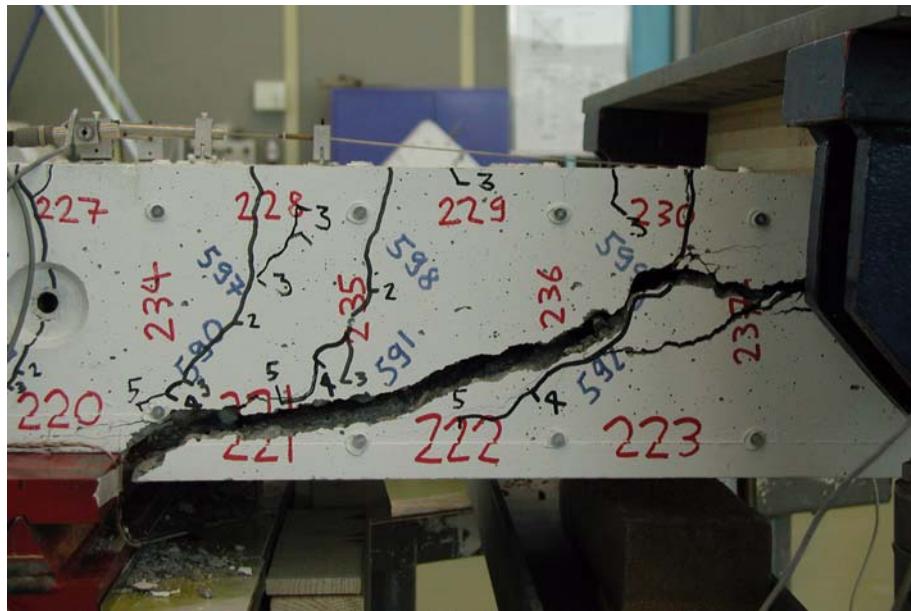


Bild 4.10: A1V1 – Schubbruch im Kragarm K2.

4.2.2 Versuch A1V2

Der Versuch wurde innerhalb eines Tages durchgeführt. Vor der eigentlichen Durchführung des Versuchs erfolgte im unbelasteten Zustand die Deformettermessung der Laststufe LS 6. Diese diente zur Bestimmung der plastischen Verformungen nach dem ersten Versuch, welche beim zweiten Versuch als initiale Vorverformungen berücksichtigt wurden. Anschliessend erfolgte die Belastung des Versuchskörpers und die Durchführung der Laststufen LS 7 bis LS 11.

Laststufe (LS)	F_A [kN]	F_B [kN]	F_C [kN]	$-V_{C1}$ [kN]	$-M_C$ [kNm]	w_1 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	Bemerkungen
6	0	-8,1	12,5	8,0	4,3	5,6	0,63	-0,14	Nullmessung
7	121,6 114,7	76,5 71,7	218,7 207,0	129,6 122,7	82,1 77,7	14,7 14,7	2,06 2,04	-0,27 -0,28	Belastungsende Messende
8	151,8 140,8	97,5 89,9	269,9 251,3	159,8 148,8	101,4 94,4	17,3 17,2	2,48 2,45	-0,32 -0,33	Belastungsende Messende
9	181,0 160,6	117,8 103,7	319,4 284,9	189,0 168,6	120,1 107,1	20,3 20,2	3,02 3,00	-0,36 -0,37	Belastungsende Messende
10	211,9 191,1	139,3 124,8	371,8 336,6	219,8 199,1	139,8 126,6	25,7 25,6	4,16 4,16	-0,41 -0,42	Belastungsende Messende
11	241,3 216,0	159,7 142,1	421,6 378,7	249,2 223,9	158,7 142,5	38,8 39,3	7,79 7,96	-0,47 -0,49	Belastungsende Messende
HL	245,9	163,0	429,5	253,9	161,7	49,1	10,93	-0,54	Höchstlast
Entlastung	214,3	141,0	375,9	222,3	141,4	133,2	—	-0,53	Entlastungsbeginn

Tabelle 4.4: A1V2 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 4.2).

Bei einer Kraft von $F_A \approx 120$ kN wurde die Laststufe LS 7 durchgeführt. Gegenüber der Laststufe LS 5 beim ersten Versuch hatte sich das Rissbild nicht verändert. Auf der Oberseite wurden im Bereich des nördlichen Lagers (Stelle C) maximale Rissbreiten von 0,15 bis 0,2 mm gemessen. Die übrigen Risse wiesen Breiten von 0,05 bis 0,1 mm auf, und die mittleren Rissabstände betrugen ungefähr 60 mm. Für die folgenden Laststufen wurde bis zum Erreichen der Höchstlast ein Belastungsintervall von $\Delta F_A \approx 30$ kN gewählt.

Die Laststufe LS 8 entsprach mit einer Kraft von $F_A \approx 150$ kN dem Belastungsniveau der letzten Laststufe LS 5 des ersten Versuchs. Das Rissbild hatte sich dabei nicht verändert, während sich hingegen die Rissbreiten vergrössert hatten. Auf der Oberseite wiesen die Risse im Bereich des nördlichen Lagers maximale Breiten von 0,2 bis 0,25 mm auf, und die übrigen Rissbreiten betragen 0,05 bis 0,15 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite wurden auf der Höhe der oberen Deformettermessreihe (≈ 30 mm unterhalb der Oberkante) Rissbreiten von 0,1 bis maximal 0,5 mm gemessen. Unterhalb der Verankerungsbereiche der Biegebewehrung, auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$), wiesen die Risse noch Breiten von 0,05 bis 0,25 mm auf.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 10 ($F_A \approx 210$ kN) bildeten sich vorwiegend auf der Vorder- und Hinterseite neue Risse. Ausser der Bildung vereinzelter Risse über dem nörd-

Laststufe	Oberseite			Vorderseite – Kragarm	
	Kragarm K1 w_{cr} [mm]	Lager NORD w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	$z \approx -70$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 7	0,05...0,10	0,15...0,20	0,05...0,10	0,10...0,30	0,05...0,15
LS 8	0,05...0,15	0,20...0,25	0,05...0,15	0,10...0,50	0,05...0,25
LS 9	0,05...0,15	0,25...0,35	0,05...0,15	0,10...0,55	0,05...0,25
LS 10	0,05...0,15	0,30...0,50	0,05...0,15	0,10...0,70	0,05...0,25
LS 11	0,05...0,35	0,35...1,10	0,05...0,45	0,10...1,40	0,10...0,40

Tabelle 4.5: A1V2 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen.

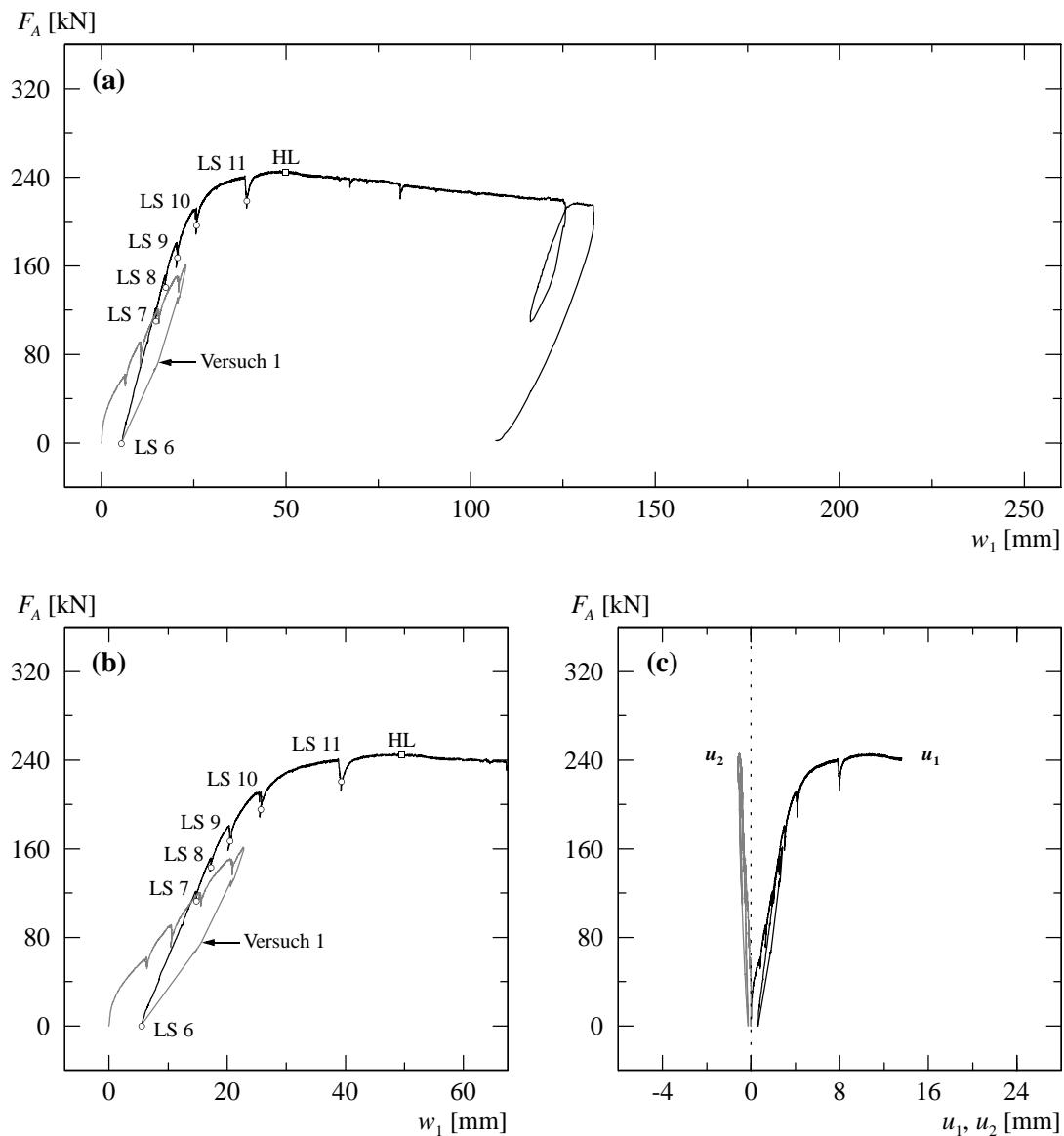


Bild 4.11: A1V2 – (a) und (b) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K1; (c) Verformungen der Zugzone über Auflager NORD.

lichen Lager konnte keine Veränderung des Rissbildes auf der Oberseite festgestellt werden. Dabei vergrösserten sich die Rissbreiten im Bereich des nördlichen Lagers auf 0,3 bis maximal 0,5 mm, während die Breiten der übrigen Risse ungefähr konstant blieben. Neben der Bildung eines neuen Risses beim Kragarmende pflanzten sich die vorhandenen Risse auf der Vorder- und Hinterseite fort. Die Risse wiesen auf der Höhe der oberen Deformettermessreihe Rissbreiten von 0,1 bis maximal 0,7 mm auf. Bei den anfänglich vertikal verlaufenden Rissen im Mittelfeld konnte im unteren Bereich eine Verästelung mit bedeutend flacheren Rissen beobachtet werden. Die schrägen Risse wiesen Neigungen von 25 bis 45° gegenüber der x -Achse auf, und auf halber Versuchskörperhöhe betragen die Rissbreiten 0,05 bis 0,25 mm.

Während der Belastung zwischen den Laststufen LS 10 und LS 11 ($F_A \approx 210 \div 240$ kN) bildeten sich auf der Mittelfeldseite und über der Lagerplatte die ersten Betonstauchungsrisse in der Biegedruckzone beim nördlichen Lager. Auf der Oberseite hatte sich das Rissbild nicht verändert, und nur vereinzelt konnten Verlängerungen der vorhandenen Risse beobachtet werden. Die Rissbreiten hatten sich hingegen vergrössert und betragen im Bereich des nördlichen Lagers 0,35 bis maximal 1,1 mm, während die Breiten der übrigen Risse zwischen 0,05 bis 0,45 mm lagen. Auf der Vorder- und Hinterseite erstreckten sich die Risse im Kragarm über die oberen 85 % und im

Mittelfeld über die oberen 80 % der Versuchskörperhöhe. Im Bereich der Biegebewehrungsverankerungen bildeten sich horizontal verlaufende Risse. Die schrägen Risse hatten sich zudem geringfügig verlängert, wobei im Kragarm eine deutliche Abflachung der Risse im unteren Bereich feststellbar war. Auf der Höhe der oberen Deformettermessreihe wurden über dem nördlichen Lager zwei Risse mit maximalen Breiten von 1,2 und 1,4 mm gemessen. Die übrigen Rissbreiten betrugen 0,1 bis 0,45 mm. Unterhalb der Bereiche, in denen die Biegebewehrungsverankerungen lagen, verringerten sich die Rissbreiten stark; auf halber Versuchskörperhöhe betragen sie 0,1 bis 0,4 mm.

Im weiteren Versuchsfortschritt wurde bei einer Durchbiegung von $w_1 = 49,1$ mm beim Kragarm K1 die Höchstlast erreicht. Die entsprechende Kraft betrug $F_A = 245,9$ kN. Anschliessend wurde die Durchbiegung des Kragarms K1 vergrössert. Bei einer Durchbiegung von $w_1 \approx 60$ mm wurden in dem zur y-Achse parallel verlaufenden Druckfeld auf der Oberseite (Biegezugzone) die ersten Betonstauchungsrisse beim nördlichen Lager beobachtet. Gleichzeitig lösten sich auf der Mittelfeldseite beim nördlichen Lager erste Betonplättchen an der Unterseite ab.

Mit zunehmender Kragarmdurchbiegung w_1 versagte beim nördlichen Lager allmählich der Beton im Verankerungsbereich eines Stabpaars der Biegebewehrung auf der Vorderseite sowie von zwei Stabpaaren auf der Hinterseite, und Teile des Überdeckungsbetons auf der Oberseite wurden in y-Richtung stark gestaucht. Die Bruchzone erstreckte sich in x-Richtung über eine Länge von 200 bis 300 mm. Diese Zerstörung des Druckfeldes führte zu geringfügigen horizontalen Verschiebungen der Biegebewehrungsstäbe entlang ihrer Stabachse und zu einem kleinen vertikalen Versatz der Ankerplatten, wobei die Querkraftbewehrungsstäbe die Verankerungszone und somit die Biegebewehrung stabilisierten. Gleichzeitig platzen auf der Mittelfeldseite beim nördlichen Lager grössere Teile des Überdeckungsbetons an der Unterseite ab. Bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 133$ mm wurde der Versuch abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt noch ungefähr 87 % der Höchstlast. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden.

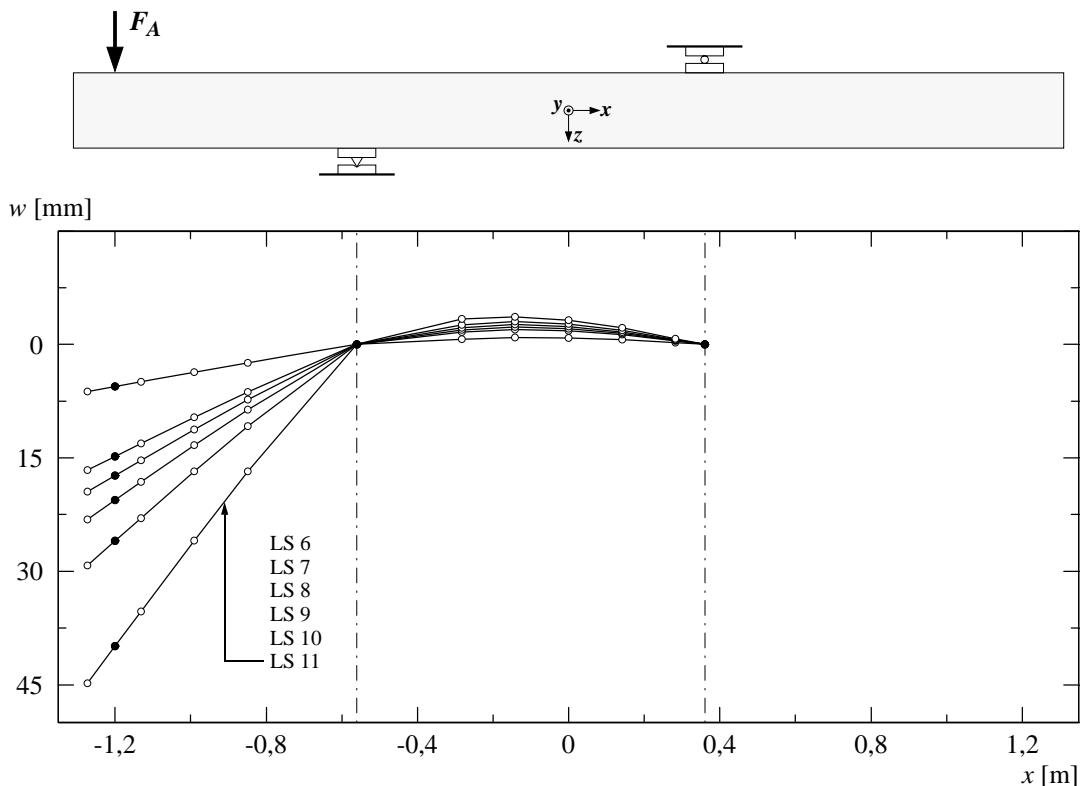


Bild 4.12: A1V2 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

Für die abschliessende Untersuchung des Versuchskörpers wurde auf der Oberseite der abgeplatzte Überdeckungsbeton der Biegezugzone entfernt. Die Bruchzone erstreckte sich auf einer Länge von 200 bis 300 mm beim nördlichen Lager über die äusseren Viertelsbereiche der Versuchskörperbreite. Der Überdeckungsbeton im mittleren Bereich blieb intakt. Im Verankerungsbereich der Biegebewehrung konnten kleine vertikale Relativverschiebungen der Ankerplatten festgestellt werden, wobei aber keine zerrissenen Querkraftbewehrungsstäbe entdeckt wurden. An der Unterseite war der Überdeckungsbeton der Biegendruckzone in einem Bereich von 100 bis 150 mm rechts vom nördlichen Lager (im Mittelfeld) abgeplatzt. Die Oberfläche der abgeplatzten Bereiche zeigte neben dem Lager keine Spuren einer Zerstörung der Rissverzahnung oder eines gegenseitigen Abgleitens der Rissflächen.

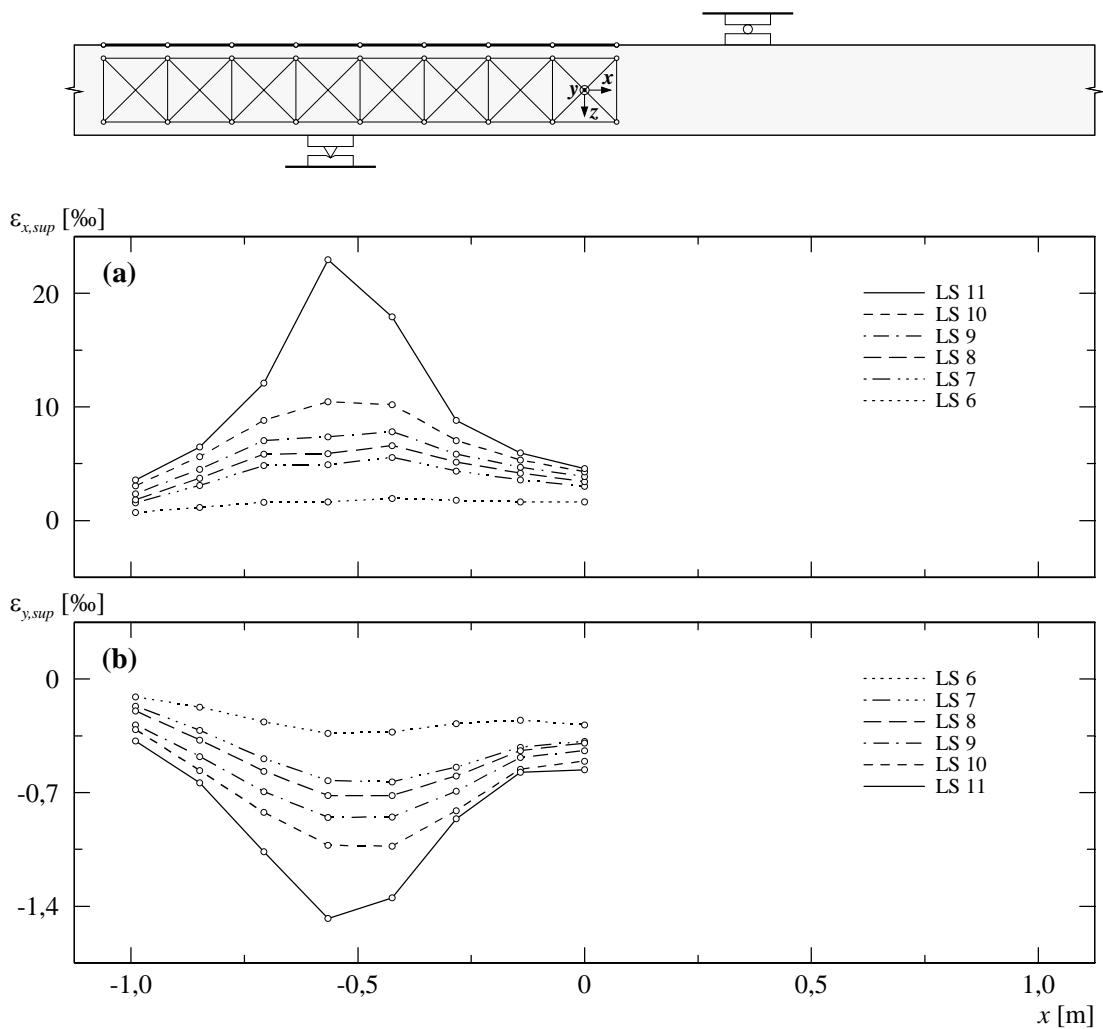


Bild 4.13: A1V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben.

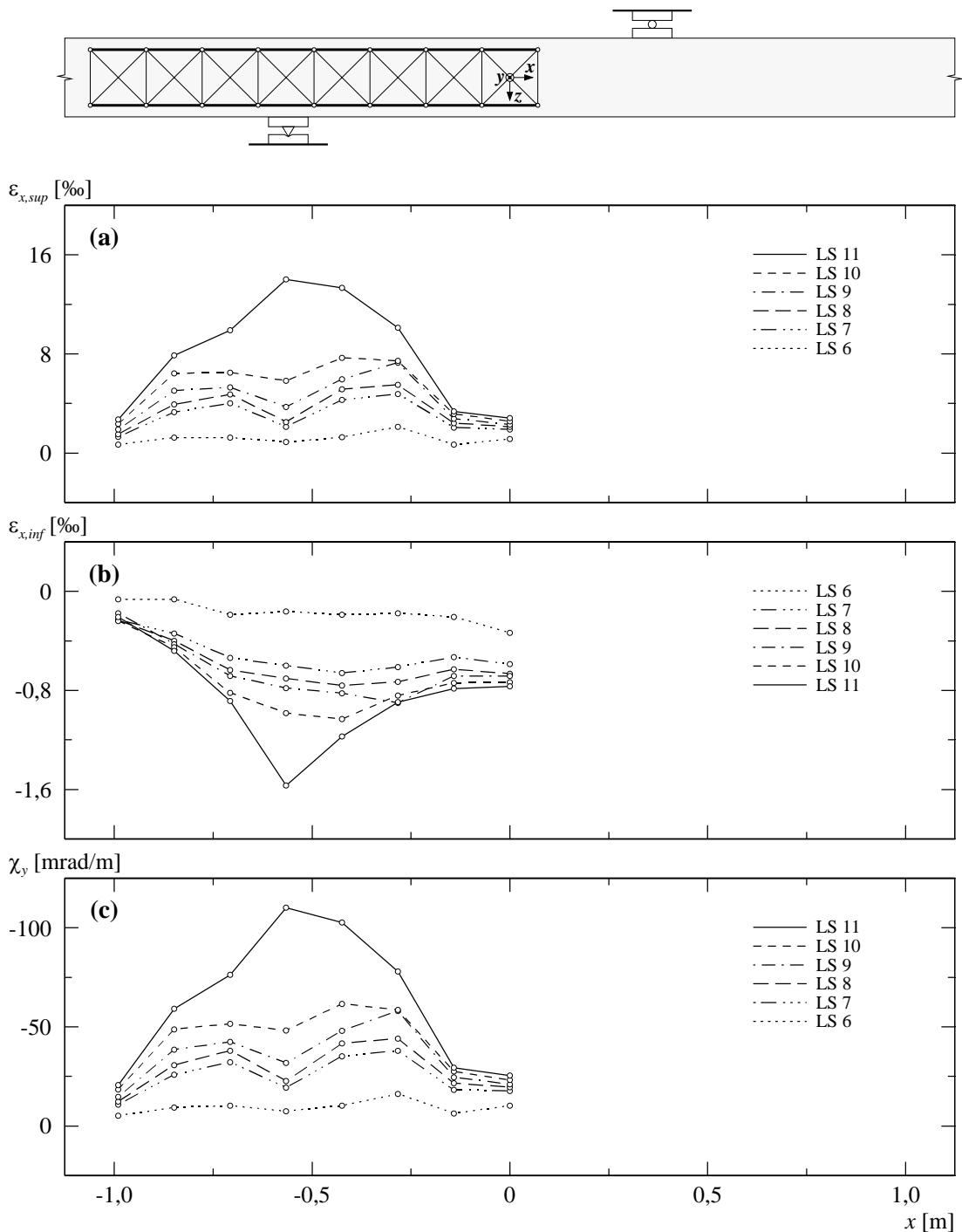


Bild 4.14: A1V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

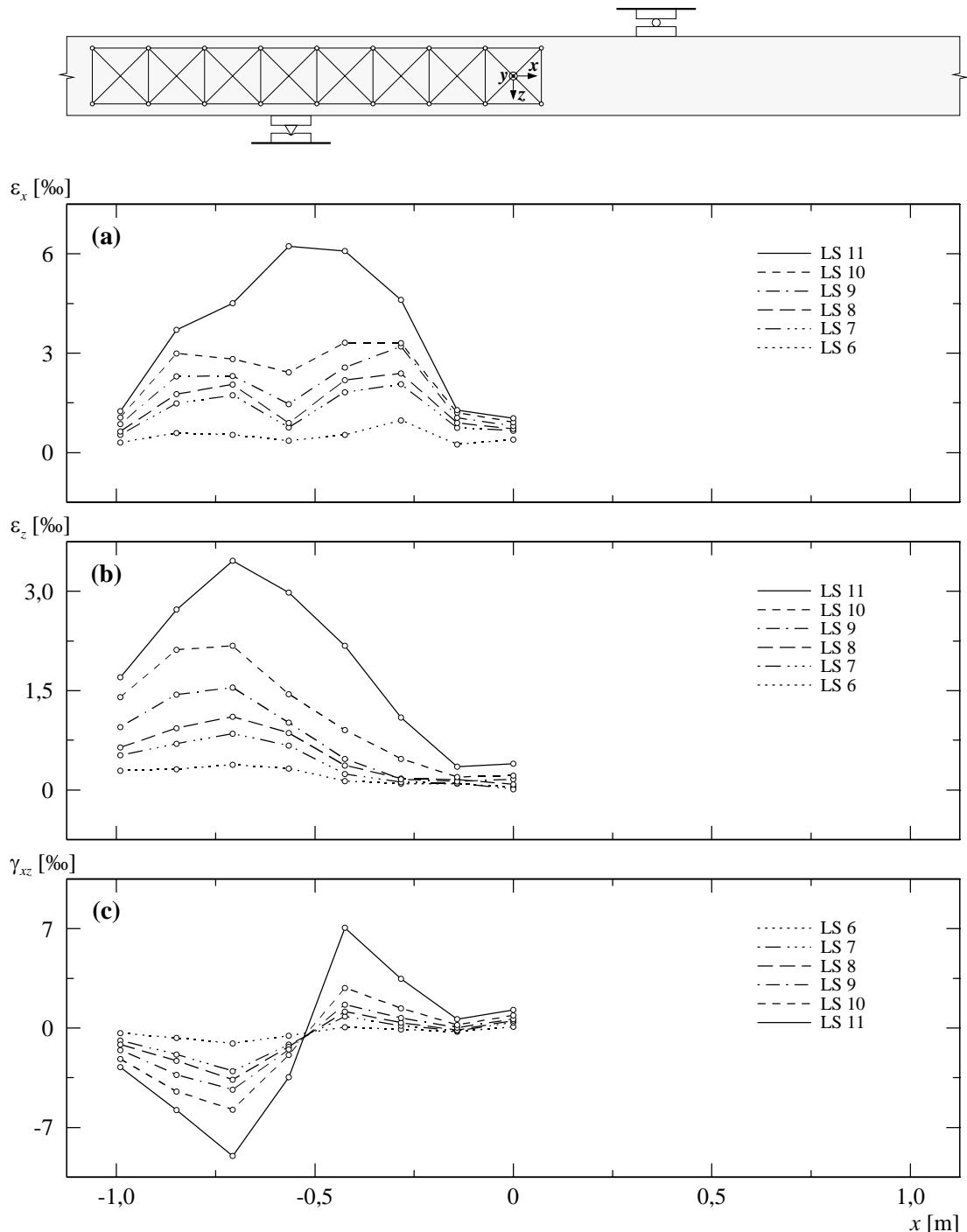
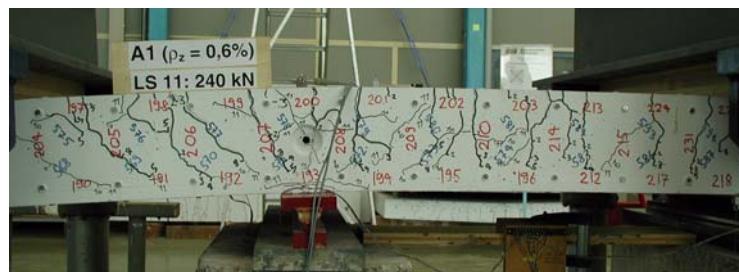


Bild 4.15: A1V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

(a)



(b)

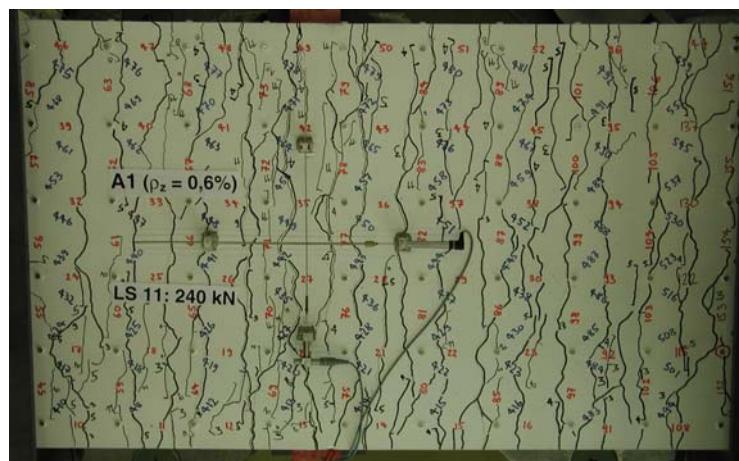
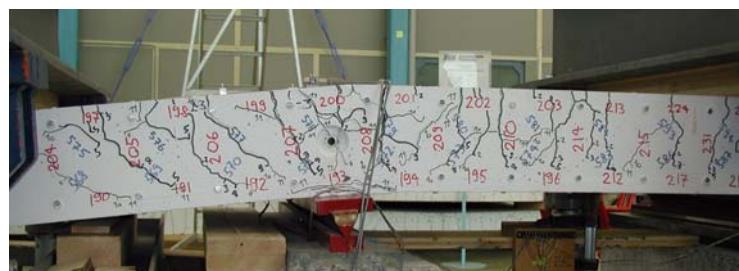


Bild 4.16: A1V2 – Rissbild bei Laststufe LS 11: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

(a)



(b)

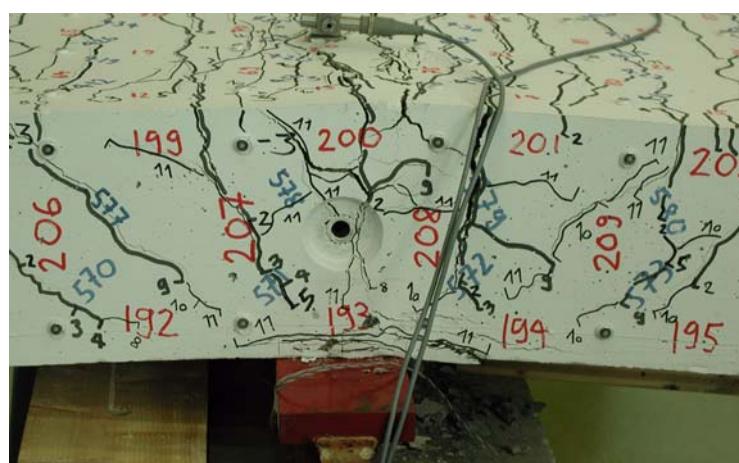


Bild 4.17: A1V2 – Rissbild nach Überschreiten der Höchstlast: (a) Vorderseite; (b) Auflagerbereich.

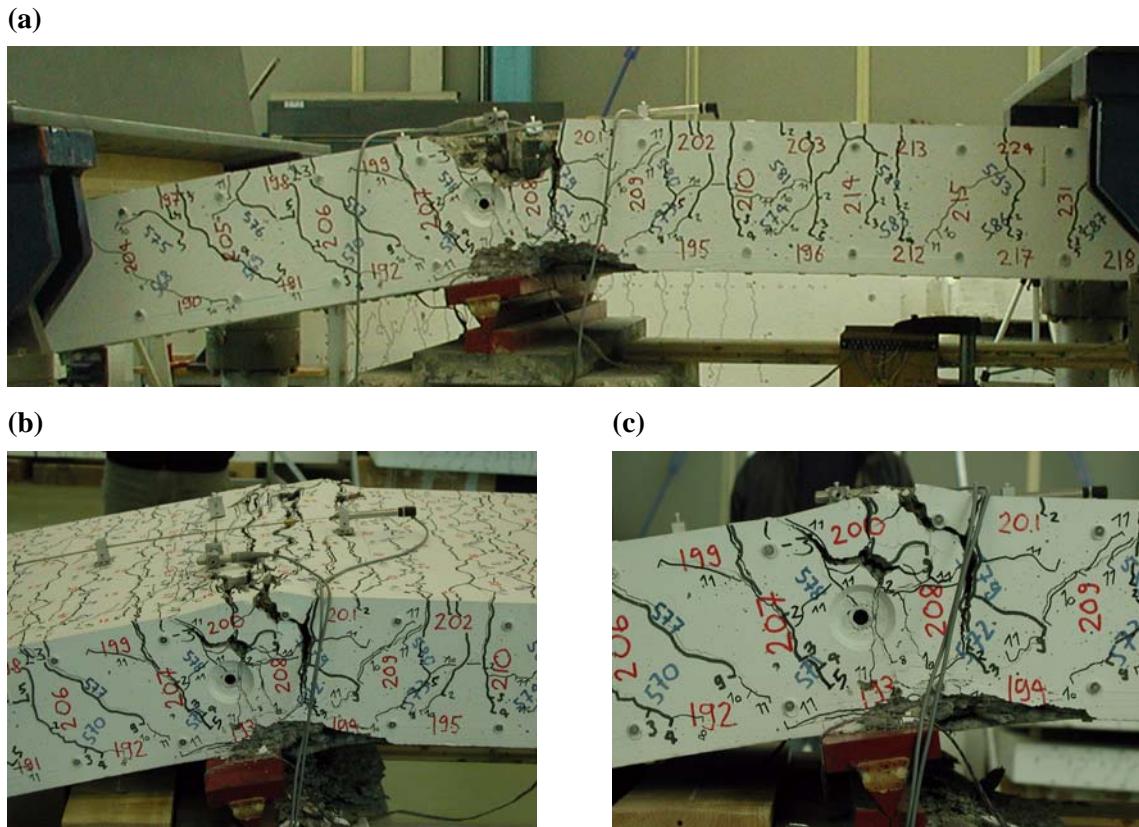


Bild 4.18: A1V2 – Rissbild nach Versuchsende: (a) Vorderseite; (b) Oberseite beim nördlichen Lager; (c) Bruchzone beim nördlichen Lager.

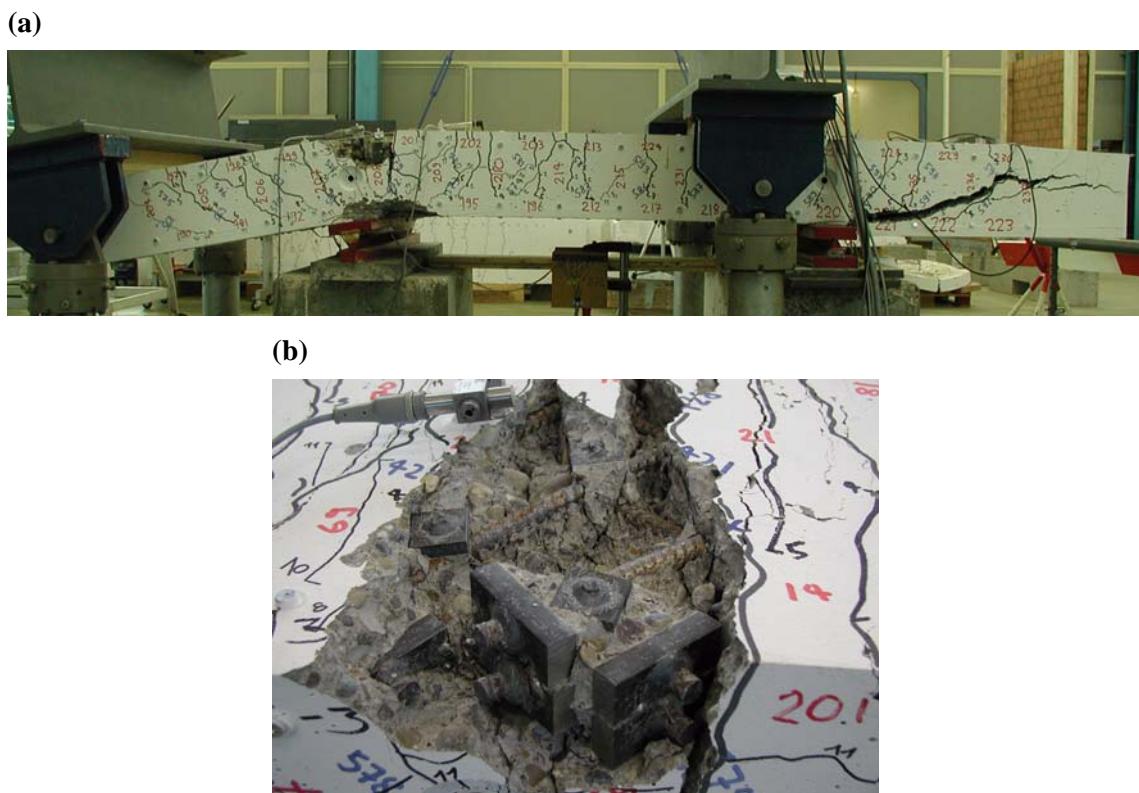


Bild 4.19: Versuchskörper A1 – (a) Rissbild auf der Vorderseite nach Versuchsende; (b) freigelegte Biegebewehrung beim nördlichen Lager.

4.3 Versuchskörper A2

Die Biegebewehrung des Versuchskörpers A2 war mit derjenigen des Versuchskörpers A1 identisch. Der fiktive geometrische Bewehrungsgehalt in x -Richtung betrug $\rho_x = 1,538 \%$, und für die Bewehrungsrichtung galt $\varphi_0 = 45^\circ$. In beiden Bewehrungsrichtungen (n - und t -Richtung) waren zwei Bewehrungslagen mit Stäben $\varnothing 12$ mm und einem Stababstand von 80 mm angeordnet. Im Gegensatz zum Versuchskörper A1 wiesen die beiden Kragarmbereiche Querkraftbewehrungsgehalte von $\rho_z = 0,156 \%$ (Kragarm K2) und $0,302 \%$ (Kragarm K1) auf.

4.3.1 Versuch A2V1

Am ersten Versuchstag wurden die beiden Nullmessungen und die Laststufe LS 2 durchgeführt. Die Laststufen LS 3 bis LS 6 folgten am zweiten, die Laststufen LS 7 und LS 8 am dritten Versuchstag. Über Nacht und über das Wochenende zwischen den Laststufen LS 6 und LS 7 blieb der Versuchskörper jeweils belastet.

Bei einer Kraft von $F_A = F_B \approx 60$ kN wurde die erste Laststufe LS 2 durchgeführt. Der gerissene Bereich erstreckte sich über die ganze Oberseite, und die Risse wiesen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 95 mm Breiten bis 0,05 mm auf. Auf der Vorder- und Hinterseite des Versuchskörpers hatten sich nur vertikale Risse gebildet. Im Mittelfeld und über den Auflagern reichten diese über die oberen zwei Drittel der Versuchskörperhöhe. Für die folgenden Laststufen wurde bis zum Erreichen der Höchstlast ein Belastungsintervall von $\Delta F_A = \Delta F_B \approx 30$ kN gewählt.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 4 ($F_A = F_B \approx 120$ kN) bildeten sich vorwiegend auf der Oberseite weitere Risse. Ausser zwei neuen Rissen bei den Kragarmenden endeten diese in den Bereichen der Biegebewehrungsverankerungen. Im Mittelfeld und über den Auflagern wurden Risse mit Breiten von 0,1 bis 0,15 mm gemessen, deren mittlerer Abstand ungefähr 50 mm betrug. Auf der Vorder- und Hinterseite pflanzten sich die bereits vorhandenen Risse fort. Im Kragarm verliefen diese im oberen Bereich vertikal, setzten sich dann aber im unteren Bereich

Laststufe (LS)	$F_A = F_B$ [kN]	V_{D1} [kNm]	$-M_D$ [kNm]	w_1 [mm]	w_3 [mm]	w_2 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	u_3 [mm]	u_4 [mm]	Bemerkungen
1	0	7,9	4,2	0	0	0	0	0	0	0	Nullmessung
2	60,7 48,5	68,6 56,4	43,1 35,3	5,8 5,8	-1,8 -1,8	6,1 6,2	0,63 0,65	-0,00 -0,01	0,66 0,68	0,00 0,00	Belastungsende Messende
3	90,3 84,0	98,2 92,0	62,0 58,0	10,1 10,3	-2,9 -2,9	10,5 10,7	1,15 1,16	-0,04 -0,05	1,18 1,20	-0,04 -0,05	Belastungsende Messende
4	120,6 112,5	128,5 120,5	81,4 76,3	14,6 14,7	-4,2 -4,2	15,1 15,3	1,56 1,57	-0,09 -0,10	1,70 1,72	-0,10 -0,11	Belastungsende Messende
5	150,9 140,6	158,8 148,5	100,8 94,2	19,2 19,4	-5,4 -5,4	19,9 20,2	2,08 2,11	-0,14 -0,16	2,29 2,30	-0,15 -0,16	Belastungsende Messende
6	180,1 168,9	188,0 176,8	119,5 112,3	24,7 24,9	-6,9 -7,0	25,9 26,2	2,72 2,75	-0,23 -0,25	2,91 2,92	-0,22 -0,24	Belastungsende Messende
7	210,5 196,4	218,5 204,3	139,0 129,9	32,3 32,5	-9,2 -9,3	34,5 34,9	3,52 3,53	-0,35 -0,37	3,87 3,93	-0,33 -0,34	Belastungsende Messende
HL	220,5	228,4	145,3	36,1	-10,6	40,3	3,87	-0,39	4,83	-0,39	Höchstlast
8	216,0 197,8	223,9 205,7	142,5 130,8	36,5 36,2	-10,9 -11,0	42,7 43,8	3,88 3,81	-0,39 -0,40	5,35 5,53	-0,41 -0,44	Belastungsende Messende
Entlastung	117,3 0	125,2 7,9	79,3 4,2	56,2 39,4	-33,0 -27,0	213,3 180,1	2,96 1,31	-0,35 -0,20	— —	— —	Entlastungsbeginn Versuchsende

Tabelle 4.6: A2V1 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 4.1).

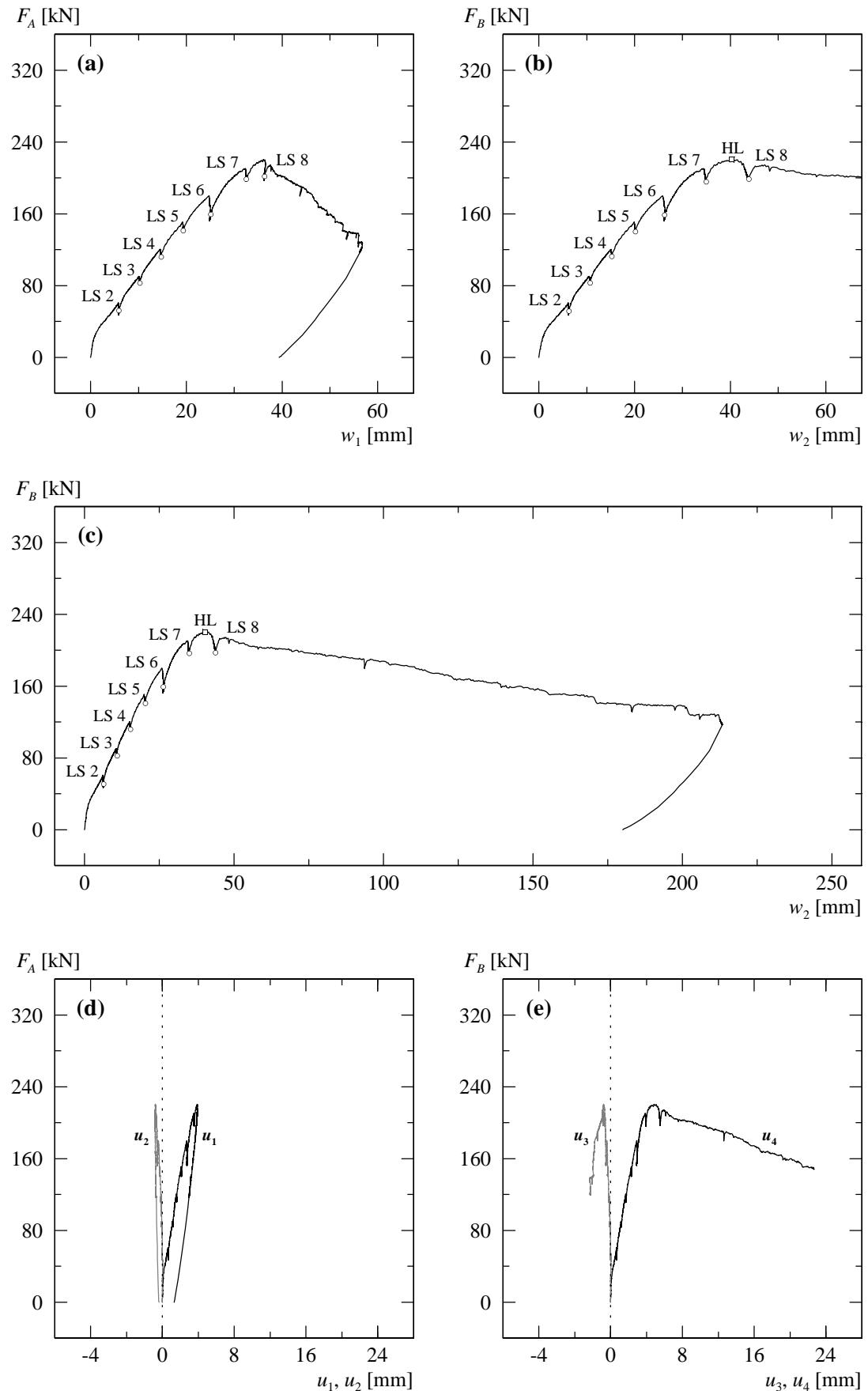


Bild 4.20: A2V1 – (a) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K1; (b) und (c) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K2; (d) Verformungen der Zugzone über Auflager NORD; (e) Verformungen der Zugzone über Auflager SÜD.

Laststufe	Oberseite					Vorderseite – Kragarm	
	Kragarm K1 w_{cr} [mm]	Lager NORD w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	Lager SÜD w_{cr} [mm]	Kragarm K2 w_{cr} [mm]	$z \approx -70$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 2	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,10	HR...0,05
LS 3	0,05...0,10	0,05...0,10	0,05...0,10	0,05...0,10	HR...0,10	0,05...0,20	HR...0,10
LS 4	0,05...0,10	0,10...0,15	0,10...0,15	0,10...0,15	0,05...0,10	0,10...0,40	HR...0,10
LS 5	0,05...0,10	0,05...0,20	0,05...0,20	0,05...0,20	0,05...0,20	0,10...0,50	0,05...0,10
LS 6	0,05...0,10	0,05...0,25	0,10...0,25	0,05...0,25	0,05...0,20	0,10...0,65	0,05...0,10
LS 7	0,05...0,10	0,20...0,40	0,20...0,45	0,20...0,45	0,05...0,20	0,20...1,10	0,05...0,10
LS 8	0,05...0,15	0,20...0,45	0,20...0,55	0,25...0,80	0,05...0,25	0,20...1,40	0,05...0,15

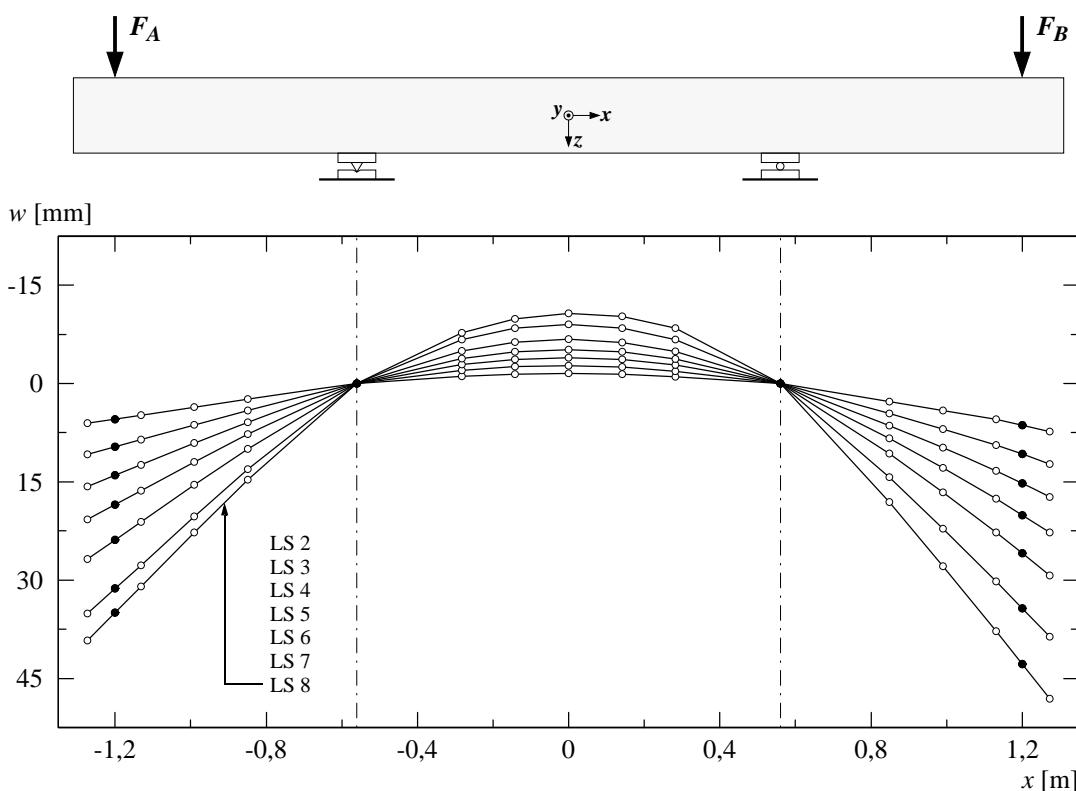
Tabelle 4.7: A2V1 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

mit einer leichten Neigung gegen die Auflager fort, während diejenigen im Mittelfeld ungefähr vertikal verliefen und sich über die oberen drei Viertel der Versuchskörperhöhe erstreckten.

Während der Belastung zwischen den Laststufen LS 4 und LS 5 ($F_A = F_B \approx 120 \div 150$ kN) bildete sich im Kragarm K2 ($\rho_z = 0,156\%$) auf der Unterseite ein Längsriss, der eine Länge von ca. 450 mm hatte und ungefähr parallel zur x -Richtung im mittleren Drittelbereich verlief. Unten an der Stirnseite des Versuchskörpers betrug die Rissbreite 0,1 mm.

In der Belastungsphase zwischen der Laststufe LS 6 und LS 7 ($F_A = F_B \approx 180 \div 210$ kN) konnte ein Knall wahrgenommen werden, der auf das Zerreissen eines Querkraftbewehrungsstabes zurückzuführen war.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 7 ($F_A = F_B \approx 210$ kN) bildeten sich sowohl auf der Oberseite als auch auf der Vorder- und Hinterseite neue Risse. Bei dieser Laststufe konnten auf der Mittelfeldseite die ersten Betonstauchungsrisse in der Biegedruckzone beim südlichen Lager (Stelle D) festgestellt werden. Neben der Bildung von je einem neuen Riss bei den Kragarmenden und vereinzelten Verlängerungen der Risse wurde auf der Oberseite eine

**Bild 4.21:** A2V1 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

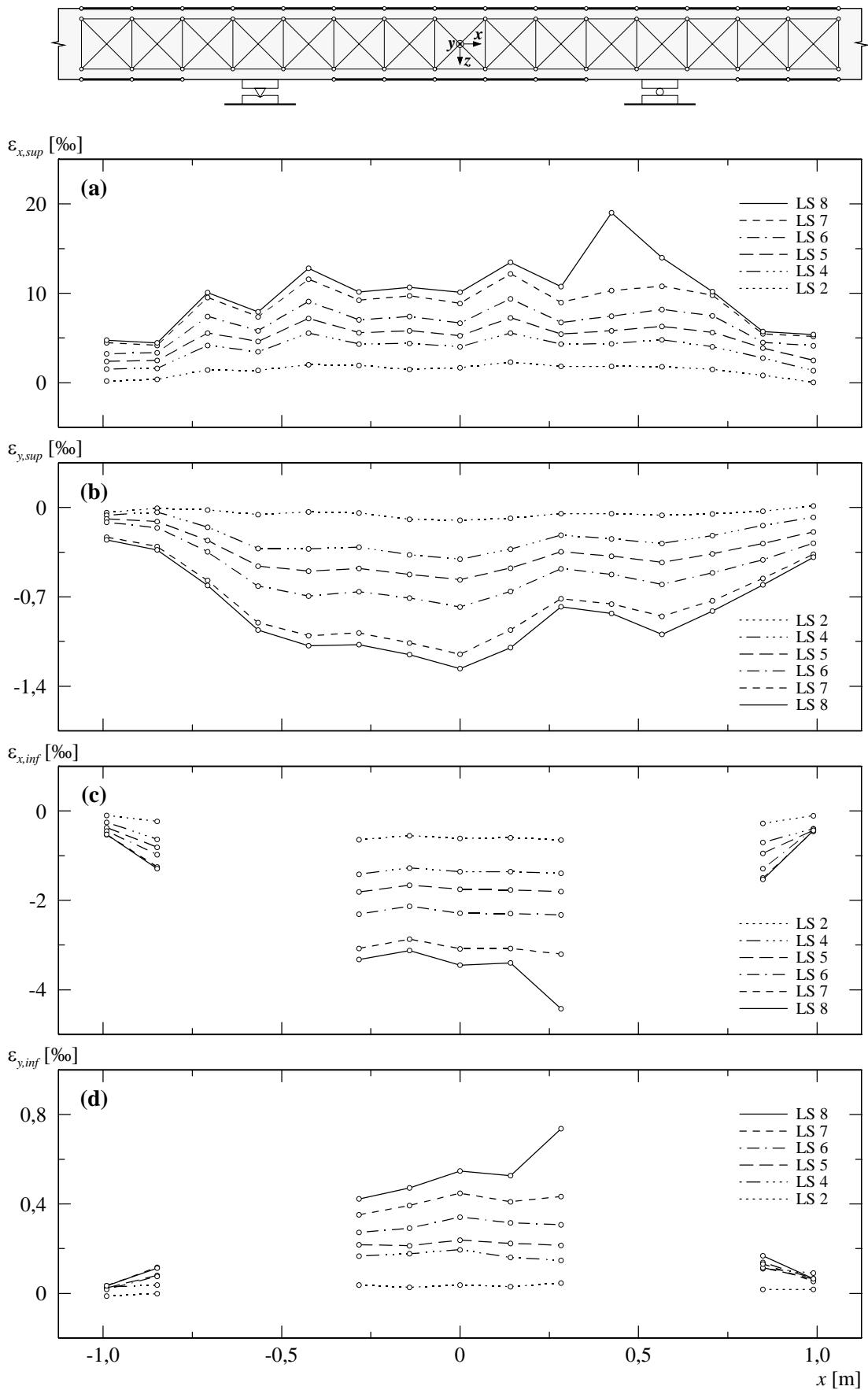


Bild 4.22: A2V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben; (c) mittlere Längsdehnungen unten; (d) mittlere Querdehnungen unten.

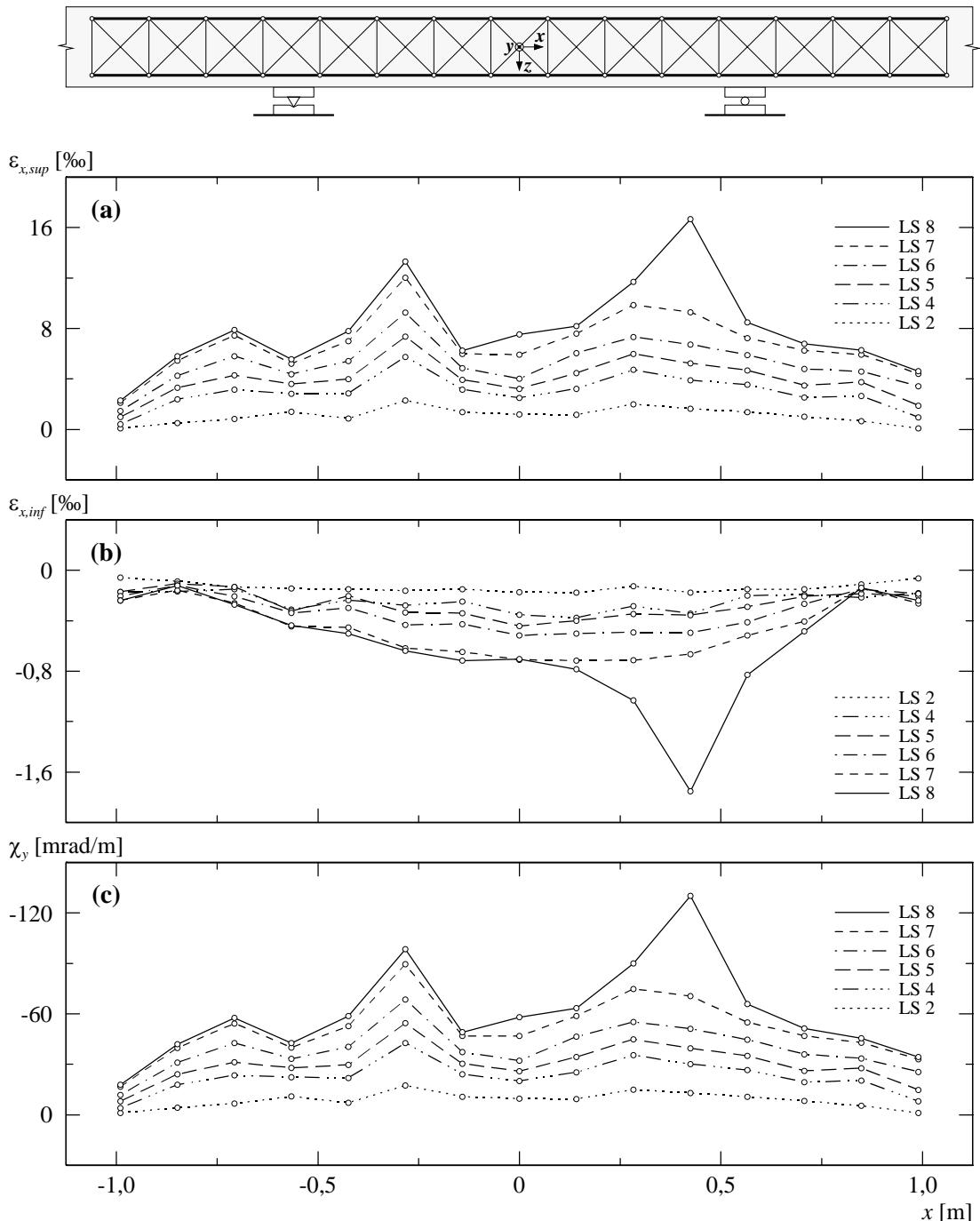


Bild 4.23: A2V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

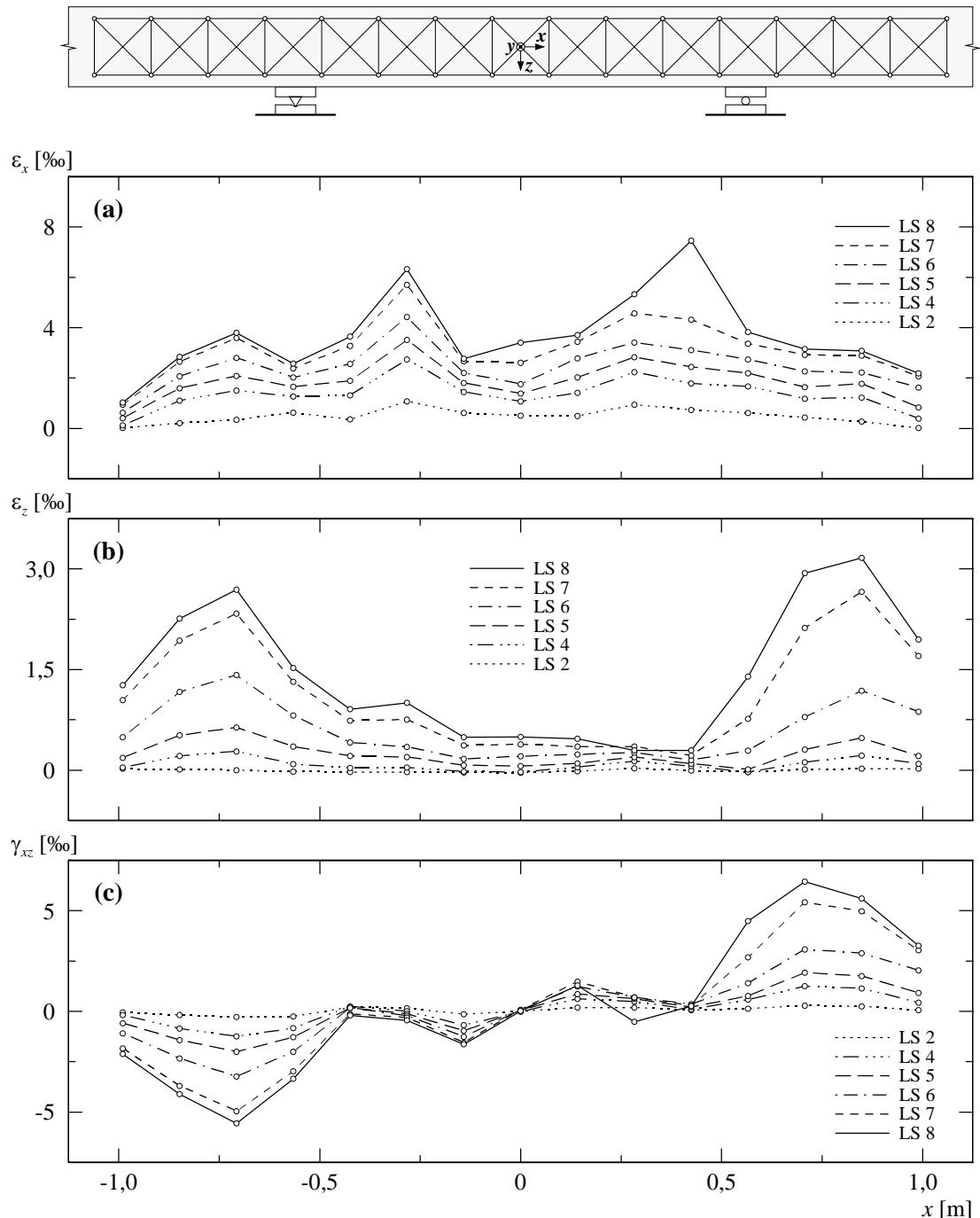


Bild 4.24: A2V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

Vergrösserung der Rissbreiten beobachtet. Die Rissbreiten betragen im Mittelfeld und über den Auflagern 0,2 bis 0,45 mm bei mittleren Rissabständen von ungefähr 50 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite erstreckten sich die Risse über die oberen 80 % der Versuchskörperhöhe. Im Bereich der Biegebewehrungsverankerungen bildeten sich horizontal verlaufende Risse. Die anfänglich ungefähr vertikal verlaufenden Risse im Kragarm setzten sich nun im unteren Bereich bedeutend flacher fort, während sich die Risse im Mittelfeld nur geringfügig verlängerten. Auf der Höhe der oberen Deformatormessreihe (≈ 30 mm unterhalb der Oberkante) wurden im Mittelfeld Rissbreiten von 0,2 bis maximal 1,1 mm gemessen. Unterhalb der Bereiche, in denen die Biegebewehrungsverankerungen lagen, konnte eine starke Abnahme der Rissbreiten festgestellt werden. Die Risse in den beiden Kragarmen wiesen Neigungen von 30 bis 45° gegenüber der x-Achse auf, und die Rissbreiten auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) betrugen 0,05 bis 0,1 mm. Der Längsriss auf der Unterseite im Kragarm K2 verlängerte sich auf eine Länge von ca. 500 mm und wies an der Stirnseite eine Rissbreite von 0,2 mm auf.

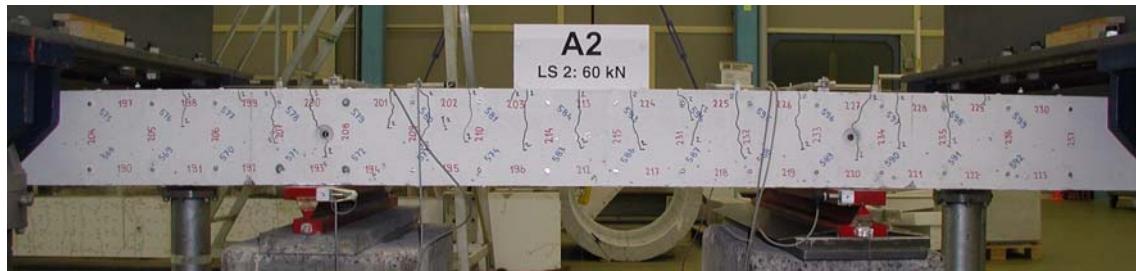
Im weiteren Versuchsfortschritt, zwischen der Laststufe LS 7 und LS 8, wurde bei einer Durchbiegung von $w_1 = 36,1$ mm beim Kragarm K1 und $w_2 = 40,3$ mm beim Kragarm K2 die Höchstlast erreicht. Die entsprechende Kraft betrug $F_A = F_B = 220,5$ kN. Unmittelbar vor Erreichen der Höchstlast konnte das Zerreissen von zwei Querkraftbewehrungstäben akustisch wahrgenommen werden.

Nach Erreichen der Höchstlast wurde bei einer Kraft von $F_A = F_B \approx 216$ kN sowie dazugehörigen Durchbiegungen von $w_1 \approx 36,5$ mm beim Kragarm K1 und $w_2 \approx 42,7$ mm beim Kragarm K2 die letzte Laststufe LS 8 des ersten Versuchs durchgeführt. Auf der Mittelfeldseite beim südlichen Lager bildeten sich neue Betonstauchungsrisse in der Biegedruckzone und an der Unterseite konnten erste Abplatzungen von Betonplättchen festgestellt werden. Neben den BetonstauchungsrisSEN hatten sich bis zur Laststufe LS 8 kaum neue Risse gebildet. Die bestehenden Risse hatten sich jedoch teilweise verlängert und zusätzlich verstärkt. Auf der Oberseite wurde beim südlichen Lager ein Riss mit einer Breite von 0,8 mm gemessen. Die übrigen Risse im Mittelfeld und über den Auflagern wiesen Breiten von 0,2 bis 0,55 mm auf. Auf der Vorder- und Hinterseite betragen die Rissbreiten im Mittelfeld und bei den Auflagern auf der Höhe der oberen Deformatormessreihe 0,2 bis maximal 1,4 mm. Unterhalb der Verankerungsbereiche der Biegebewehrung und auf halber Versuchskörperhöhe wiesen die Risse im Kragarm und Mittelfeld noch Breiten von 0,05 bis 0,15 mm auf. Die Rissbreite des Längsrisses auf der Unterseite im Kragarm K2 betrug an der Stirnseite 0,25 mm.

Anschliessend wurden die Durchbiegungen der Kragarme vergrössert. Bei einer Durchbiegung von $w_2 \approx 49$ mm wurden in dem zur y-Achse parallel verlaufenden Druckfeld auf der Oberseite (Biegezugzone) die ersten Betonstauchungsrisse beim südlichen Lager beobachtet. Unmittelbar danach versagte der Beton im Verankerungsbereich von je zwei Stabpaaren der Biegebewehrung auf der Vorder- und Hinterseite, wobei Teile des Überdeckungsbetons in y-Richtung stark gestaucht wurden. Die Bruchzone erstreckte sich in x-Richtung über eine Länge von ungefähr 200 bis 300 mm. Bei zunehmender Kragarmdurchbiegung w_2 führte die Zerstörung in diesem Bereich zu einem vertikalen Versatz der Ankerplatten und zu horizontalen Verschiebungen der Biegebewehrungstäbe entlang ihrer Stabachse. Gleichzeitig lösten sich auf der Mittelfeldseite beim südlichen Lager grössere Teile des Überdeckungsbetons an der Unterseite ab. Im weiteren Versuchsfortschritt konnte bei Kragarmdurchbiegungen von $w_2 \approx 150$ bis 200 mm das Zerreissen von drei weiteren Querkraftbewehrungstäben akustisch wahrgenommen werden. Bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_2 \approx 213$ mm wurde der Versuch abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt noch ungefähr 53 % der Höchstlast. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden.

Für die abschliessende Untersuchung des Versuchskörpers wurde auf der Oberseite der abgeplatzte Überdeckungsbeton der Biegezugzone entfernt. Die Bruchzone erstreckte sich auf einer Länge von 200 bis 300 mm beim südlichen Lager über die ganze Versuchskörperbreite. Im Verankerungsbereich von vier Stabpaaren der Biegebewehrung konnten grosse vertikale Relativverschiebungen der Ankerplatten festgestellt werden, und die Querkraftbewehrungstäbe waren

(a)

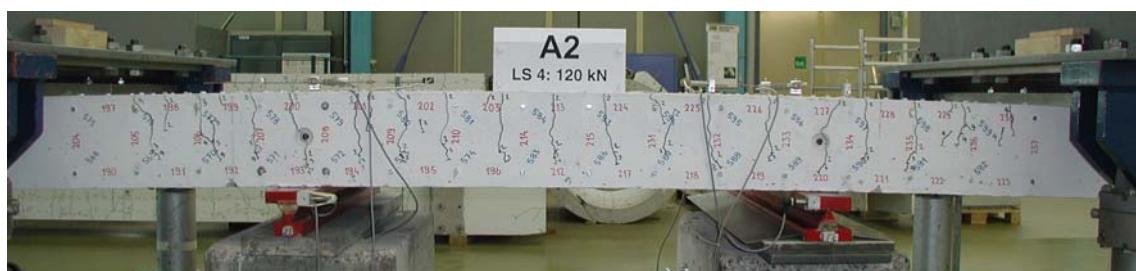


(b)



Bild 4.25: A2V1 – Rissbild bei Laststufe LS 2: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

(a)

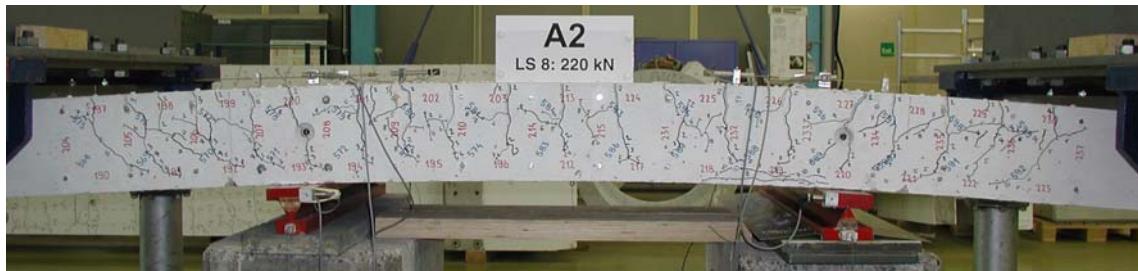


(b)



Bild 4.26: A2V1 – Rissbild bei Laststufe LS 4: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

(a)

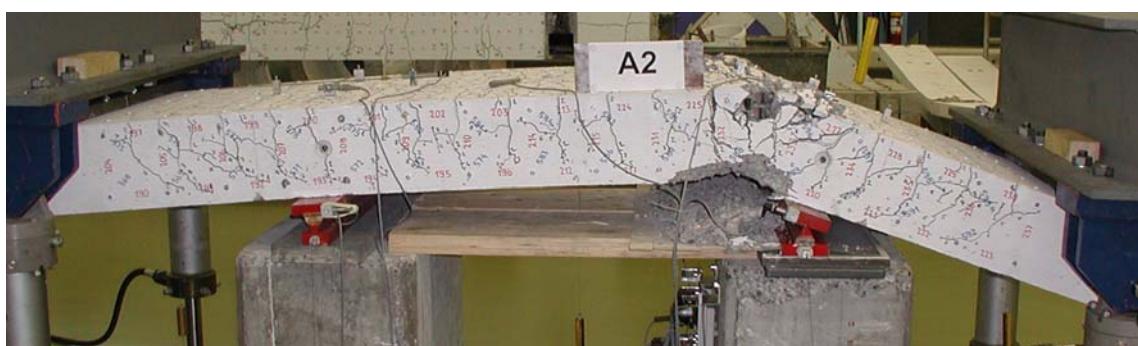


(b)



Bild 4.27: A2V1 – Rissbild bei Laststufe LS 8: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

(a)



(b)



(c)



Bild 4.28: A2V1 – Rissbild nach Versuchsende: (a) Vorderseite; (b) Oberseite beim südlichen Lager; (c) Bruchzone beim südlichen Lager.

unterhalb der Biegebewehrungslagen zerrissen. An der Unterseite war der Überdeckungsbeton der Biegedruckzone in einem Bereich von 200 bis 270 mm links vom südlichen Lager (im Mittelfeld) abgeplatzt. Die Oberfläche der abgeplatzten Bereiche zeigte neben dem Lager keine Spuren einer Zerstörung der Rissverzahnung oder eines gegenseitigen Abgleitens der Rissflächen.

4.3.2 Versuch A2V2

Der Versuch wurde innerhalb eines Tages durchgeführt. Vor der eigentlichen Durchführung des Versuchs erfolgte im unbelasteten Zustand die Deformettermessung der Laststufe LS 9. Diese diente zur Bestimmung der plastischen Verformungen nach dem ersten Versuch, welche beim zweiten Versuch als initiale Vorverformungen berücksichtigt wurden. Anschliessend erfolgte die Belastung des Versuchskörpers und die Durchführung der Laststufen LS 10 und LS 11.

Laststufe (LS)	F_A [kN]	F_B [kN]	F_C [kN]	$-V_{C1}$ [kN]	$-M_C$ [kNm]	w_1 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	Bemerkungen
9	0	-8,1	12,4	7,9	4,2	9,8	1,31	-0,20	Nullmessung
10	210,7 200,2	138,4 131,1	369,6 351,9	218,6 208,1	139,1 132,4	29,5 29,7	3,95 3,94	-0,36 -0,37	Belastungsende Messende
11	240,2 222,9	159,0 147,0	419,8 390,4	248,2 230,9	158,0 146,9	35,4 35,9	4,96 5,07	-0,42 -0,43	Belastungsende Messende
HL	245,1	162,4	428,1	253,1	161,1	41,8	6,66	-0,47	Höchstlast
Entlastung	133,3	84,6	238,5	141,2	89,6	227,9	—	—	Entlastungsbeginn

Tabelle 4.8: A2V2 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 4.2).

Bei einer Kraft von $F_A \approx 210$ kN wurde die Laststufe LS 10 durchgeführt. Gegenüber der Laststufe LS 8 beim ersten Versuch hatte sich das Rissbild nicht verändert. Auf der Oberseite wurden im Bereich des nördlichen Lagers (Stelle C) maximale Rissbreiten von 0,35 bis 0,4 mm gemessen. Die übrigen Risse wiesen Breiten von 0,1 bis 0,25 mm auf, und die mittleren Rissabstände betrugen ungefähr 50 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite betragen die Rissbreiten auf der Höhe der oberen Deformettermessreihe (≈ 30 mm unterhalb der Oberkante) 0,15 bis maximal 0,7 mm. Unterhalb der Verankerungsbereiche der Biegebewehrung und auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) wiesen die Risse noch Breiten von 0,05 bis 0,1 mm auf.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 11 ($F_A \approx 240$ kN) bildeten sich vorwiegend auf der Vorder- und Hinterseite neue Risse, während sich das Rissbild auf der Oberseite kaum veränderte. Bei dieser Laststufe konnten auf der Mittelfeldseite und über der Lagerplatte die ersten Betonstauchungsrisse in der Biedruckzone beim nördlichen Lager festgestellt werden. Auf der Oberseite vergrösserten sich die Rissbreiten im Bereich des nördlichen Lagers auf 0,55 bis maximal 0,7 mm, und die übrigen Risse wiesen Breiten von 0,1 bis 0,4 mm auf. Auf der Vorder- und Hinterseite erstreckten sich die Risse im Kragarm über die oberen 85 % und im Mittelfeld über die oberen 80 % der Versuchskörperhöhe. Im Bereich der Biegebewehrungsverankerungen bildeten sich horizontal verlaufende Risse mit Rissbreiten von 0,05 bis 0,1 mm. Die übrigen Risse wiesen auf der Höhe der oberen Deformettermessreihe Rissbreiten von 0,15 bis maximal 0,9 mm auf. Bei den anfänglich vertikal verlaufenden Rissen im Mittelfeld konnte im unteren Bereich eine Verästelung mit bedeutend flacheren Rissen beobachtet werden. Die schrägen Risse im Kragarm wiesen Neigungen von 25 bis 45° gegenüber der x-Achse auf, während im Mittelfeld keine Rissneigungen unter 45° gemessen wurden. Auf halber Versuchskörperhöhe betragen die Rissbreiten ungefähr 0,05 bis 0,15 mm.

Laststufe	Oberseite			Vorderseite – Kragarm	
	Kragarm K1 w_{cr} [mm]	Lager NORD w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	$z \approx -70$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 10	0,10...0,25	0,35...0,40	0,10...0,25	0,15...0,70	0,05...0,10
LS 11	0,10...0,40	0,55...0,70	0,10...0,35	0,15...0,90	0,05...0,15

Tabelle 4.9: A2V2 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen.

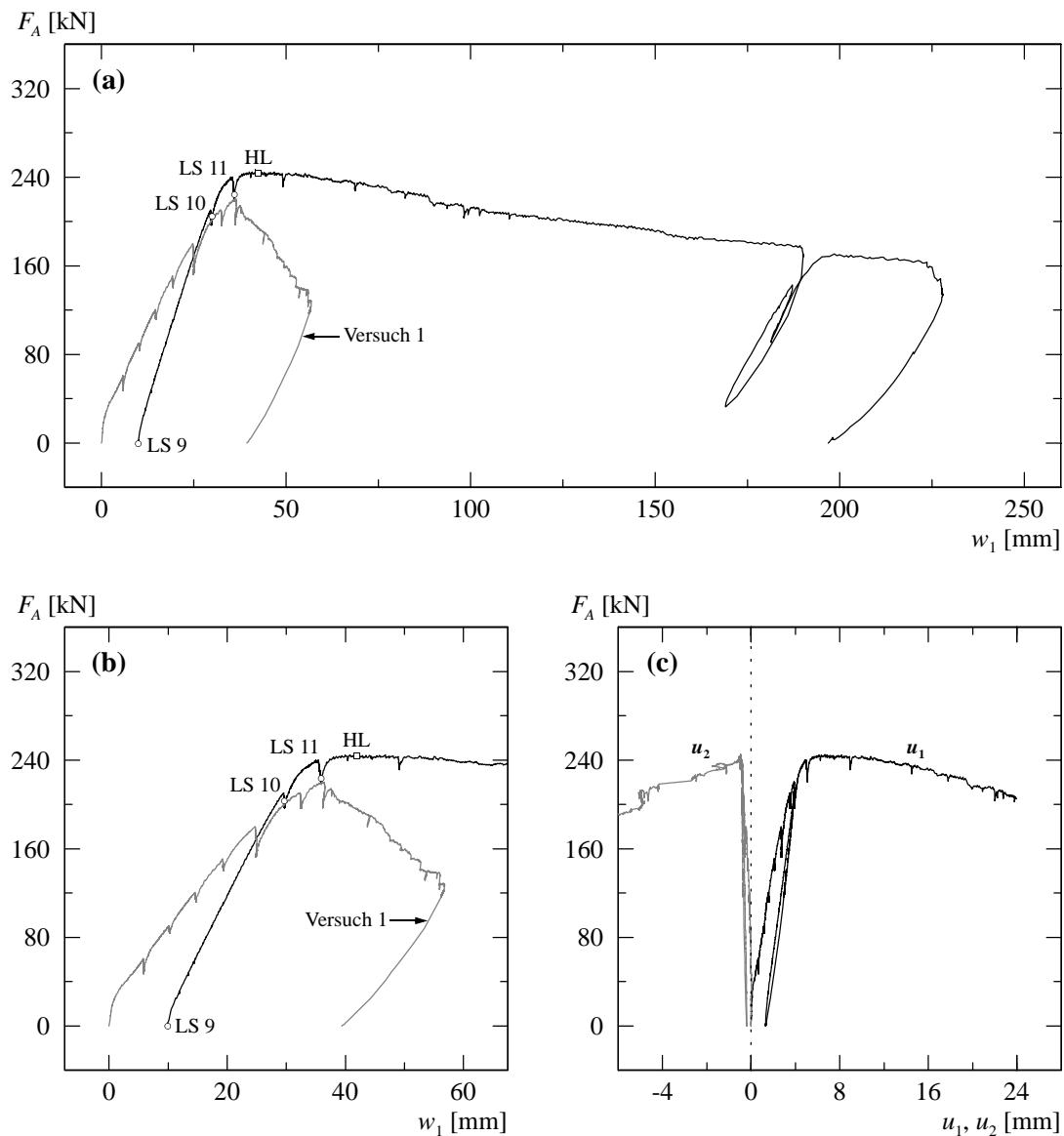


Bild 4.29: A2V2 – (a) und (b) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K1; (c) Verformungen der Zugzone über Auflager NORD.

Im weiteren Versuchfortschritt wurde bei einer Durchbiegung von $w_1 = 41,8$ mm beim Kragarm K1 die Höchstlast erreicht. Die entsprechende Kraft betrug $F_A = 245,1$ kN. Anschliessend wurde die Durchbiegung des Kragarms K1 vergrössert. Bei einer Durchbiegung von $w_1 \approx 52$ mm wurden in dem zur y -Achse parallel verlaufenden Druckfeld auf der Oberseite (Biegezugzone) die ersten Betonstauchungsrisse beim nördlichen Lager beobachtet. Gleichzeitig lösten sich an der Unterseite beim nördlichen Lager erste Betonplättchen auf der Mittelfeldseite ab, während sich auf der hinteren Kragarmseite lokale Betonstauchungsrisse bildeten.

Mit zunehmender Kragarmdurchbiegung w_1 versagte beim nördlichen Lager allmählich der Beton im Verankerungsbereich von zwei Stabpaaren der Biegebewehrung auf der Vorderseite sowie von drei Stabpaaren auf der Hinterseite, und Teile des Überdeckungsbetons auf der Oberseite wurden in y -Richtung stark gestaucht. Die Bruchzone erstreckte sich in x -Richtung über eine Länge von ungefähr 200 bis 400 mm. Diese Zerstörung des Druckfeldes führte zu einem vertikalen Versatz der Ankerplatten und zu horizontalen Verschiebungen der Biegebewehrungsstäbe entlang ihrer Stabachse. Gleichzeitig platzten auf der Mittelfeldseite beim nördlichen Lager grössere Teile des Überdeckungsbetons an der Unterseite ab. Im weiteren Versuchfortschritt konnte bei Kragarmdurchbiegungen von $w_1 \approx 85$ bis 225 mm das Zerreissen von vier Bewehrungsstäben

akustisch wahrgenommen werden. Bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 228$ mm wurde der Versuch abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt noch ungefähr 54 % der Höchstlast. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden.

Für die abschliessende Untersuchung des Versuchskörpers wurde auf der Oberseite der abgeplatzte Überdeckungsbeton der Biegezugzone entfernt. Die Bruchzone erstreckte sich auf einer Länge von 200 bis 400 mm beim nördlichen Lager über die gesamte Versuchskörperbreite. Im Verankerungsbereich von einem Stabpaar der Biegebewehrung auf der Vorderseite sowie von zwei Stabpaaren auf der Hinterseite konnten grosse vertikale Relativverschiebungen der Ankerplatten festgestellt werden, und die Querkraftbewehrungsstäbe waren unterhalb der Biegebewehrungslagen zerrissen. In der obersten Bewehrungslage wurde außerdem ein zerrissener Biegebewehrungsstab Ø 12 mm über dem nördlichen Lager lokalisiert. Bei den beiden Knallen, die bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 225$ mm wahrgenommen wurden, handelte es sich vermutlich um die Brüche je eines Querkraft- und Biegebewehrungsstabes. An der Unterseite war der Überdeckungsbeton der Biegendruckzone in einem Bereich von 120 bis 170 mm rechts vom nördlichen Lager (im Mittelfeld) abgeplatzt. Die Oberfläche der abgeplatzten Bereiche zeigte neben dem Lager keine Spuren einer Zerstörung der Rissverzahnung oder eines gegenseitigen Abgleitens der Rissflächen.

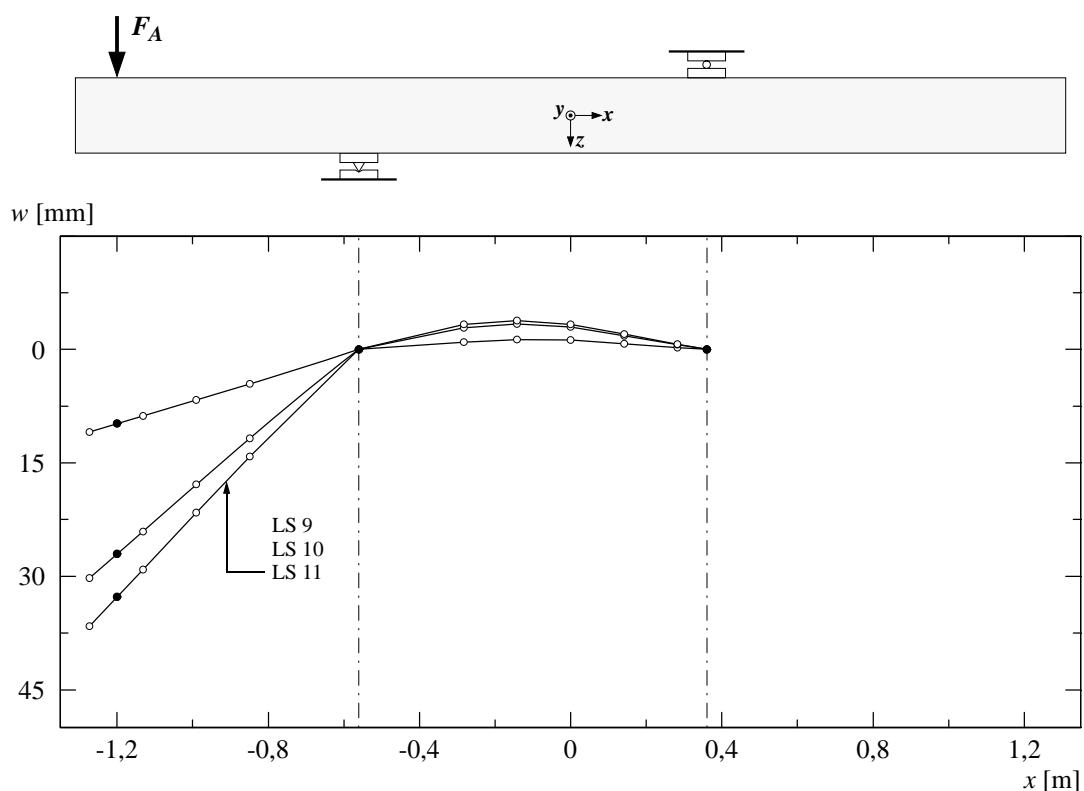


Bild 4.30: A2V2 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

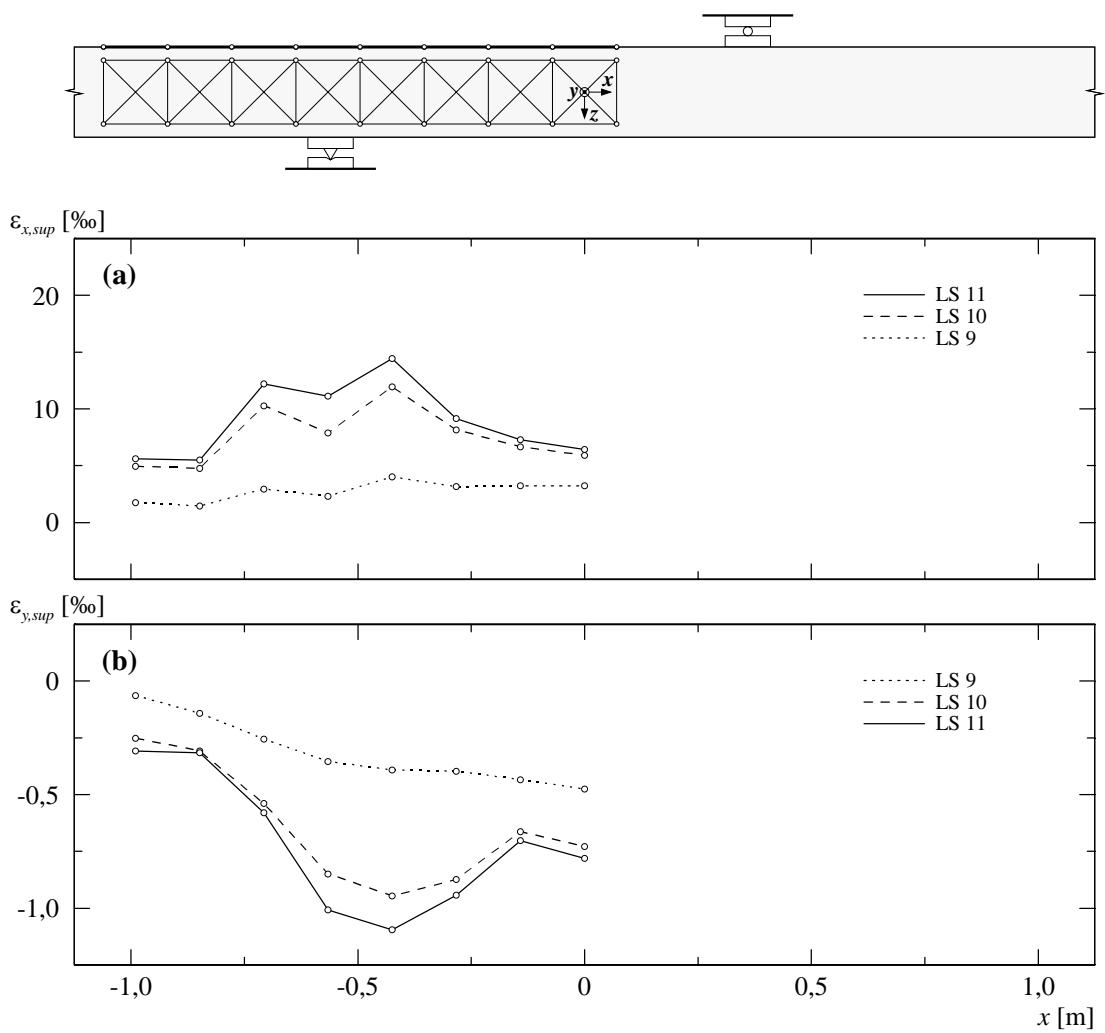


Bild 4.31: A2V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben.

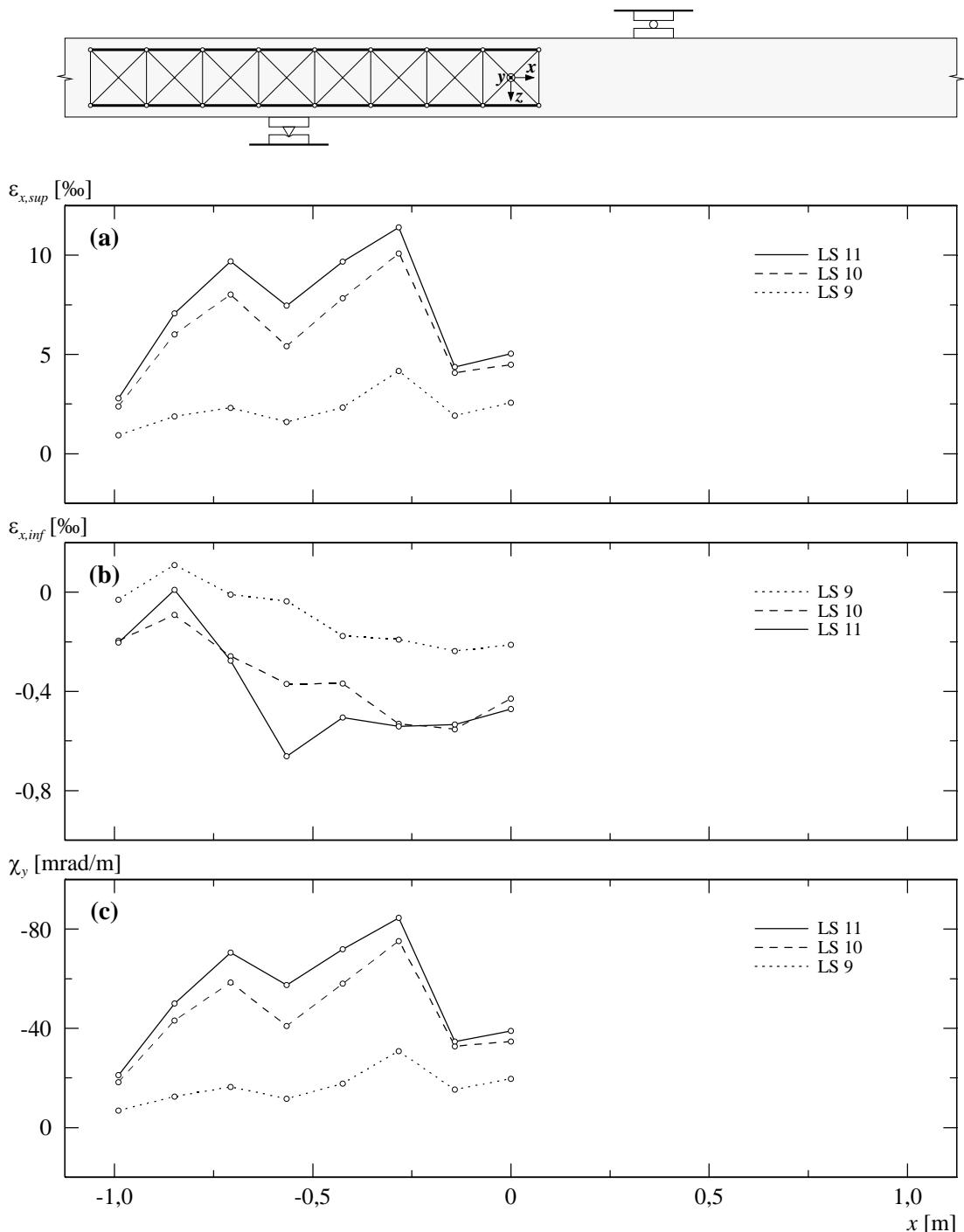


Bild 4.32: A2V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

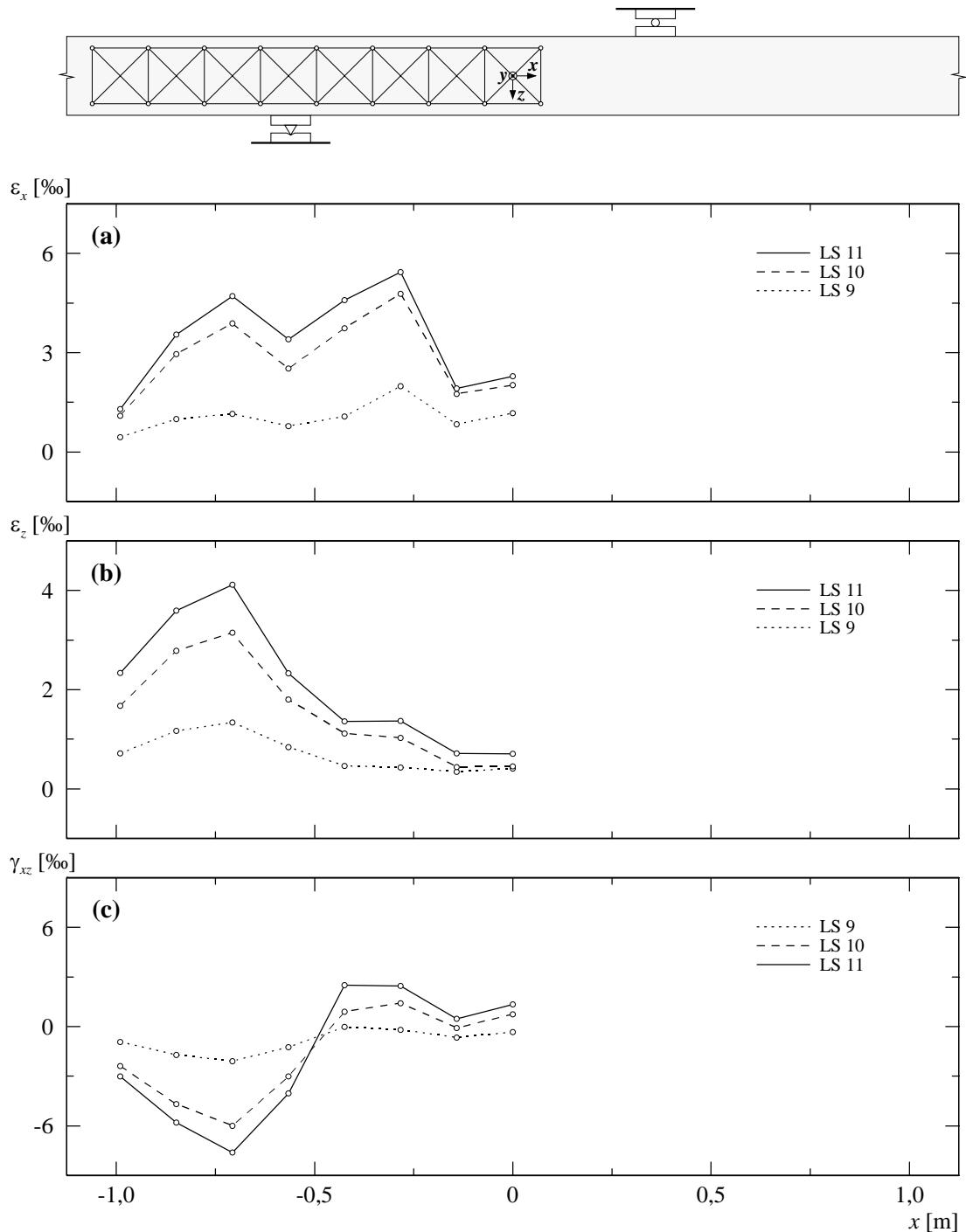
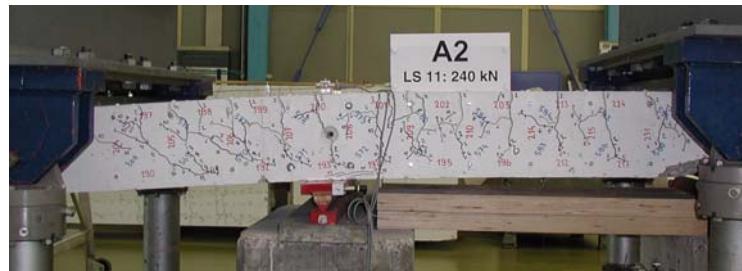


Bild 4.33: A2V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

(a)

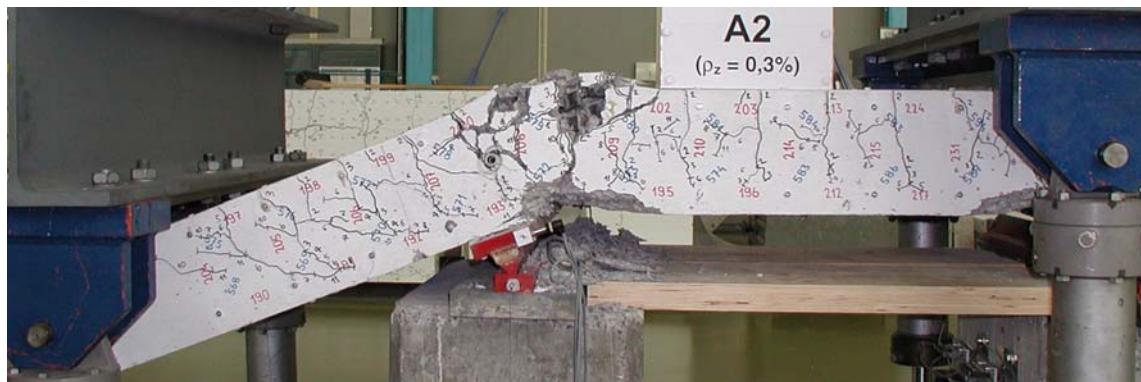


(b)

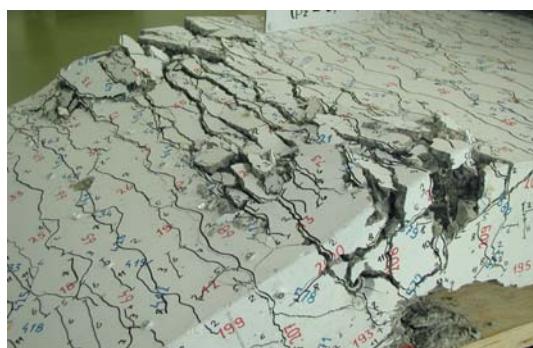


Bild 4.34: A2V2 – Rissbild bei Laststufe LS 11: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

(a)



(b)



(c)

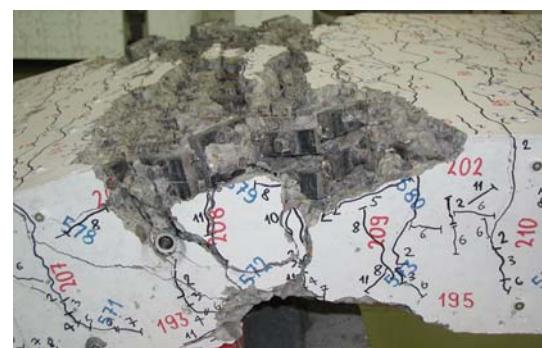


Bild 4.35: A2V2 – Rissbild nach Versuchsende: (a) Vorderseite; (b) Oberseite beim nördlichen Lager; (c) freigelegte Biegebewehrung beim nördlichen Lager.

4.4 Versuchskörper A3

Der Versuchskörper A3 war als Vergleichsversuch zu den Versuchskörpern A1 und A2 konzipiert. Dieser Versuch sollte den Einfluss der Biegebewehrungsrichtungen auf das Trag- und Verformungsverhalten aufzeigen. Der geometrische Bewehrungsgehalt in x -Richtung betrug $\rho_x = 1,745 \%$, und für die Bewehrungsrichtung galt $\varphi_0 = 0^\circ$. In der Hauptbewehrungsrichtung (x -Richtung) waren zwei Bewehrungslagen, in der Querrichtung (y -Richtung) eine Bewehrungslage mit Stäben $\varnothing 12$ mm und einem Stababstand von 80 mm angeordnet. Die beiden Kragarmbereiche wiesen Querkraftbewehrungsgehalte von $\rho_z = 0 \%$ (Kragarm K2) und 0,309 % (Kragarm K1) auf.

4.4.1 Versuch A3V1

Am ersten Versuchstag wurden die beiden Nullmessungen und die Laststufe LS 2 durchgeführt. Die Laststufen LS 3 bis LS 5 folgten am zweiten, die Laststufen LS 6 und LS 7 am dritten Versuchstag. Über Nacht und über das Wochenende zwischen den Laststufen LS 5 und LS 6 blieb der Versuchskörper jeweils belastet.

Bei einer Kraft von $F_A = F_B \approx 60$ kN wurde die erste Laststufe LS 2 durchgeführt. Der gerissene Bereich erstreckte sich über das Mittelfeld und die erste Hälfte der Kragarme. Die Risse auf der Oberseite wiesen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 75 bis 100 mm Breiten von 0,05 mm auf. Auf der Vorder- und Hinterseite des Versuchskörpers hatten sich ungefähr vertikal verlaufende Risse gebildet. Im Mittelfeld und über den Auflagern reichten diese über die oberen 40 % der Versuchskörperhöhe. Für die folgenden Laststufen wurde bis zum Erreichen der Bruchlast ein Belastungsintervall von $\Delta F_A = \Delta F_B \approx 30$ kN gewählt.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 4 ($F_A = F_B \approx 120$ kN) bildeten sich vorwiegend in den äusseren Bereichen der Kragarme weitere Risse. Die Rissbreiten der vorhandenen Risse vergrösserten sich kaum, wobei maximale Rissbreiten von 0,05 mm gemessen wurden. Auf der Vorder- und Hinterseite verlängerten sich die bereits vorhandenen Risse. Im Kragarm verließen diese im oberen Bereich vertikal, setzten sich aber im mittleren Bereich mit einer leichten

Laststufe (LS)	$F_A = F_B$ [kN]	V_{D1} [kNm]	$-M_D$ [kNm]	w_1 [mm]	w_3 [mm]	w_2 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	u_3 [mm]	u_4 [mm]	Bemerkungen
1	0	7,8	4,2	0	0	0	0	0	0	0	Nullmessung
2	61,1 55,8	68,9 63,6	43,3 39,9	2,6 2,7	-0,8 -0,8	3,0 3,1	0,24 0,25	0,02 0,03	0,25 0,26	-0,01 -0,01	Belastungsende Messende
3	91,5 85,3	99,2 93,1	62,7 58,8	4,3 4,4	-1,1 -1,1	4,8 4,9	0,41 0,42	0,05 0,05	0,42 0,43	-0,01 -0,01	Belastungsende Messende
4	121,7 114,6	129,5 122,4	82,1 77,6	5,9 6,0	-1,5 -1,5	6,5 6,6	0,58 0,59	0,07 0,08	0,59 0,59	-0,02 -0,02	Belastungsende Messende
5	151,0 144,8	158,8 152,6	100,9 96,9	7,6 7,7	-1,9 -1,9	8,2 8,4	0,75 0,76	0,11 0,11	0,75 0,75	-0,02 -0,03	Belastungsende Messende
6	181,5 176,2	189,3 184,0	120,3 117,0	9,5 9,6	-2,3 -2,3	10,2 10,4	0,93 0,94	0,13 0,15	0,92 0,93	-0,03 -0,04	Belastungsende Messende
7	211,4 203,6	219,2 211,4	139,5 134,5	11,1 11,2	-2,7 -2,8	11,9 12,1	1,10 1,12	0,18 0,19	1,08 1,10	-0,04 -0,04	Belastungsende Messende
Bruch K2	257,8	265,6	169,2	14,5	-3,6	15,4	1,45	0,26	1,42	-0,05	Schubbruch
Entlastung	152,0 0	159,7 7,8	101,4 4,2	10,2 3,4	-2,5 -0,7	23,3 11,4	1,03 0,33	0,21 0,12	0,96 0,32	-0,04 0,00	Entlastungsbeginn Versuchsende

Tabelle 4.10: A3V1 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 4.1).

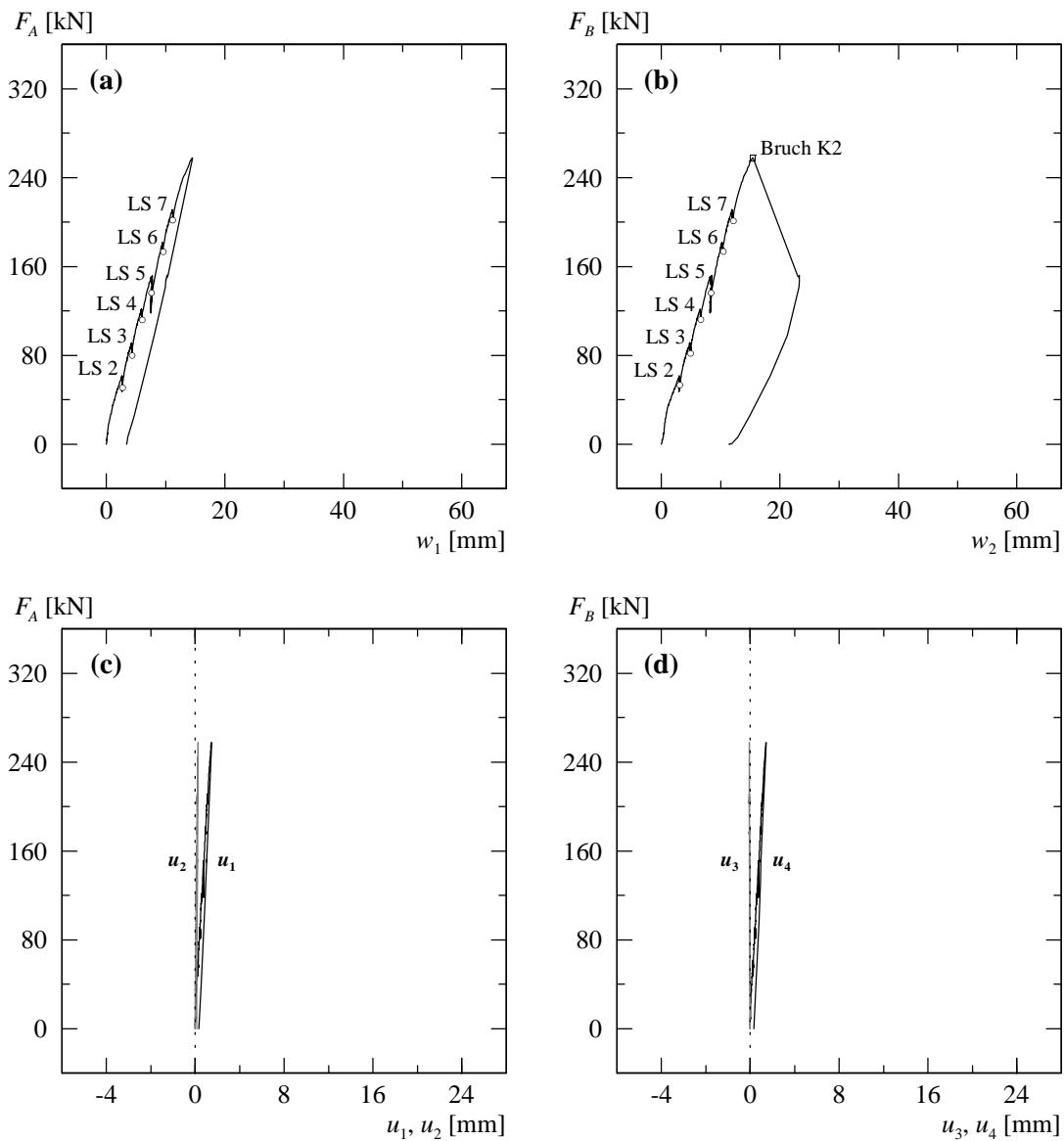


Bild 4.36: A3V1 – (a) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K1; (b) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K2; (c) Verformungen der Zugzone über Auflager NORD; (d) Verformungen der Zugzone über Auflager SÜD.

Neigung gegen die Auflager fort, während diejenigen im Mittelfeld ungefähr vertikal verliefen und sich über die oberen 50 bis 60 % der Versuchskörperhöhe erstreckten.

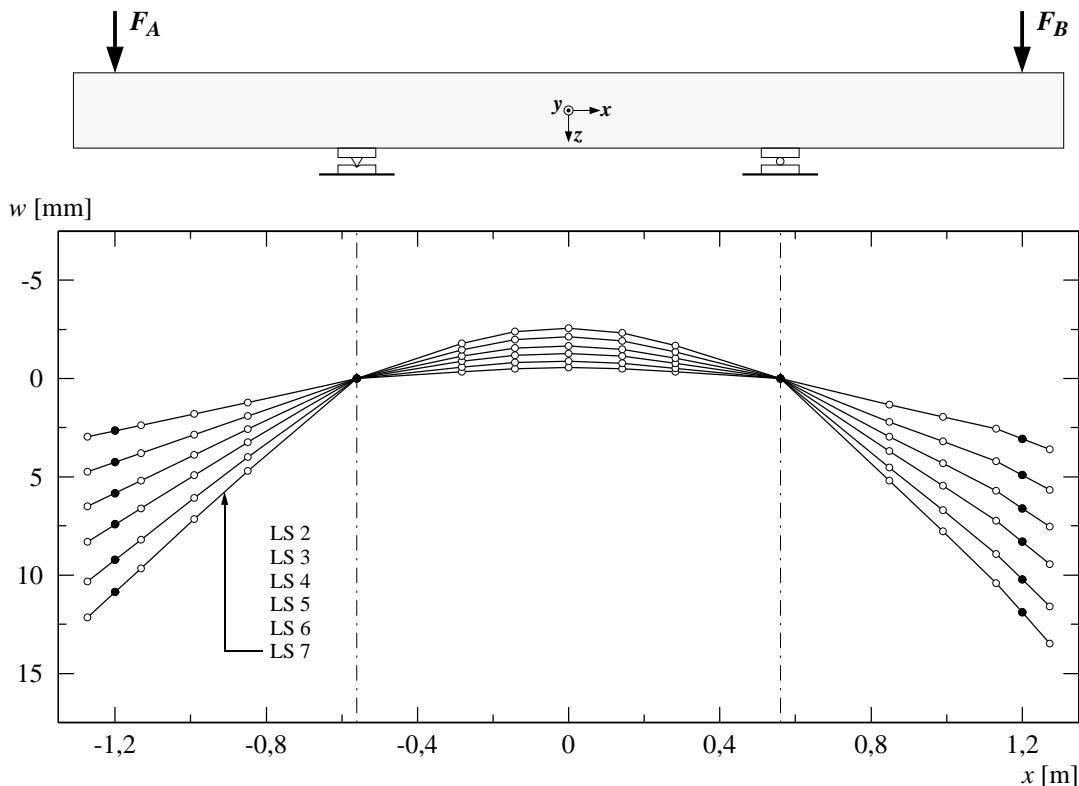
Die letzte Laststufe LS 7 des ersten Versuchs wurde bei einer Kraft von $F_A = F_B \approx 210$ kN durchgeführt. Gegenüber der Laststufe LS 4 hatte sich das Rissbild kaum verändert. Neben der Bildung von je einem neuen Riss bei den Kragarmenden und eines in x -Richtung verlaufenden Verbundrisses über dem nördlichen Lager (Stelle C) wurde auf der Oberseite eine Vergrößerung der Rissbreiten beobachtet. Die Rissbreiten betrugen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 75 bis 100 mm im Mittelfeld und über den Auflagern 0,05 bis 0,15 mm, in den Kragarmen 0,05 bis 0,1 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite wurde die Verlängerung der bereits vorhandenen Risse und die Fortpflanzung der beiden neuen Risse bei den Kragarmenden beobachtet. Dabei erstreckten sich die Risse über die oberen 60 bis 70 % der Versuchskörperhöhe. Die schräg verlaufenden Risse im Kragarm K2 ($\rho_z = 0\%$) setzten sich nun im unteren Bereich flacher fort, während sich die Risse im Kragarm K1 bei gleichbleibender Rissneigung verlängerten. Die Neigung der Risse betrug im unteren Bereich des Kragarms K2 ungefähr 45 bis 55° gegenüber der x -Achse. Im Mit-

Laststufe	Oberseite					Vorderseite – Kragarm	
	Kragarm K1 w_{cr} [mm]	Lager NORD w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	Lager SÜD w_{cr} [mm]	Kragarm K2 w_{cr} [mm]	$z \approx -70$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 2	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	–
LS 3	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	–
LS 4	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR
LS 5	HR...0,05	0,05...0,10	0,05...0,10	0,05...0,10	HR...0,05	HR...0,10	HR...0,05
LS 6	HR...0,05	0,05...0,10	0,05...0,10	0,05...0,10	HR...0,05	HR...0,10	HR...0,05
LS 7	0,05...0,10	0,10...0,15	0,05...0,10	0,10...0,15	0,05...0,10	0,05...0,15	HR...0,05

Tabelle 4.11: A3V1 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

telfeld konnte nur eine geringfügige Verlängerung der ungefähr vertikal verlaufenden Risse beobachtet werden. Im Kragarm K2 wurden auf der Höhe der oberen Deformettermessreihe (≈ 30 mm unterhalb der Oberkante) Rissbreiten von 0,05 bis 0,15 mm und auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) solche von ungefähr 0,05 mm gemessen.

Im weiteren Versuchsfortschritt erfolgte bei einer Kraft von $F_A = F_B = 257,8$ kN ein spröder Schubbruch des Kragarms K2. Die dazugehörigen Durchbiegungen betragen $w_1 = 14,5$ mm beim Kragarm K1 und $w_2 = 15,4$ mm beim Kragarm K2. Bis zum Erreichen der Bruchlast waren keine Anzeichen feststellbar, die auf ein baldiges Versagen hinwiesen. Erst in der letzten Phase vor dem Bruch konnte ein Knistern wahrgenommen und die Bildung der Bruchfläche beobachtet werden. Der eigentliche Bruchprozess erfolgte schlagartig, wobei der untere Betonkeil vollständig abgetrennt wurde. Die leicht s-förmig gekrümmte Bruchfläche und der sich bis zur Krafteinleitung erstreckende Trennriss entlang der Biegebewehrung entstanden unmittelbar beim Bruch. Die Steifigkeit der Versuchsanlage genügte nicht, um ein schlagartiges Abtrennen des unteren Betonkeils zu verhindern.

**Bild 4.37:** A3V1 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

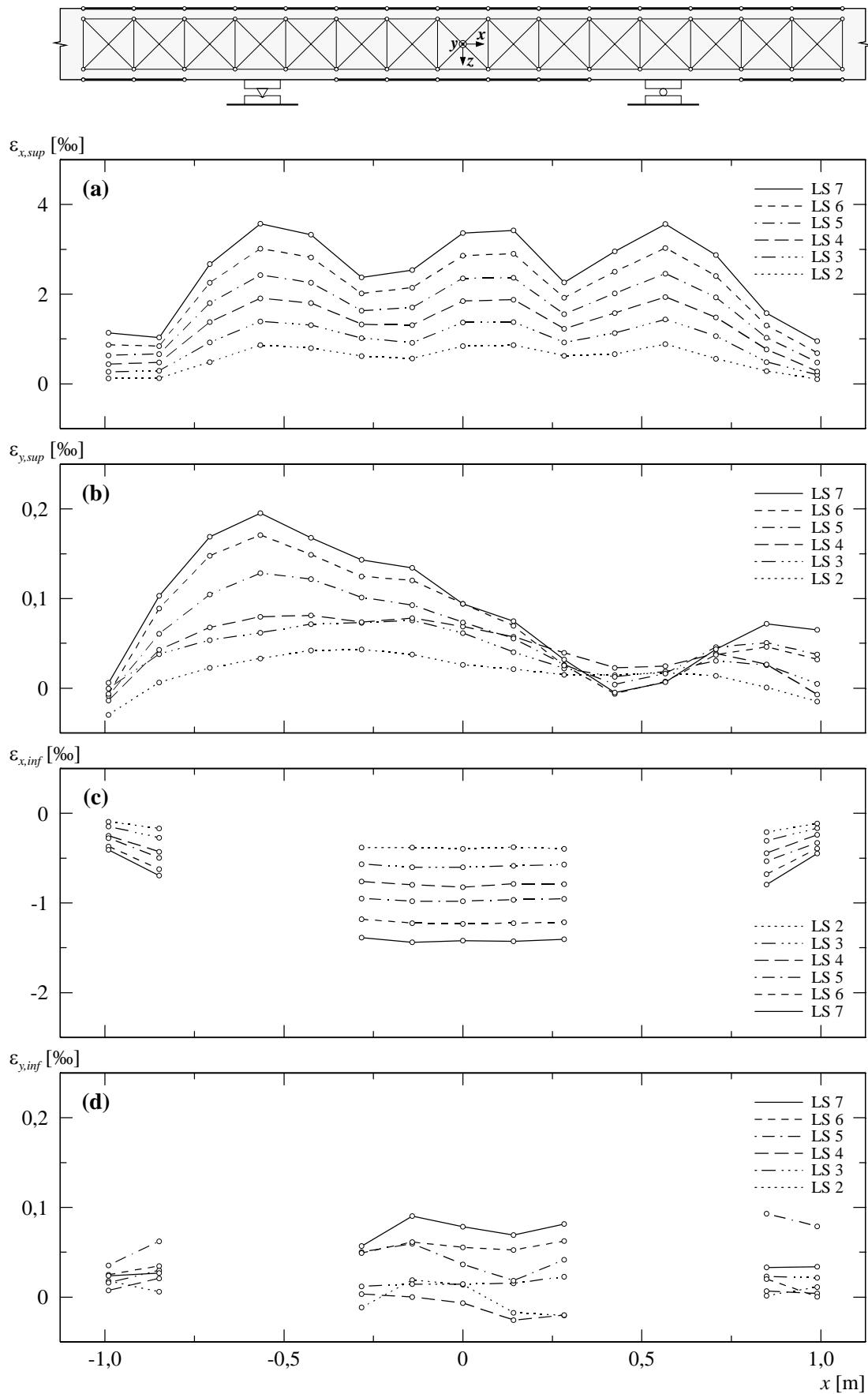


Bild 4.38: A3V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben; (c) mittlere Längsdehnungen unten; (d) mittlere Querdehnungen unten.

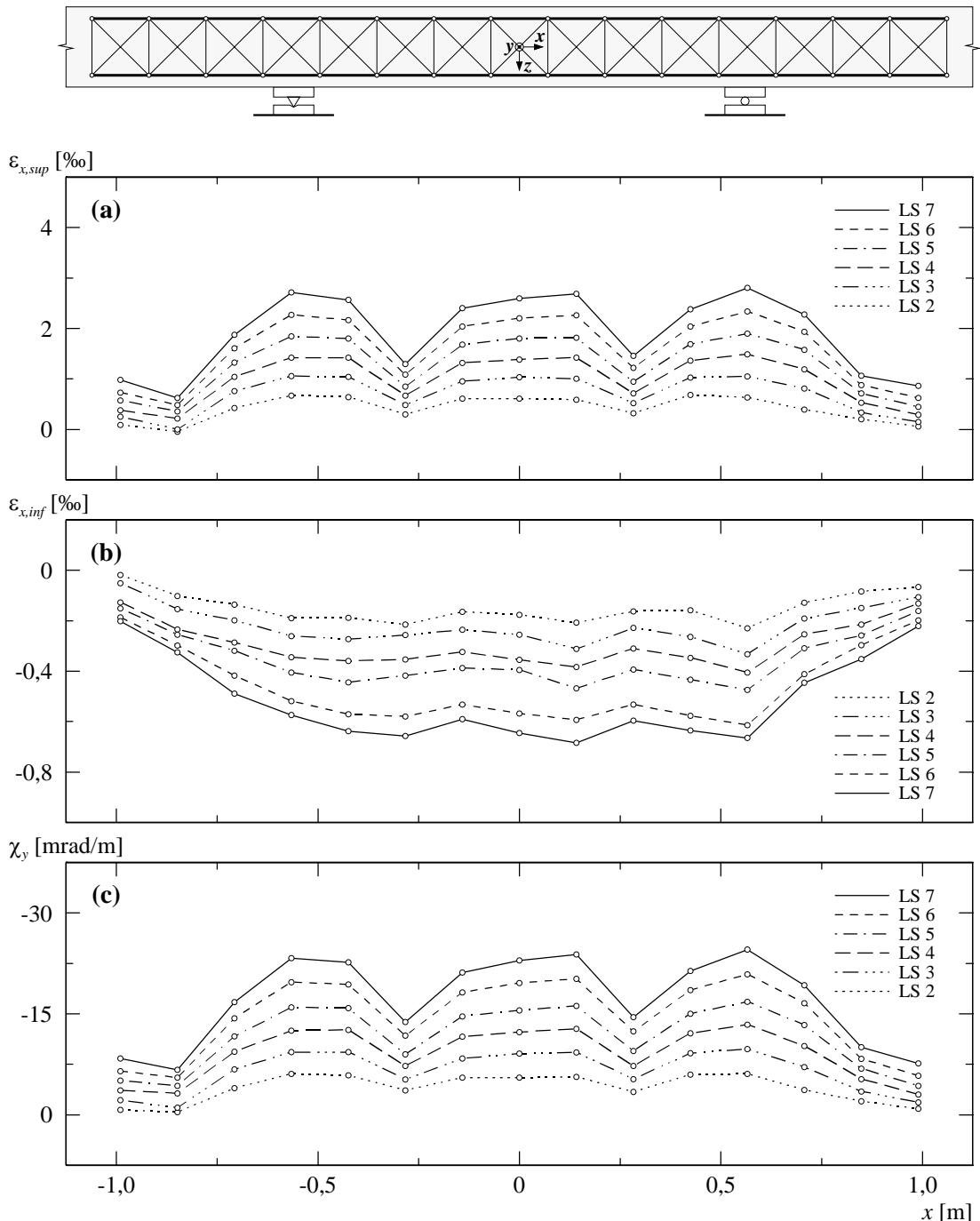


Bild 4.39: A3V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

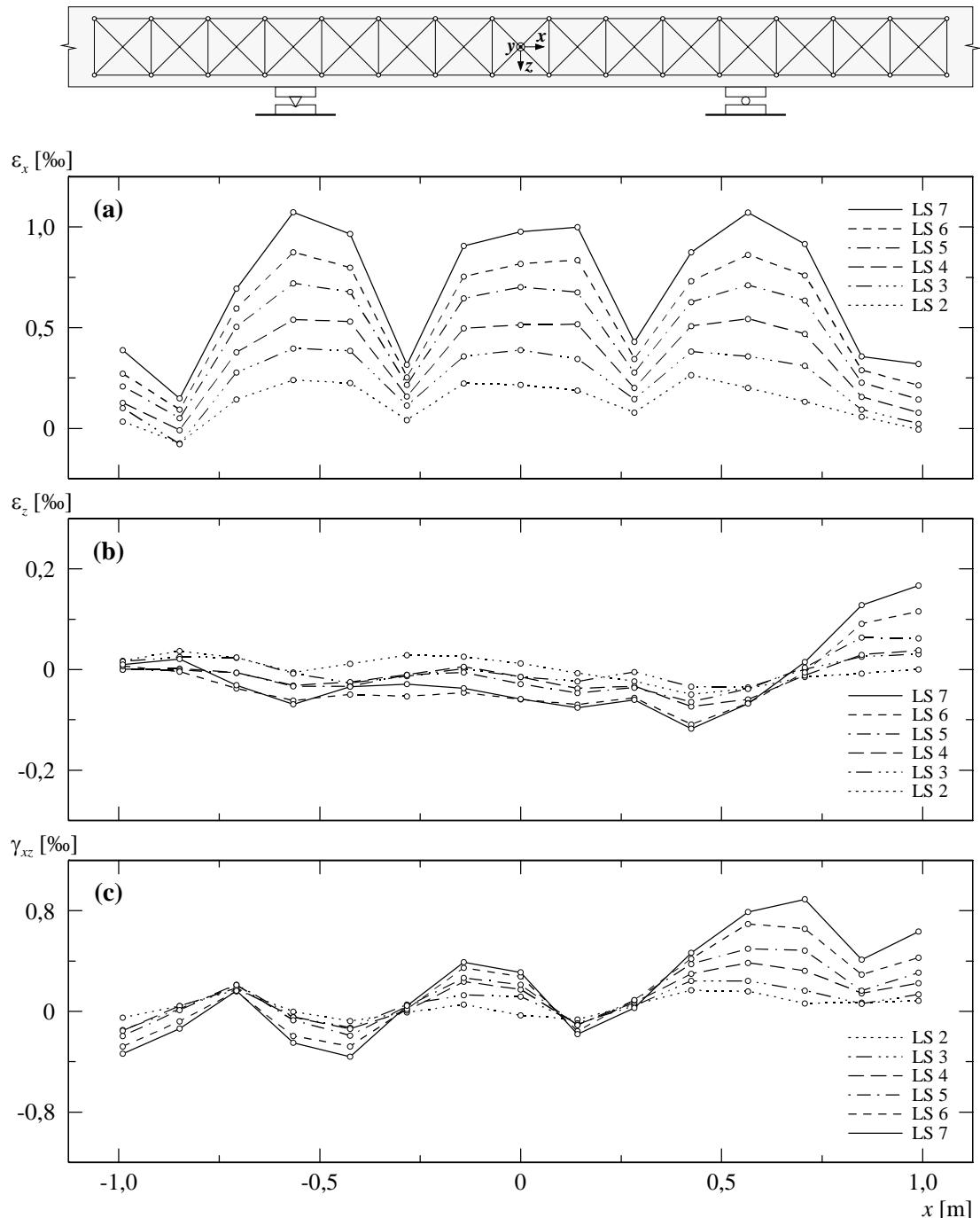
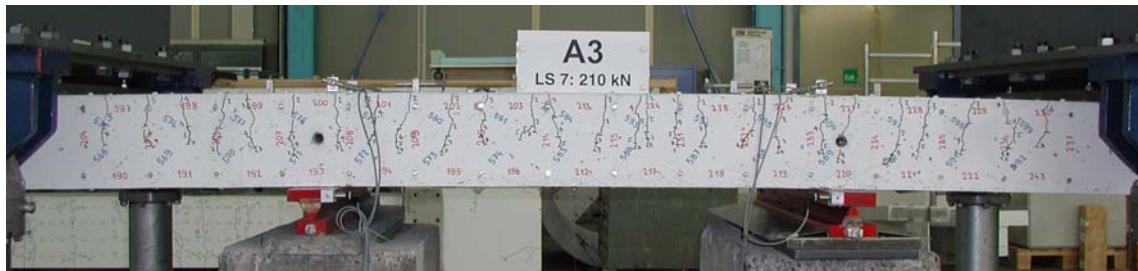


Bild 4.40: A3V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

(a)



(b)

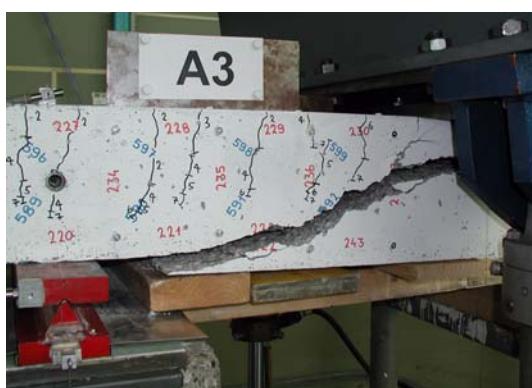


Bild 4.41: A3V1 – Rissbild bei Laststufe LS 7: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

(a)



(b)



(c)



Bild 4.42: A3V1 – Rissbild nach dem Bruch: (a) Vorderseite; (b) Schubbruch im Kragarm K2; (c) Bruchfläche im Kragarm K2.

Nach Versuchsende wurde der untere Betonkeil entfernt. Die abschliessende Untersuchung zeigte eine rauhe Beschaffenheit der Bruchfläche und einen gleichmässigen Oberflächenverlauf über die Versuchskörperbreite. Der mittlere, steil verlaufende Teil wies eine Neigung von ungefähr 45° gegenüber der x -Achse auf. Im unteren Teil verlief die Bruchfläche über eine Länge von etwa 350 mm bis zum Auflager sehr flach, wobei die Dicke der Abplatzungen in der Biegedruckzone beim Auflagerbereich nur wenige Millimeter betrug.

4.4.2 Versuch A3V2

Vor der eigentlichen Durchführung des Versuchs erfolgte im unbelasteten Zustand die Deformettermessung der Laststufe LS 8. Diese diente zur Bestimmung der plastischen Verformungen nach dem ersten Versuch, welche beim zweiten Versuch als initiale Vorverformungen berücksichtigt wurden. Anschliessend erfolgte die Belastung des Versuchskörpers und die Durchführung der Laststufen LS 9 und LS 10 am ersten sowie der Laststufen LS 11 bis LS 14 am zweiten Versuchstag. Über Nacht blieb der Versuchsträger belastet.

Laststufe (LS)	F_A [kN]	F_B [kN]	F_C [kN]	$-V_{C1}$ [kN]	$-M_C$ [kNm]	w_1 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	Bemerkungen
8	0	-7,8	12,3	7,8	4,2	2,6	0,33	0,12	Nullmessung
9	211,3 204,1	139,1 134,1	370,5 358,3	219,1 211,9	139,4 134,8	10,2 10,3	1,25 1,26	0,31 0,32	Belastungsende Messende
10	241,9 236,8	160,4 156,9	422,4 413,8	249,7 244,6	159,0 155,7	11,5 11,6	1,43 1,44	0,36 0,36	Belastungsende Messende
11	271,3 260,3	180,9 173,2	472,3 453,6	279,1 268,1	177,8 170,8	13,0 13,1	1,64 1,65	0,41 0,42	Belastungsende Messende
12	300,6 287,7	201,3 192,3	522,0 500,1	308,4 295,5	196,6 188,3	14,9 15,1	1,96 2,01	0,46 0,48	Belastungsende Messende
13	324,6 293,5	218,0 196,4	562,8 510,0	332,5 301,3	212,0 192,1	23,8 24,3	4,58 4,81	0,59 0,59	Belastungsende Messende
HL	331,2	222,6	573,9	339,0	216,2	35,4	8,19	0,66	Höchstlast
14	325,1 301,8	218,3 202,1	563,5 524,0	332,9 309,6	212,2 197,4	39,4 40,1	9,25 9,42	0,66 0,64	Belastungsende Messende
Entlastung	81,8	49,1	151,0	89,6	56,6	232,0	—	0,02	Entlastungsbeginn

Tabelle 4.12: A3V2 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 4.2).

Die Laststufe LS 9 entsprach mit einer Kraft von $F_A \approx 210$ kN dem Belastungsniveau der letzten Laststufe LS 7 des ersten Versuchs. Neben der Bildung von in x -Richtung verlaufenden Verbundrissen auf der Oberseite hatte sich das Rissbild und die Rissbreiten gegenüber der Laststufe LS 7 nicht verändert. Auf der Oberseite wurden im Bereich des nördlichen Lagers (Stelle C) maximale Rissbreiten von 0,1 bis 0,15 mm gemessen. Die übrigen Risse wiesen Breiten von 0,05 bis 0,1 mm auf, und die mittleren Rissabstände betragen ungefähr 75 bis 100 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite wurden auf der Höhe der oberen Deformettermessreihe (≈ 30 mm unterhalb der Oberkante) Rissbreiten von 0,05 bis 0,15 mm und auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) solche von maximal 0,05 mm gemessen. Für die folgenden Laststufen wurde bis zum Erreichen der Höchstlast ein Belastungsintervall von $\Delta F_A \approx 30$ kN gewählt.

Während der Belastung zwischen den Laststufen LS 10 und LS 11 ($F_A \approx 240 \div 270$ kN) bildete sich im Kragarm K1 auf der Unterseite ein Längsriss, der eine Länge von ca. 400 mm hatte und

Laststufe	Oberseite			Vorderseite – Kragarm	
	Kragarm K1 w_{cr} [mm]	Lager NORD w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	$z \approx -70$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 9	0,05...0,10	0,10...0,15	0,05...0,10	0,05...0,15	HR...0,05
LS 10	0,05...0,10	0,10...0,15	0,05...0,10	0,05...0,15	HR...0,05
LS 11	0,05...0,10	0,10...0,20	0,05...0,10	0,05...0,20	HR...0,05
LS 12	0,05...0,15	0,15...0,30	0,05...0,10	0,05...0,20	HR...0,10
LS 13	0,05...0,15	0,30...1,00	0,05...0,15	0,05...0,70	HR...0,25
LS 14	0,05...0,15	0,30...1,40	0,05...0,15	0,05...1,40	HR...0,35

Tabelle 4.13: A3V2 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

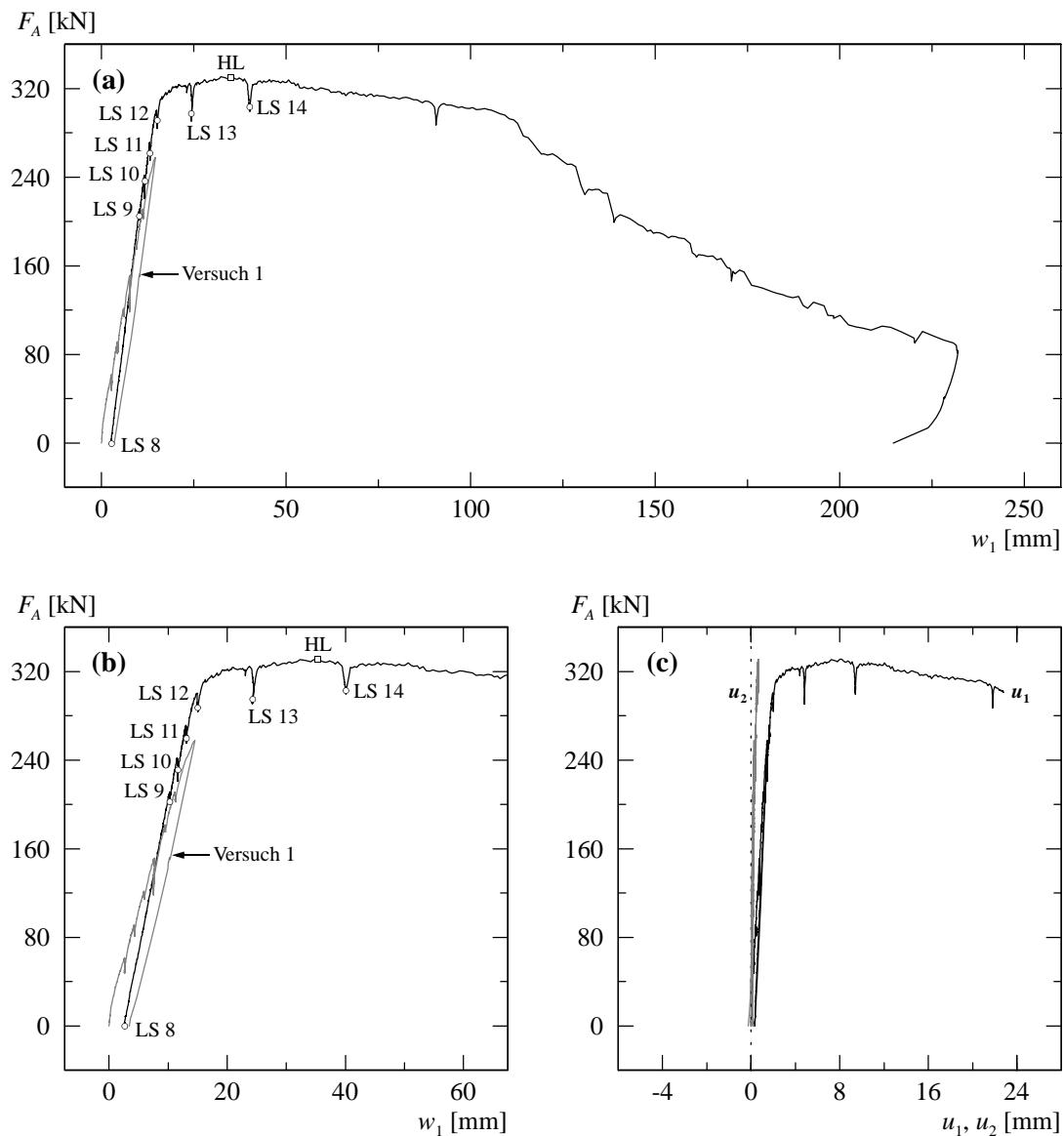


Bild 4.43: A3V2 – (a) und (b) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K1; (c) Verformungen der Zugzone über Auflager NORD.

ungefähr parallel zur x -Richtung im mittleren Drittelbereich verlief. Unten an der Stirnseite des Versuchskörpers betrug die Rissbreite 0,15 mm.

Nach dem Fließbeginn der Biegebewehrung wurde die Laststufe LS 13 bei einer Kraft von $F_A \approx 320$ kN durchgeführt. Bei dieser Laststufe konnten auf der Mittelfeldseite und über der Lagerplatte die ersten Betonstauchungsrisse in der Biegendruckzone beim nördlichen Lager festgestellt werden. Ausser der Bildung weiterer Verbundrisse und eines Risses über dem nördlichen Lager wurde auf der Oberseite eine Vergrösserung der Rissbreiten beobachtet. Dabei wurde beim nördlichen Lager ein Riss mit einer Breite von 1 mm gemessen. Die übrigen Risse über dem Auflager wiesen Breiten von 0,15 bis 0,3 mm auf, während im Kragarm und im Mittelfeld die Rissbreiten 0,05 bis 0,15 mm betrugen. Auf der Vorder- und Hinterseite konnte die Verlängerung der bestehenden Risse im Kragarm festgestellt werden, während sich das Rissbild im Mittelfeld nicht verändert hatte. Im Kragarm erstreckten sich die Risse über die oberen 80 % und im Mittelfeld über die oberen 70 % der Versuchskörperhöhe. Die Risse wiesen auf der Höhe der oberen Deforometermessreihe Rissbreiten von 0,05 bis maximal 0,7 mm auf. Bei den anfänglich relativ steil verlaufenden Rissen im Kragarm wurde im unteren Bereich eine deutliche Abflachung der Risse beobachtet. Auf halber Versuchskörperhöhe wurden Rissneigungen von 45 bis 60° gegenüber der

x -Achse gemessen, die sich im unteren Bereich schliesslich auf 30 bis 45° verringerten, wobei die Rissbreiten auf halber Versuchskörperhöhe maximal 0,25 mm betragen. Die Rissbreite des Längsrisses auf der Unterseite im Kragarm betrug an der Stirnseite 0,2 mm.

Im weiteren Versuchsfortschritt, zwischen den Laststufen LS 13 und LS 14, wurde bei einer Durchbiegung von $w_1 = 35,4$ mm beim Kragarm K1 die Höchstlast erreicht. Die entsprechende Kraft betrug $F_A = 331,2$ kN. Gleichzeitig lösten sich auf der Mittelfeldseite erste Betonplättchen an der Unterseite beim nördlichen Lager ab.

Nach Erreichen der Höchstlast wurde bei einer Kraft von $F_A \approx 330$ kN und einer Durchbiegung von $w_1 \approx 39,4$ mm die letzte Laststufe LS 14 des zweiten Versuchs durchgeführt. Neben der weiteren Ausdehnung der Betonstauchungsrisse in der Biegedruckzone konzentrierte sich die Bildung neuer Risse sowie das Rissbreitenwachstum der bestehenden Risse vorwiegend auf die Bereiche beim nördlichen Lager. Auf der Oberseite wurden über dem Lager zwei Risse mit einer Breite von 1,4 mm gemessen. Die übrigen Risse über dem Auflager wiesen Breiten von 0,15 bis 0,5 mm auf, während die Rissbreiten im Kragarm und im Mittelfeld bei 0,05 bis 0,15 mm verharrten. Ausser der Verlängerung eines schrägen Risses rechts des nördlichen Lagers (Mittelfeldseite) wurde keine Veränderung des Rissbildes auf der Vorder- und Hinterseite festgestellt. Im Bereich des nördlichen Lagers wiesen zwei Risse auf der Höhe der oberen Deformettermessreihe eine Rissbreite von 1,4 mm auf. Die übrigen Rissbreiten betragen 0,05 bis 0,7 mm. Auf halber Versuchskörperhöhe wurden noch solche von maximal 0,35 mm gemessen. Der Längsriss auf der Unterseite im Kragarm wies an der Stirnseite eine unveränderte Rissbreite von 0,2 mm auf.

Anschliessend wurde die Durchbiegung des Kragarms K1 vergrössert. Mit zunehmender Kragarmdurchbiegung w_1 platzten auf der Mittelfeldseite beim nördlichen Lager grössere Teile des Überdeckungsbetons an der Unterseite ab. Im weiteren Versuchsfortschritt konnte bei Kragarmdurchbiegungen von $w_1 \approx 130$ bis 170 mm viermal das Zerreissen von Querkraftbewehrungsstäben akustisch wahrgenommen werden. Bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 232$ mm wurde der Versuch abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt noch ungefähr 25 % der Höchstlast. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden.

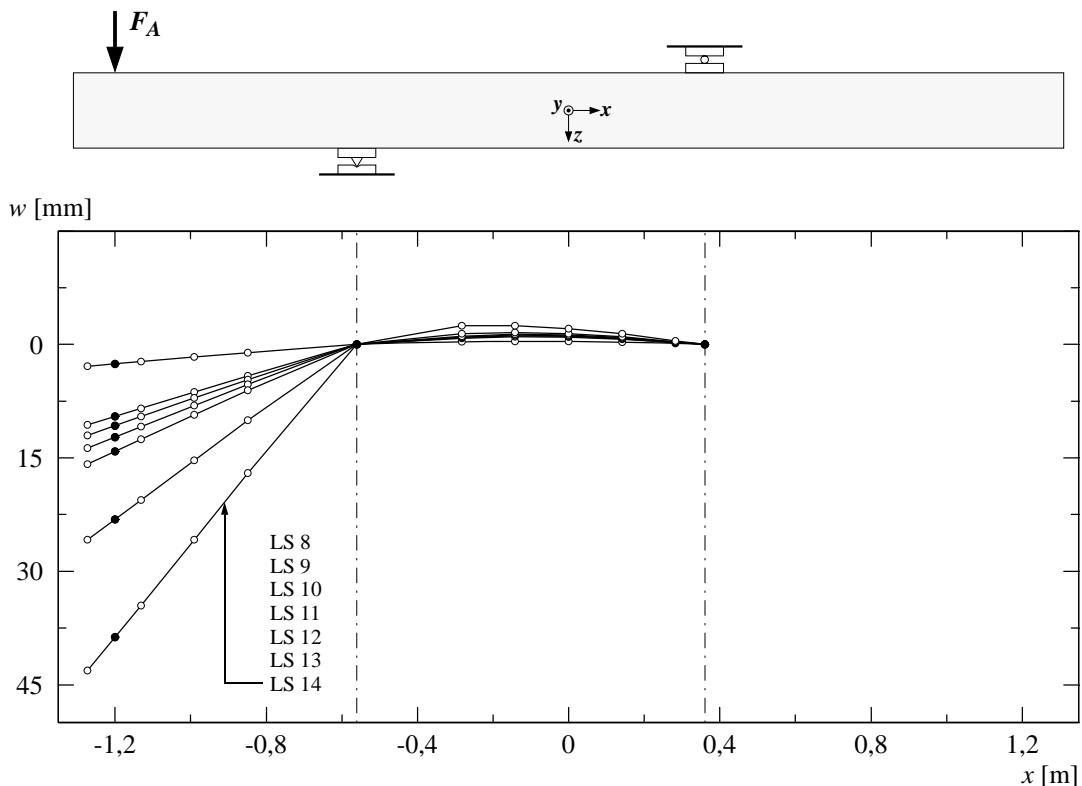


Bild 4.44: A3V2 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

Bei der abschliessenden Untersuchung des Versuchskörpers konnte auf der Mittelfeldseite beim nördlichen Lager eine ausgeprägte Rissfläche festgestellt werden. Diese erstreckte sich mit einer Neigung von 45° gegenüber der x -Achse vom rechten Lagerrand bis zur Oberseite. An der Unterseite war der Überdeckungsbeton der Biegedruckzone in einem Bereich von 200 bis 350 mm rechts vom nördlichen Lager (im Mittelfeld) abgeplatzt, wobei die Abplatzungen in unmittelbarer Auflagernähe eine Dicke von ungefähr 55 mm aufwiesen. Die unter 45° geneigte Rissfläche zeigte im unteren, oberhalb der Betonüberdeckung liegenden Bereich ($z \approx 45 \div 80$ mm) leichte Spuren einer Zerstörung der Rissverzahnung beziehungsweise eines gegenseitigen Abgleitens der Rissufer. Ausser den beiden äussersten Querkraftbewehrungsstäben waren in der ersten Reihe neben dem Auflager alle Stäbe in der Rissfläche zerrissen. Dabei zeigten alle abgetrennten Querkraftbewehrungsstäbe eine Bruchfläche, die unter einem Winkel von ungefähr 45° gegenüber der Stabachse verlief.

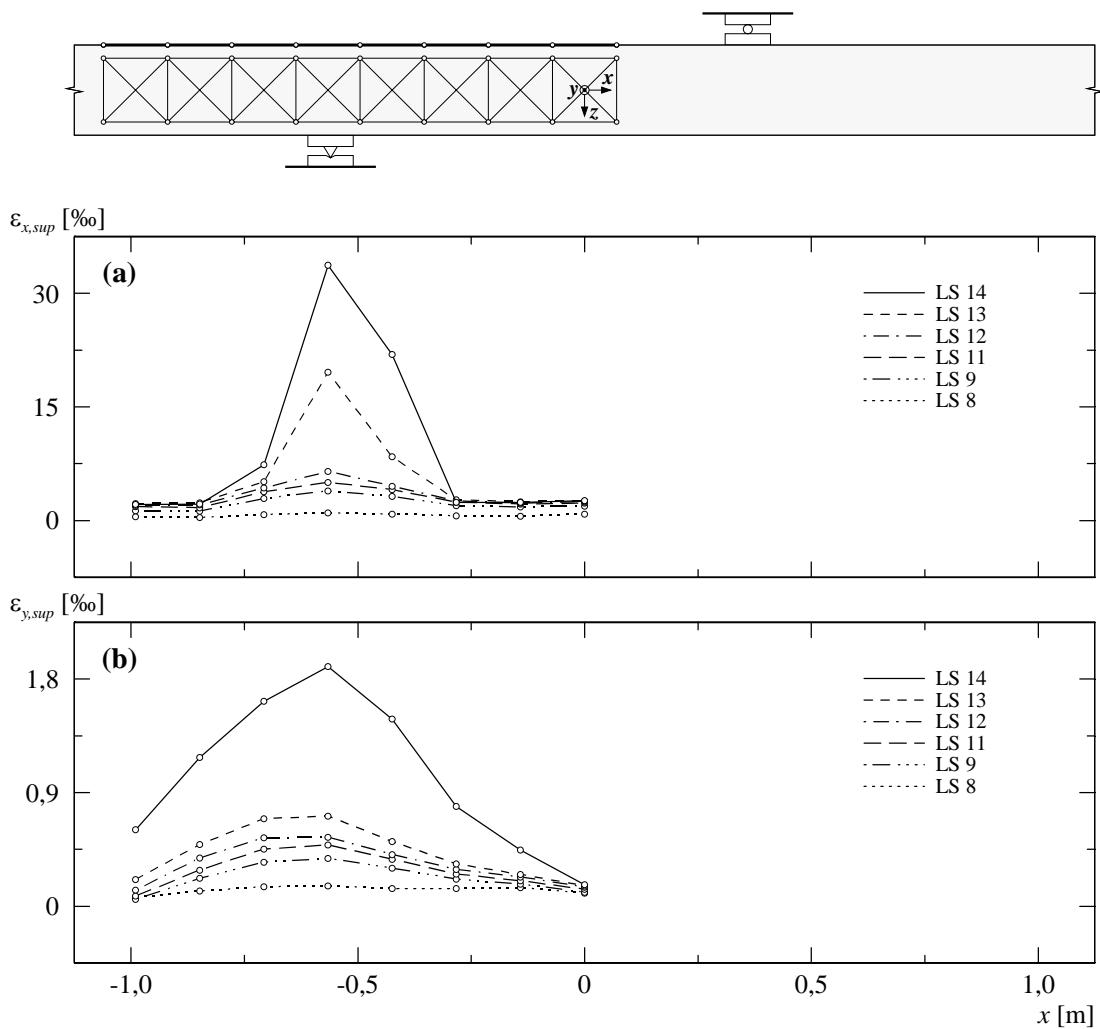


Bild 4.45: A3V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben.

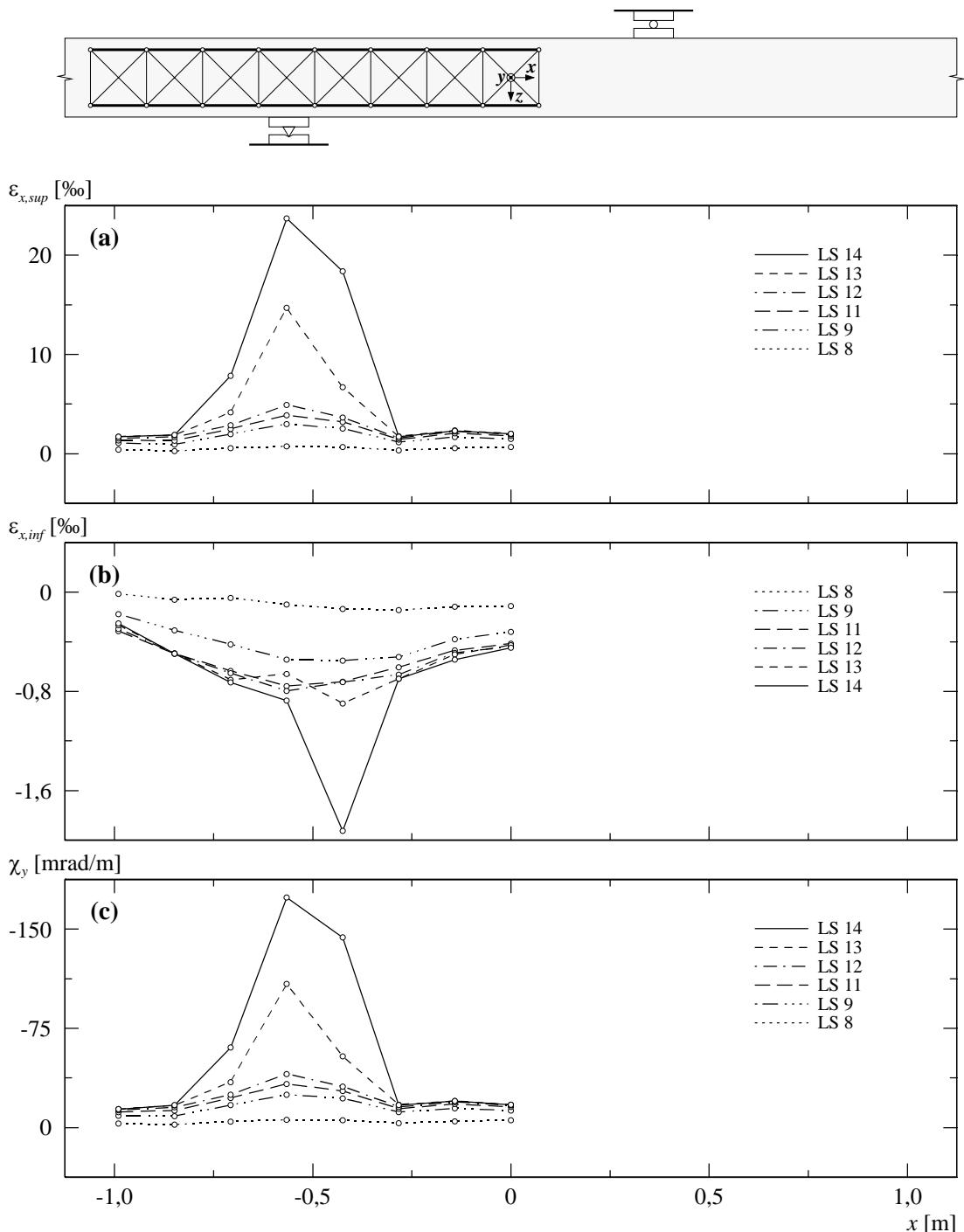


Bild 4.46: A3V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

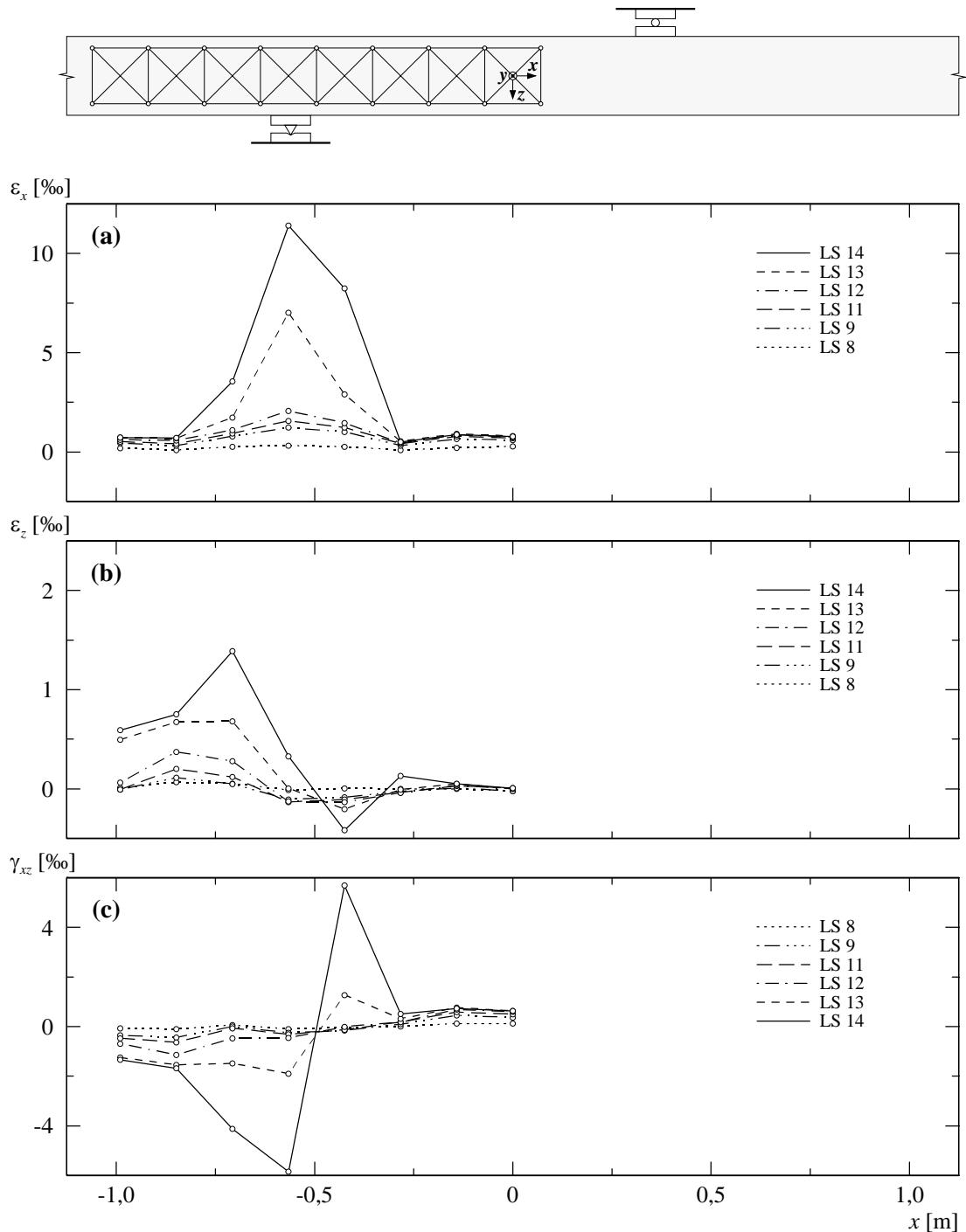
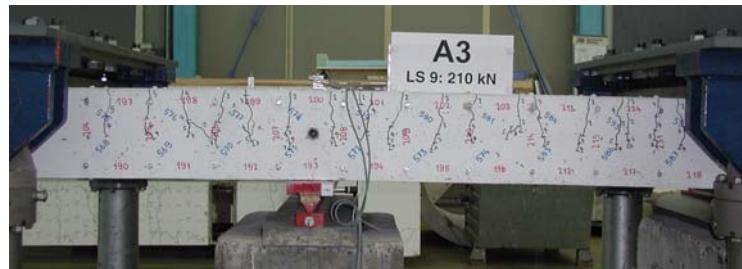


Bild 4.47: A3V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

(a)



(b)

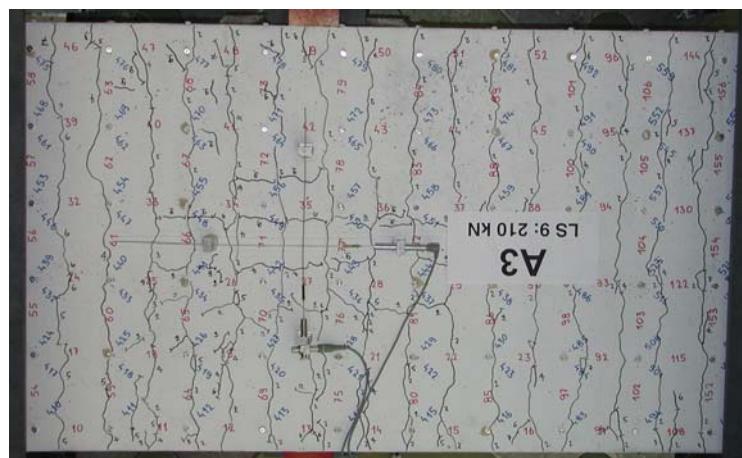
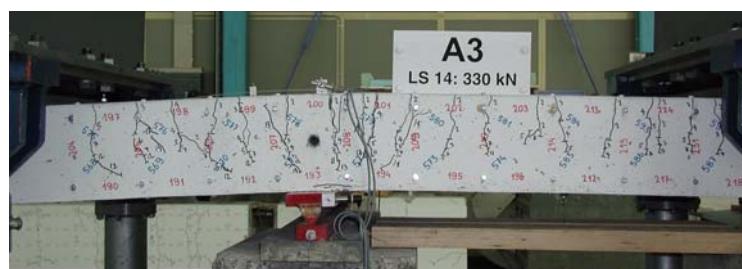


Bild 4.48: A3V2 – Rissbild bei Laststufe LS 9: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

(a)



(b)

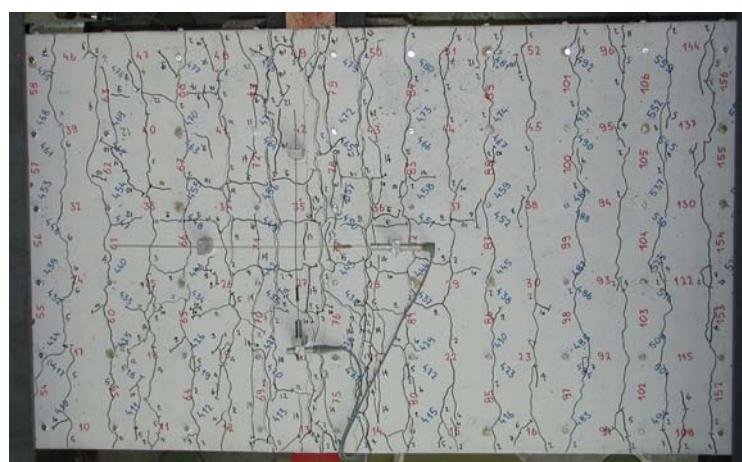
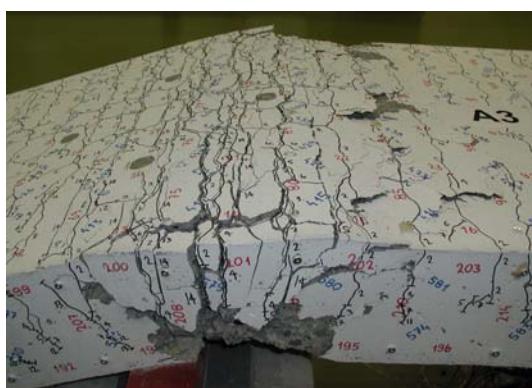


Bild 4.49: A3V2 – Rissbild bei Laststufe LS 14: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

(a)



(b)



(c)

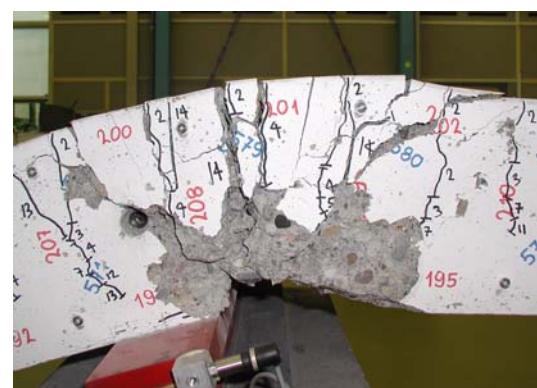


Bild 4.50: A3V2 – Rissbild nach Versuchsende: (a) Vorderseite; (b) Oberseite beim nördlichen Lager; (c) Bruchzone beim nördlichen Lager.

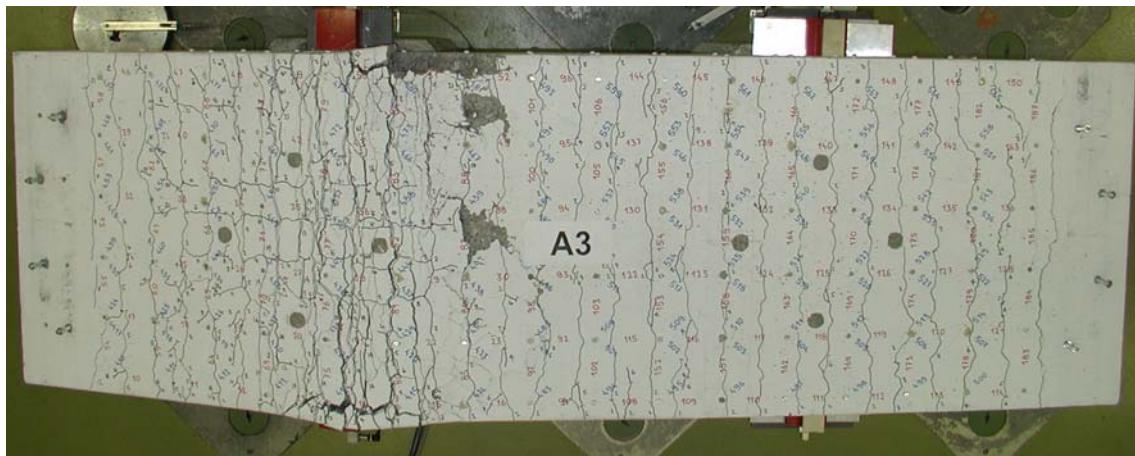


Bild 4.51: Versuchskörper A3 – Rissbild auf der Oberseite nach Versuchsende.

4.5 Versuchskörper A4

Gegenüber den Versuchskörpern A1 und A2 wurden die Biegebewehrungsquerschnitte des Versuchskörpers A4 in beiden Bewehrungsrichtungen (n - und t -Richtung) um einen Drittel reduziert. Der fiktive geometrische Bewehrungsgehalt in x -Richtung betrug $\rho_x = 0,952 \%$, und für die Bewehrungsrichtung galt $\phi_0 = 45^\circ$. In beiden Bewehrungsrichtungen war eine Bewehrungslage mit Stäben $\varnothing 12$ mm und einem Stababstand von 60 mm angeordnet. Die beiden Kragarmbereiche wiesen Querkraftbewehrungsgehalte von $\rho_z = 0 \%$ (Kragarm K2) und 0,156 % (Kragarm K1) auf.

4.5.1 Versuch A4V1

Am ersten Versuchstag wurden die beiden Nullmessungen und die Laststufe LS 2 durchgeführt. Die Laststufen LS 3 und LS 4 folgten am zweiten Versuchstag. Über Nacht blieb der Versuchsträger belastet.

Bei einer Kraft von $F_A = F_B \approx 60$ kN wurde die erste Laststufe LS 2 durchgeführt. Der gerissene Bereich erstreckte sich über das Mittelfeld und die erste Hälfte der Kragarme. Die Risse auf der Oberseite wiesen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 100 mm Breiten zwischen 0,05 und 0,1 mm auf. Auf der Vorder- und Hinterseite des Versuchskörpers hatten sich ungefähr vertikal verlaufende Risse gebildet. Im Mittelfeld und über den Auflagern reichten diese über die oberen zwei Drittel der Versuchskörperhöhe. Für die folgenden Laststufen wurde bis zum Erreichen der Bruchlast ein Belastungsintervall von $\Delta F_A = \Delta F_B \approx 30$ kN gewählt.

Während der Belastung zwischen der Laststufe LS 3 und LS 4 ($F_A = F_B \approx 90 \div 120$ kN) bildete sich im Kragarm K1 ($\rho_z = 0,156 \%$) auf der Unterseite ein Längsriss, der eine Länge von ca. 550 mm hatte und ungefähr parallel zur x -Richtung im mittleren Drittelbereich ($y \approx -100$ mm) verlief. Unten an der Stirnseite des Versuchskörpers betrug die Rissbreite 0,3 mm.

Die letzte Laststufe LS 4 des ersten Versuchs wurde bei einer Kraft von $F_A = F_B \approx 120$ kN durchgeführt. Gegenüber der Laststufe LS 2 hatten sich sowohl auf der Oberseite als auch auf der Vorder- und Hinterseite neue Risse gebildet. Neben der Bildung von neuen Rissen bei den Kragarmenden wurde auf der Oberseite eine Verästelung der bestehenden Risse beobachtet, wobei die Verästelungsrisse in den Verankerungsbereichen der Biegebewehrung endeten. Die Rissbreiten betrugen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 50 bis 80 mm im Mittelfeld und über den Auflagern 0,05 bis 0,30 mm, in den Kragarmen 0,05 bis 0,2 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite erstreckten sich die Risse über die oberen 80 bis 85 % der Versuchskörperhöhe. Neue Risse wurden bei den Kragarmenden und den Verankerungsbereichen der Biegebewehrung im Mittelfeld

Laststufe (LS)	$F_A = F_B$ [kN]	V_{D1} [kN]	$-M_D$ [kNm]	w_1 [mm]	w_3 [mm]	w_2 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	u_3 [mm]	u_4 [mm]	Bemerkungen
1	0	7,8	4,2	0	0	0	0	0	0	0	Nullmessung
2	60,7 54,8	68,5 62,6	43,1 39,2	7,8 7,9	-2,0 -2,0	7,9 8,0	1,13 1,15	-0,07 -0,08	0,87 0,88	-0,07 -0,08	Belastungsende Messende
3	90,5 80,1	98,3 87,9	62,1 55,5	12,8 12,9	-3,3 -3,3	12,9 12,9	1,90 1,91	-0,13 -0,13	1,45 1,46	-0,15 -0,16	Belastungsende Messende
4	120,3 110,3	128,1 118,0	81,2 74,8	18,7 18,7	-4,9 -4,8	19,1 19,1	2,80 2,83	-0,20 -0,25	2,28 2,28	-0,23 -0,24	Belastungsende Messende
Bruch K2	132,7	140,5	89,1	21,7	-5,6	22,6	3,30	-0,29	2,68	-0,29	Schubbruch
Entlastung	54,1 0	61,9 7,8	38,8 4,2	16,4 9,5	-5,7 -4,0	36,1 22,5	2,08 1,03	-0,23 -0,13	1,75 0,78	-0,25 -0,15	Entlastungsbeginn Versuchsende

Tabelle 4.14: A4V1 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 4.1).

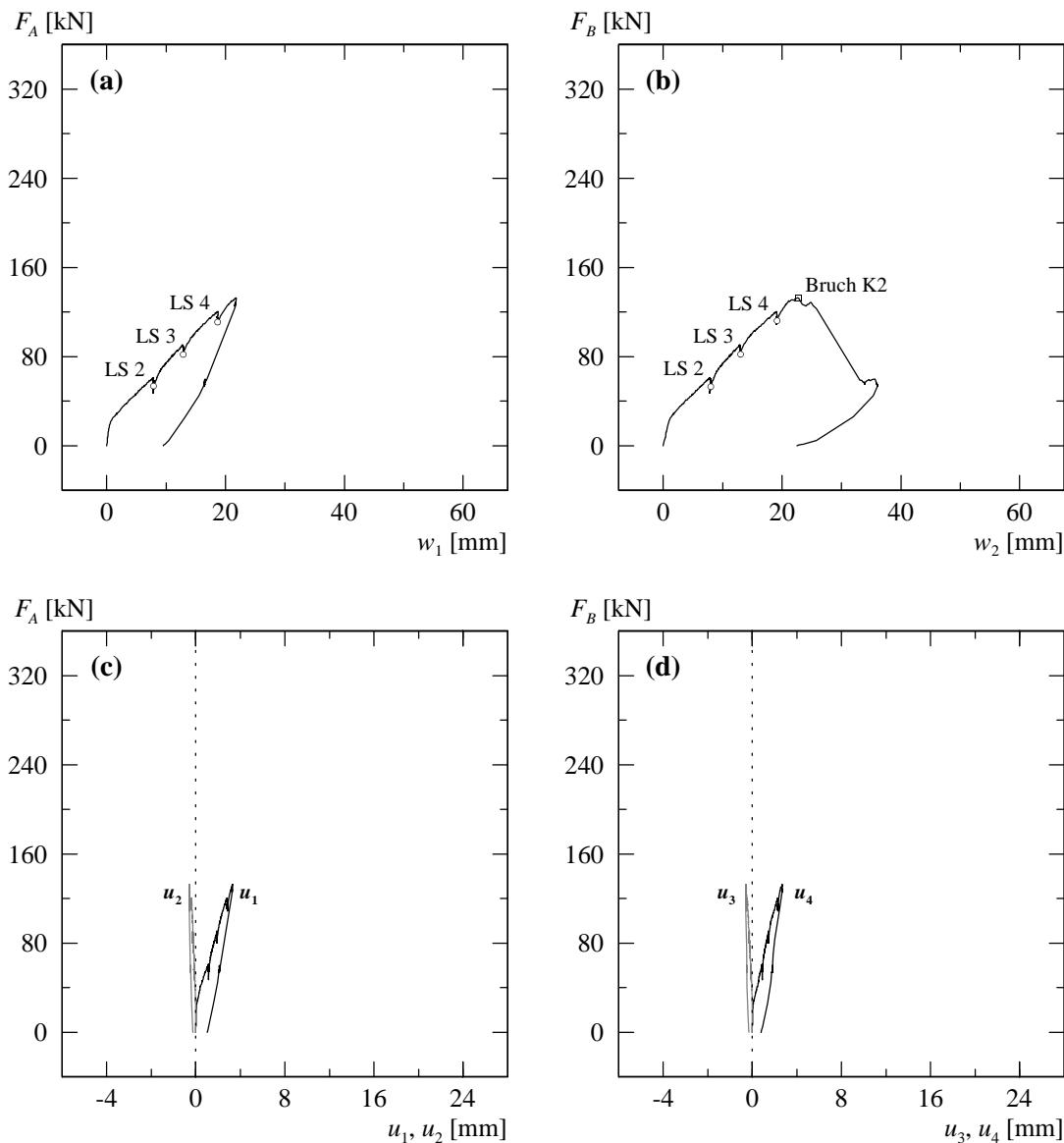


Bild 4.52: A4V1 – (a) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K1; (b) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K2; (c) Verformungen der Zugzone über Auflager NORD; (d) Verformungen der Zugzone über Auflager SÜD.

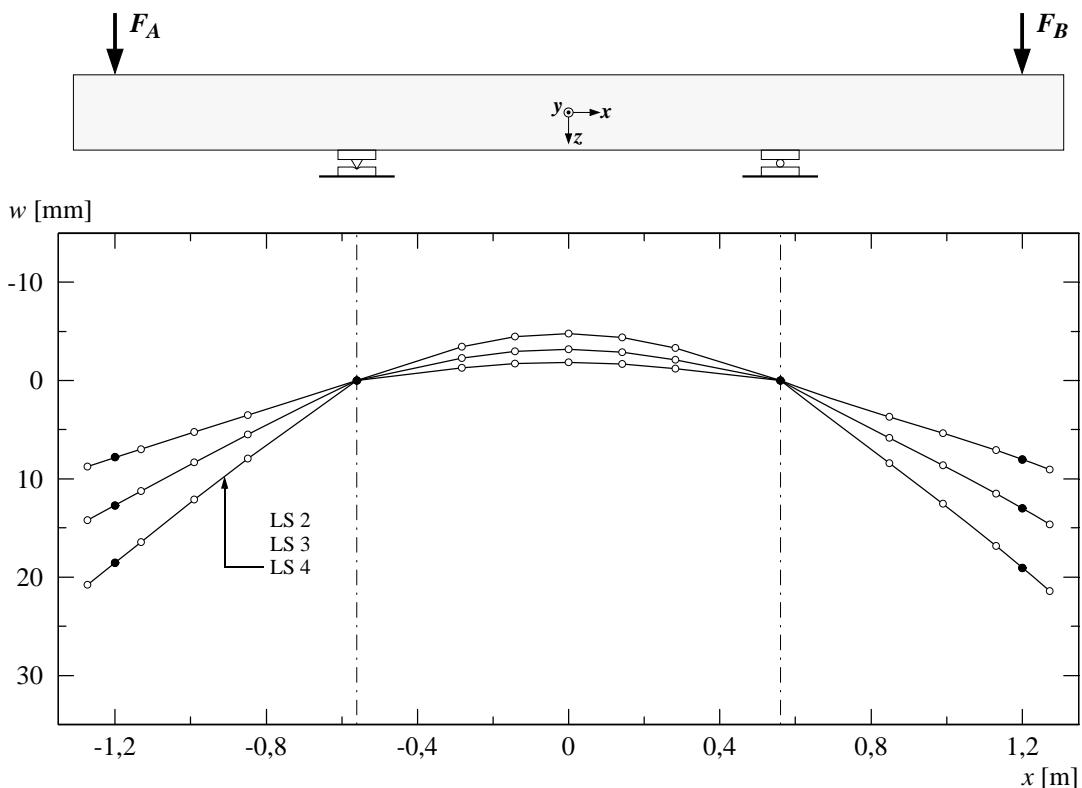
festgestellt, wobei letztere horizontal verliefen. Die anfänglich ungefähr vertikal verlaufenden Risse im Kragarm setzten sich im unteren Bereich mit einer leichten Neigung gegen die Auflager fort, während im Mittelfeld eine geringfügige Verlängerung der ungefähr vertikal verlaufenden Risse beobachtet wurde. Die schrägen Risse wiesen Neigungen von 45 bis 60° gegenüber der x -Achse auf. Im Kragarm K2 ($\rho_z = 0\%$) wurden auf der Höhe der oberen Deformettermessreihe (≈ 30 mm unterhalb der Oberkante) Rissbreiten von 0,1 bis 0,3 mm gemessen. Unterhalb der Bereiche, in denen die Biegebewehrungsverankerungen lagen, verringerten sich die Rissbreiten stark; auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) betrugen sie 0,05 bis 0,1 mm.

Im weiteren Versuchsfortschritt erfolgte bei einer Kraft von $F_A = F_B = 132,7$ kN ein spröder Schubbruch des Kragarms K2. Die dazugehörigen Durchbiegungen betrugen $w_1 = 21,7$ mm beim Kragarm K1 und $w_2 = 22,6$ mm beim Kragarm K2. Während der letzten 20 Sekunden vor dem Erreichen der Bruchlast konnte ein Knistern wahrgenommen und die Bildung von Schubrisse im Auflagerbereich des Kragarms K2 beobachtet werden. Die Schubrisse wiesen Neigungen von 30 bis 45° gegenüber der x -Achse auf, wobei sich in den letzten 8 Sekunden die Entwicklung der Bruchfläche abzeichnete. Kurz vor dem Bruch (ca. 3 Sekunden) setzte ein unkontrolliertes

Laststufe	Oberseite					Vorderseite – Kragarm	
	Kragarm K1 w_{cr} [mm]	Lager NORD w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	Lager SÜD w_{cr} [mm]	Kragarm K2 w_{cr} [mm]	$z \approx -70$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 2	HR...0,05	0,05...0,10	0,05...0,10	0,05...0,10	HR...0,05	0,05...0,10	HR...0,05
LS 3	0,05...0,10	0,05...0,10	0,05...0,20	0,05...0,20	HR...0,10	0,05...0,20	HR...0,10
LS 4	0,05...0,20	0,05...0,20	0,05...0,30	0,05...0,20	HR...0,15	0,10...0,30	0,05...0,10

Tabelle 4.15: A4V1 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

Risswachstum ein. Der eigentliche Bruchprozess verlief relativ langsam und führte nicht zu einer Abtrennung des unteren Betonkeils. Der untere Betonkeil und das südliche, horizontal bewegliche Lager wurden um 6 bis 8 mm nach Norden verschoben beziehungsweise unter den Versuchskörper geschoben. Die leicht s-förmig gekrümmte Bruchfläche folgte in ihrem steil verlaufenden Teil einem vorhandenen Schubriss, der sich im unteren Bereich bis über die Lagerplatte ausdehnte. Der sich bis zur Krafteinleitung erstreckende Trennriss entlang der Biegebewehrung entstand unmittelbar beim Bruch. Die Steifigkeit der Versuchsanlage genügte, um ein schlagartiges Abtrennen des unteren Betonkeils zu verhindern.

**Bild 4.53:** A4V1 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

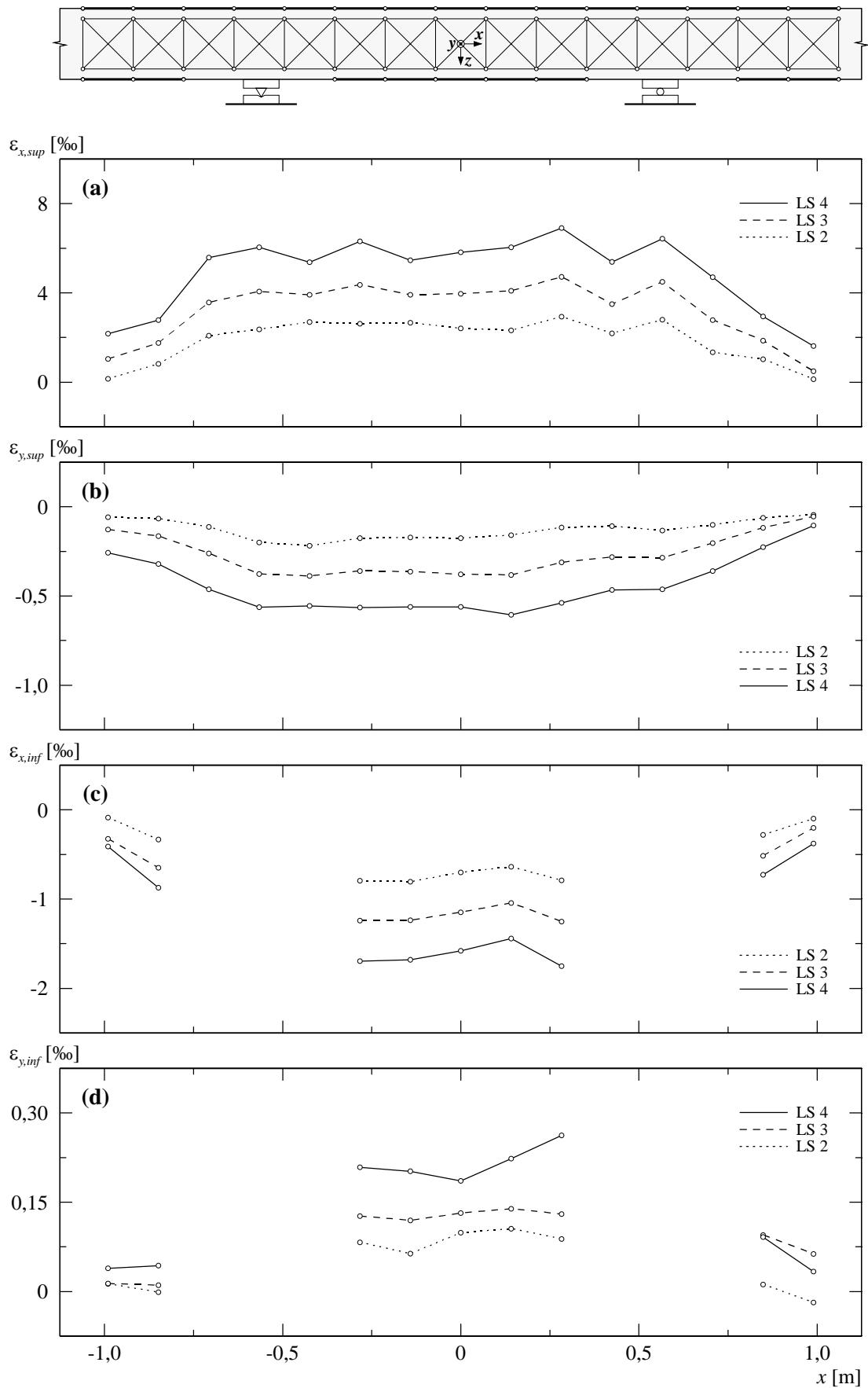


Bild 4.54: A4V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben; (c) mittlere Längsdehnungen unten; (d) mittlere Querdehnungen unten.

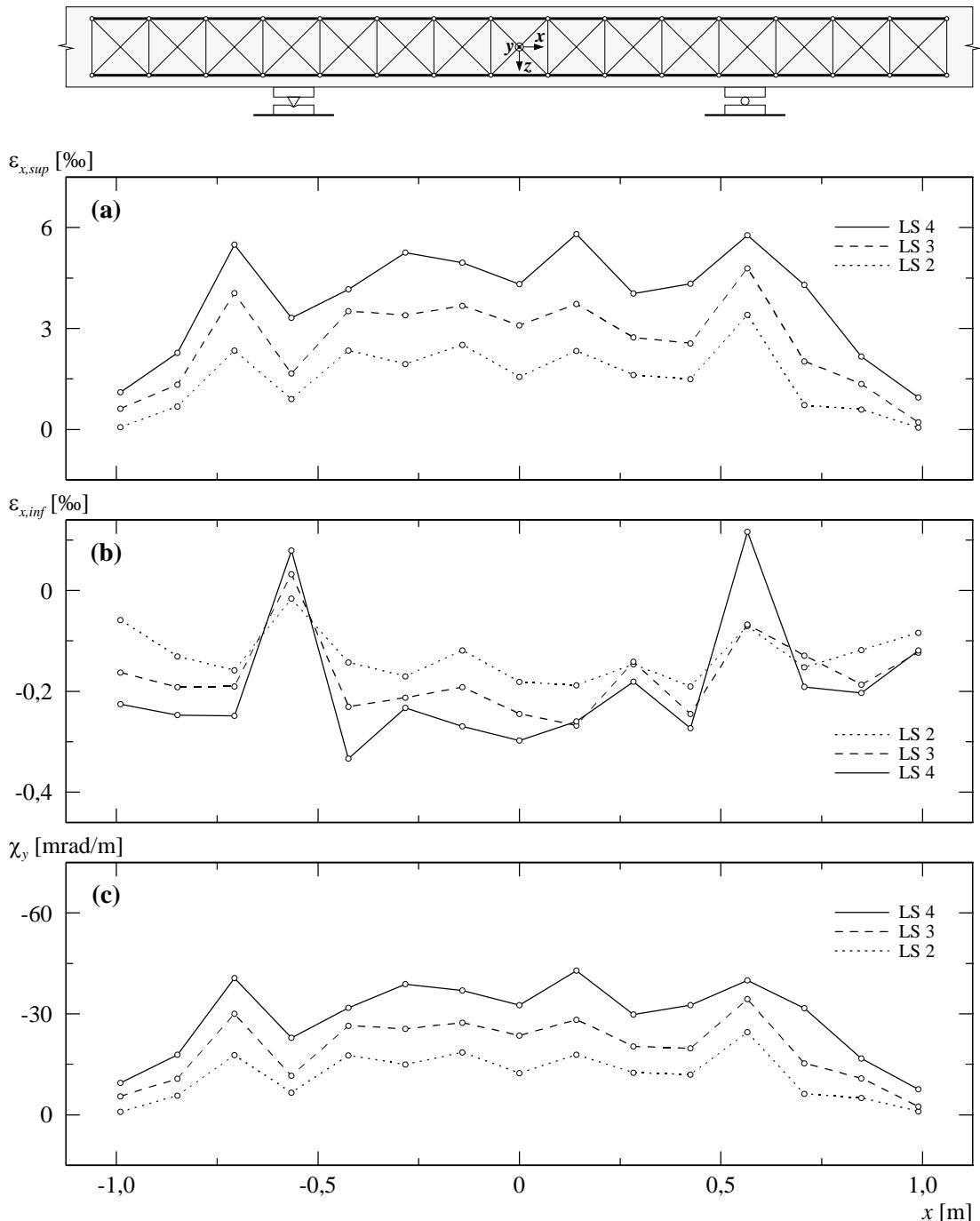


Bild 4.55: A4V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

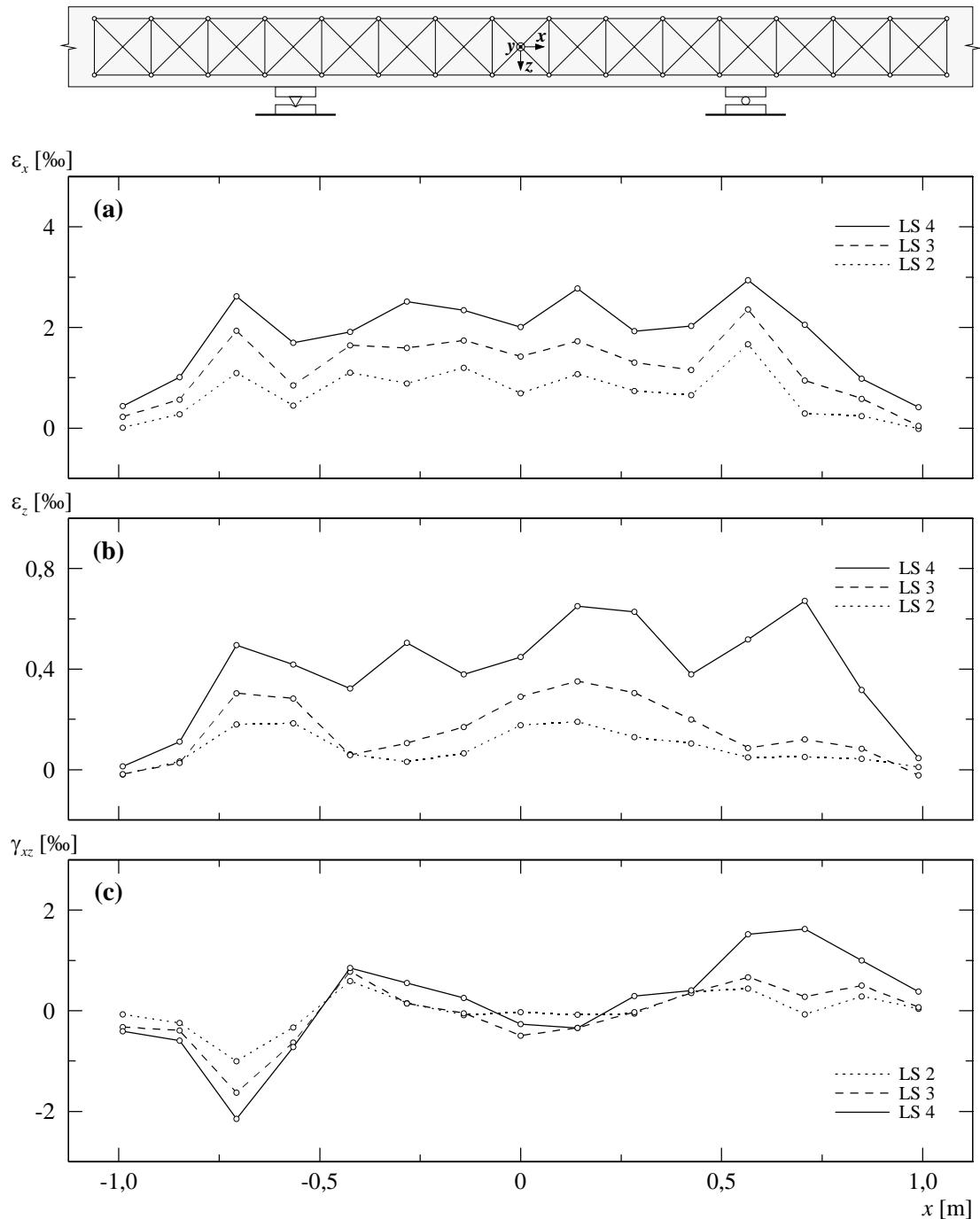
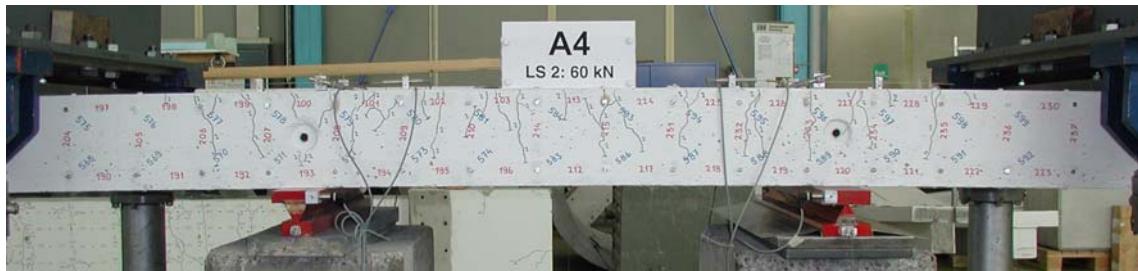


Bild 4.56: A4V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

(a)

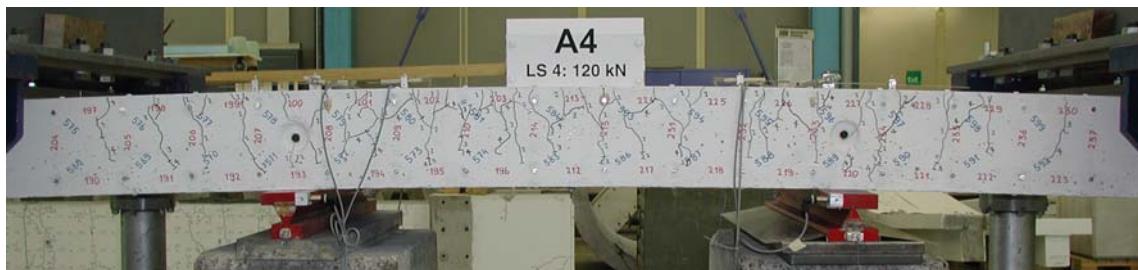


(b)



Bild 4.57: A4V1 – Rissbild bei Laststufe LS 2: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

(a)

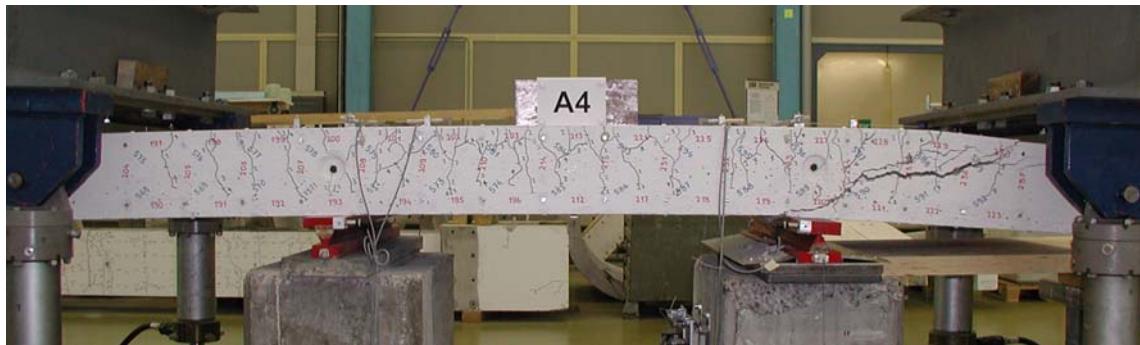


(b)

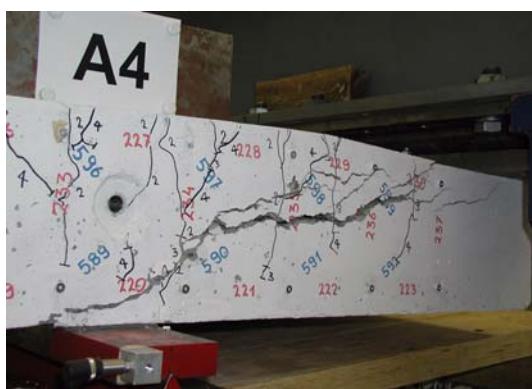


Bild 4.58: A4V1 – Rissbild bei Laststufe LS 4: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

(a)



(b)



(c)

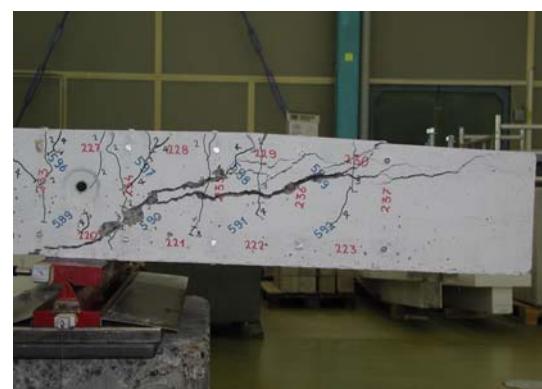


Bild 4.59: A4V1 – Rissbild nach dem Bruch: (a) Vorderseite; (b) Schubbruch im Kragarm K2; (c) Bruchfläche im Kragarm K2.

4.5.2 Versuch A4V2

Vor der eigentlichen Durchführung des Versuchs erfolgte im unbelasteten Zustand die Deformermessung der Laststufe LS 5. Diese diente zur Bestimmung der plastischen Verformungen nach dem ersten Versuch, welche beim zweiten Versuch als initiale Vorverformungen berücksichtigt wurden. Anschliessend erfolgte die Belastung des Versuchskörpers und die Durchführung der Laststufe LS 6 am ersten sowie der Laststufen LS 7 bis LS 9 am zweiten Versuchstag. Über Nacht blieb der Versuchsträger belastet.

Laststufe (LS)	F_A [kN]	F_B [kN]	F_C [kN]	$-V_{C1}$ [kN]	$-M_C$ [kNm]	w_1 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	Bemerkungen
5	0	-7,8	12,3	7,8	4,2	5,5	1,03	-0,13	Nullmessung
6	120,9 113,9	76,2 71,4	217,2 205,4	128,7 121,7	81,6 77,1	16,1 16,2	3,08 3,10	-0,32 -0,33	Belastungsende Messende
7	150,4 142,2	96,8 91,1	267,4 253,4	158,2 150,0	100,5 95,2	20,5 20,6	4,04 4,05	-0,38 -0,40	Belastungsende Messende
8	181,0 168,7	118,0 109,5	319,1 298,4	188,8 176,6	120,0 112,2	28,1 28,6	5,27 5,42	-0,48 -0,52	Belastungsende Messende
HL	188,9	123,6	332,6	196,7	125,1	35,8	7,61	-0,72	Höchstlast
9	183,7 171,7	119,9 111,6	323,7 303,4	191,5 179,5	121,8 114,1	38,1 38,6	8,27 8,45	-0,88 -1,06	Belastungsende Messende
Entlastung	77,5	46,0	143,6	85,3	53,8	243,7	–	–	Entlastungsbeginn

Tabelle 4.16: A4V2 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 4.2).

Die Laststufe LS 6 entsprach mit einer Kraft von $F_A \approx 120$ kN dem Belastungsniveau der letzten Laststufe LS 4 des ersten Versuchs. Das Rissbild und die Rissbreiten hatten sich dabei gegenüber der Laststufe LS 4 nicht verändert. Auf der Oberseite wurden im Bereich des nördlichen Lagers (Stelle C) maximale Rissbreiten von 0,1 bis 0,2 mm gemessen. Die übrigen Risse wiesen Breiten von 0,05 bis 0,15 mm auf, und die mittleren Rissabstände betrugen ungefähr 50 bis 80 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite wurden auf der Höhe der oberen Deformermessreihe (≈ 30 mm unterhalb der Oberkante) Rissbreiten von 0,1 bis maximal 0,3 mm gemessen. Unterhalb der Verankerungsbereiche der Biegebewehrung, auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$), wiesen die Risse noch Breiten von 0,05 bis 0,1 mm auf. Der Längsriss auf der Unterseite im Kragarm K1 verlängerte sich nicht und wies an der Stirnseite eine Rissbreite von 0,35 mm auf. Für die folgenden Laststufen wurde bis zum Erreichen der Höchstlast ein Belastungsintervall von $\Delta F_A \approx 30$ kN gewählt.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 8 ($F_A \approx 180$ kN) bildeten sich vorwiegend auf der Oberseite neue Risse, wobei eine weitere Verästelung der bestehenden Risse beobachtet wurde. Die Rissbreiten betragen bei mittleren Rissabständen von 30 bis 80 mm im Bereich des nördlichen Lagers 0,15 bis 0,3 mm, während die Breiten der übrigen Risse zwischen 0,05 und 0,25 mm lagen. Neben der Bildung weiterer, horizontal verlaufender Risse im Bereich der Biegebewehrungsverankerungen, wurde auf der Vorder- und Hinterseite eine Verlängerung und Ver-

Laststufe	Oberseite			Vorderseite – Kragarm	
	Kragarm K1 w_{cr} [mm]	Lager NORD w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	$z \approx -70$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 6	0,05...0,15	0,10...0,20	0,05...0,20	0,10...0,30	0,05...0,10
LS 7	0,05...0,20	0,10...0,20	0,05...0,20	0,10...0,60	0,05...0,30
LS 8	0,05...0,25	0,15...0,30	0,05...0,20	0,15...0,90	0,05...0,40
LS 9	0,05...0,25	0,15...1,40	0,05...0,20	0,15...1,20	0,05...0,50

Tabelle 4.17: A4V2 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen.

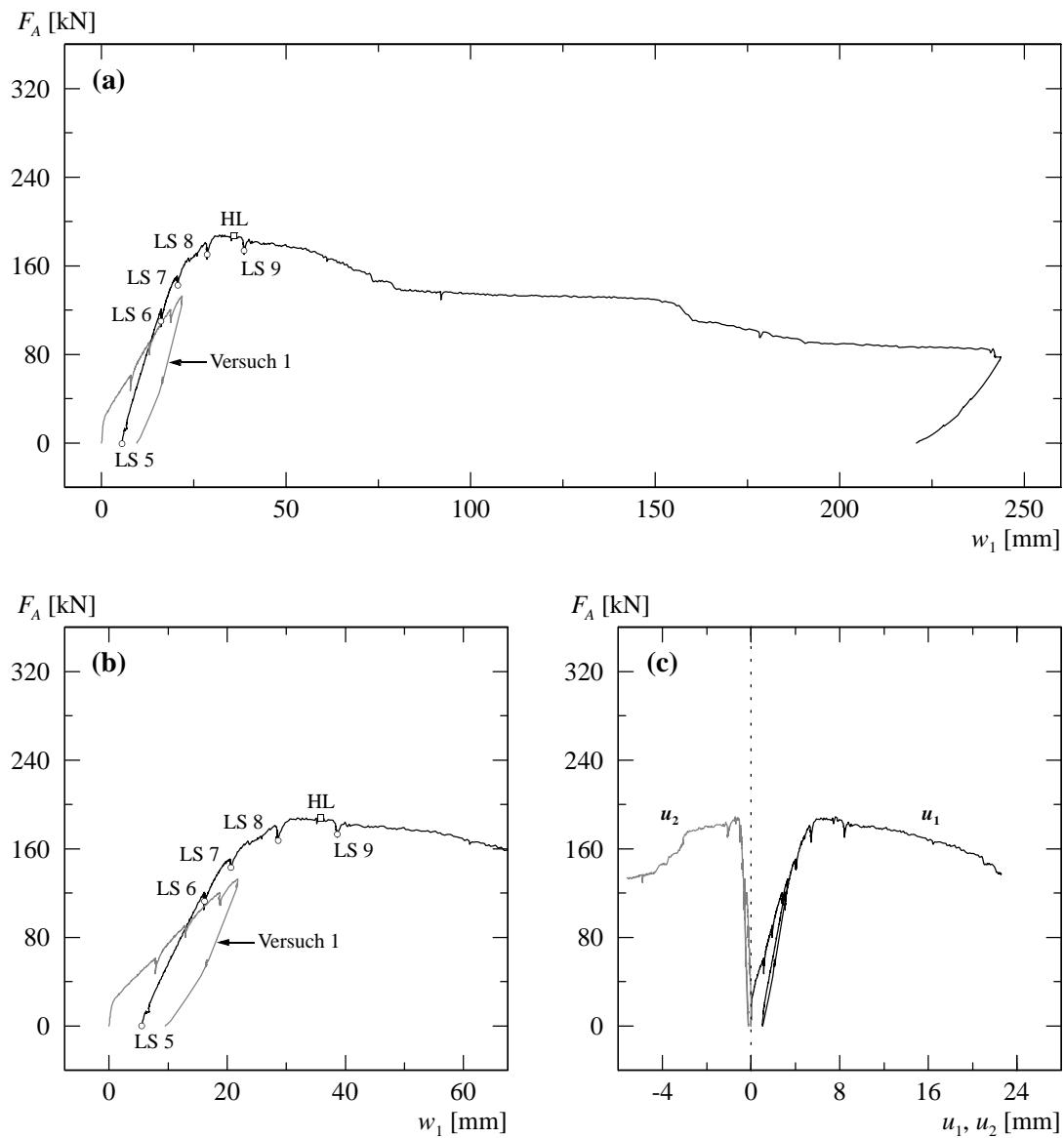


Bild 4.60: A4V2 – (a) und (b) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K1; (c) Verformungen der Zugzone über Auflager NORD.

ästelung der bereits bestehenden Risse beobachtet. Die anfänglich relativ steilen Risse setzten sich nun mit bedeutend flacheren Neigungen gegen das nördliche Lager fort. Die Risse wiesen im unteren Bereich Neigungen von 15 bis 25° gegenüber der x -Achse auf. Im Kragarm erstreckten sich die schrägen Risse über die oberen 95 % und im Mittelfeld über die oberen 85 % der Versuchskörperhöhe. Die Rissbreiten betragen auf der Höhe der oberen Deformatormessreihe 0,15 bis maximal 0,9 mm. Unterhalb der Bereiche, in denen die Biegebewehrungsverankerungen lagen, konnte eine Abnahme der Rissbreiten festgestellt werden; auf halber Versuchskörperhöhe betrugen sie noch 0,05 bis 0,4 mm. Der Längsriss auf der Unterseite im Kragarm verlängerte sich bis zur Lagerplatte und wies an der Stirnseite eine Rissbreite von 0,5 mm auf.

Im weiteren Versuchsfortschritt, zwischen den Laststufen LS 8 und LS 9, wurde bei einer Durchbiegung von $w_1 = 35,8$ mm beim Kragarm K1 die Höchstlast erreicht. Die entsprechende Kraft betrug $F_A = 188,9$ kN.

Nach Erreichen der Höchstlast wurde bei einer Kraft von $F_A \approx 180$ kN und einer Durchbiegung von $w_1 \approx 38,1$ mm die letzte Laststufe LS 9 des zweiten Versuchs durchgeführt. Bei dieser Laststufe konnten die ersten Betonstauchungsrisse auf der Mittelfeldseite und über den Lagerplatten in der Biegendruckzone beim nördlichen Lager festgestellt werden. Weiter wurden auf der Krag-

armseite sowie im zur y -Achse parallel verlaufenden Druckfeld auf der Oberseite (Biegezugzone) leichte Betonstauchungen beobachtet. Neben den Betonstauchungsrissen hatten sich bis zur Laststufe LS 9 kaum neue Risse gebildet. Die bestehenden Risse hatten sich jedoch teilweise verlängert und zusätzlich verästelt. Auf der Oberseite wurde beim nördlichen Lager ein Riss mit einer Breite von 1,4 mm gemessen. Die übrigen Risse über dem Auflager wiesen Breiten von 0,15 bis 0,8 mm auf, während die Rissbreiten im Kragarm und im Mittelfeld 0,05 bis 0,25 mm betragen. Die schrägen Risse auf der Vorder- und Hinterseite hatten sich im Kragarm geringfügig verlängert, wobei die Verlängerungen parallel zum unteren Versuchskörperrand verliefen. Auf der Höhe der oberen Deformatormessreihe wurden über dem nördlichen Lager drei Risse mit maximalen Breiten zwischen 0,8 und 1,2 mm gemessen. Die übrigen Rissbreiten betrugen 0,1 bis 0,45 mm. Unterhalb der Verankerungsbereiche der Biegebewehrung und auf halber Versuchskörperhöhe wiesen die Risse noch Breiten von 0,05 bis 0,5 mm auf. Die Rissbreite des Längsrisses auf der Unterseite im Kragarm betrug an der Stirnseite 0,55 mm.

Anschliessend wurde die Durchbiegung des Kragarms K1 vergrössert. Ab einer Durchbiegung von $w_1 \approx 40$ mm bildeten sich in dem zur y -Achse parallel verlaufenden Druckfeld auf der Oberseite die ersten Betonstauchungsrisse beim nördlichen Lager. Die ersten Abplatzungen von Betonplättchen in der Biegedruckzone wurden ab einer Durchbiegung von $w_1 \approx 60$ mm festgestellt.

Bei einer Durchbiegung von $w_1 \approx 75$ mm versagte der Beton im Verankerungsbereich der Biegebewehrung beim nördlichen Lager, und Teile des Überdeckungsbetons wurden in y -Richtung stark gestaucht. Kurz danach platzten bei einer Durchbiegung von $w_1 \approx 80$ mm auf der Mittelfeldseite beim nördlichen Lager grössere Teile des Überdeckungsbetons an der Unterseite ab. Im weiteren Versuchsfortschritt konnte bei einer Durchbiegung von $w_1 \approx 160$ mm ein erneutes Versagen des Druckfeldes auf der Oberseite beobachtet werden. Inzwischen erstreckte sich die Bruchzone in x -Richtung über eine Länge von 500 bis 550 mm, wobei die Verankerungsbereiche von je fünf Stabpaaren der Biegebewehrung auf der Vorder- und Hinterseite betroffen waren. Die Zerstörung des Druckfeldes führte zu einem vertikalen Versatz der Ankerplatten und zu horizontalen Verschiebungen der Biegebewehrungsstäbe entlang ihrer Stabachse. Bei einer Kragarmdurchbiegung

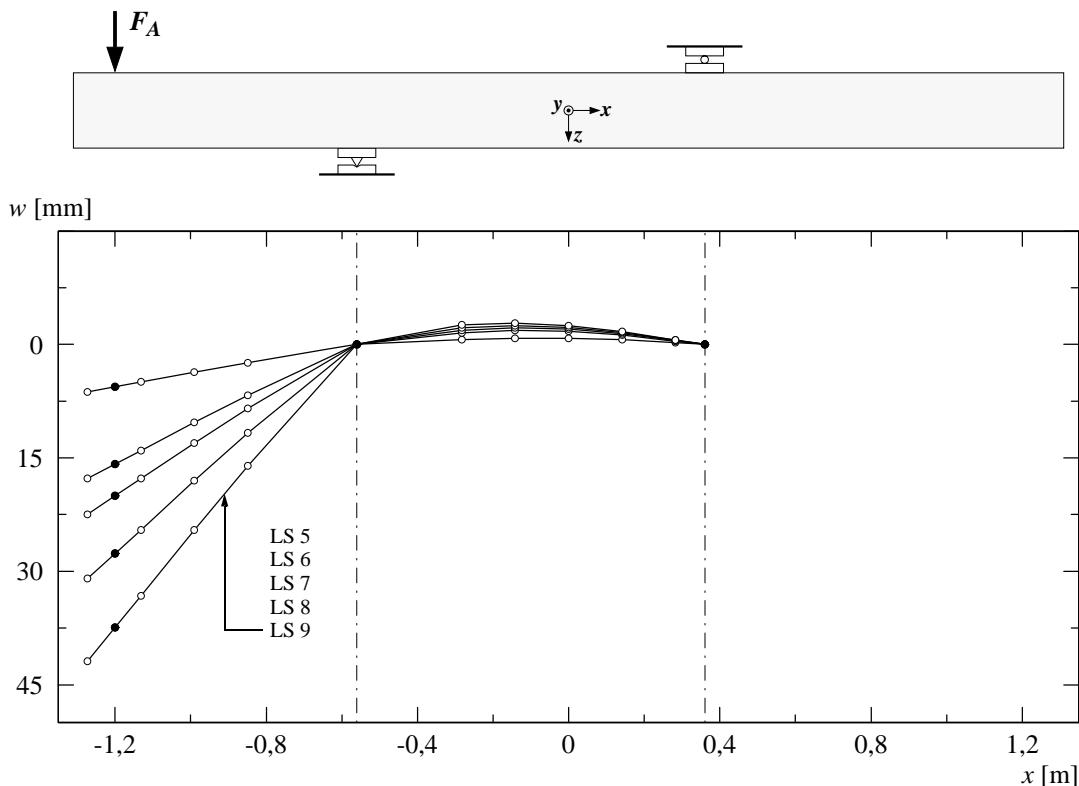


Bild 4.61: A4V2 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

von $w_1 \approx 243$ mm wurde der Versuch abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt noch ungefähr 41 % der Höchstlast. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden.

Für die abschliessende Untersuchung des Versuchskörpers wurde auf der Oberseite der abgeplatzte Überdeckungsbeton der Biegezugzone entfernt. Die Bruchzone dehnte sich beim nördlichen Lager über die ganze Versuchskörperbreite aus und erstreckte sich in den äusseren Viertelsbereichen auf eine Länge von 500 bis 550 mm und im mittleren Bereich auf ungefähr 300 mm. Im Verankerungsbereich von zehn Stabpaaren der Biegebewehrung konnten grosse vertikale Relativverschiebungen der Ankerplatten festgestellt werden, wobei die Querkraftbewehrungsstäbe von je zwei Stabpaaren auf der Vorder- und Hinterseite unterhalb der Biegebewehrungslagen zerrissen waren. Bei den übrigen sechs freigelegten Stabpaaren waren in den Verankerungsbereichen keine Querkraftbewehrungsstäbe angeordnet. An der Unterseite war der Überdeckungsbeton der Biegedruckzone in einem Bereich von 80 bis 100 mm rechts vom nördlichen Lager (im Mittelfeld) abgeplatzt, während die Betonstauchungen auf der linken Seite zu keinen Abplatzungen führten. Die Oberfläche der abgeplatzten Bereiche zeigte neben dem Lager keine Spuren einer Zerstörung der Rissverzahnung oder eines gegenseitigen Abgleitens der Rissflächen.

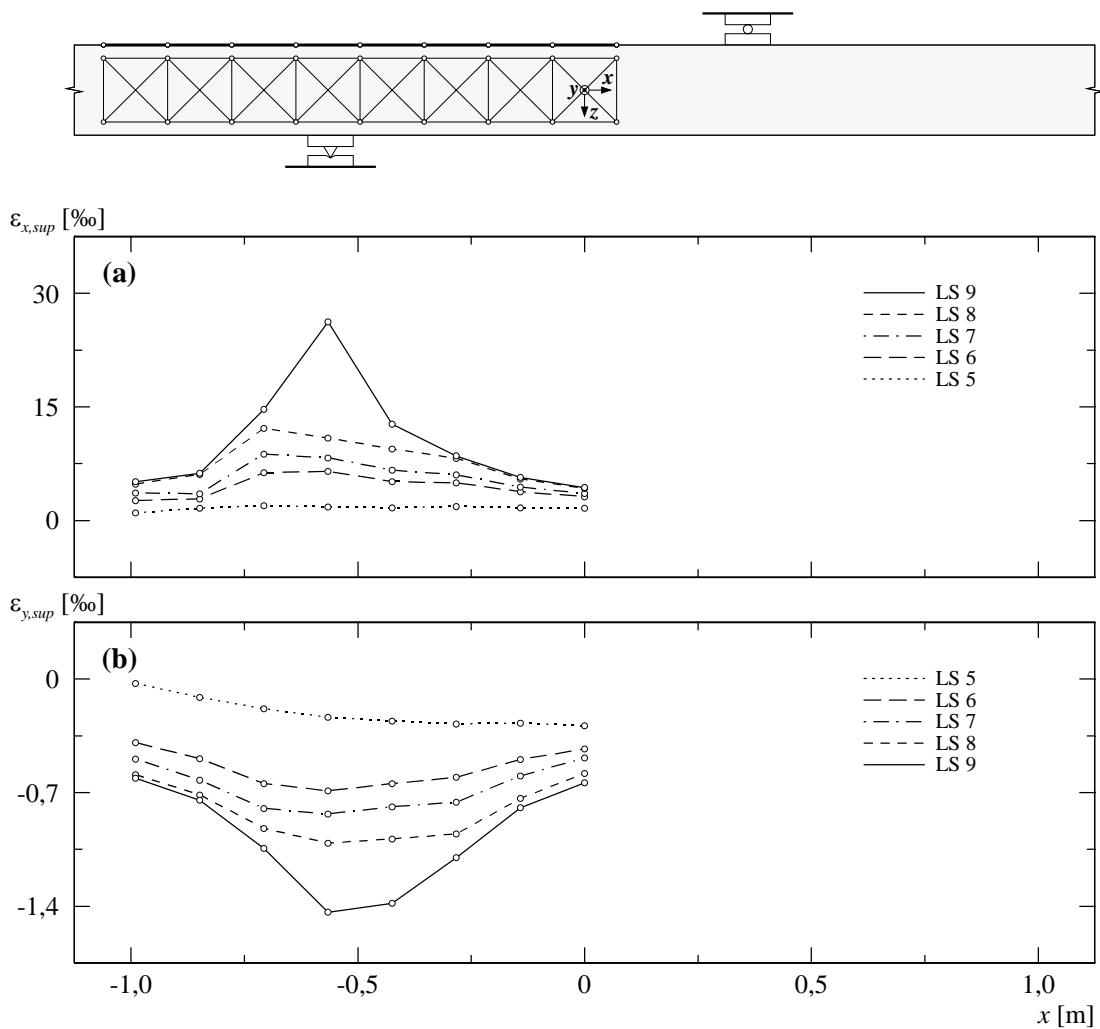


Bild 4.62: A4V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben.

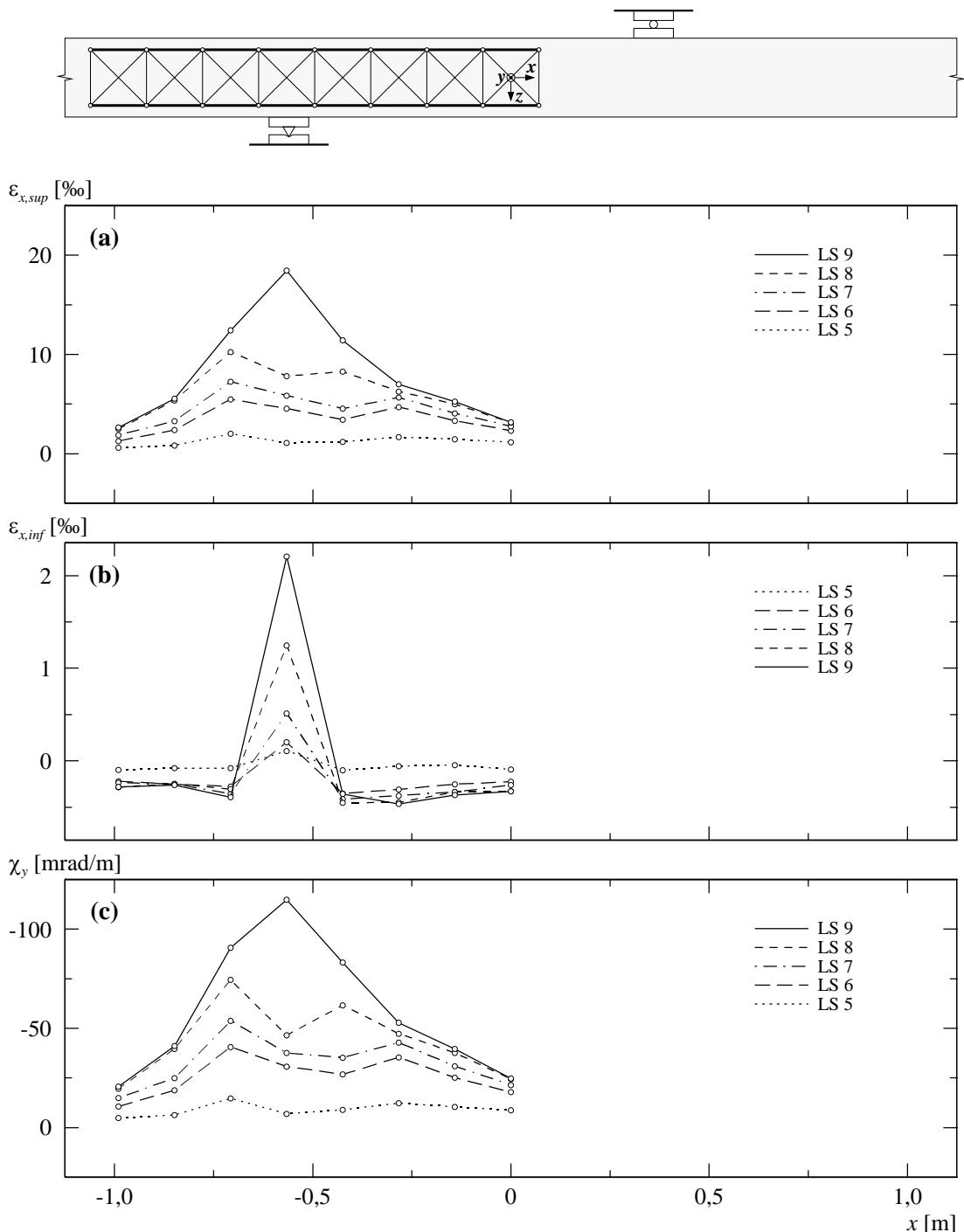


Bild 4.63: A4V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

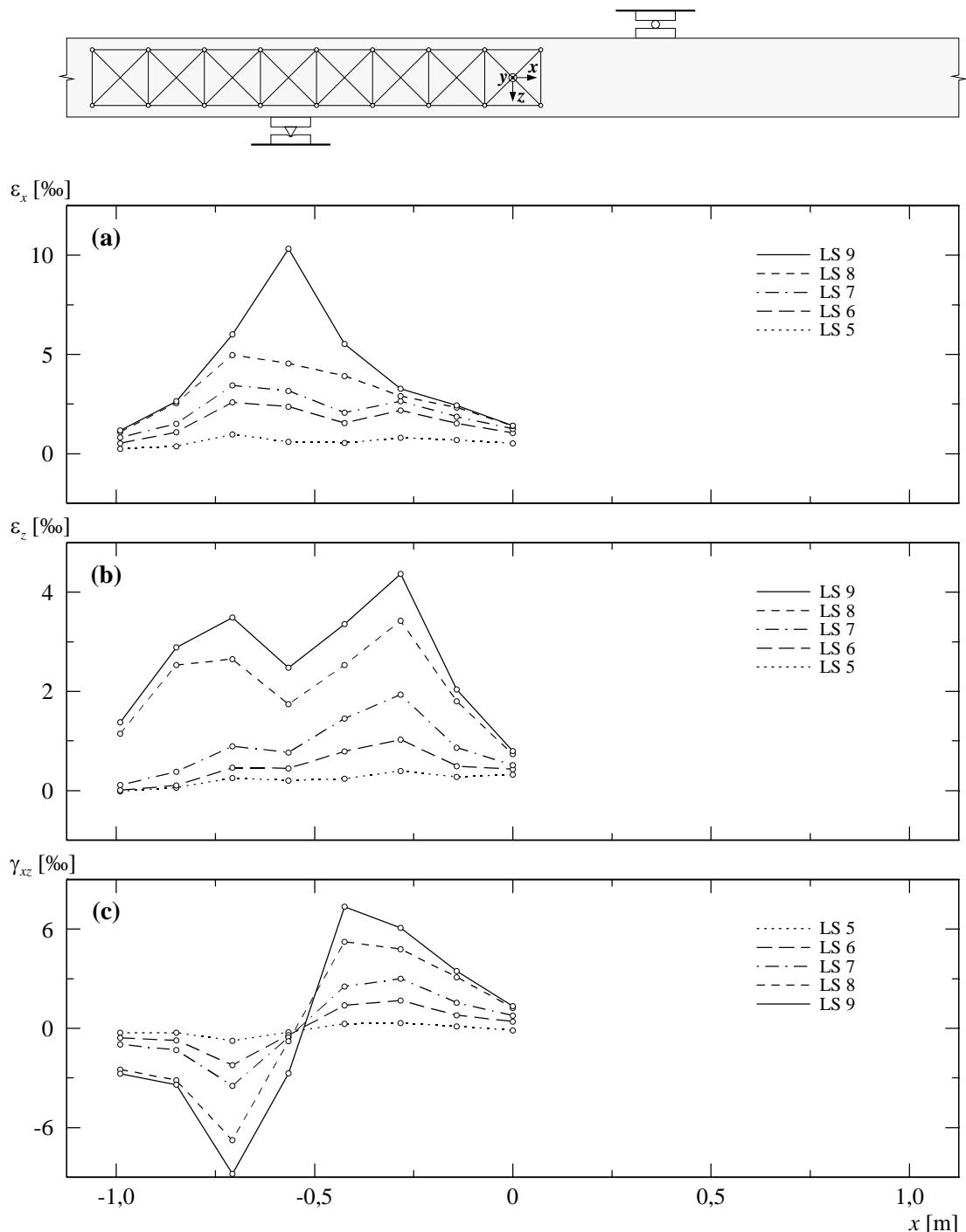
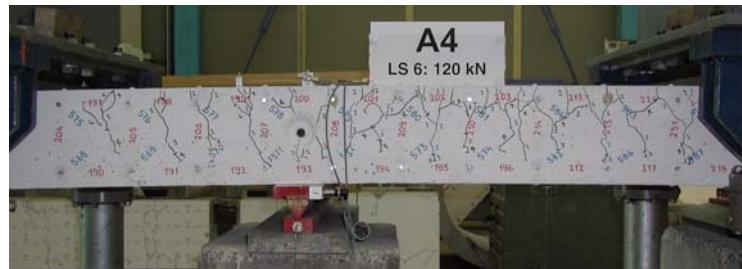


Bild 4.64: A4V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

(a)



(b)

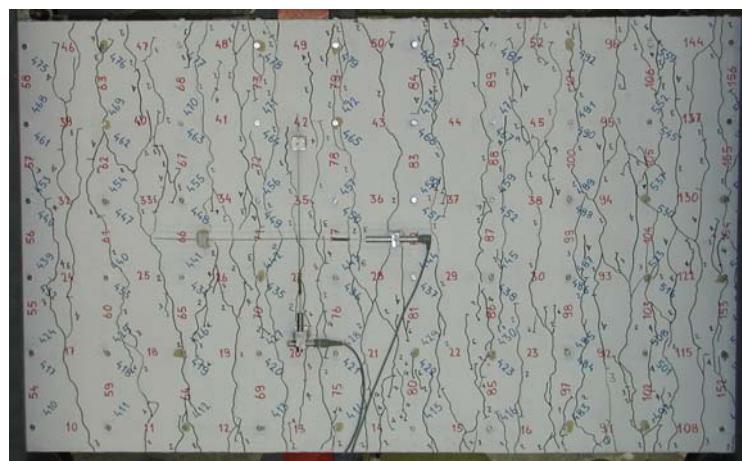
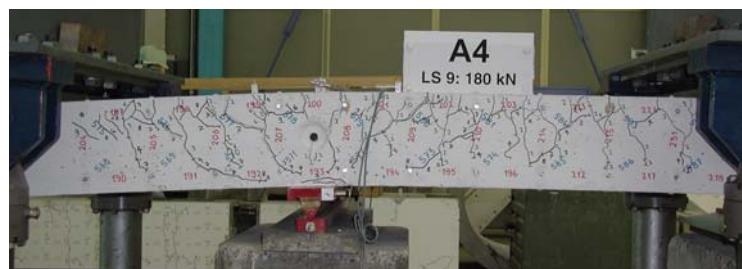


Bild 4.65: A4V2 – Rissbild bei Laststufe LS 6: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

(a)



(b)

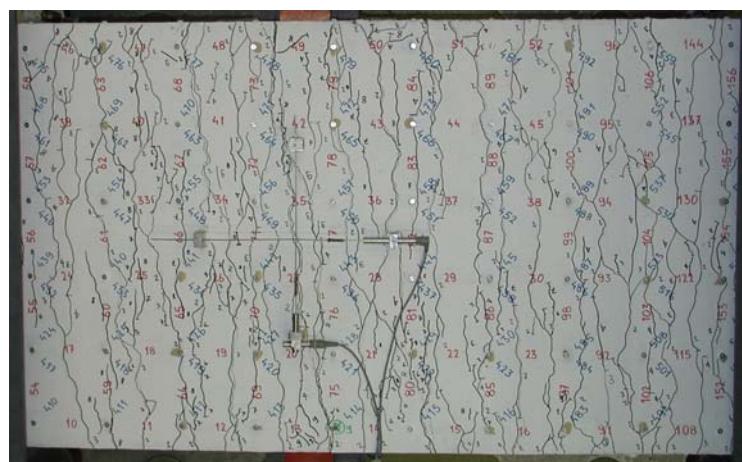
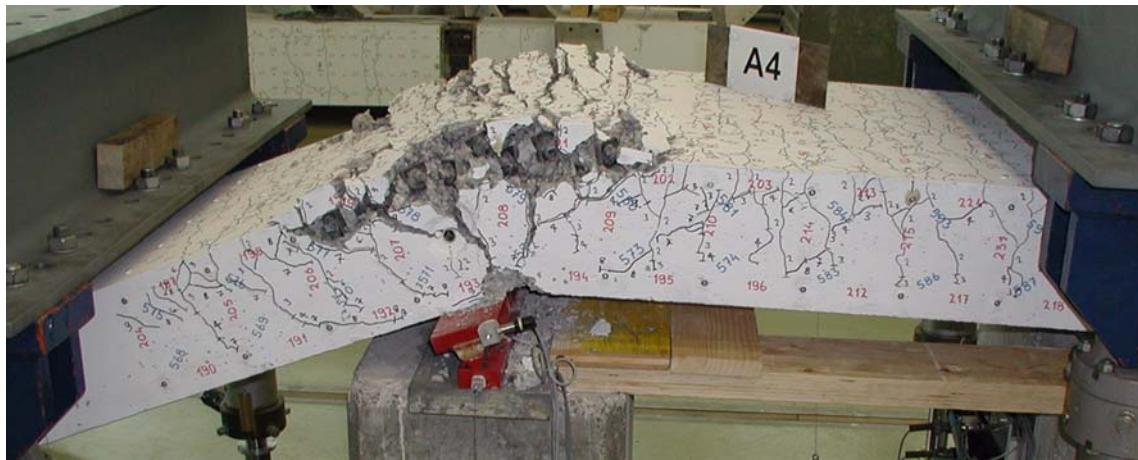
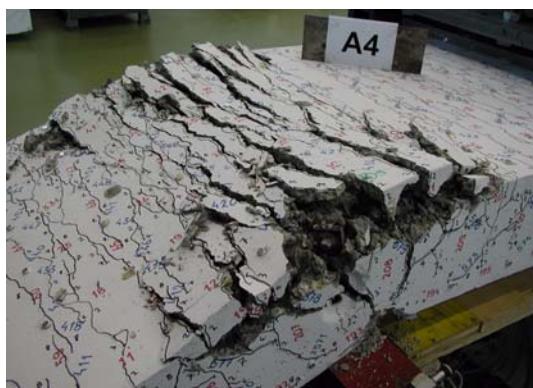


Bild 4.66: A4V2 – Rissbild bei Laststufe LS 9: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

(a)



(b)



(c)



Bild 4.67: A4V2 – Rissbild nach Versuchsende: (a) Vorderseite; (b) Oberseite beim nördlichen Lager; (c) freigelegte Biegebewehrung beim nördlichen Lager.

4.6 Versuchskörper A5

Der Versuchskörper A5 war als Vergleichsversuch zum Versuchskörper A4 konzipiert. Dieser Versuch sollte den Einfluss der Biegebewehrungsrichtungen auf das Trag- und Verformungsverhalten aufzeigen. Der geometrische Bewehrungsgehalt in x -Richtung betrug $\rho_x = 1,056\%$, und für die Bewehrungsrichtung galt $\varphi_0 = 0^\circ$. In der Hauptbewehrungsrichtung (x -Richtung) und Querrichtung (y -Richtung) war je eine Bewehrungslage mit Stäben $\varnothing 12$ mm angeordnet, wobei die Hauptbewehrung einen Stababstand von 60 mm und die Querbewehrung einen solchen von 80 mm aufwies. Die beiden Kragarmbereiche wiesen Querkraftbewehrungsgehalte von $\rho_z = 0\%$ (Kragarm K2) und 0,155 % (Kragarm K1) auf.

4.6.1 Versuch A5V1

Am ersten Versuchstag wurden die beiden Nullmessungen und die Laststufe LS 2 durchgeführt. Die Laststufen LS 3 bis LS 6 folgten am zweiten, die Laststufe LS 7 am dritten Versuchstag. Über Nacht blieb der Versuchskörper jeweils belastet.

Bei einer Kraft von $F_A = F_B \approx 60$ kN wurde die erste Laststufe LS 2 durchgeführt. Der gerissene Bereich erstreckte sich über das Mittelfeld und die erste Hälfte der Kragarme. Die Risse auf der Oberseite wiesen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 75 bis 100 mm Breiten von 0,05 mm auf. Auf der Vorder- und Hinterseite des Versuchskörpers hatten sich ungefähr vertikal verlaufende Risse gebildet. Im Mittelfeld und über den Auflagern reichten diese über die oberen 50 % der Versuchskörperhöhe. Für die folgenden Laststufen wurde bis zum Erreichen der Bruchlast ein Belastungsintervall von $\Delta F_A = \Delta F_B \approx 30$ kN gewählt.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 4 ($F_A = F_B \approx 120$ kN) bildeten sich in den äusseren Bereichen der Kragarme weitere Risse. Die Rissbreiten der vorhandenen Risse vergrösserten sich geringfügig, wobei maximale Rissbreiten von 0,05 bis 0,1 mm gemessen wurden. Auf der Vorder- und Hinterseite verlängerten sich die bereits vorhandenen Risse. Im Kragarm verliefen diese im oberen Bereich vertikal, setzten sich dann aber im mittleren Bereich mit einer leichten

Laststufe (LS)	$F_A = F_B$ [kN]	V_{D1} [kN]	$-M_D$ [kNm]	w_1 [mm]	w_3 [mm]	w_2 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	u_3 [mm]	u_4 [mm]	Bemerkungen
1	0	7,7	4,2	0	0	0	0	0	0	0	Nullmessung
2	60,6 54,3	68,3 62,1	42,9 38,9	3,5 3,6	-1,1 -1,1	3,8 3,9	0,34 0,36	0,02 0,02	0,11 0,10	0,00 0,00	Belastungsende Messende
3	91,1 83,7	98,8 91,4	62,5 57,7	5,7 5,8	-1,6 -1,6	6,1 6,1	0,56 0,57	0,04 0,05	0,28 0,37	-0,01 -0,01	Belastungsende Messende
4	121,2 113,3	128,9 121,0	81,7 76,7	7,8 8,0	-2,1 -2,1	8,2 8,4	0,78 0,79	0,07 0,07	0,56 0,64	-0,01 -0,01	Belastungsende Messende
5	152,0 143,5	159,7 151,2	101,4 96,0	10,2 10,3	-2,7 -2,7	10,6 10,7	1,02 1,02	0,09 0,11	0,84 0,81	-0,01 -0,01	Belastungsende Messende
6	180,5 174,1	188,2 181,8	119,7 115,6	12,9 13,1	-3,4 -3,5	13,3 13,5	1,29 1,30	0,14 0,15	1,05 0,99	-0,01 -0,02	Belastungsende Messende
7	202,7 191,0	210,4 198,7	133,9 126,4	16,1 16,5	-4,5 -4,7	17,0 17,5	1,56 1,56	0,19 0,19	1,45 1,38	-0,02 -0,03	Belastungsende Messende
HL	214,4	222,1	141,4	39,4	-14,2	42,6	3,63	0,29	4,18	-0,04	Höchstlast
Bruch K2	213,0	220,7	140,5	40,5	—	44,1	3,75	0,29	4,38	-0,04	Schubbruch
Entlastung	0	7,7	4,2	43,4	—	50,2	2,36	0,16	—	—	Versuchsende

Tabelle 4.18: A5V1 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 4.1).

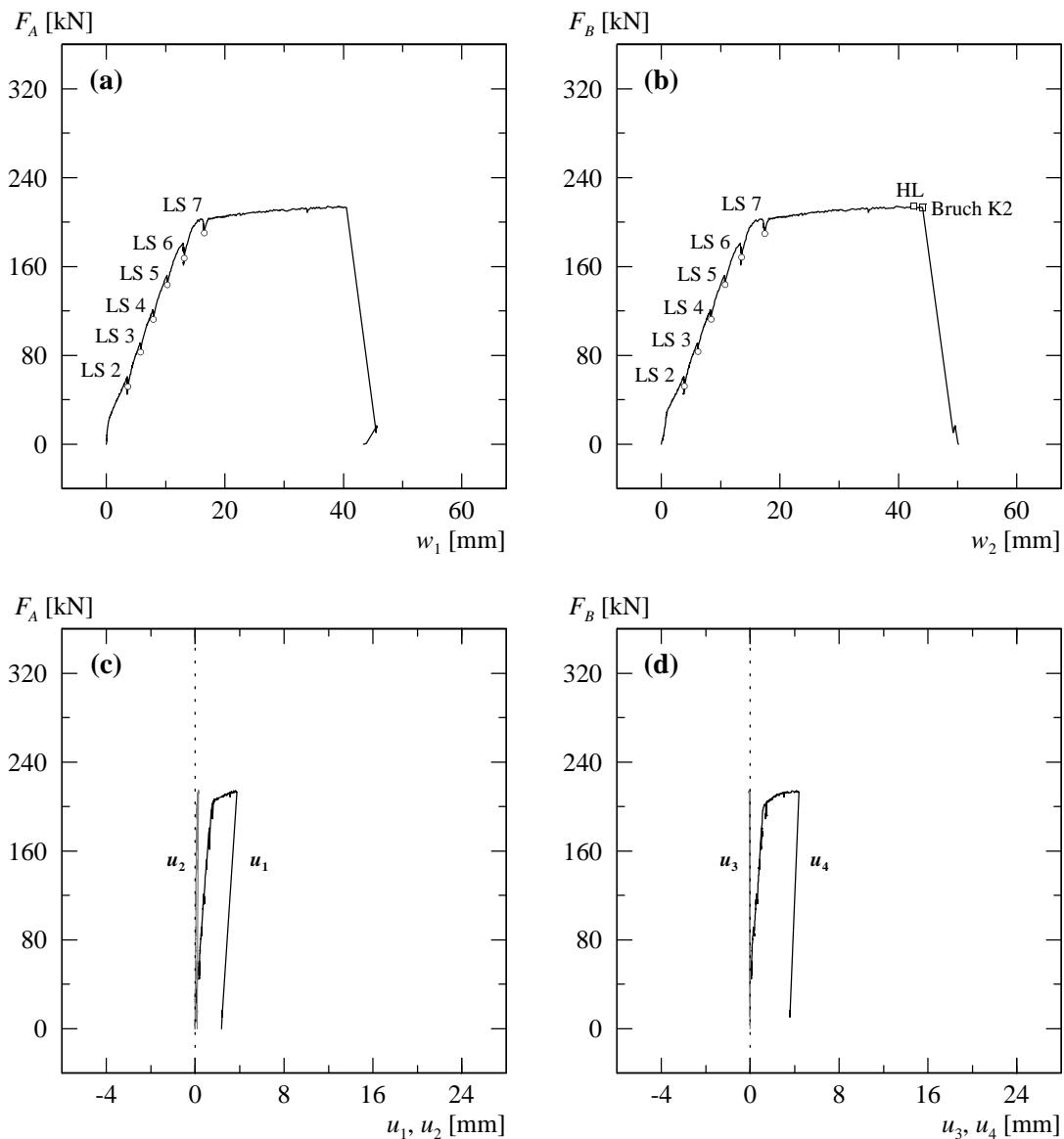


Bild 4.68: A5V1 – (a) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K1; (b) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K2; (c) Verformungen der Zugzone über Auflager NORD; (d) Verformungen der Zugzone über Auflager SÜD.

Neigung gegen die Auflager fort, während diejenigen im Mittelfeld ungefähr vertikal verliefen und sich über die oberen 50 bis 65 % der Versuchskörperhöhe erstreckten.

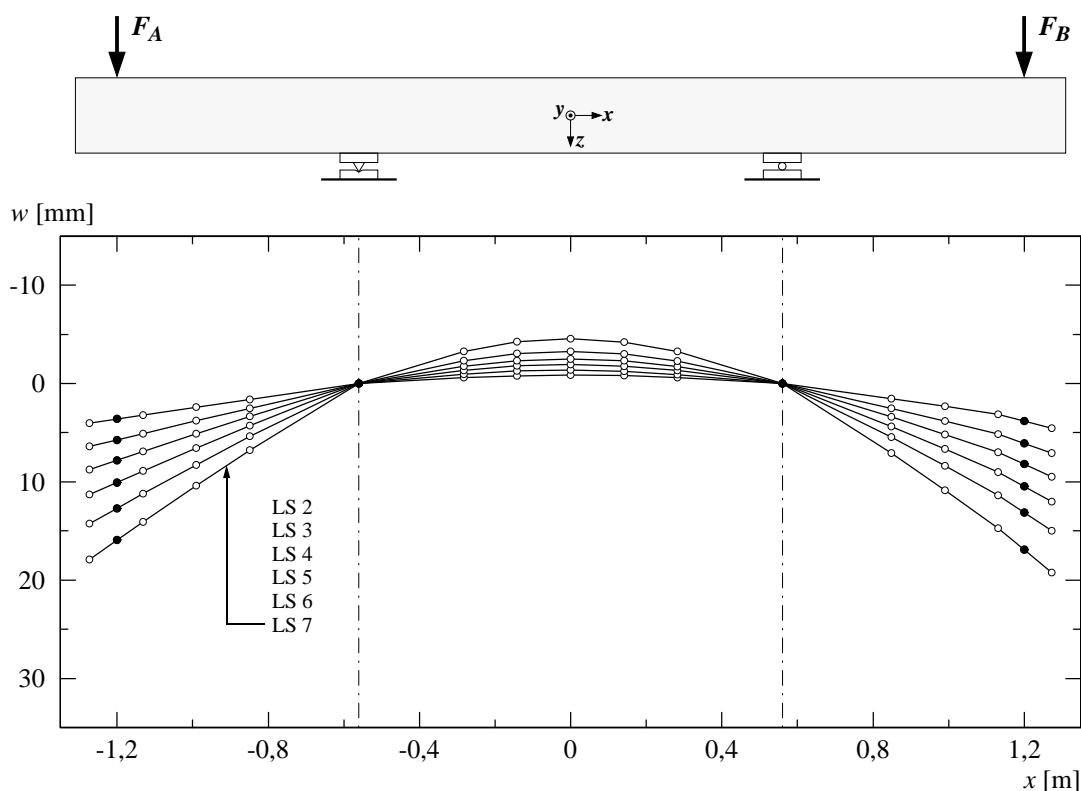
Nach dem Fliessbeginn der Biegebewehrung wurde die letzte Laststufe LS 7 des ersten Versuchs bei einer Kraft von $F_A = F_B \approx 200$ kN durchgeführt. Gegenüber der Laststufe LS 4 hatte sich das Rissbild kaum verändert. Neben der Bildung von je einem neuen Riss bei den Kragarmenden und vereinzelter, in x -Richtung verlaufender Verbundrisse über dem nördlichen Lager (Stelle C) wurde auf der Oberseite eine Vergrösserung der Rissbreiten beobachtet. Beim südlichen Lager wurde ein Riss mit einer Breite von 0,4 mm gemessen. Die übrigen Rissbreiten betragen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 75 bis 100 mm im Mittelfeld und über den Auflagern 0,1 bis 0,3 mm, in den Kragarmen 0,05 bis 0,15 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite wurde die Verlängerung der bereits vorhandenen Risse und die Fortpflanzung der beiden neuen Risse bei den Kragarmenden beobachtet. Dabei erstreckten sich die Risse über die oberen 70 bis 80 % der Versuchskörperhöhe. Die schräg verlaufenden Risse im Kragarm K2 ($\rho_z = 0\%$) hatten sich nun im unteren Bereich flacher fortgesetzt, während sich die Risse im Kragarm K1 bei gleich-

Laststufe	Oberseite					Vorderseite – Kragarm	
	Kragarm K1 w_{cr} [mm]	Lager NORD w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	Lager SÜD w_{cr} [mm]	Kragarm K2 w_{cr} [mm]	$z \approx -70$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 2	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	–
LS 3	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR
LS 4	HR...0,05	0,05...0,10	0,05...0,10	0,05...0,10	HR...0,05	HR...0,10	HR
LS 5	0,05...0,10	0,10...0,15	0,10...0,15	0,10...0,15	0,05...0,10	HR...0,10	HR...0,05
LS 6	0,05...0,10	0,10...0,15	0,10...0,15	0,10...0,15	0,05...0,10	0,05...0,15	HR...0,05
LS 7	0,05...0,10	0,10...0,20	0,10...0,30	0,10...0,40	0,05...0,15	0,05...0,20	HR...0,05
Entlastung	HR...0,10	0,65...0,70	0,25...0,80	0,45...1,00	HR...0,25	0,05...0,35	HR...0,05

Tabelle 4.19: A5V1 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

bleibender Rissneigung verlängert hatten. Die Neigung der Risse betrug im unteren Bereich des Kragarms K2 ungefähr 45 bis 55° gegenüber der x -Achse. Im Mittelfeld konnte nur eine geringfügige Verlängerung der ungefähr vertikal verlaufenden Risse beobachtet werden. Im Kragarm K2 wurden auf der Höhe der oberen Deformettermessreihe (≈ 30 mm unterhalb der Oberkante) Rissbreiten von $0,05$ bis $0,2$ mm und auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) solche von ungefähr $0,05$ mm gemessen.

Im weiteren Versuchsfortschritt wurde die Durchbiegung der beiden Kragarme kontinuierlich vergrößert, wobei in dieser Belastungsphase mehrmals ein Knistern zu hören war. Bei einer Durchbiegung von $w_1 = 39,4$ mm beim Kragarm K1 und $w_2 = 42,6$ mm beim Kragarm K2 wurde die Höchstlast erreicht. Die entsprechende Kraft betrug $F_A = F_B = 214,4$ kN. Gleichzeitig konnten im Mittelfeld vereinzelt feine Betonstauchungsrisse in der Biegedruckzone festgestellt werden. Unmittelbar nach Überschreiten der Höchstlast erfolgte bei einer Kraft von $F_A = F_B = 213,0$ kN ein spröder Schubbruch des Kragarms K2. Die dazugehörenden Durchbiegungen betragen $w_1 = 40,5$ mm beim Kragarm K1 und $w_2 = 44,1$ mm beim Kragarm K2. Der eigentliche Bruchprozess erfolgte schlagartig und ohne Vorankündigung, wobei der untere Betonkeil vollständig abge-

**Bild 4.69:** A5V1 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

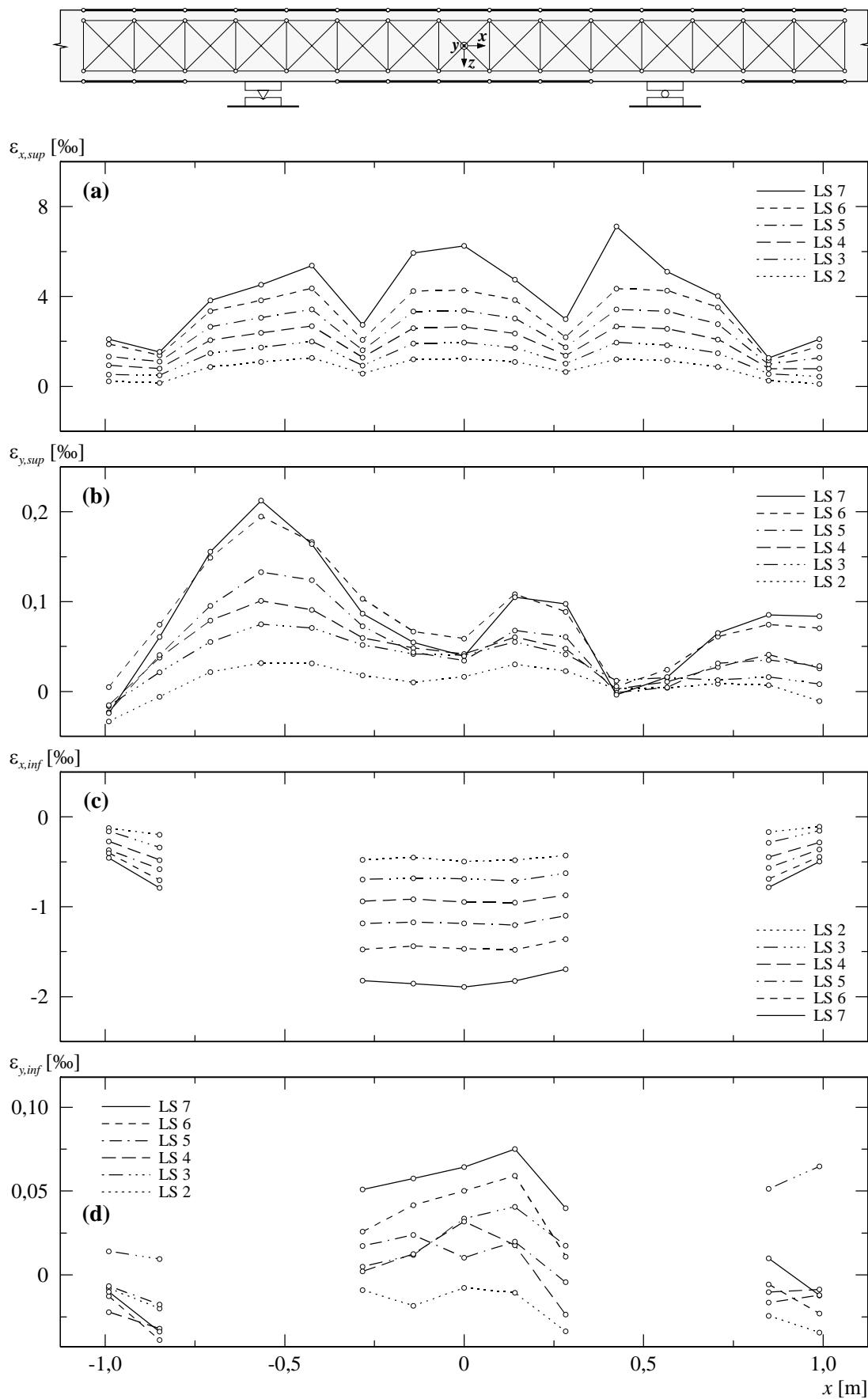


Bild 4.70: A5V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben; (c) mittlere Längsdehnungen unten; (d) mittlere Querdehnungen unten.

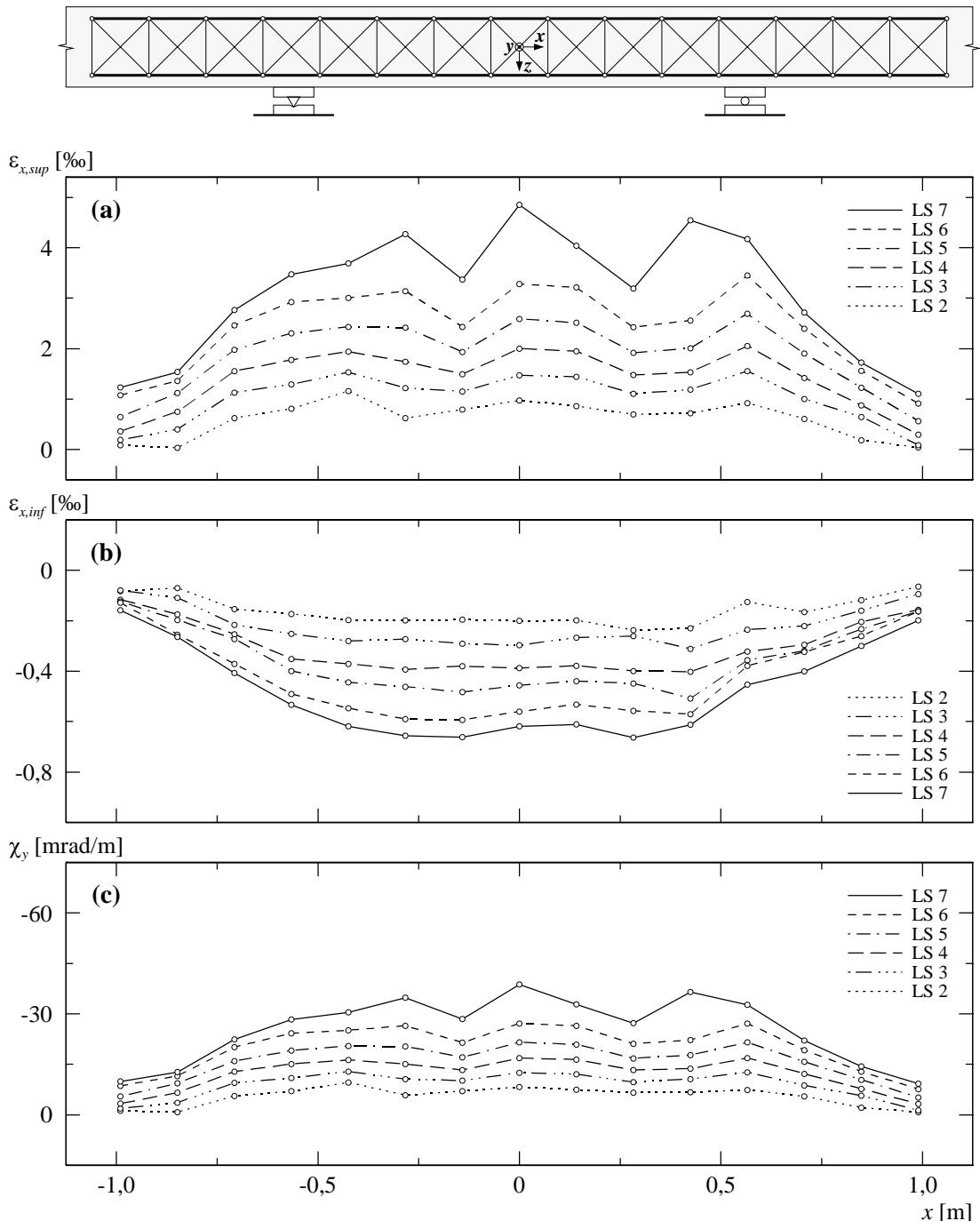


Bild 4.71: A5V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

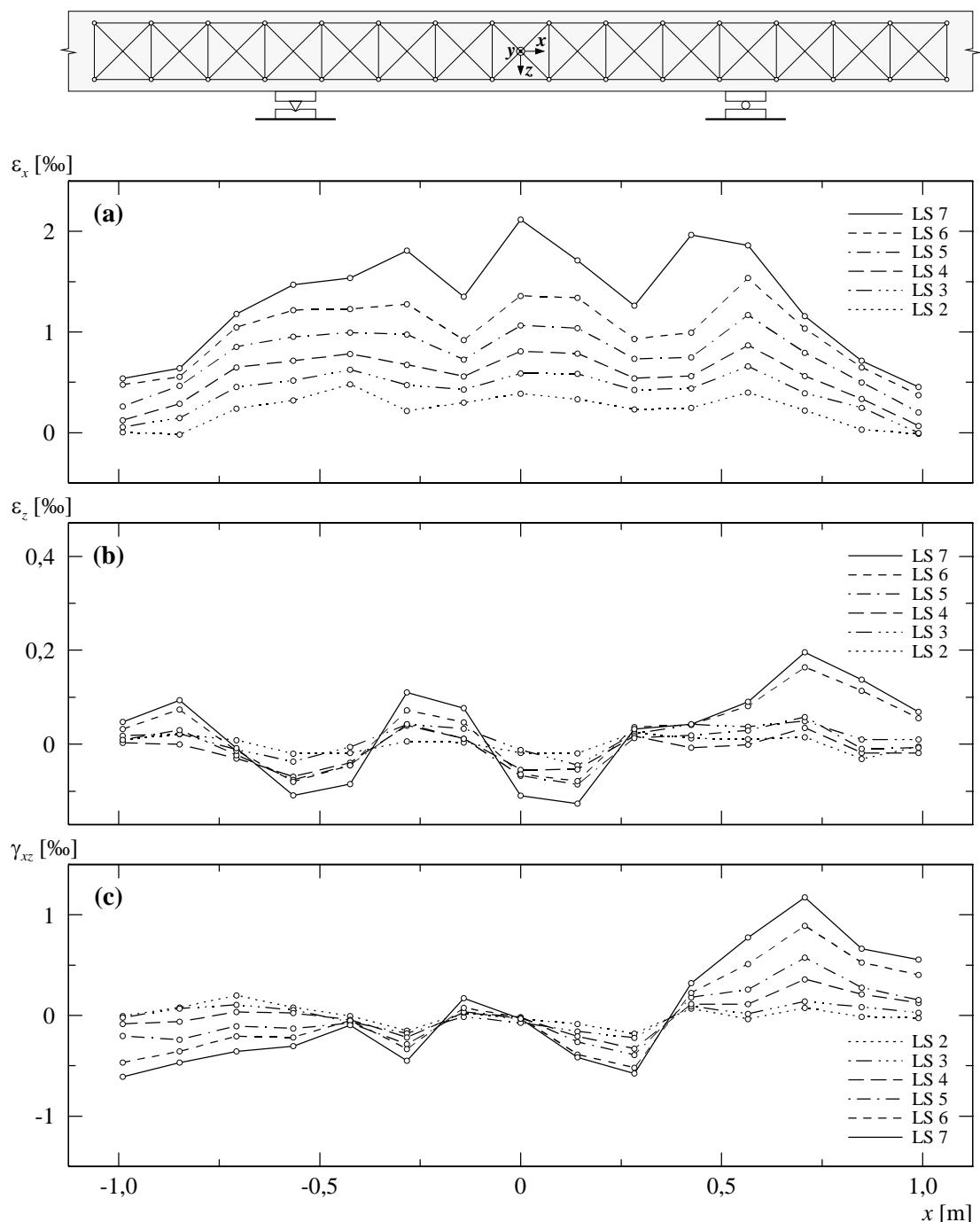
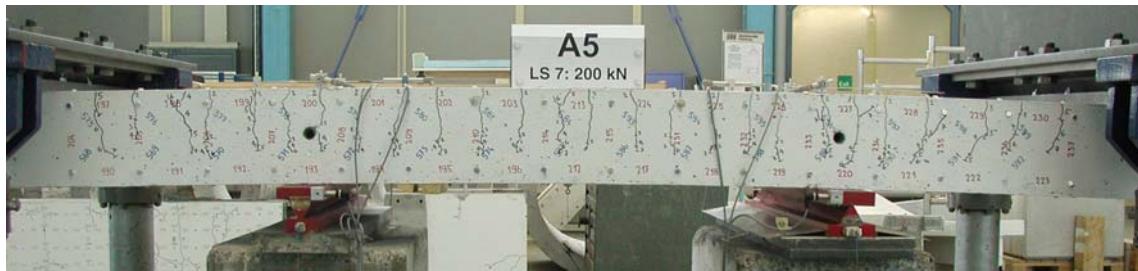


Bild 4.72: A5V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

(a)

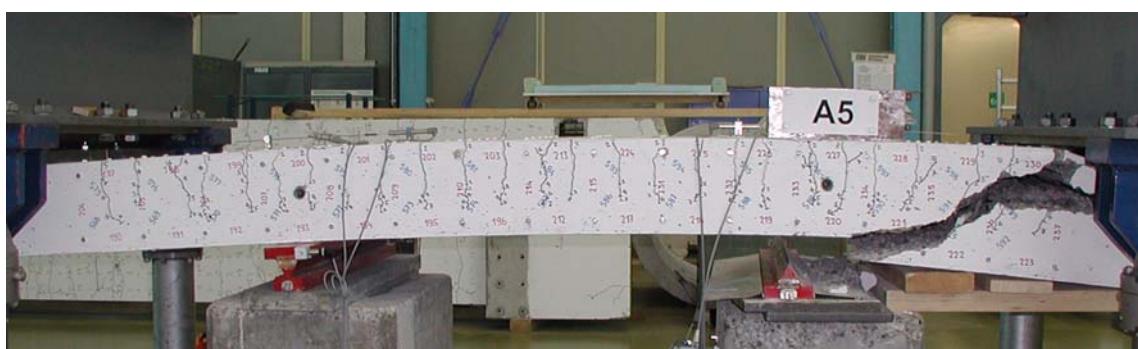


(b)



Bild 4.73: A5V1 – Rissbild bei Laststufe LS 7: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

(a)



(b)

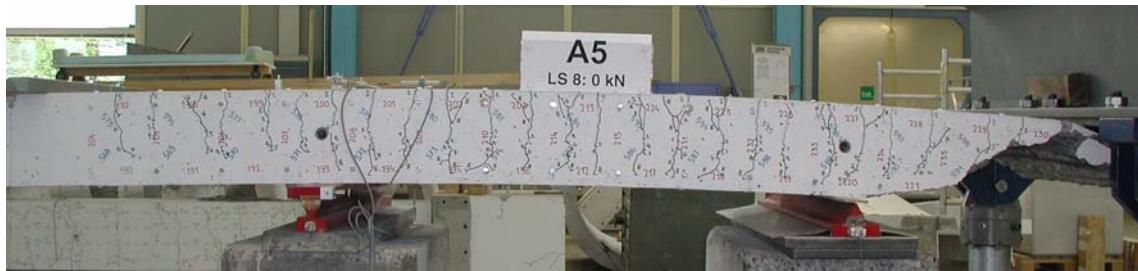


(c)



Bild 4.74: A5V1 – Rissbild nach dem Bruch: (a) Vorderseite; (b) Schubbruch im Kragarm K2; (c) Bruchfläche im Kragarm K2.

(a)



(b)



(c)

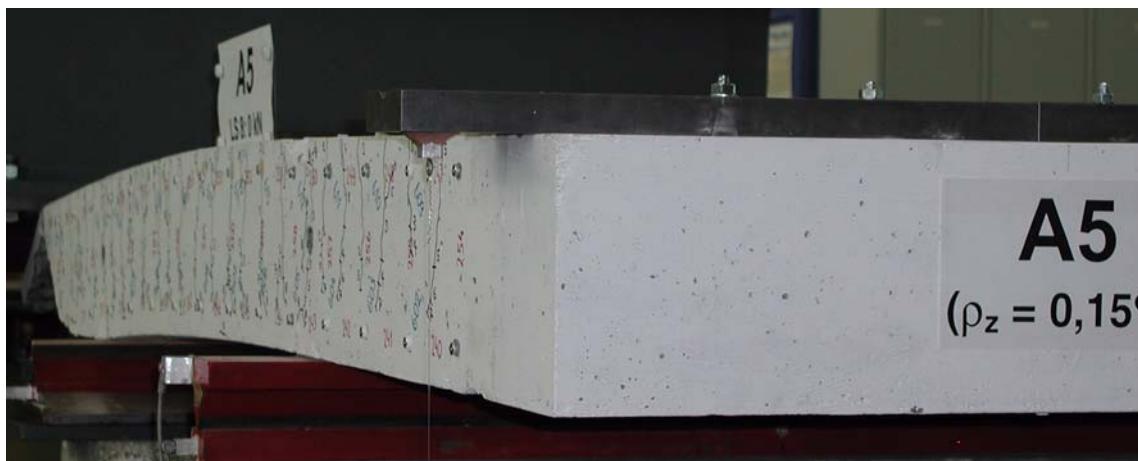


Bild 4.75: A5V1 – Rissbild und plastische Verformungen nach der Entlastung (Laststufe LS 8):
(a) Vorderseite; (b) Oberseite; (c) Seitenansicht.

trennt wurde. Die leicht s-förmig gekrümmte Bruchfläche und der sich bis zur Krafteinleitung erstreckende Trennriss entlang der Biegebewehrung entstanden unmittelbar beim Bruch. Die Steifigkeit der Versuchsanlage genügte nicht, um ein schlagartiges Abtrennen des unteren Betonkeils zu verhindern.

Um die Grösse der plastischen Deformationen festzustellen, die sich bis zum Erreichen der Höchstlast eingestellt hatten, wurden im entlasteten Zustand die Rissbreiten aufgenommen. Die Veränderungen des Rissbildes beschränkten sich auf das Mittelfeld. Dabei bildeten sich auf der Oberseite zwei neue Risse, während sich die bestehenden Risse auf der Vorder- und Hinterseite verlängerten und verästelten. Beim südlichen Lager wurden auf der Oberseite maximale Rissbreiten von 1 mm gemessen. Die übrigen Rissbreiten betrugen im Mittelfeld und über den Auflagern 0,65 bis 0,8 mm, in den Kragarmen 0,05 bis 0,25 mm. Weiter wurde auf der Vorder- und Hinterseite auch die Höhe der Biegendruckzone beziehungsweise des ungerissenen Bereichs bestimmt. Die gemessenen Abstände der Risswurzeln von der Unterseite beliefen sich im Mittelfeld zwischen 18 und 37 mm. Die Rissbreiten auf der Höhe der oberen Deformettermessreihe betragen 0,3 bis maximal 0,8 mm.

Nach Versuchsende wurde der untere Betonkeil entfernt. Die abschliessende Untersuchung zeigte eine rauhe Beschaffenheit der Bruchfläche und einen gleichmässigen Oberflächenverlauf über die Versuchskörperbreite. Der mittlere, steil verlaufende Teil wies eine Neigung von ungefähr 45° gegenüber der x -Achse auf. Im unteren Teil verlief die Bruchfläche über eine Länge von etwa 250 mm bis zum Auflager sehr flach, wobei die Dicke der Abplatzungen in der Biegendruckzone beim Auflagerbereich noch 5 bis 10 mm betrug.

4.6.2 Versuch A5V2

Der Versuch wurde innerhalb eines Tages durchgeführt. Vor der eigentlichen Durchführung des Versuchs erfolgte im unbelasteten Zustand die Deformettermessung der Laststufe LS 8. Diese diente zur Bestimmung der plastischen Verformungen nach dem ersten Versuch, welche beim zweiten Versuch als initiale Vorverformungen berücksichtigt wurden. Anschliessend erfolgte die Belastung des Versuchskörpers und die Durchführung der Laststufen LS 9 bis LS 11.

Laststufe (LS)	F_A [kN]	F_B [kN]	F_C [kN]	$-V_{C1}$ [kN]	$-M_C$ [kNm]	w_1 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	Bemerkungen
8	0	-7,7	12,2	7,7	4,2	20,2	2,36	0,16	Nullmessung
9	201,1 189,8	132,2 124,3	353,2 334,0	208,9 197,5	132,9 125,6	31,8 31,9	3,65 3,64	0,37 0,38	Belastungsende Messende
10	220,8 207,8	145,9 136,9	386,6 364,5	228,6 215,6	145,5 137,2	33,7 34,1	3,91 3,94	0,41 0,40	Belastungsende Messende
11	229,7 215,0	152,1 141,9	401,7 376,8	237,5 222,8	151,2 141,8	42,0 42,6	6,35 6,55	0,46 0,46	Belastungsende Messende
HL	238,3	158,0	416,2	246,0	156,7	59,9	12,00	0,51	Höchstlast
Entlastung	64,9	37,4	122,2	72,6	45,7	201,9	—	—	Entlastungsbeginn

Tabelle 4.20: A5V2 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 4.2).

Bei der Laststufe LS 8 wurden zusätzlich zu den Deformettermessungen auch die Rissbreiten aufgenommen. Beim nördlichen Lager (Stelle C) wurden auf der Oberseite maximale Rissbreiten von 0,65 bis 0,7 mm gemessen. Die übrigen Rissbreiten betragen im Kragarm maximal 0,1 mm und im Mittelfeld 0,25 bis 0,8 mm.

Die Laststufe LS 9 entsprach mit einer Kraft von $F_A \approx 200$ kN dem Belastungsniveau der letzten Laststufe LS 7 des ersten Versuchs. Das Rissbild hatte sich gegenüber der Laststufe LS 8 kaum verändert. Neben der Bildung vereinzelter, in x -Richtung verlaufender Verbundrisse auf der Oberseite und der Verlängerung bestehender Risse auf der Vorder- und Hinterseite, konnte eine Vergrösserung der Rissbreiten beobachtet werden. Auf der Oberseite wurden im Bereich des nördlichen Lagers maximale Rissbreiten von 0,7 bis 1 mm gemessen. Die übrigen Risse wiesen Breiten von 0,05 bis 0,2 mm im Kragarm sowie 0,3 bis 1,05 mm im Mittelfeld auf, und die mittleren Rissabstände betrugen ungefähr 75 bis 100 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite wurden auf der Höhe der oberen Deformettermessreihe (≈ 30 mm unterhalb der Oberkante) Rissbreiten von 0,05 bis 0,5 mm und auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) solche von maximal 0,1 mm gemessen.

Während der Belastung zwischen den Laststufen LS 9 und LS 10 ($F_A \approx 200 \div 210$ kN) bildete sich im Kragarm K1 auf der Unterseite ein Längsriss, der eine Länge von ca. 400 mm hatte und ungefähr parallel zur x -Richtung im mittleren Drittelbereich verlief. Unten an der Stirnseite des Versuchskörpers betrug die Rissbreite 0,15 mm.

Laststufe	Oberseite			Vorderseite – Kragarm	
	Kragarm K1 w_{cr} [mm]	Lager NORD w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	$z \approx -70$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 8	HR...0,10	0,65...0,70	0,25...0,80	0,05...0,35	HR...0,05
LS 9	0,05...0,20	0,70...1,00	0,30...1,05	0,05...0,50	HR...0,10
LS 10	0,05...0,25	0,70...1,05	0,30...1,10	0,05...0,60	HR...0,20
LS 11	0,05...0,25	0,75...1,40	0,30...1,10	0,05...1,10	HR...0,35

Tabelle 4.21: A5V2 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

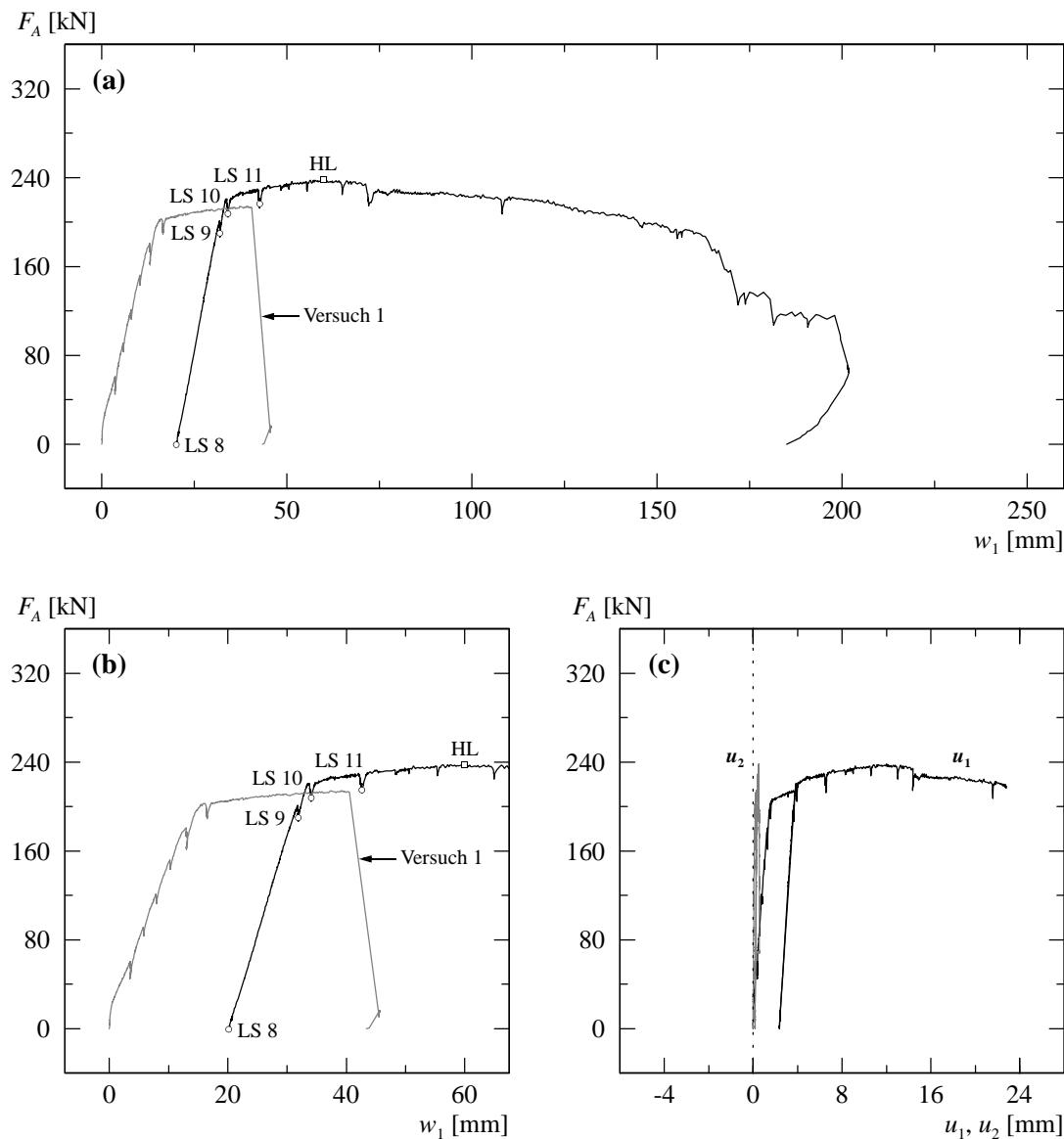


Bild 4.76: A5V2 – (a) und (b) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K1; (c) Verformungen der Zugzone über Auflager NORD.

Nach dem Fliessbeginn der Biegebewehrung wurde die Laststufe LS 10 bei einer Kraft von $F_A \approx 210$ kN durchgeföhrt. Ausser der Bildung eines neuen Risses und der Verlängerung der bestehenden Risse auf der Vorder- und Hinterseite im Kragarm wurde keine grosse Veränderung des Rissbildes beobachtet. Auf der Oberseite beim nördlichen Lager wurden Risse mit Breiten zwischen 0,7 und 1,05 mm gemessen. Die übrigen Risse wiesen im Kragarm noch Breiten von 0,05 bis 0,25 mm auf, während im Mittelfeld die Rissbreiten 0,3 bis maximal 1,1 mm betragen. Auf der Vorder- und Hinterseite erstreckten sich die Risse über die oberen 80 bis 90 % der Versuchskörperhöhe. Die Risse wiesen auf der Höhe der oberen Deformettermessreihe Rissbreiten von 0,05 bis maximal 0,6 mm auf. Die schräg verlaufenden Risse setzten sich im unteren Bereich mit sehr flachen Neigungen fort. Die Neigung der Risse betrug auf halber Versuchskörperhöhe im Kragarm ungefähr 35 bis 55° gegenüber der x -Achse, während die Risse im Mittelfeld ungefähr vertikal verliefen. Im unteren Bereich wurde im Kragarm und im Mittelfeld eine Abflachung der Rissneigungen auf 10 bis 25° beobachtet, wobei die Rissbreiten auf halber Versuchskörperhöhe maximal 0,2 mm betragen.

Im weiteren Versuchsfortschritt wurde die Durchbiegung des Kragarms K1 vergrössert. Die letzte Laststufe LS 11 des zweiten Versuchs wurde bei einer Kraft von $F_A \approx 230$ kN und einer

Durchbiegung von $w_1 \approx 42,0$ mm durchgeführt. Auf der Oberseite hatte sich das Rissbild bis auf vereinzelte Verästelungen der bestehenden Risse nicht verändert. Die Rissbreiten hatten sich hingegen im Bereich des nördlichen Lagers vergrößert und betragen 0,75 bis maximal 1,4 mm, während sich die Breiten der übrigen Risse nicht vergrößerten und im Kragarm zwischen 0,05 bis 0,25 mm sowie im Mittelfeld zwischen 0,3 bis maximal 1,1 mm lagen. Ausser der Verästelung vereinzelter Risse im oberen Bereich hatten sich auf der Vorder- und Hinterseite die schrägen Risse rechts des nördlichen Lagers (Mittelfeldseite) verlängert. Dabei setzten sich diese im unteren Bereich mit flachen Neigungen gegen das nördliche Lager fort. Im Bereich des nördlichen Lagers wurde auf der Höhe der oberen Deformettermessreihe ein Riss mit einer Rissbreite von 1,1 mm gemessen. Die übrigen Rissbreiten betrugen 0,05 bis 0,8 mm. Auf halber Versuchskörperhöhe wurden noch solche von maximal 0,35 mm gemessen. Der Längsriss auf der Unterseite im Kragarm wies an der Stirnseite eine Rissbreite von 0,2 mm auf.

Mit zunehmender Kragarmdurchbiegung konnten bei einer Durchbiegung von $w_1 \approx 50$ mm die ersten Betonstauchungsrisse in der Biegedruckzone auf der Mittelfeldseite beim nördlichen Lager festgestellt werden. Kurz darauf wurde bei einer Durchbiegung von $w_1 = 59,9$ mm beim Kragarm K1 die Höchstlast erreicht. Die entsprechende Kraft betrug $F_A = 238,3$ kN.

Nach dem Überschreiten der Höchstlast lösten sich bei einer Durchbiegung von $w_1 \approx 65$ mm auf der Mittelfeldseite beim nördlichen Lager die ersten Betonplättchen in der Biegedruckzone ab. Anschliessend wurde bei einer Durchbiegung von $w_1 \approx 73$ mm ein Knistern wahrgenommen und die Bildung von SchubrisSEN auf der Vorder- und Hinterseite des Mittelfelds beobachtet. Die Rissneigung betrug 25 bis 35° gegenüber der x -Achse. Im weiteren Versuchsfortschritt konnte bei Kragarmdurchbiegungen von $w_1 \approx 145$ bis 180 mm das Zerreissen von Biegebewehrungs- und Querkraftbewehrungsstäben akustisch wahrgenommen werden. Gleichzeitig platzten rechts beim nördlichen Lager (im Mittelfeld) grössere Teile des Überdeckungsbetons an der Unterseite ab. Bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 201$ mm wurde der Versuch abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt noch ungefähr 27 % der Höchstlast. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden.

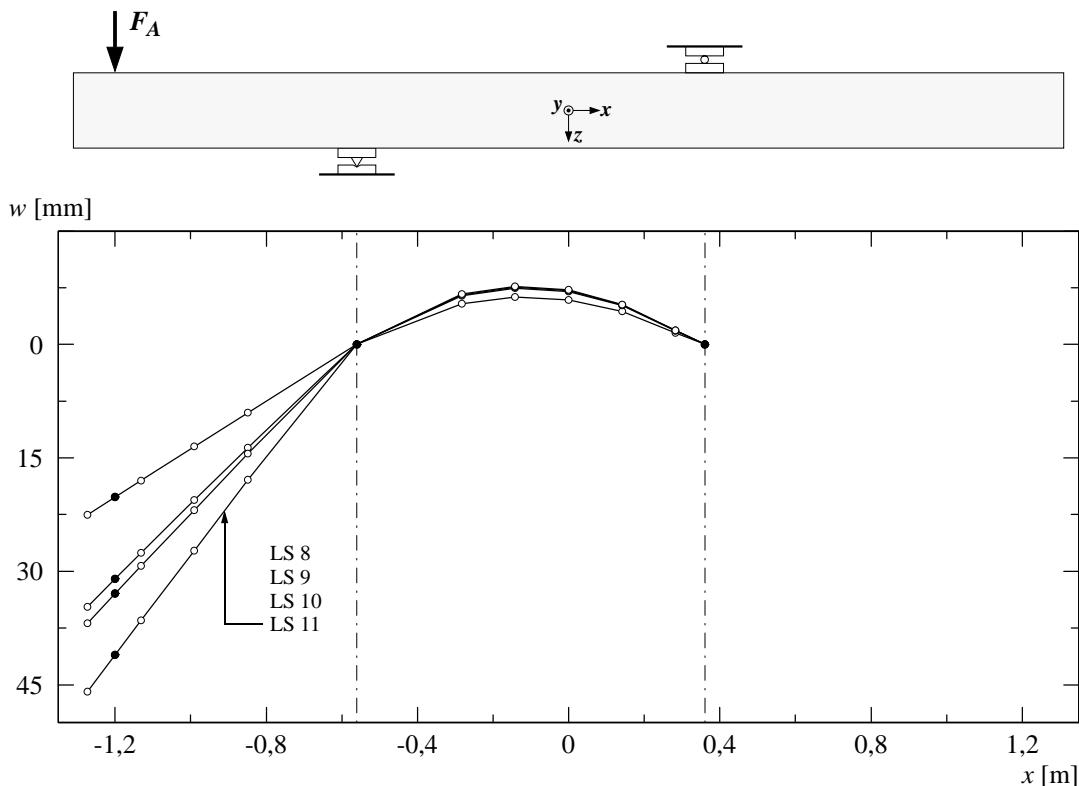


Bild 4.77: A5V2 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

Bei der abschliessenden Untersuchung des Versuchskörpers konnte auf der Mittelfeldseite beim nördlichen Lager eine ausgeprägte Rissfläche festgestellt werden. Diese erstreckte sich mit einer Neigung von 45° gegenüber der x -Achse vom rechten Lagerrand bis zur Oberseite. An der Unterseite war der Überdeckungsbeton der Biegedruckzone in einem Bereich von 120 bis 360 mm rechts vom nördlichen Lager abgeplatzt, wobei die Abplatzungen in unmittelbarer Auflagernähe eine Dicke von ungefähr 30 bis 40 mm aufwiesen. Die unter 45° geneigte Rissfläche zeigte im unteren, oberhalb der Betonüberdeckung liegenden Bereich ($z \approx 60 \div 80$ mm) leichte Spuren einer Zerstörung der Rissverzahnung beziehungsweise eines gegenseitigen Abgleitens der Rissufer. In der ersten Reihe neben dem Auflager waren drei von acht Querkraftbewehrungsstäben in der Rissfläche zerrissen, wobei der äusserste Stab auf der Vorderseite und die vier nebeneinanderliegenden Stäbe auf der Hinterseite intakt blieben. Alle abgetrennten Querkraftbewehrungsstäbe zeigten eine Bruchfläche, die unter einem Winkel von ungefähr 45° gegenüber der Stabachse verlief. Weiter wurden über dem nördlichen Lager sechs zerrissene Biegebewehrungsstäbe Ø 12 mm lokalisiert. Diese befanden sich alle auf der Hinterseite des Versuchskörpers.

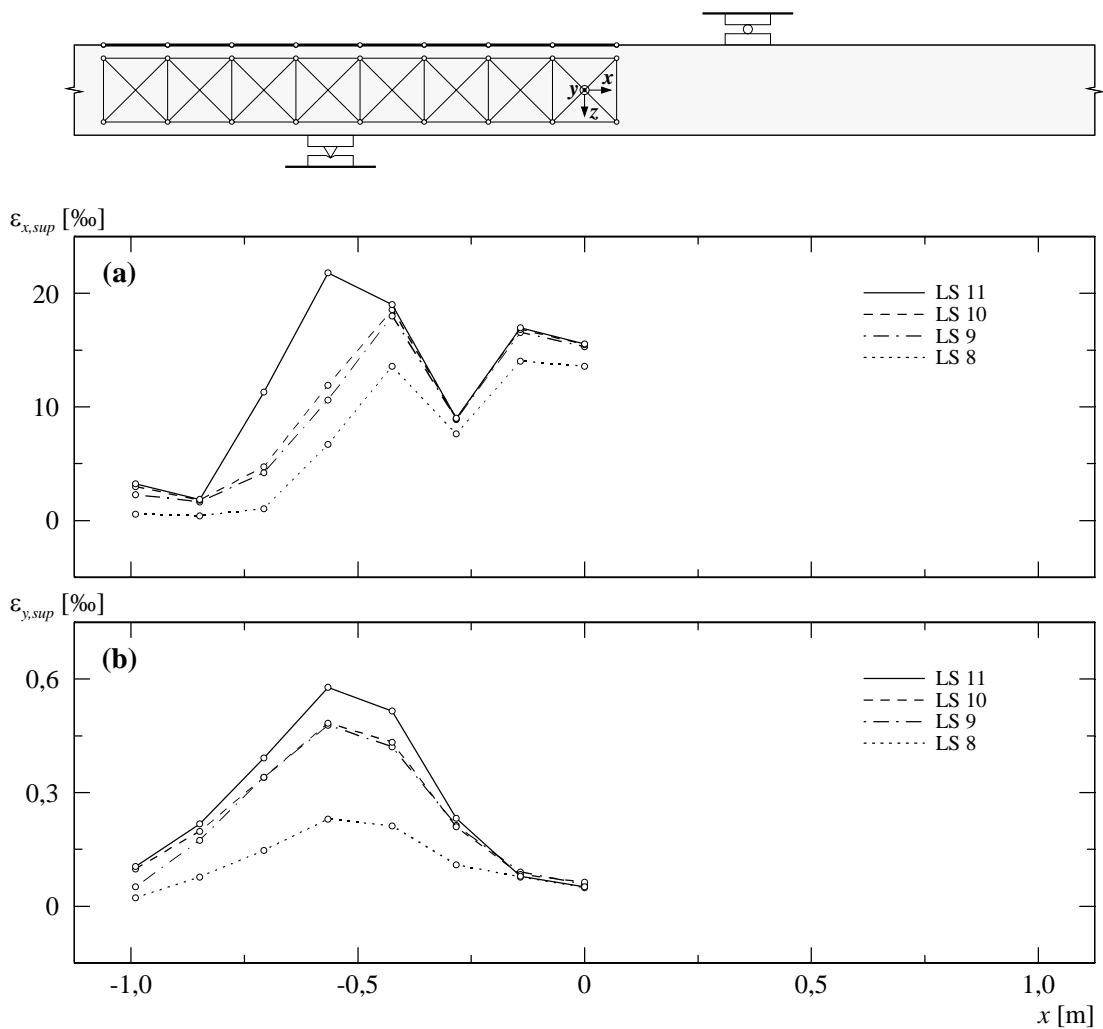


Bild 4.78: A5V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben.

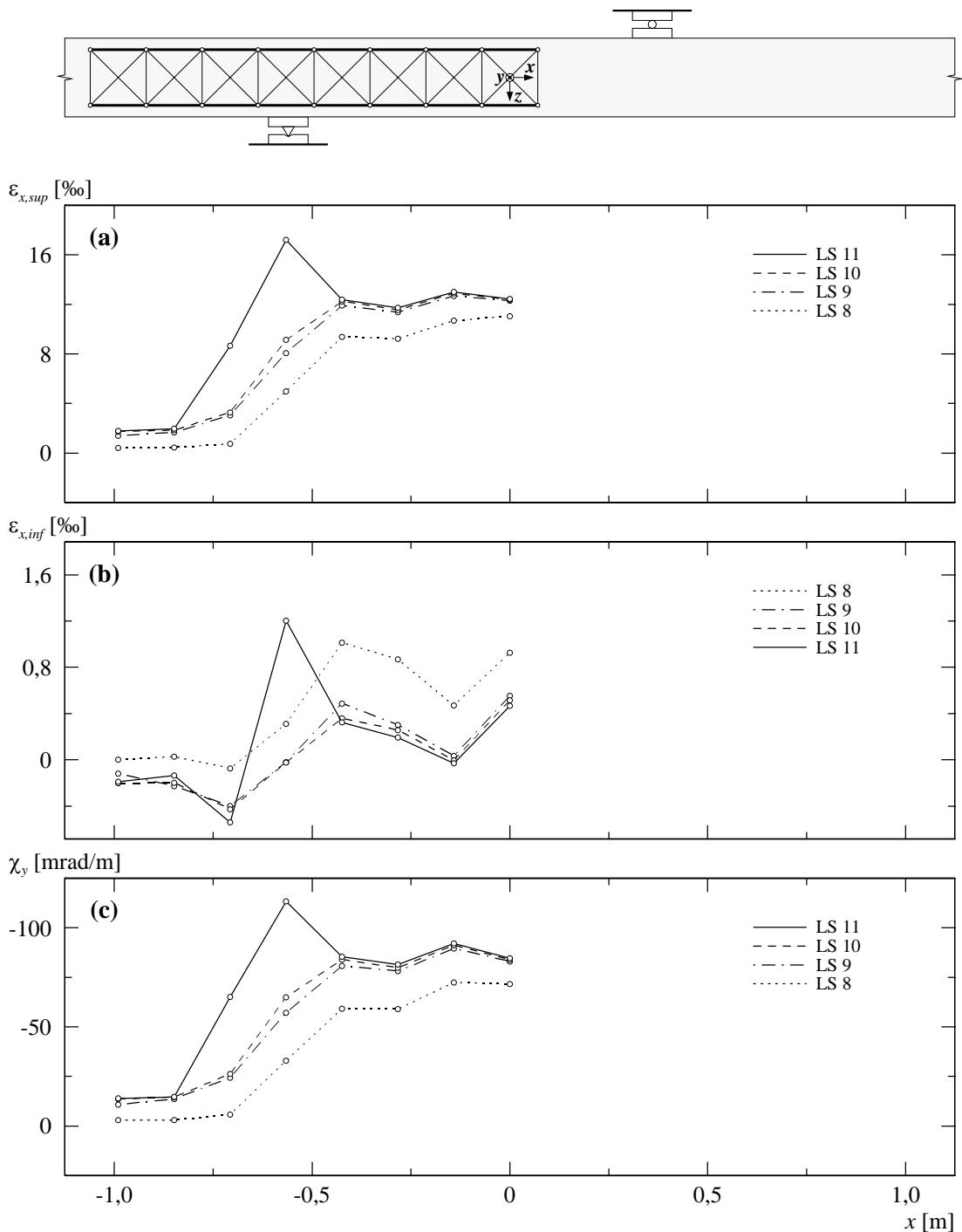


Bild 4.79: A5V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

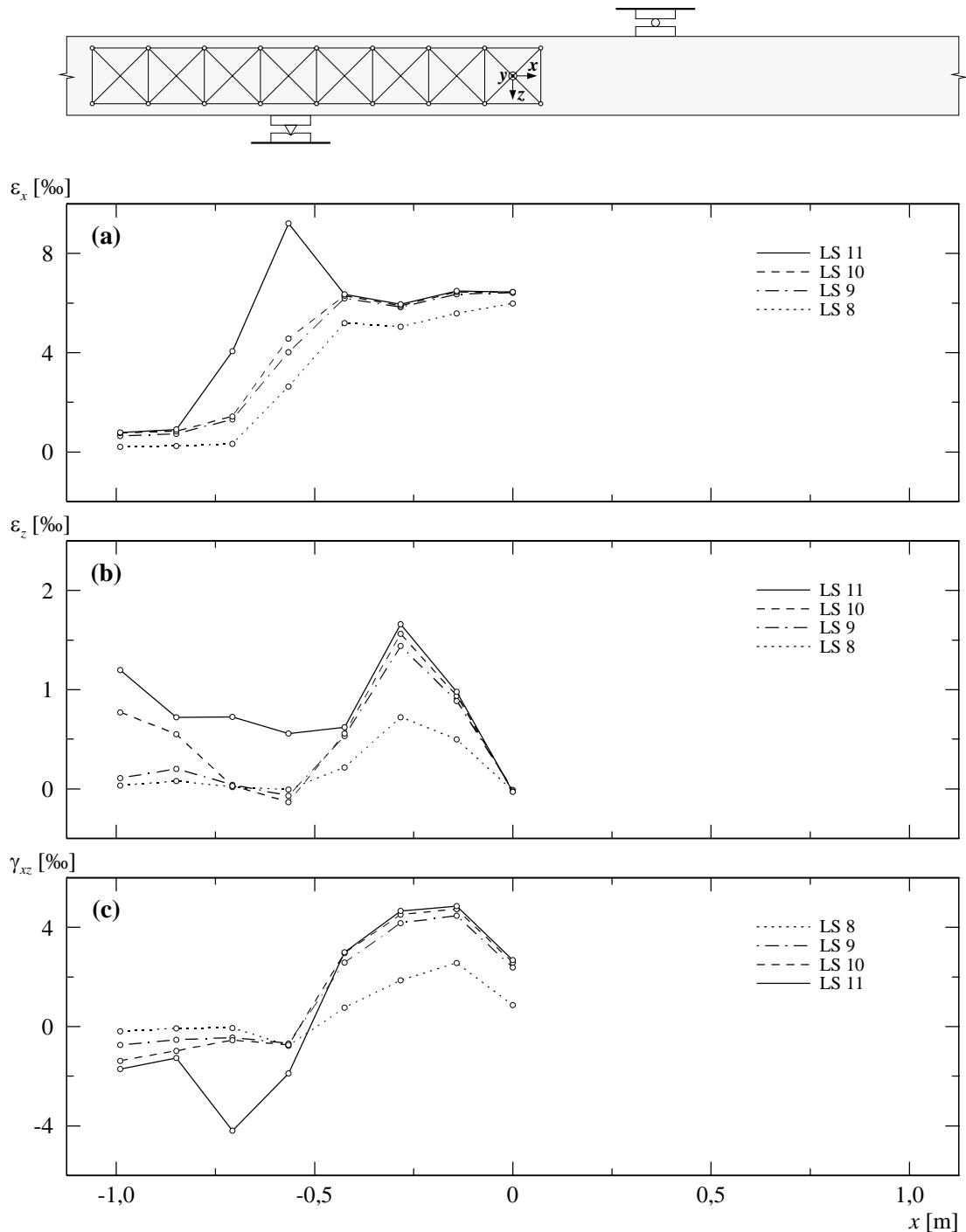
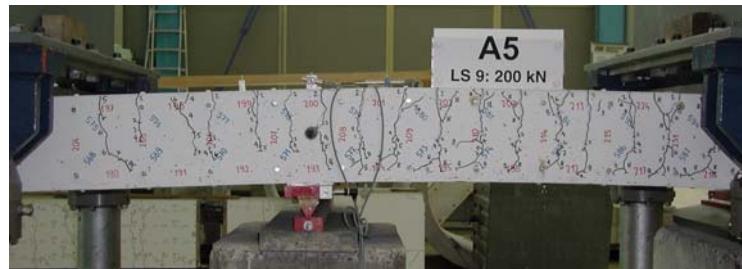


Bild 4.80: A5V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

(a)

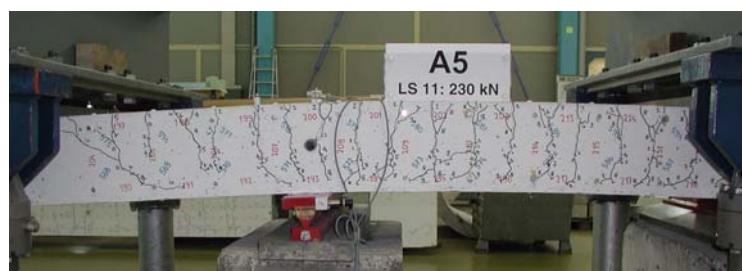


(b)



Bild 4.81: A5V2 – Rissbild bei Laststufe LS 9: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

(a)



(b)

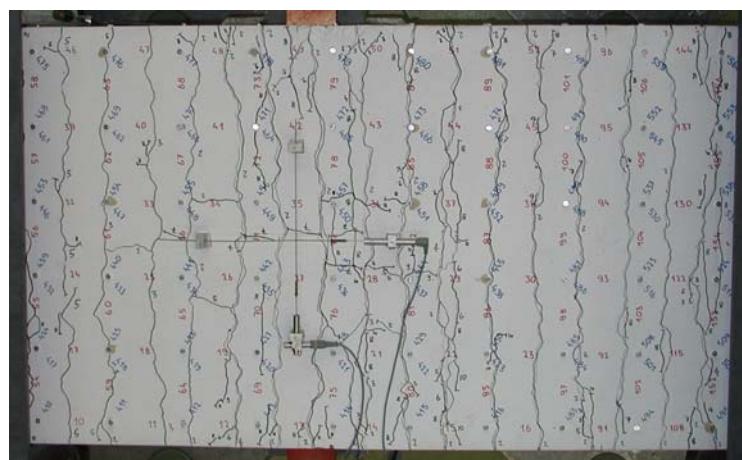


Bild 4.82: A5V2 – Rissbild bei Laststufe LS 11: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

(a)



(b)



(c)



Bild 4.83: A5V2 – Rissbild nach Versuchsende: (a) Vorderseite; (b) Oberseite beim nördlichen Lager; (c) Bruchzone beim nördlichen Lager.



Bild 4.84: Versuchskörper A5 – Freigelegte Biegebewehrung beim nördlichen Lager.

4.7 Versuchskörper A6

Der Biegebewehrungsgehalt des Versuchskörpers A6 war mit demjenigen des Versuchskörpers A4 identisch. Im Gegensatz zum Versuchskörper A4 wurde die Biegebewehrung in den Kragarmen abgestuft, wobei Spannungsfelder mit unterschiedlichen Druckfeldneigungen für die Bestimmung des resultierenden Längszugkraftverlaufs verwendet wurden. Die entsprechenden Druckfelder wiesen eine Neigung von 45° ($\cot \theta = 1$) im Kragarm K2 und $26,6^\circ$ ($\cot \theta = 2$) im Kragarm K1 auf. Der fiktive geometrische Bewehrungsgehalt in x -Richtung betrug $\rho_x = 0,952\%$, und für die Bewehrungsrichtung galt $\varphi_0 = 45^\circ$. In beiden Bewehrungsrichtungen (n - und t -Richtung) war eine Bewehrungslage mit Stäben Ø 12 mm und einem Stababstand von 60 mm angeordnet. Die beiden Kragarmbereiche wiesen identische Querkraftbewehrungsgehalte von $\rho_z = 0,156\%$ auf.

4.7.1 Versuch A6V1

Am ersten Versuchstag wurden die beiden Nullmessungen sowie die Laststufen LS 2 und LS 3 durchgeführt. Die Laststufen LS 4 bis LS 6 folgten am zweiten, die Laststufe LS 7 am dritten Versuchstag. Über Nacht blieb der Versuchsträger jeweils belastet.

Bei einer Kraft von $F_A = F_B \approx 60$ kN wurde die erste Laststufe LS 2 durchgeführt. Der gerissene Bereich erstreckte sich über das Mittelfeld und die erste Hälfte der Kragarme. Die Risse auf der Oberseite wiesen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 80 bis 100 mm Breiten zwischen 0,05 und 0,1 mm auf. Auf der Vorder- und Hinterseite des Versuchskörpers hatten sich ungefähr vertikal verlaufende Risse gebildet. Im Mittelfeld und über den Auflagern reichten diese über die oberen zwei Drittel der Versuchskörperhöhe. Für die folgenden Laststufen wurde bis zum Erreichen der Bruchlast ein Belastungsintervall von $\Delta F_A = \Delta F_B \approx 30$ kN gewählt.

Während der Belastung zwischen den Laststufen LS 3 und LS 4 ($F_A = F_B \approx 90 \div 120$ kN) bildete sich in den Kragarmen auf der Unterseite je ein Längsriss. Der Riss im Kragarm K1 ($\theta = 26,6^\circ$) hatte eine Länge von ca. 450 mm und verlief ungefähr in Versuchskörpermitte parallel zur x -Richtung, während der Riss im Kragarm K2 ($\theta = 45^\circ$) eine Länge von ca. 350 mm aufwies und mit einer leichten Neigung gegenüber der x -Achse in der vorderen Versuchskörperhälfte

Laststufe (LS)	$F_A = F_B$ [kN]	V_{D1} [kN]	$-M_D$ [kNm]	w_1 [mm]	w_2 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	u_3 [mm]	u_4 [mm]	Bemerkungen
1	0	7,8	4,2	0	0	0	0	0	0	Nullmessung
2	60,3 52,7	68,0 60,5	42,8 37,9	5,6 5,7	6,1 6,2	0,63 0,65	-0,01 -0,02	0,78 0,81	-0,05 -0,05	Belastungsende Messende
3	89,8 82,4	97,6 90,2	61,7 56,9	10,1 10,4	11,0 11,3	1,29 1,34	-0,06 -0,07	1,53 1,56	-0,10 -0,11	Belastungsende Messende
4	120,0 110,4	127,8 118,2	81,0 74,8	15,4 15,5	17,0 17,0	2,10 2,12	-0,14 -0,16	2,22 2,20	-0,17 -0,19	Belastungsende Messende
5	150,4 138,2	158,2 145,9	100,4 92,6	22,0 22,1	23,6 23,7	3,01 3,01	-0,24 -0,27	3,04 3,04	-0,28 -0,30	Belastungsende Messende
6	167,5 155,2	175,3 163,0	111,4 103,5	27,1 27,3	29,7 29,8	3,60 3,60	-0,31 -0,34	3,81 3,85	-0,38 -0,40	Belastungsende Messende
7	172,3 161,5	180,0 169,3	114,4 107,5	31,3 31,3	36,2 36,5	3,99 3,97	-0,38 -0,37	4,44 4,41	-0,47 -0,48	Belastungsende Messende
HL	173,2	181,0	115,1	32,4	38,2	4,08	-0,38	4,64	-0,49	Höchstlast
Entlastung	66,7 0	74,5 7,8	46,9 4,2	44,9 34,1	202,4 181,5	2,57 1,34	-0,32 -0,20	— —	— —	Entlastungsbeginn Versuchsende

Tabelle 4.22: A6V1 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 4.1).

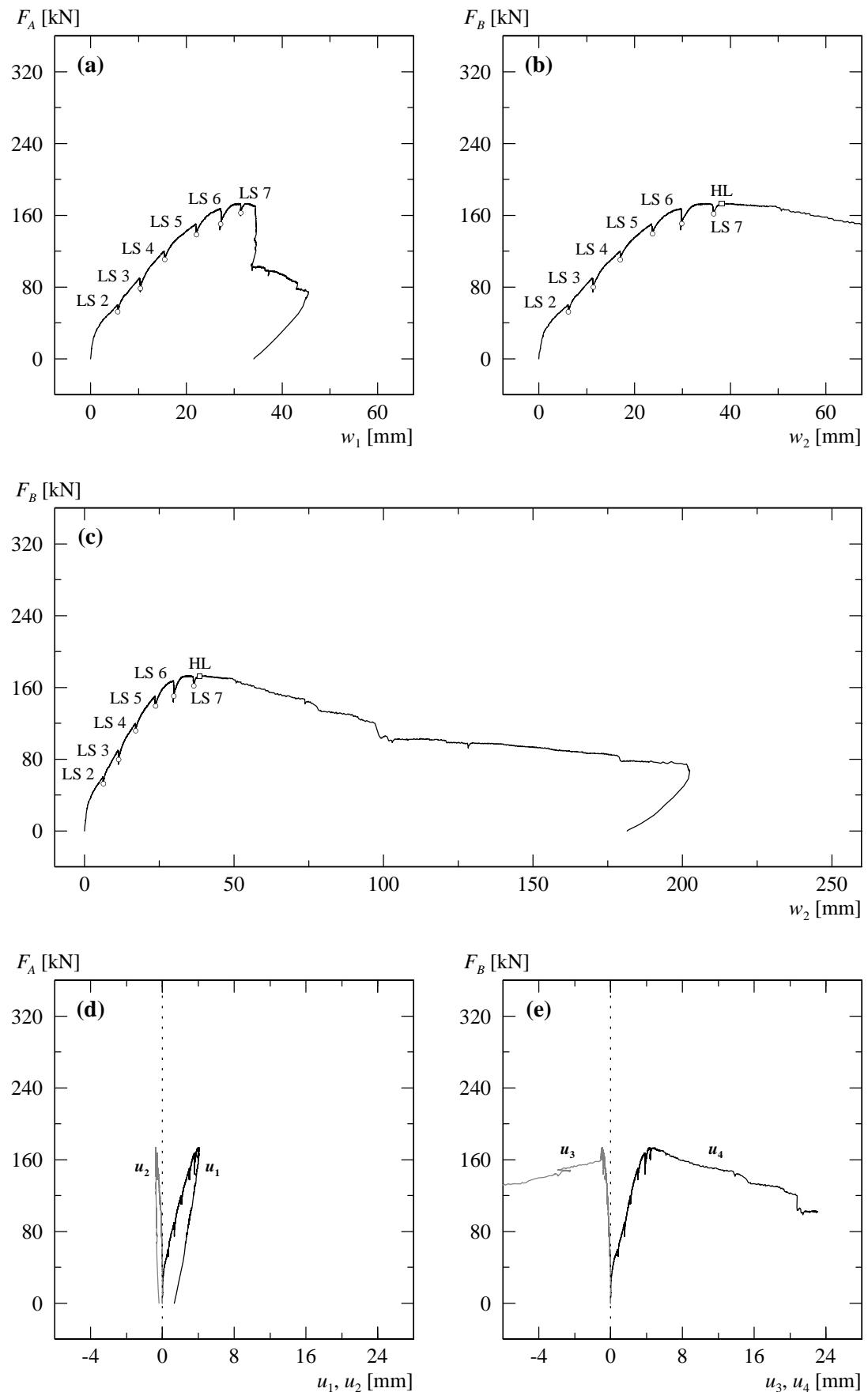


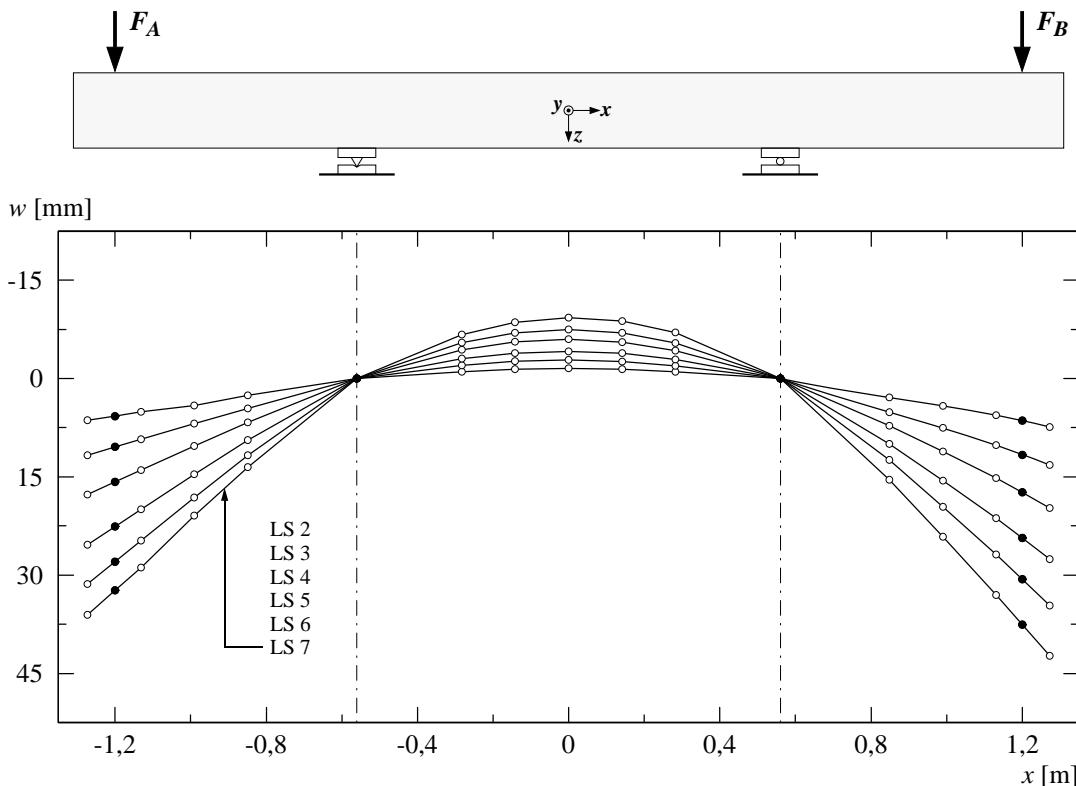
Bild 4.85: A6V1 – (a) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K1; (b) und (c) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K2; (d) Verformungen der Zugzone über Auflager NORD; (e) Verformungen der Zugzone über Auflager SÜD.

Laststufe	Oberseite					Vorderseite – Kragarm	
	Kragarm K1 w_{cr} [mm]	Lager NORD w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	Lager SÜD w_{cr} [mm]	Kragarm K2 w_{cr} [mm]	$z \approx -70$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 2	HR...0,05	0,05...0,10	0,05...0,10	0,05...0,10	HR...0,05	HR...0,10	HR...0,05
LS 3	HR...0,05	0,05...0,10	0,05...0,15	0,05...0,15	HR...0,05	0,05...0,15	HR...0,05
LS 4	0,05...0,10	0,05...0,20	0,05...0,20	0,05...0,20	0,05...0,20	0,05...0,45	HR...0,10
LS 5	0,05...0,20	0,05...0,25	0,05...0,30	0,05...0,30	0,05...0,30	0,05...0,35	0,05...0,10
LS 6	0,10...0,25	0,10...0,35	0,10...0,40	0,10...0,35	0,10...0,50	0,10...0,50	0,05...0,25
LS 7	0,10...0,35	0,10...0,50	0,10...0,75	0,15...1,00	0,10...0,55	0,10...0,80	0,05...0,30

Tabelle 4.23: A6V1 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

($y \approx 30 \div 180$ mm) verlief. Unten an der Stirnseite des Versuchskörpers betrug die Rissbreite 0,2 mm im Kragarm K1 und 0,15 mm im Kragarm K2.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 4 ($F_A = F_B \approx 120$ kN) bildeten sich sowohl auf der Oberseite wie auch auf der Vorder- und Hinterseite neue Risse. Der gerissene Bereich erstreckte sich über den gesamten Versuchskörper. Neben der Bildung von neuen Rissen bei den Kragarmenden wurde auf der Oberseite eine Verästelung der bestehenden Risse beobachtet, wobei die Verästelungsrisse mehrheitlich in den Verankerungsbereichen der Biegebewehrung endeten. Die Rissbreiten betrugen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 50 bis 80 mm im Mittelfeld und über den Auflagern 0,05 bis 0,20 mm, im Kragarm K1 0,05 bis 0,1 mm und im Kragarm K2 0,05 bis 0,2 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite erstreckten sich die Risse über die oberen 70 bis 80 % der Versuchskörperhöhe. Neue Risse wurden bei den Kragarmenden und den Verankerungsbereichen der Biegebewehrung im Mittelfeld festgestellt, wobei letztere horizontal verliefen. Die anfänglich ungefähr vertikal verlaufenden Risse im Kragarm setzten sich im unteren Bereich mit einer leichten Neigung gegen die Auflager fort, während im Mittelfeld eine geringfügige Verlängerung der ungefähr vertikal verlaufenden Risse beobachtet wurde. Die schrägen Risse wiesen Neigungen von 45 bis 60° gegenüber der x -Achse auf. In den Kragarmen

**Bild 4.86:** A6V1 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

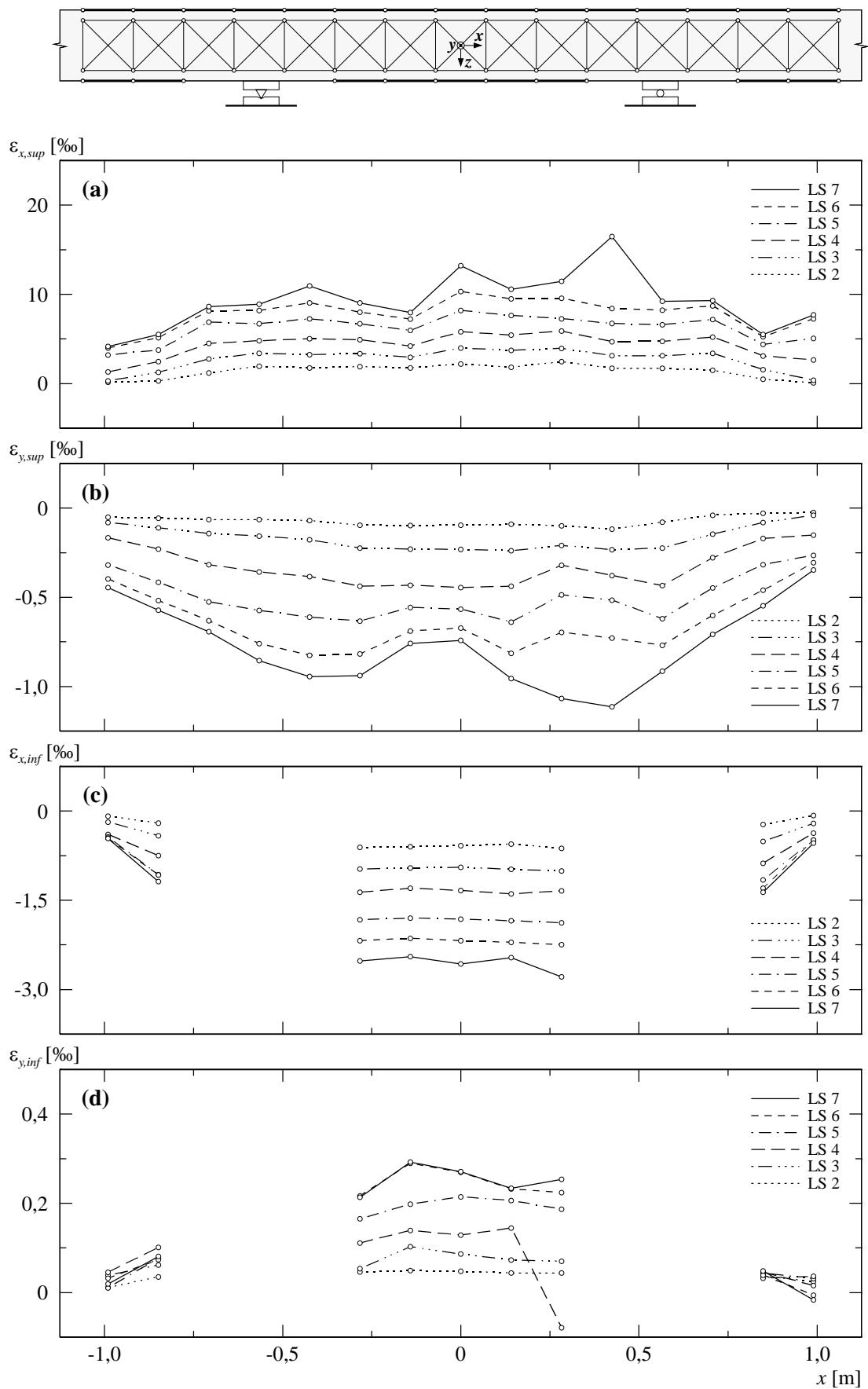


Bild 4.87: A6V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben; (c) mittlere Längsdehnungen unten; (d) mittlere Querdehnungen unten.

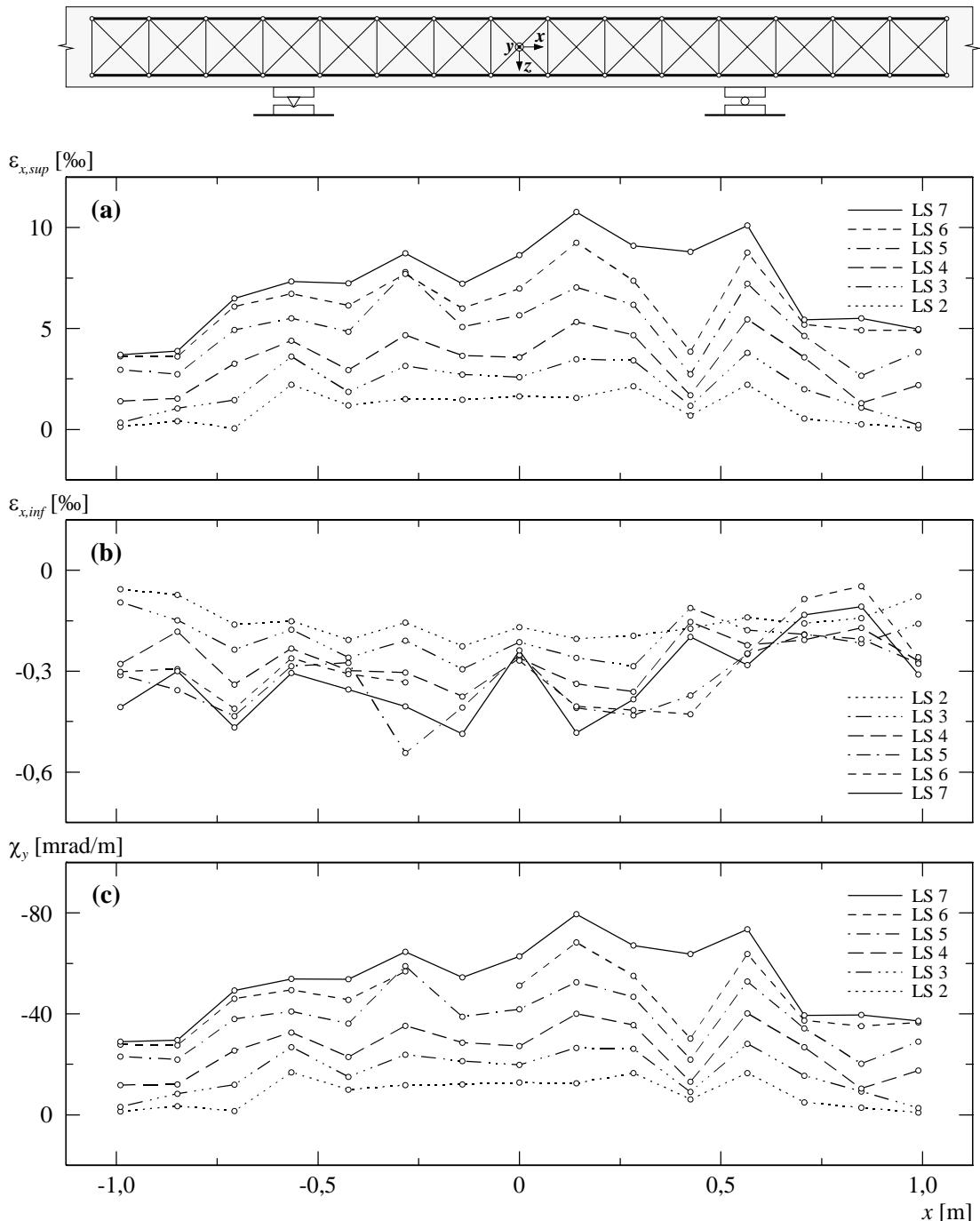


Bild 4.88: A6V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

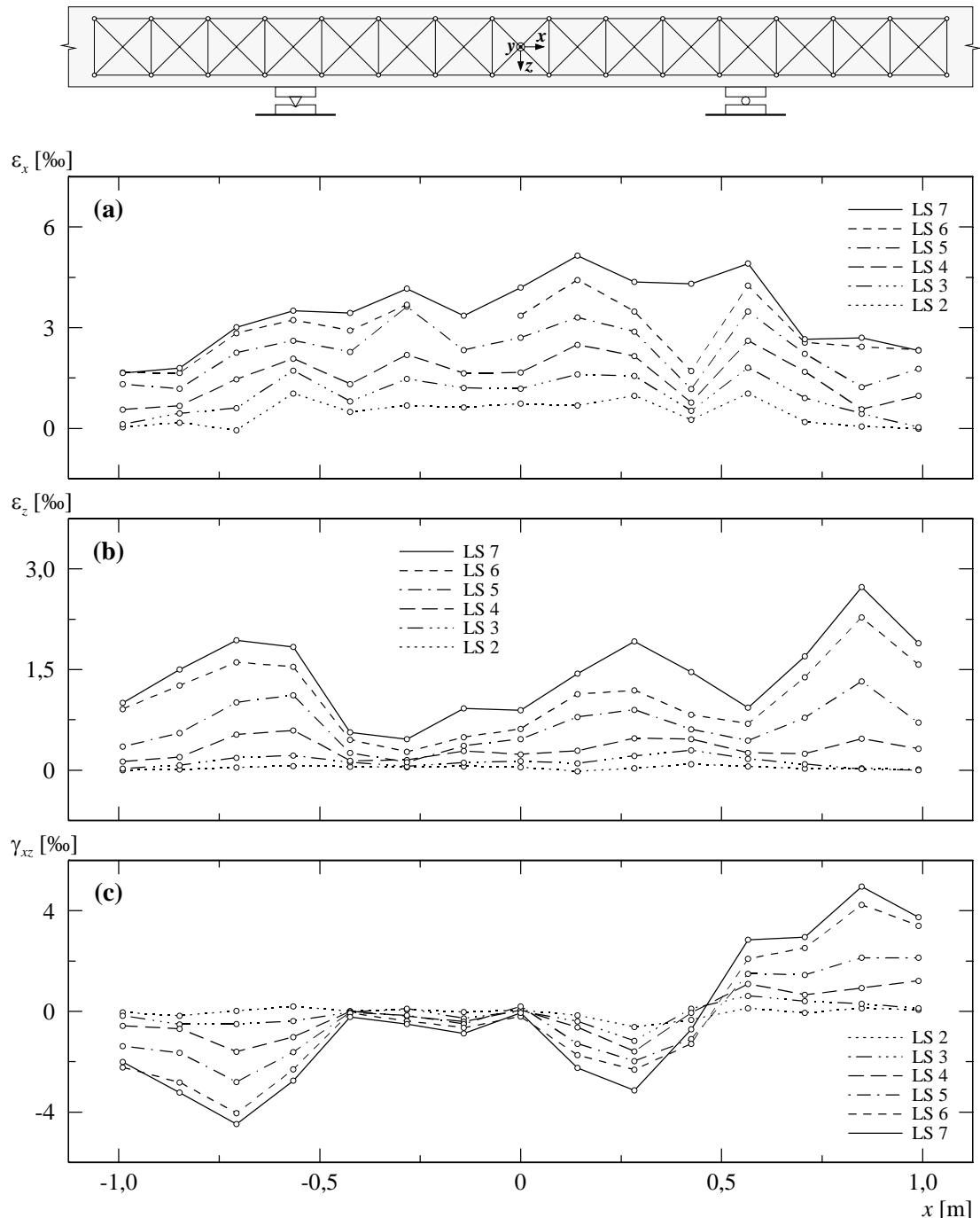


Bild 4.89: A6V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

wurden auf der Höhe der oberen Deformatormessreihe (≈ 30 mm unterhalb der Oberkante) Rissbreiten von 0,05 bis 0,45 mm gemessen. Unterhalb der Bereiche, in denen die Biegebewehrungsverankerungen lagen, verringerten sich die Rissbreiten stark; auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) betragen sie noch maximal 0,1 mm.

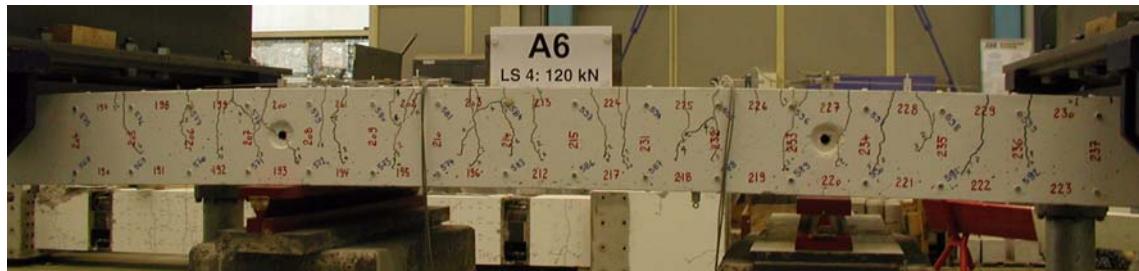
Nach dem Fliessbeginn der Biegebewehrung wurde die Laststufe LS 6 bei einer Kraft von $F_A = F_B \approx 160$ kN durchgeführt. Auf der Oberseite hatten sich die Risse zunehmend verästelt. Im Kragarm K2 wurde an der Stelle der inneren Bewehrungsabstufung ($x \approx 940$ mm) ein Riss mit einer Breite von 0,5 mm gemessen. Die übrigen Rissbreiten betragen im Mittelfeld und über den Auflagern 0,1 bis 0,3 mm, in den Kragarmen 0,05 bis 0,25 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite hatten sich in den äusseren Kragarmbereichen neue Schubrisse gebildet, und die vorhandenen Risse hatten sich gegen die Auflager fortgepflanzt. Die schrägen Risse erstreckten sich über die oberen 85 % der Versuchskörperhöhe, und die Neigung der Risse betrug im unteren Bereich der Kragarme ungefähr 35 bis 45° gegenüber der x -Achse, wobei die Risse im untersten Bereich stark abdrehten und sich entlang der Biegendruckzone fortsetzten. Im Mittelfeld waren neue Horizontalrisse im Bereich der Biegebewehrungsverankerungen entstanden, während sich die vorhandenen Risse verästelt und geringfügig verlängert hatten. Die Rissbreiten betragen auf der Höhe der oberen Deformatormessreihe 0,1 bis 0,5 mm und auf halber Versuchskörperhöhe 0,05 bis 0,25 mm. Der Längsriss auf der Unterseite im Kragarm K1 hatte sich auf eine Länge von ca. 500 mm verlängert, während sich jener im Kragarm K2 ungefähr parallel zur x -Richtung ($y \approx 180$ mm) fortgepflanzt und eine Länge von ca. 550 mm erreicht hatte. Dabei hatten sich die Rissbreiten an der Stirnseite auf 0,7 mm im Kragarm K1 und auf 0,6 mm im Kragarm K2 vergrössert.

Anschliessend wurde die Durchbiegung der beiden Kragarme kontinuierlich vergrössert. Die letzte Laststufe LS 7 des ersten Versuchs wurde bei einer Kraft von $F_A = F_B \approx 172$ kN sowie dazugehörigen Durchbiegungen von $w_1 \approx 31,3$ mm beim Kragarm K1 und $w_2 \approx 36,2$ mm beim Kragarm K2 durchgeführt. Gegenüber der Laststufe LS 6 hatte sich das Rissbild nicht verändert. Hingegen hatten sich die Rissbreiten der bestehenden Risse vergrössert. Auf der Oberseite betragen die maximalen Rissbreiten 0,75 mm im Mittelfeld und 1 mm beim südlichen Lager (Stelle D). Die übrigen Rissbreiten lagen in diesen Bereichen zwischen 0,1 und 0,5 mm. Der Riss bei der Bewehrungsabstufung im Kragarm K2 hatte sich nur geringfügig vergrössert. Die Rissbreiten auf der Vorder- und Hinterseite betragen im Mittelfeld und bei den Auflagern auf der Höhe der oberen Deformatormessreihe 0,1 bis maximal 0,8 mm. Unterhalb der Verankerungsbereiche der Biegebewehrung und auf halber Versuchskörperhöhe wurden noch Rissbreiten von 0,05 bis 0,3 mm gemessen. Die Längsrisse auf der Unterseite wiesen in beiden Kragarmen eine Rissbreite von 0,7 mm an der Stirnseite des Versuchskörpers auf.

Im weiteren Versuchsfortschritt wurde bei einer Durchbiegung von $w_1 = 32,4$ mm beim Kragarm K1 und $w_2 = 38,2$ mm beim Kragarm K2 die Höchstlast erreicht. Die entsprechende Kraft betrug $F_A = F_B = 173,2$ kN. Gleichzeitig konnten auf der Mittelfeldseite beim südlichen Lager die ersten Betonstauchungsrisse in der Biegendruckzone festgestellt werden. Die ersten Abplatzungen von Betonplättchen wurden ab einer Durchbiegung von $w_2 \approx 50$ mm beobachtet.

Mit zunehmender Kragarmdurchbiegung w_2 wurden in dem zur y -Achse parallel verlaufenden Druckfeld auf der Oberseite (Biegezugzone) die ersten Betonstauchungsrisse beim südlichen Lager beobachtet. Bei einer Durchbiegung von $w_2 \approx 95$ mm versagte der Beton im Verankerungsbereich von je drei Stabpaaren der Biegebewehrung auf der Vorder- und Hinterseite, wobei Teile des Überdeckungsbetons in y -Richtung stark gestaucht wurden. Die Bruchzone erstreckte sich in x -Richtung über eine Länge von ungefähr 300 bis 350 mm. Diese Zerstörung des Druckfeldes führte zu einem vertikalen Versatz der Ankerplatten und zu horizontalen Verschiebungen der Biegebewehrungsstäbe entlang ihrer Stabachse. Gleichzeitig platzten links beim südlichen Lager (Mittelfeldseite) grössere Teile des Überdeckungsbetons an der Unterseite ab. Bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_2 \approx 202$ mm wurde der Versuch abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt noch ungefähr 39 % der Höchstlast. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden.

(a)

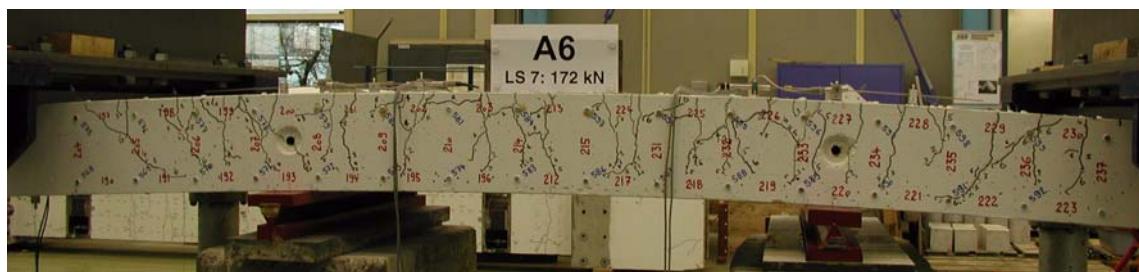


(b)



Bild 4.90: A6V1 – Rissbild bei Laststufe LS 4: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

(a)



(b)

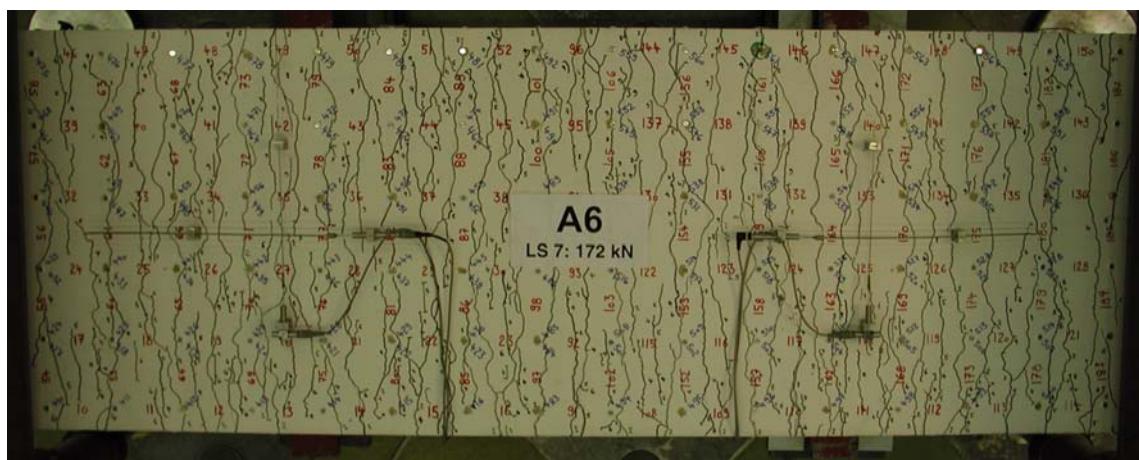


Bild 4.91: A6V1 – Rissbild bei Laststufe LS 7: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

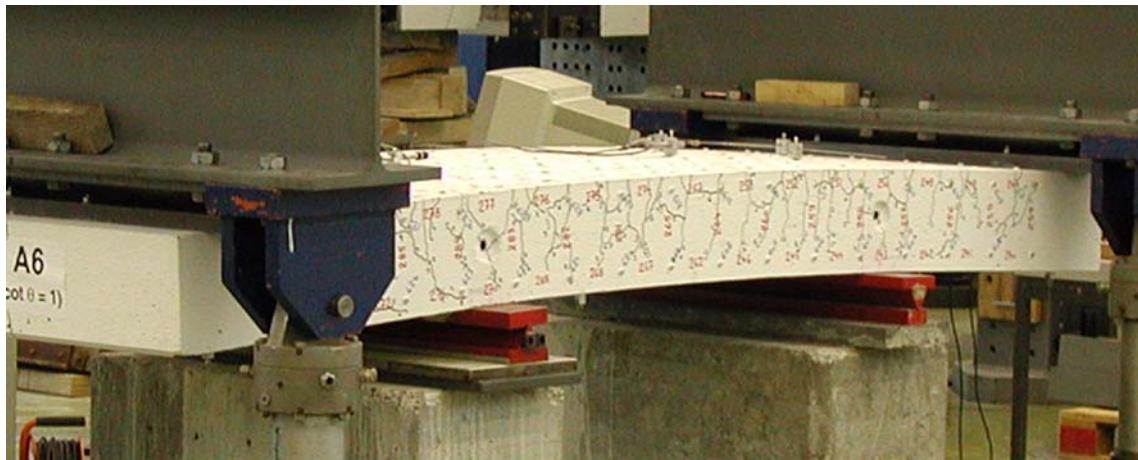


Bild 4.92: A6V1 – Seitenansicht des verformten Versuchskörpers nach Überschreiten der Höchstlast.

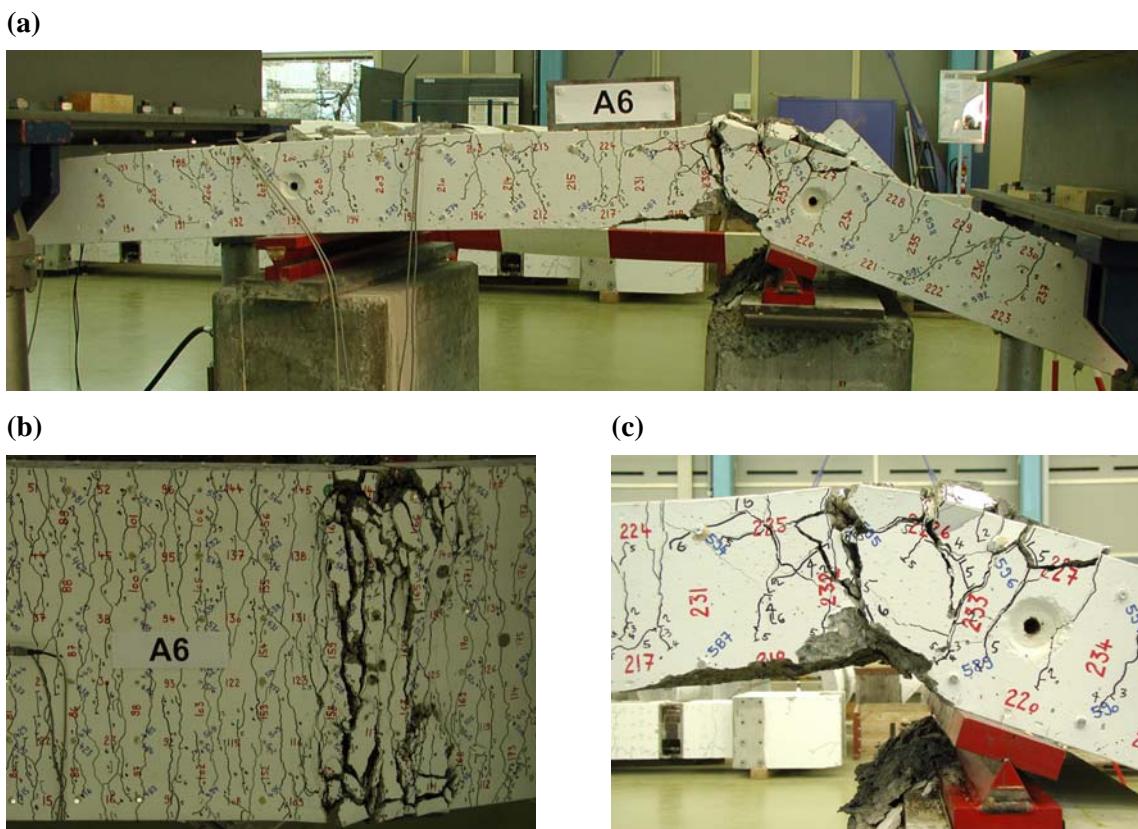


Bild 4.93: A6V1 – Rissbild nach Versuchsende: (a) Vorderseite; (b) Oberseite beim südlichen Lager; (c) Bruchzone beim südlichen Lager.

Für die abschliessende Untersuchung des Versuchskörpers wurde auf der Oberseite der abgeplätzte Überdeckungsbeton der Biegezugzone entfernt. Die Bruchzone dehnte sich beim südlichen Lager über die ganze Versuchskörperbreite aus und erstreckte sich in den äusseren Viertelsbereichen auf eine Länge von 300 bis 350 mm beziehungsweise im mittleren Bereich auf ungefähr 200 mm. Im Verankerungsbereich von sechs Stabpaaren der Biegebewehrung konnten grosse vertikale Relativverschiebungen der Ankerplatten festgestellt werden, wobei die Querkraftbewehrungsstäbe von je einem Stabpaar auf der Vorder- und Hinterseite unterhalb der Biegebewehrungslagen zerrissen waren. Bei den übrigen vier freigelegten Stabpaaren waren in den Verankerungsbereichen keine Querkraftbewehrungsstäbe angeordnet. An der Unterseite war der Überdeckungsbeton der Biegendruckzone in einem Bereich von 230 bis 350 mm links vom südlichen Lager abgeplatzt. Die Oberfläche der abgeplatzten Bereiche zeigte neben dem Lager keine Spuren einer Zerstörung der Rissverzahnung oder eines gegenseitigen Abgleitens der Rissflächen.

4.7.2 Versuch A6V2

Der Versuch wurde innerhalb eines Tages durchgeführt. Vor der eigentlichen Durchführung des Versuchs erfolgte im unbelasteten Zustand die Deformettermessung der Laststufe LS 8. Diese diente zur Bestimmung der plastischen Verformungen nach dem ersten Versuch, welche beim zweiten Versuch als initiale Vorverformungen berücksichtigt wurden. Anschliessend erfolgte die Belastung des Versuchskörpers und die Durchführung der Laststufe LS 9.

Laststufe (LS)	F_A [kN]	F_B [kN]	F_C [kN]	$-V_{C1}$ [kN]	$-M_C$ [kNm]	w_1 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	Bemerkungen
8	0	-7,8	12,2	7,8	4,2	16,8	1,34	-0,20	Nullmessung
9	184,1 165,3	120,2 107,1	324,3 292,5	191,9 173,1	122,0 110,0	37,4 37,5	4,73 4,75	-0,45 -0,47	Belastungsende Messende
HL	187,4	122,5	329,9	195,2	124,1	44,7	6,92	-0,63	Höchstlast
Entlastung	73,2	43,1	136,3	81,0	51,0	254,0	–	–	Entlastungsbeginn

Tabelle 4.24: A6V2 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 4.2).

Bei einer Kraft von $F_A \approx 184$ kN wurde die Laststufe LS 9 durchgeführt. Gegenüber der Laststufe LS 7 beim ersten Versuch hatte sich das Rissbild nur auf der Vorder- und Hinterseite geringfügig verändert. Dabei hatten sich die bestehenden Risse verlängert, und es hatten sich vereinzelte Verästelungsrisse sowie ein schräger Riss im Bereich des äusseren Kragarms gebildet. Auf der Oberseite wurde im Kragarm an der Stelle der inneren Bewehrungsabstufung ($x \approx -1060$ mm) ein Riss mit einer Breite von 0,6 mm gemessen. Die übrigen Risse wiesen mittlere Rissabstände von ungefähr 50 bis 80 mm auf. Im Kragarm verharnten die Rissbreiten bei 0,1 bis 0,25 mm, während sich die Risse im Mittelfeld und über den Auflagern auf 0,1 bis maximal 0,65 mm geöffnet hatten. Auf der Vorder- und Hinterseite erstreckten sich die Risse über die oberen 85 % der Versuchskörperhöhe. Die Rissbreiten betragen auf der Höhe der oberen Deformettermessreihe (≈ 30 mm unterhalb der Oberkante) 0,1 bis maximal 1,2 mm. Unterhalb der Verankerungsbereiche der Biegebewehrung konnte eine Abnahme der Rissbreiten festgestellt werden und auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) wiesen die Risse noch Breiten von 0,1 bis 0,5 mm auf. Die schrägen Risse wiesen im Kragarm mittlere Neigungen von 35 bis 45° gegenüber der x -Achse auf, während im Mittelfeld tendenziell steilere Rissneigungen zwischen 45 und 55° gemessen wurden.

Im weiteren Versuchsfortschritt wurde bei einer Durchbiegung von $w_1 = 44,7$ mm beim Kragarm K1 die Höchstlast erreicht. Die entsprechende Kraft betrug $F_A = 187,4$ kN. Gleichzeitig konnten auf der Mittelfeldseite beim nördlichen Lager (Stelle C) die ersten Betonstauchungsrisse in der Biegendruckzone festgestellt werden.

Mit zunehmender Kragarmdurchbiegung w_1 wurden in dem zur y -Achse parallel verlaufenden Druckfeld auf der Oberseite (Biegezugzone) die ersten Betonstauchungsrisse beim nördlichen Lager beobachtet. Bei einer Durchbiegung von $w_1 \approx 70$ mm versagte der Beton im Verankerungsbereich von vier Stabpaaren der Biegebewehrung auf der Vorderseite sowie von fünf Stabpaaren auf der Hinterseite, und Teile des Überdeckungsbetons wurden in y -Richtung gestaucht. Die Bruchzone erstreckte sich in x -Richtung über eine Länge von ungefähr 370 bis 500 mm. Bei der

Laststufe	Oberseite			Vorderseite – Kragarm	
	Kragarm K1 w_{cr} [mm]	Lager NORD w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	$z \approx -70$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 9	0,10...0,60	0,15...0,65	0,10...0,60	0,10...1,20	0,10...0,50

Tabelle 4.25: A6V2 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen.

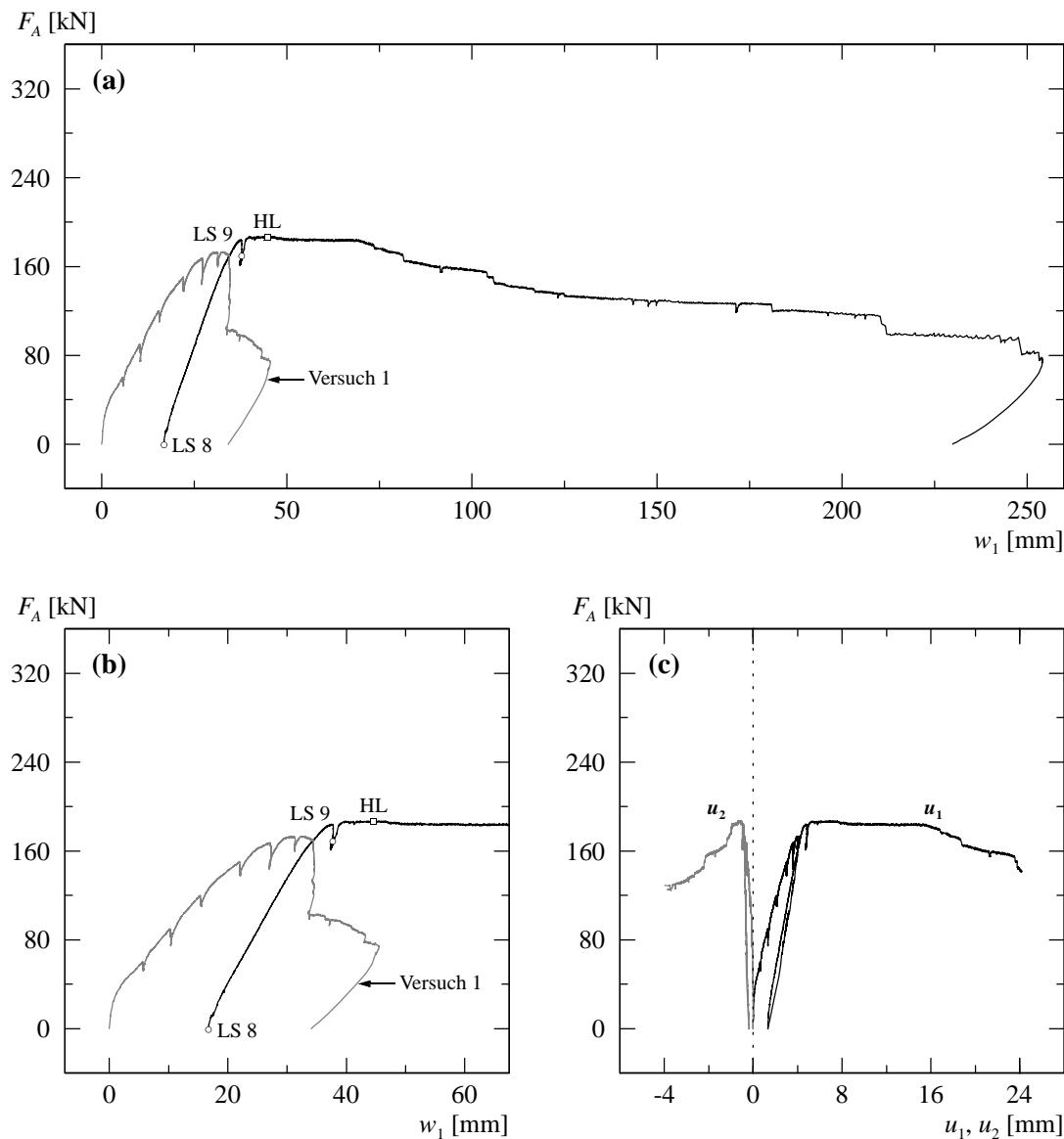


Bild 4.94: A6V2 – (a) und (b) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K1; (c) Verformungen der Zugzone über Auflager NORD.

sukzessiven Steigerung der Kragarmdurchbiegung w_1 führte die Zerstörung des Druckfeldes zu einem vertikalen Versatz der Ankerplatten und zu horizontalen Verschiebungen der Biegebewehrungsstäbe entlang ihrer Stabachse. Gleichzeitig platzten rechts beim nördlichen Lager (Mittelfeldseite) grössere Teile des Überdeckungsbetons an der Unterseite ab. Bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 254$ mm wurde der Versuch abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt noch ungefähr 39 % der Höchstlast. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden.

Für die abschliessende Untersuchung des Versuchskörpers wurde auf der Oberseite der abgeplatzte Überdeckungsbeton der Biegezugzone entfernt. Die Bruchzone erstreckte sich auf einer Länge von 370 bis 500 mm beim nördlichen Lager über die gesamte Versuchskörperbreite. Auf der Vorder- und Hinterseite konnten im Verankerungsbereich von je drei Stabpaaren der Biegebewehrung grosse vertikale Relativverschiebungen der Ankerplatten festgestellt werden. Bei je einem Stabpaar waren Querkraftbewehrungsstäbe angeordnet, die unterhalb der Biegebewehrungslagen zerrissen waren. Die übrigen drei freigelegten Stabpaare wiesen nur kleine vertikale Relativverschiebungen der Ankerplatten auf, und es konnten keine zerrissenen Querkraftbewehrungsstäbe entdeckt werden. Weiter wurde über dem nördlichen Lager ein Biegebewehrungsstab

$\varnothing 12$ mm mit einer Einschnürung lokalisiert. An der Unterseite war der Überdeckungsbeton der Biegedruckzone in einem Bereich von 80 bis 150 mm rechts vom nördlichen Lager abgeplatzt. Die Oberfläche der abgeplatzten Bereiche zeigte neben dem Lager keine Spuren einer Zerstörung der Rissverzahnung oder eines gegenseitigen Abgleitens der Rissflächen.

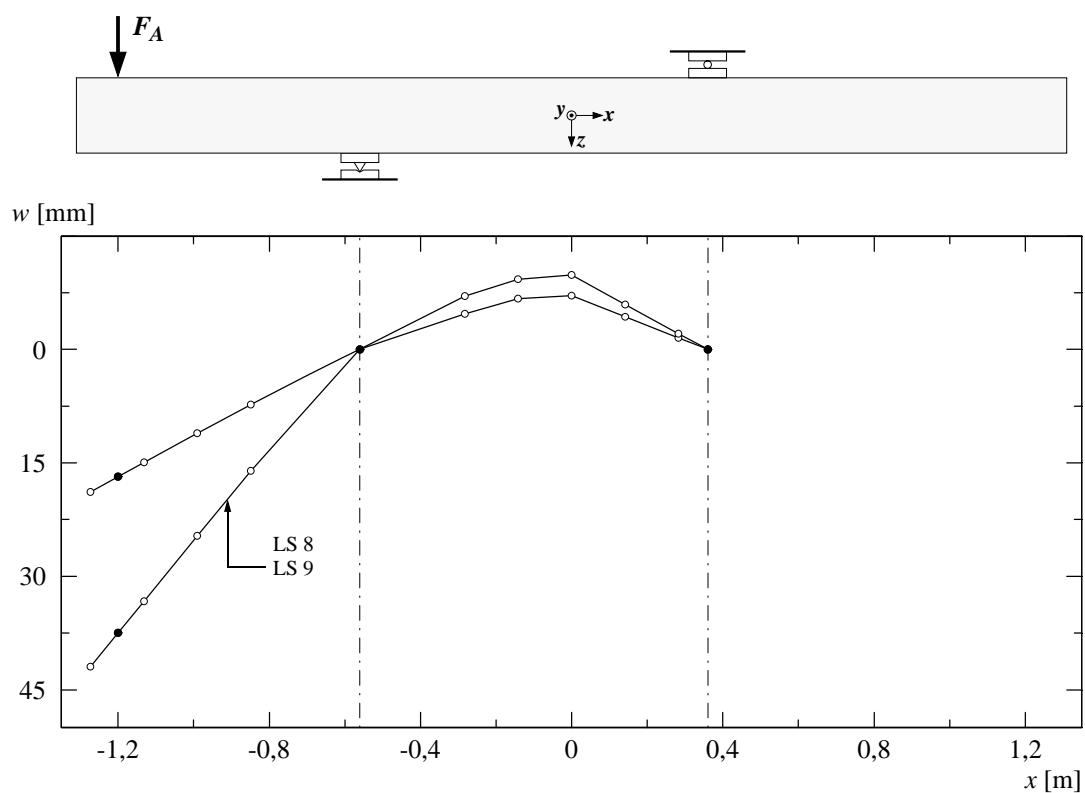


Bild 4.95: A6V2 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

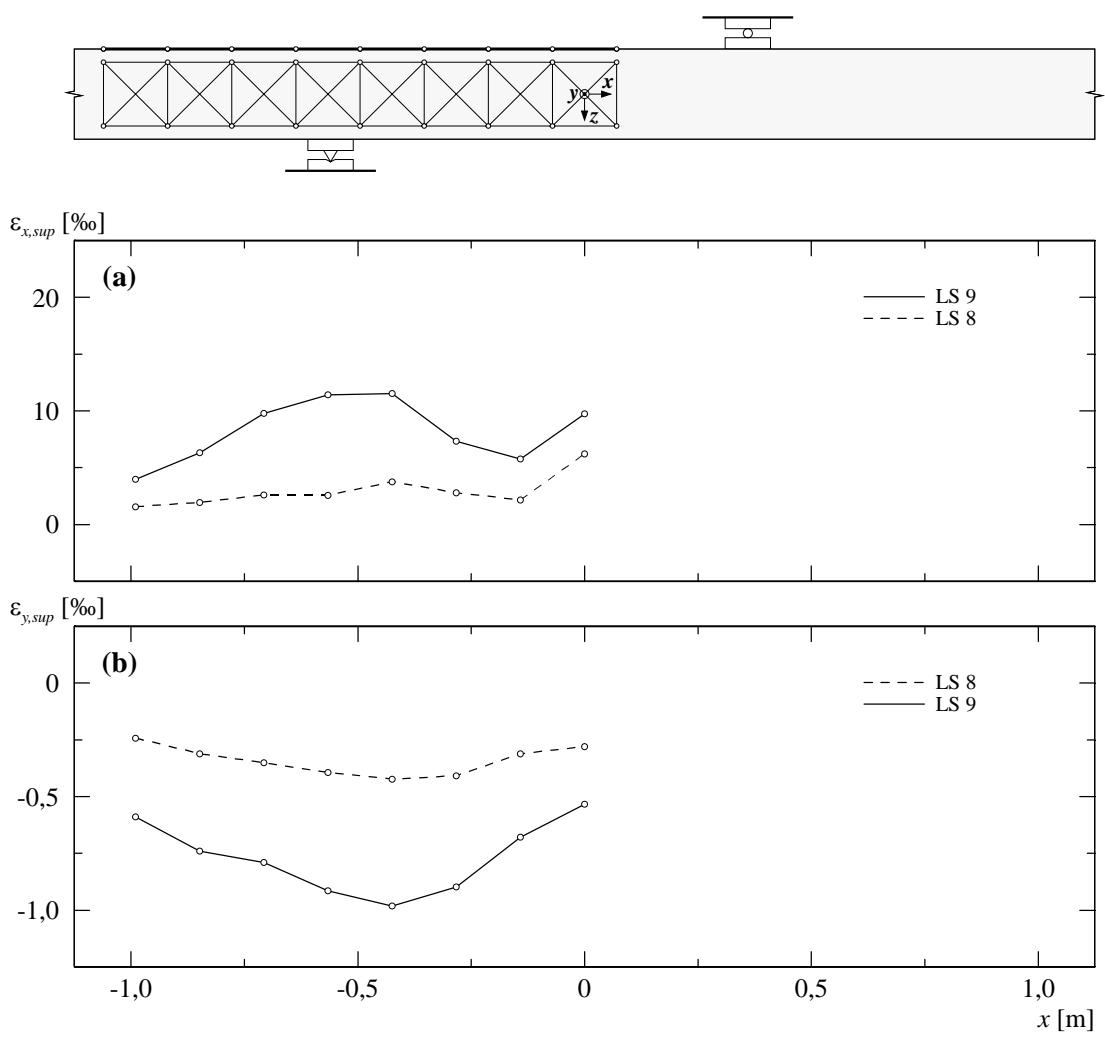


Bild 4.96: A6V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben.

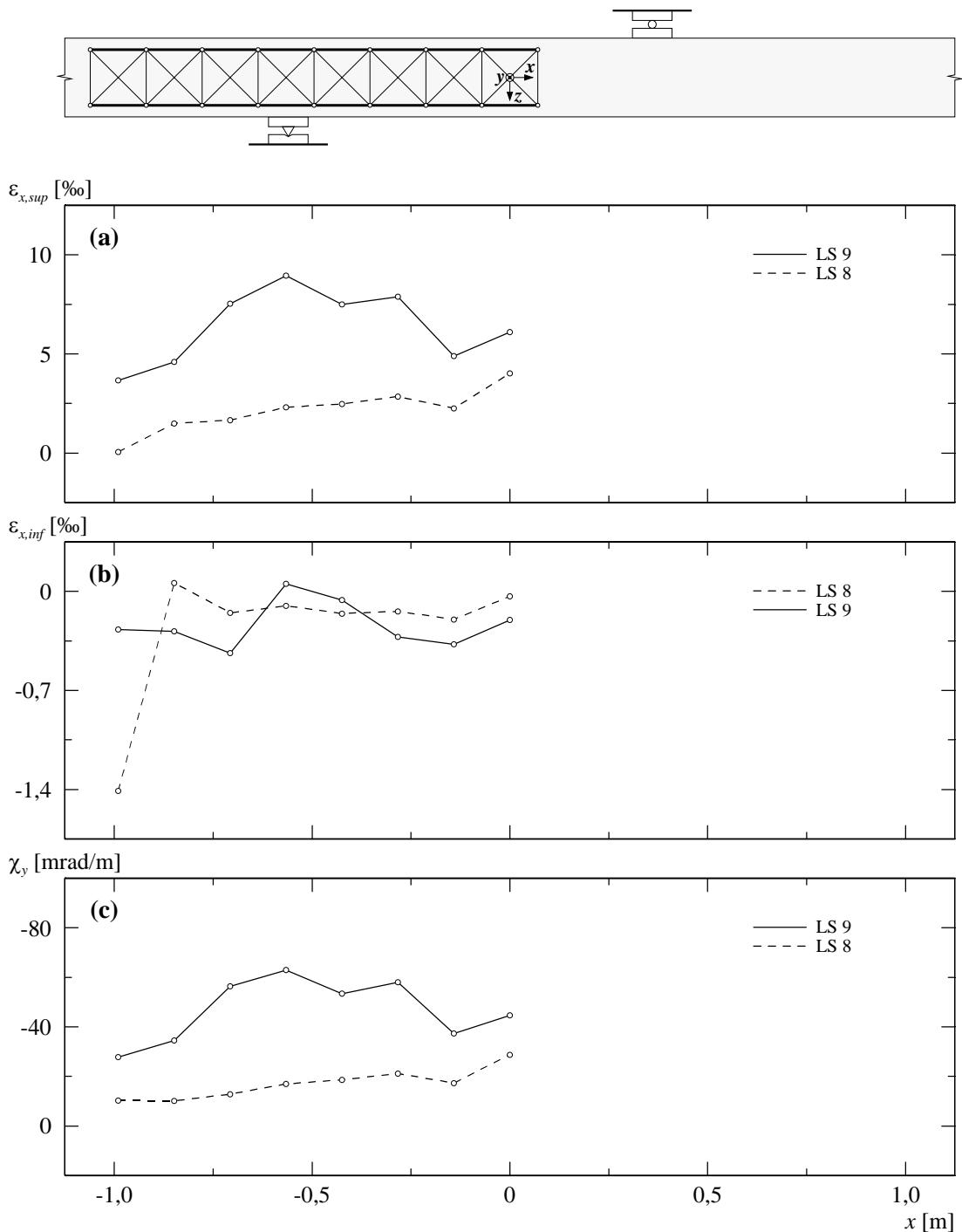


Bild 4.97: A6V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

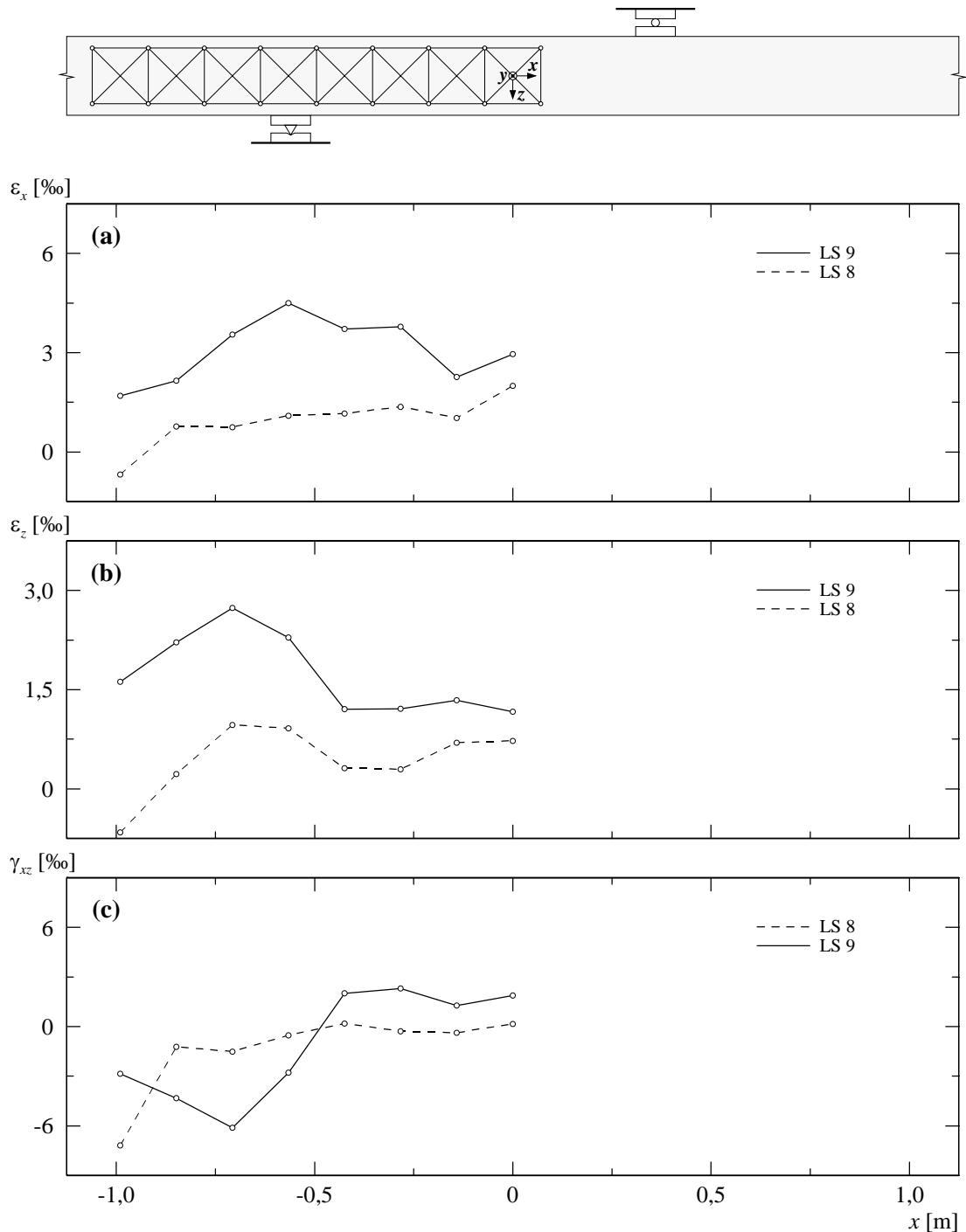
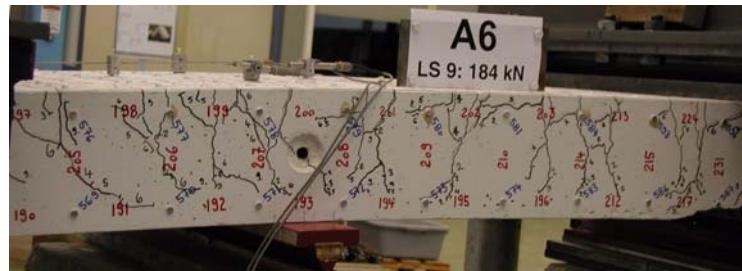


Bild 4.98: A6V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

(a)



(b)

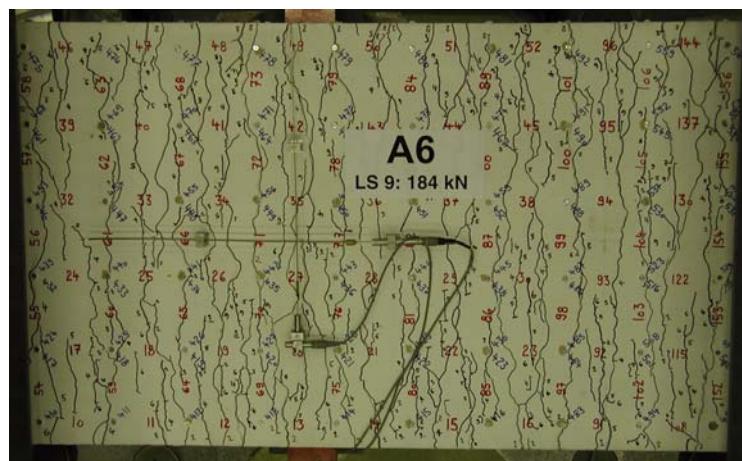
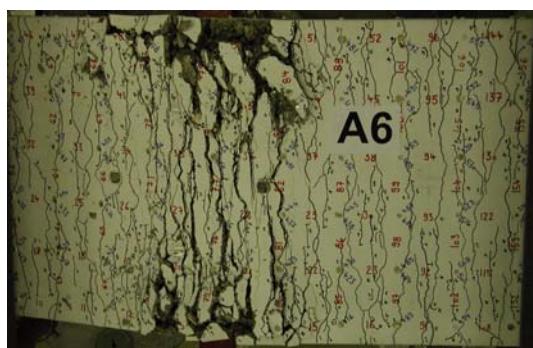


Bild 4.99: A6V2 – Rissbild bei Laststufe LS 9: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

(a)



(b)



(c)

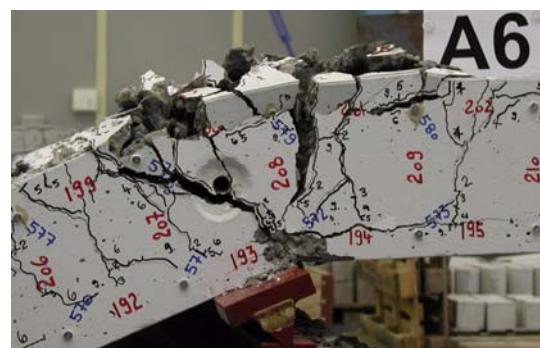


Bild 4.100: A6V2 – Rissbild nach Versuchsende: (a) Vorderseite; (b) Oberseite beim nördlichen Lager; (c) Bruchzone beim nördlichen Lager.

4.8 Versuchskörper A7

Der Versuchskörper A7 war als Vergleichsversuch zum Versuchskörper A6 konzipiert, und der Biegebewehrungsgehalt war mit demjenigen des Versuchskörpers A5 identisch. Im Gegensatz zum Versuchskörper A5 wurde die Biegebewehrung in den Kragarmen abgestuft, wobei Spannungsfelder mit unterschiedlichen Druckfeldneigungen für die Bestimmung des resultierenden Längszugkraftverlaufs verwendet wurden. Die entsprechenden Druckfelder wiesen eine Neigung von 45° ($\cot \theta = 1$) im Kragarm K2 und $26,6^\circ$ ($\cot \theta = 2$) im Kragarm K1 auf. Der geometrische Bewehrungsgehalt in x -Richtung betrug $\rho_x = 1,056\%$, und für die Bewehrungsrichtung galt $\varphi_0 = 0^\circ$. In der Hauptbewehrungsrichtung (x -Richtung) und Querrichtung (y -Richtung) war je eine Bewehrungslage mit Stäben $\varnothing 12$ mm angeordnet, wobei die Hauptbewehrung einen Stababstand von 60 mm und die Querbewehrung einen solchen von 80 mm aufwies. Die beiden Kragarmbereiche wiesen identische Querkraftbewehrungsgehalte von $\rho_z = 0,155\%$ auf.

4.8.1 Versuch A7V1

Am ersten Versuchstag wurde die erste Nullmessung durchgeführt. Die zweite Nullmessung sowie die Laststufen LS 2 und LS 3 folgten am zweiten, die Laststufen LS 4 bis LS 6 am dritten, die Laststufe LS 7 am vierten Versuchstag. Über Nacht blieb der Versuchskörper jeweils belastet.

Bei einer Kraft von $F_A = F_B \approx 60$ kN wurde die erste Laststufe LS 2 durchgeführt. Der gerissene Bereich erstreckte sich über das Mittelfeld und die erste Hälfte der Kragarme. Die mittleren Rissabstände betrugen auf der Oberseite ungefähr 80 mm, während die Risse maximale Breiten von 0,05 mm aufwiesen. Auf der Vorder- und Hinterseite des Versuchskörpers hatten sich ungefähr vertikal verlaufende Risse gebildet. Im Mittelfeld und über den Auflagern reichten diese über die oberen 50 % der Versuchskörperhöhe. Für die folgenden Laststufen wurde bis zum Erreichen der Bruchlast ein Belastungsintervall von $\Delta F_A = \Delta F_B \approx 30$ kN gewählt.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 4 ($F_A = F_B \approx 120$ kN) bildeten sich in den äusseren Bereichen der Kragarme weitere Risse. Die Rissbreiten der vorhandenen Risse vergrösserten sich geringfügig; dabei wurden maximale Rissbreiten von 0,05 bis 0,1 mm gemessen. Auf der

Laststufe (LS)	$F_A = F_B$ [kN]	V_{D1} [kNm]	$-M_D$ [kNm]	w_1 [mm]	w_2 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	u_3 [mm]	u_4 [mm]	Bemerkungen
1	0	7,8	4,2	0	0	0	0	0	0	Nullmessung
2	61,1 54,4	68,9 62,2	43,3 39,0	3,0 3,0	3,3 3,4	0,31 0,31	0,02 0,02	0,24 0,25	0,01 0,02	Belastungsende Messende
3	91,1 84,6	98,8 92,4	62,5 58,3	4,9 5,1	5,5 5,6	0,52 0,52	0,04 0,04	0,44 0,44	0,03 0,03	Belastungsende Messende
4	121,2 113,4	129,0 121,2	81,8 76,8	7,0 7,0	7,5 7,6	0,72 0,73	0,06 0,07	0,61 0,62	0,05 0,05	Belastungsende Messende
5	151,1 136,3	158,9 144,1	100,9 91,4	9,0 8,9	9,6 9,5	0,95 0,94	0,10 0,11	0,79 0,78	0,06 0,07	Belastungsende Messende
6	182,3 156,9	190,1 164,7	120,9 104,6	11,4 10,9	12,4 12,0	1,22 1,16	0,16 0,17	1,00 0,95	0,08 0,09	Belastungsende Messende
7	213,3 185,8	221,1 193,6	140,7 123,1	20,5 20,3	20,5 22,8	2,32 0,31	0,30 1,26	1,32 0,11	0,11 0,11	Belastungsende Messende
HL	216,0	223,8	142,4	25,2	25,9	2,77	0,34	1,52	0,11	Höchstlast
Bruch K2	209,4	217,2	138,2	25,8	28,2	2,81	0,35	1,55	0,11	Biegeschubbruch
Entlastung	50,6 0	58,3 7,8	36,5 4,2	16,8 13,8	50,2 44,9	1,80 1,48	0,22 0,18	0,74 0,51	0,08 0,07	Entlastungsbeginn Versuchsende

Tabelle 4.26: A7V1 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 4.1).

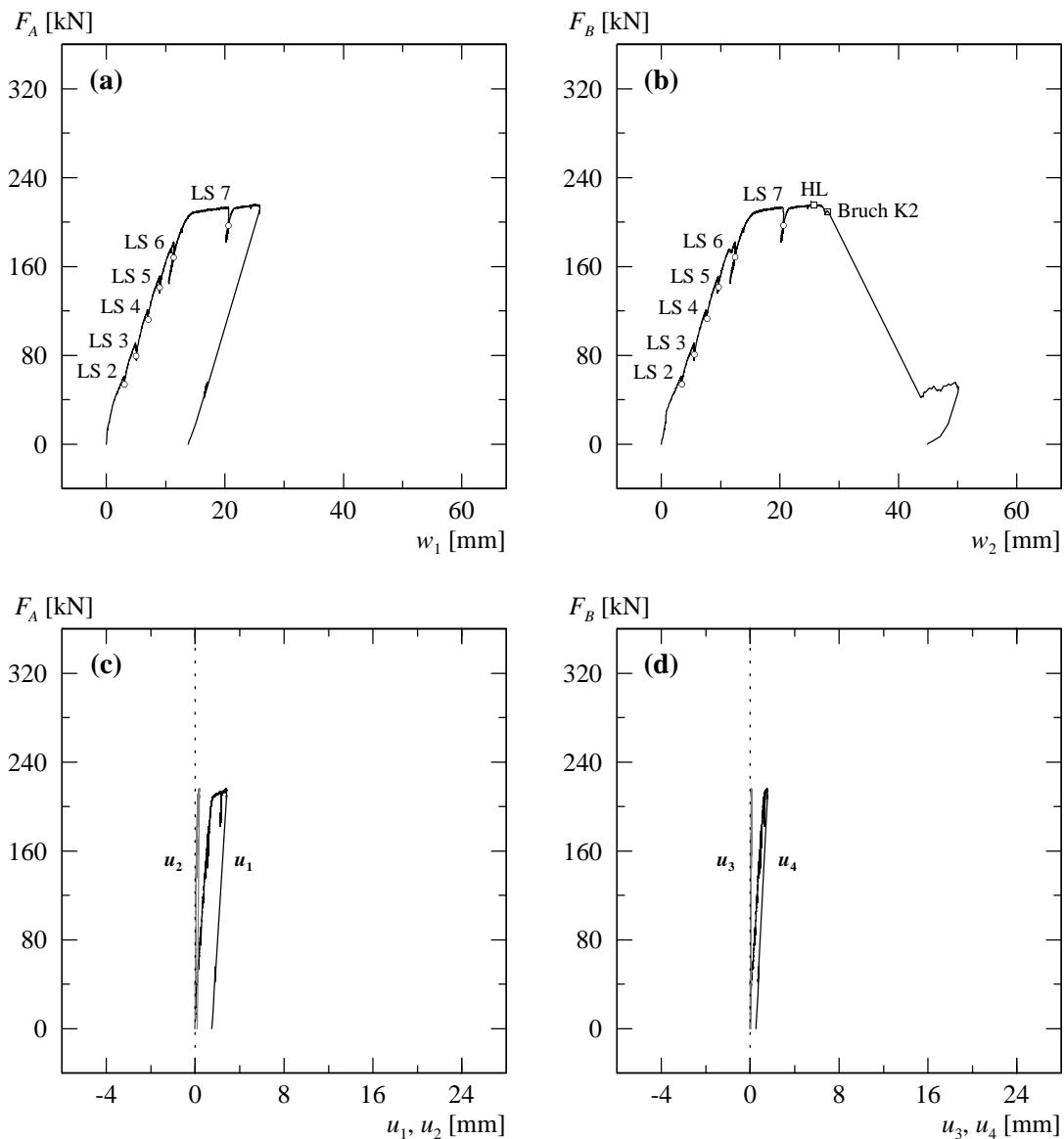


Bild 4.101: A7V1 – (a) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K1; (b) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K2; (c) Verformungen der Zugzone über Auflager NORD; (d) Verformungen der Zugzone über Auflager SÜD.

Vorder- und Hinterseite verlängerten sich die bereits vorhandenen Risse, wobei sich diese im Mittelfeld über die oberen 55 bis 65 % der Versuchskörperhöhe erstreckten. Im Kragarm K2 verliefen die Risse im oberen Bereich vertikal, setzten sich dann aber im mittleren Bereich mit einer leichten Neigung gegen das südliche Lager (Stelle D) fort, während die Risse im Kragarm K1 und im Mittelfeld ungefähr vertikal verliefen.

Während der Belastung zwischen den Laststufen LS 5 und LS 6 ($F_A = F_B \approx 150 \div 180$ kN) bildete sich im Kragarm K2 ($\theta = 45^\circ$) schlagartig ein neuer Riss an der Stelle der Bewehrungsabstützung ($x \approx 1080$ mm), welcher bis in die Biegedruckzone reichte. Der Abstand der Risswurzel von der Unterseite lag bei 20 mm, und die Rissneigung betrug 45° gegenüber der x -Achse. Dabei fiel die Kraft leicht ab, und in der Folge konnte auf der Oberseite ein vertikaler Versatz der beiden Rissufer von 0,25 bis 0,3 mm festgestellt werden.

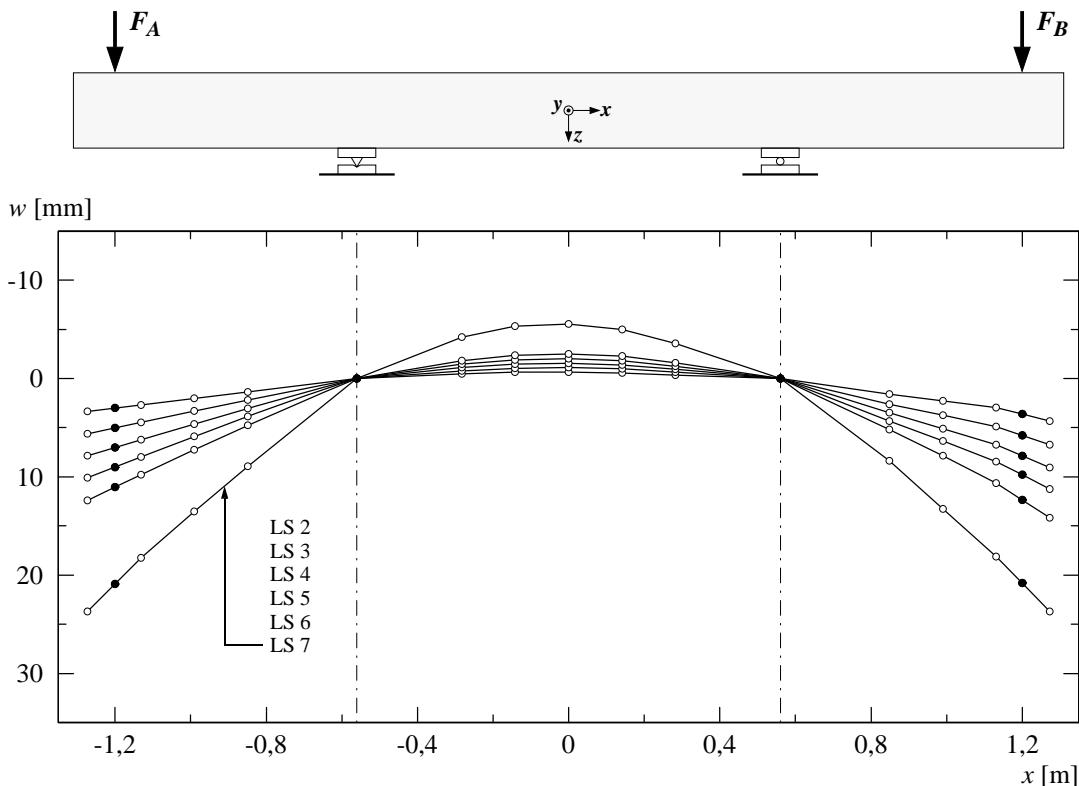
Bis zur Laststufe LS 6 ($F_A = F_B \approx 120$ kN) entstanden auf der Oberseite mehrere in x -Richtung verlaufende Verbundrisse. Weiter bildete sich neben dem Versatzriss bei der Bewehrungsabstützung ein weiterer Riss im äusseren Bereich des Kragarms K2. Im Mittelfeld und über den Auflagern wurden Rissbreiten von 0,1 bis 0,2 mm gemessen. Der Versatzriss wies eine Breite von

Laststufe	Oberseite					Vorderseite – Kragarm	
	Kragarm K1 w_{cr} [mm]	Lager NORD w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	Lager SÜD w_{cr} [mm]	Kragarm K2 w_{cr} [mm]	$z \approx -70$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 2	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR
LS 3	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR...0,05	HR
LS 4	HR...0,05	0,05...0,10	0,05...0,10	0,05...0,10	HR...0,05	HR...0,10	HR
LS 5	0,05...0,10	0,05...0,15	0,05...0,15	0,05...0,15	0,05...0,10	0,05...0,15	HR...0,05
LS 6	0,05...0,10	0,10...0,20	0,10...0,20	0,10...0,15	0,05...0,25	0,05...0,30	HR...0,10
LS 7	0,05...0,10	0,15...0,55	0,15...0,60	0,10...0,20	0,05...0,70	0,05...1,50	HR...0,25

Tabelle 4.27: A7V1 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

0,25 mm auf, ansonsten betragen die Rissbreiten in den Kragarmen maximal 0,1 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite wurde außer den neuen Rissen im Kragarm K2 die Verlängerung der bestehenden Risse beobachtet. Die schräg verlaufenden Risse im Kragarm K2 setzten sich nun im unteren Bereich flacher fort. Dabei betrug die Neigung im unteren Kragarmbereich ungefähr 45 bis 55° gegenüber der x -Achse. Im Kragarm K1 und im Mittelfeld konnte weiterhin eine ungefähr vertikale Fortpflanzung der Risse festgestellt werden. Die Rissbreiten betrugen auf der Höhe der oberen Deformettermessreihe (≈ 30 mm unterhalb der Oberkante) zwischen 0,05 und 0,2 mm, wobei der Versatzriss eine Breite von 0,3 mm aufwies. Auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) lagen die Rissöffnungen noch bei maximal 0,1 mm.

Nach dem Fliessbeginn der Biegebewehrung wurde die Durchbiegung der beiden Kragarme kontinuierlich vergrößert. Die letzte Laststufe LS 7 des ersten Versuchs wurde bei einer Kraft von $F_A = F_B \approx 210$ kN und dazugehörigen Durchbiegungen von $w_1 \approx w_2 \approx 20,5$ mm bei beiden Kragarmen durchgeführt. Gegenüber der Laststufe LS 6 hatte sich das Rissbild nur geringfügig verändert. Neben der Bildung von je einem neuen Riss bei den Kragarmenden und vereinzelter, in x -Richtung verlaufender Verbundrisse auf der Oberseite wurde eine Vergrößerung der Rissbreiten sowie eine Verlängerung der Risse auf der Vorder- und Hinterseite festgestellt. Der Ver-

**Bild 4.102:** A7V1 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

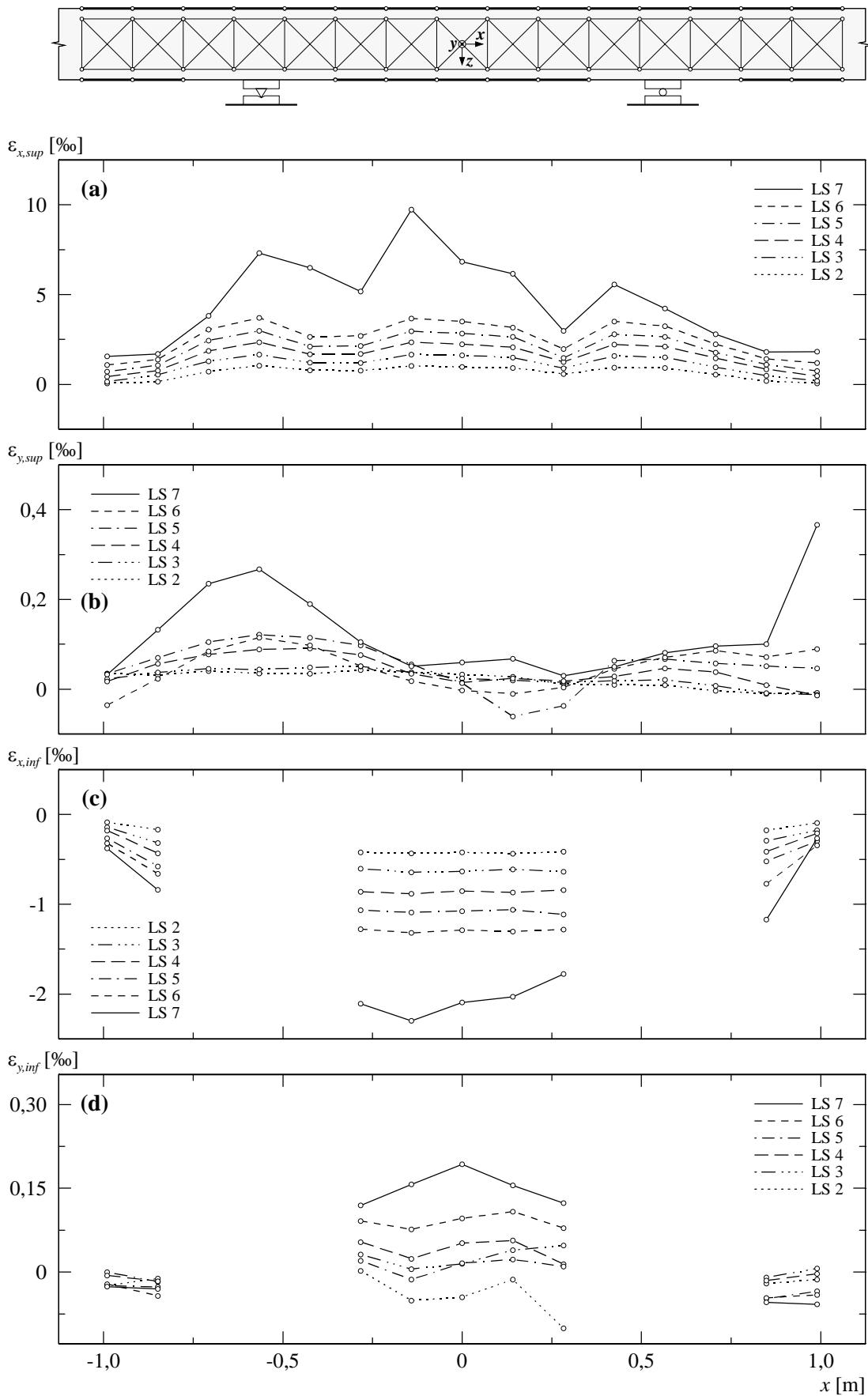


Bild 4.103: A7V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben; (c) mittlere Längsdehnungen unten; (d) mittlere Querdehnungen unten.

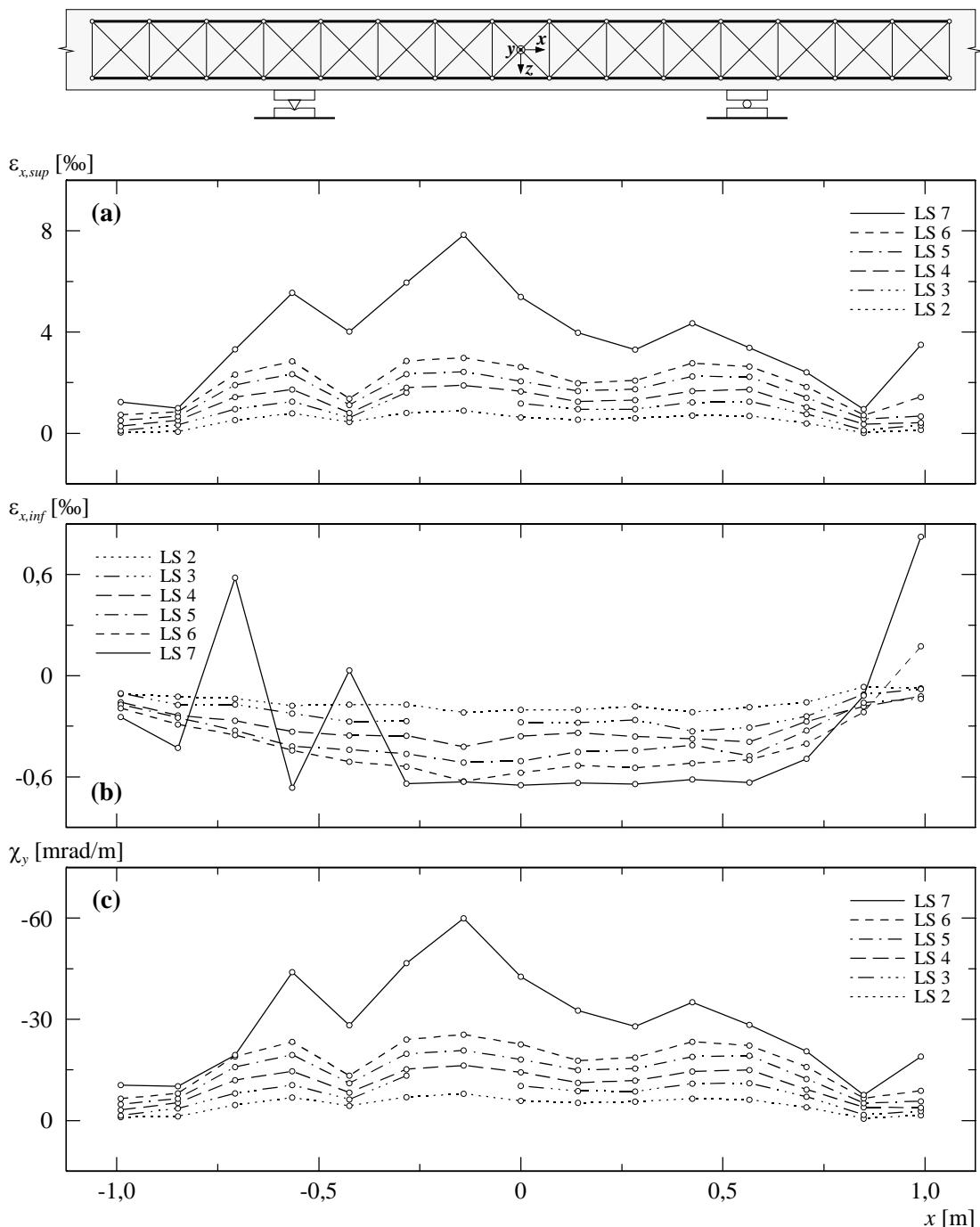


Bild 4.104: A7V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

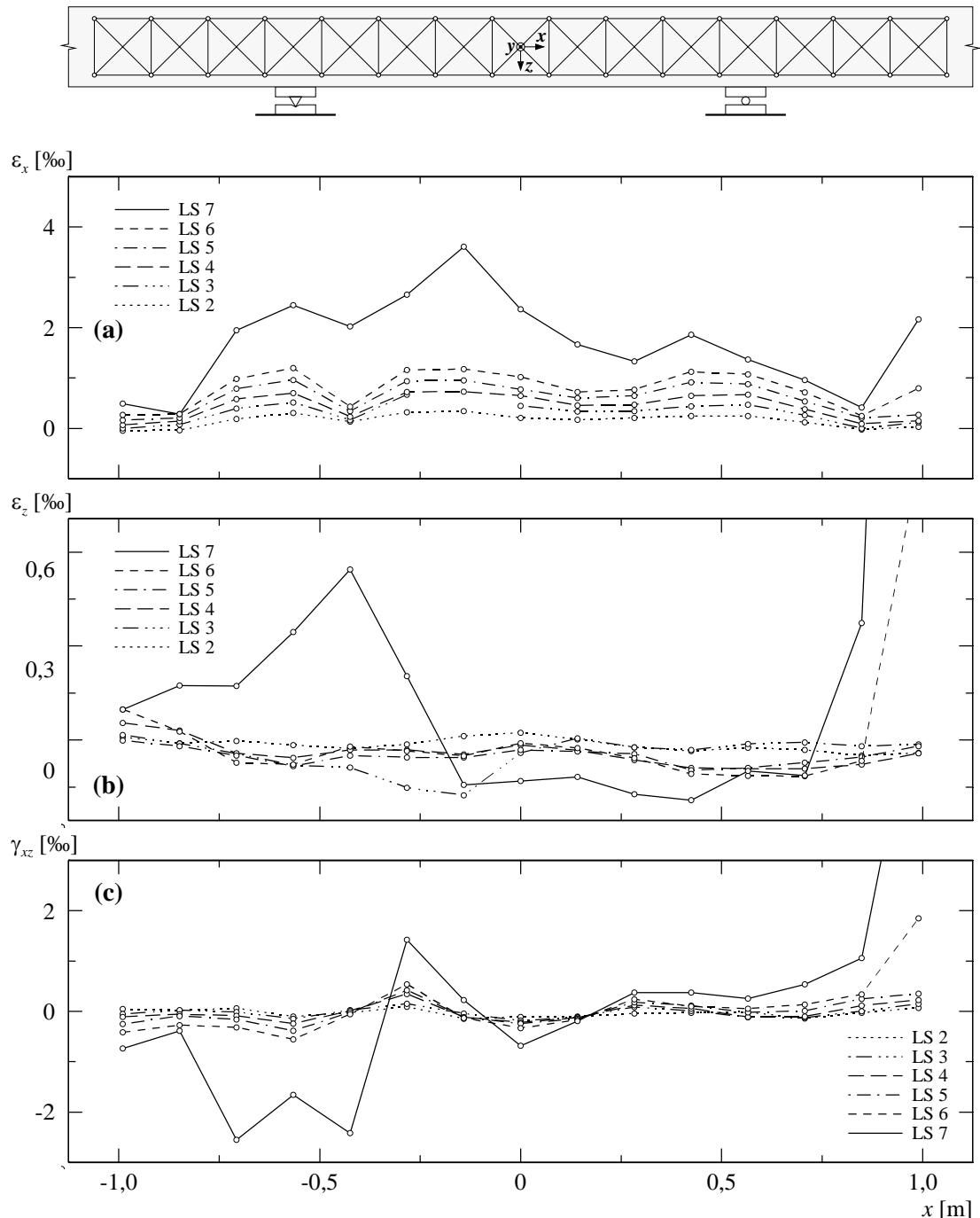
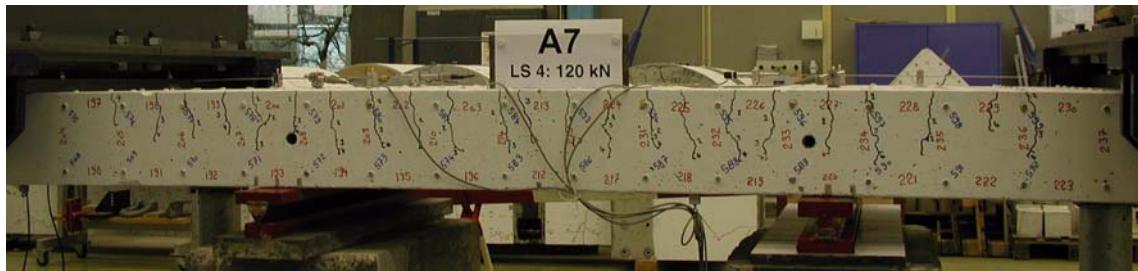


Bild 4.105: A7V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

(a)



(b)

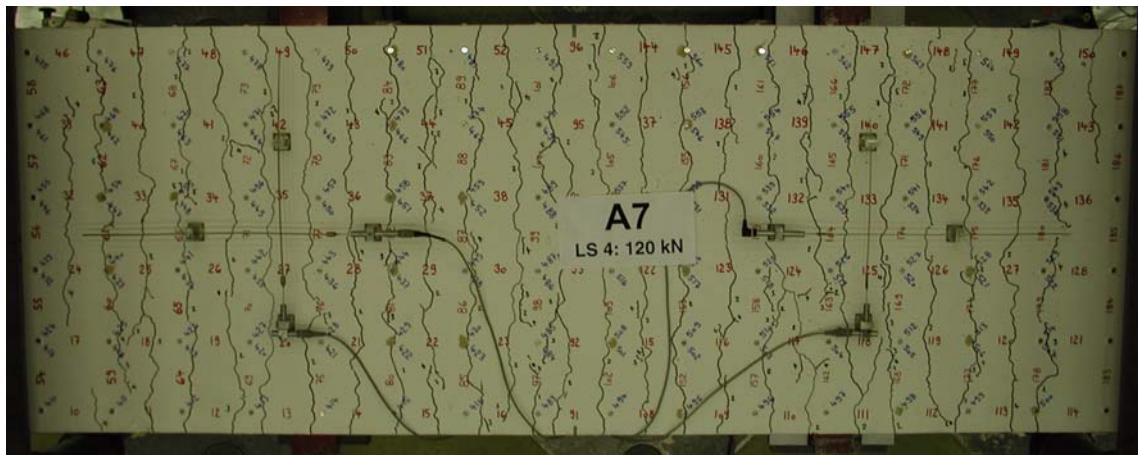
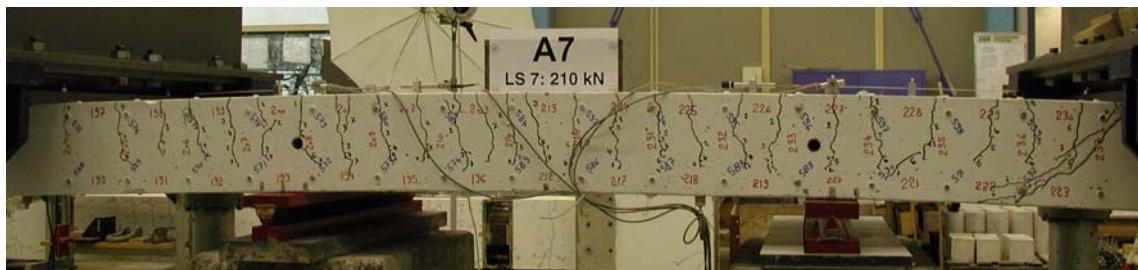


Bild 4.106: A7V1 – Rissbild bei Laststufe LS 4: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

(a)



(b)

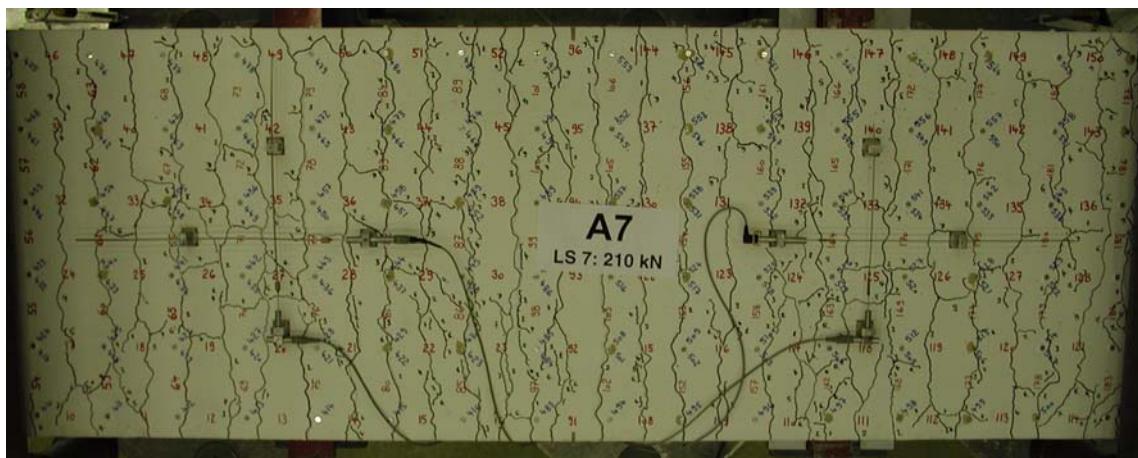
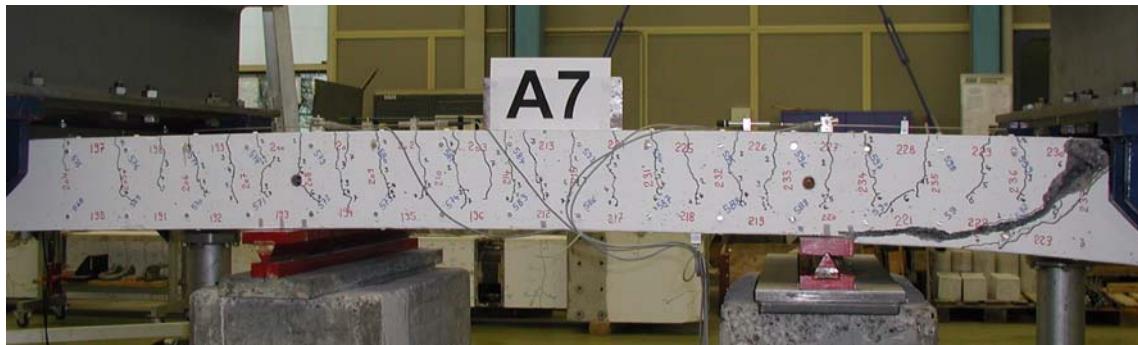


Bild 4.107: A7V1 – Rissbild bei Laststufe LS 7: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

(a)



(b)



(c)



Bild 4.108: A7V1 – Rissbild nach Versuchsende: (a) Vorderseite; (b) und (c) Biegeschubbruch im Kragarm K2.

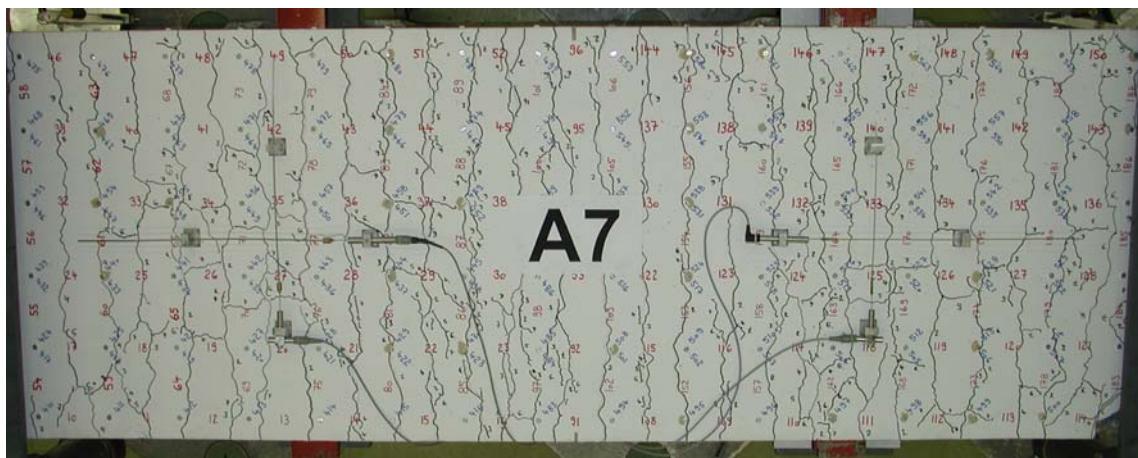


Bild 4.109: A7V1 – Rissbild auf der Oberseite nach Versuchsende.

satzriss im Kragarm K2 hatte sich auf der Oberseite 0,7 mm weit geöffnet, wobei ein vertikaler Versatz der beiden Rissufer von ungefähr 0,6 mm gemessen wurde. Die Verformungen lokalisieren sich über dem nördlichen Lager und auf der nördlichen Mittelfeldseite ($x \approx -560 \div 200$ mm). Dabei lagen die Rissbreiten zwischen 0,35 und 0,6 mm, während die Risse in den übrigen Bereichen maximale Rissbreiten von 0,2 mm aufwiesen. Auf der Vorder- und Hinterseite pflanzte sich der Versatzriss mit einer bedeutend flacheren Neigung bis zur Unterseite des Versuchskörpers fort. In der Biegedruckzone wies dieser eine Neigung von 15 bis 20° gegenüber der x -Achse auf. Die Rissbreite betrug im Bereich zwischen der Biegebewehrungslage und der Biegedruckzone ($z \approx -80 \div 80$ mm) zwischen 1,2 und 1,5 mm. Die bestehenden Risse hatten sich bei gleichbleibender Rissneigung verlängert und erstreckten sich nun über die oberen 70 bis 80 % der Versuchskörperhöhe. Auf der Höhe der oberen Deformettermessreihe wurden Rissbreiten von 0,05 bis 0,45 mm und auf halber Versuchskörperhöhe solche von maximal 0,25 mm gemessen.

Im weiteren Versuchsfortschritt wurde bei einer Durchbiegung von $w_1 = 25,2$ mm beim Kragarm K1 und $w_2 = 25,9$ mm beim Kragarm K2 die Höchstlast erreicht. Die entsprechende Kraft betrug $F_A = F_B = 216,0$ kN. Unmittelbar nach Überschreiten der Höchstlast fiel die Kraft ab, wobei eine sukzessive Zunahme der Durchbiegung im Kragarm K2 festgestellt wurde. Bei einer Kraft von $F_A = F_B = 209,4$ kN erfolgte schlagartig und ohne Vorankündigung ein Biegeschubbruch des Kragarms K2. Dabei wurde die bis zum Kragarmende verlaufende Biegebewehrung an der Stelle der Bewehrungsabstufung abgequetscht, und grössere Teile des Überdeckungsbetons in der Biegedruckzone wurden auf einer Länge von ungefähr 200 mm rechts vom südlichen Lager abgetrennt. Die leicht s-förmig gekrümmte Bruchfläche folgte in ihrem mittleren, steil verlaufenden Teil dem vorhandenen Versatzriss bei der Bewehrungsabstufung. Der untere, flache Teil bis zum Auflager entstand unmittelbar beim Bruch.

Bei der abschliessenden Untersuchung des Versuchskörpers wurden im Bereich der Bewehrungsabstufung vereinzelte Querkraftbewehrungsstäbe entdeckt, welche unterhalb der Biegebewehrungslagen zerrissen waren. Der Versatzriss verlief zwischen der zweitäußersten und drittäußersten Reihe der Querkraftbewehrungsstäbe. Weiter wies die Bruchfläche im unteren, sehr flachen Teil eine rauhe Beschaffenheit der Oberfläche auf.

4.8.2 Versuch A7V2

Der Versuch wurde innerhalb eines Tages durchgeführt. Vor der eigentlichen Durchführung des Versuchs erfolgte im unbelasteten Zustand die Deformettermessung der Laststufe LS 8. Diese diente zur Bestimmung der plastischen Verformungen nach dem ersten Versuch, welche beim zweiten Versuch als initiale Vorverformungen berücksichtigt wurden. Anschliessend erfolgte die Belastung des Versuchskörpers und die Durchführung der Laststufen LS 9 und LS 10.

Laststufe (LS)	F_A [kN]	F_B [kN]	F_C [kN]	$-V_{C1}$ [kN]	$-M_C$ [kNm]	w_1 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	Bemerkungen
8	0	-7,8	12,2	7,8	4,2	11,8	1,48	0,18	Nullmessung
9	228,5 173,0	151,1 112,6	399,6 305,5	236,2 180,7	150,4 114,9	25,7 24,3	3,79 3,60	0,59 0,58	Belastungsende Messende
10	236,0 191,7	156,4 125,6	412,4 337,3	243,8 199,5	155,2 126,9	36,1 35,2	7,10 7,04	0,71 0,69	Belastungsende Messende
HL	243,2	161,4	424,6	251,0	159,8	50,3	11,63	0,72	Höchstlast
Entlastung	87,5	53,1	160,5	95,3	60,2	182,8	–	–	Entlastungsbeginn

Tabelle 4.28: A7V2 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 4.2).

Während der Belastung bis zur Laststufe LS 9 ($F_A \approx 225$ kN) bildete sich im Kragarm K1 auf der Unterseite ein Längsriss, der eine Länge von ca. 350 mm hatte und ungefähr parallel zur x -Richtung in der hinteren Versuchskörperhälfte ($y \approx -100$ mm) verlief. Unten an der Stirnseite des Versuchskörpers betrug die Rissbreite 0,1 mm.

Nach dem Fliessbeginn der Biegebewehrung wurde die Laststufe LS 9 bei einer Kraft von $F_A \approx 225$ kN durchgeführt. Das Rissbild hatte sich gegenüber der Laststufe LS 7 kaum verändert. Neben der Bildung vereinzelter, in x -Richtung verlaufender Verbundrisse auf der Oberseite und der Verlängerung bestehender Risse auf der Vorder- und Hinterseite, konnte eine Vergrösserung der Rissbreiten beobachtet werden. Auf der Oberseite hatte sich ein Riss im Bereich des nördlichen Lagers 1,2 mm und im Mittelfeld 1 mm weit geöffnet. Die übrigen Risse wiesen mittlere Rissabstände von ungefähr 80 mm auf. Im Kragarm wurden Rissbreiten zwischen 0,05 und 0,2 mm gemessen, während die Rissbreiten im Auflagerbereich zwischen 0,15 und 0,65 mm und im Mittelfeld zwischen 0,15 und 0,5 mm lagen. Die bestehenden Risse auf der Vorder- und Hinterseite hatten sich teilweise verlängert und verästelt. Dabei erstreckten sich Risse über die oberen 70 bis 80 % der Versuchskörperhöhe. Die Rissbreiten betrugen auf der Höhe der oberen Deformettermessreihe (≈ 30 mm unterhalb der Oberkante) 0,05 bis 0,75 mm und auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) 0,05 bis 0,25 mm.

Im weiteren Versuchsfortschritt wurde die Durchbiegung des Kragarms K1 vergrössert. Die letzte Laststufe LS 10 des zweiten Versuchs wurde bei einer Kraft von $F_A \approx 235$ kN und einer Durchbiegung von $w_1 \approx 36,1$ mm durchgeführt. Bei dieser Laststufe konnten auf der Mittelfeldseite beim nördlichen Lager (Stelle C) die ersten feinen Betonstauchungsrisse auf der Unterseite festgestellt werden. Auf der Oberseite hatte sich das Rissbild bis auf vereinzelte Verästelungen nicht verändert, während vorwiegend im Bereich beim nördlichen Lager eine Vergrösserung der bestehenden Risse beobachtet wurde. Dabei wurden drei Risse mit Rissbreiten zwischen 1,2 bis

Laststufe	Oberseite			Vorderseite – Kragarm	
	Kragarm K1 w_{cr} [mm]	Lager NORD w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	$z \approx -70$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 9	0,05...0,20	0,15...1,20	0,15...1,00	0,05...0,75	0,05...0,25
LS 10	0,05...0,25	0,15...2,05	0,20...1,00	0,05...1,50	0,05...0,45

Tabelle 4.29: A7V2 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen.

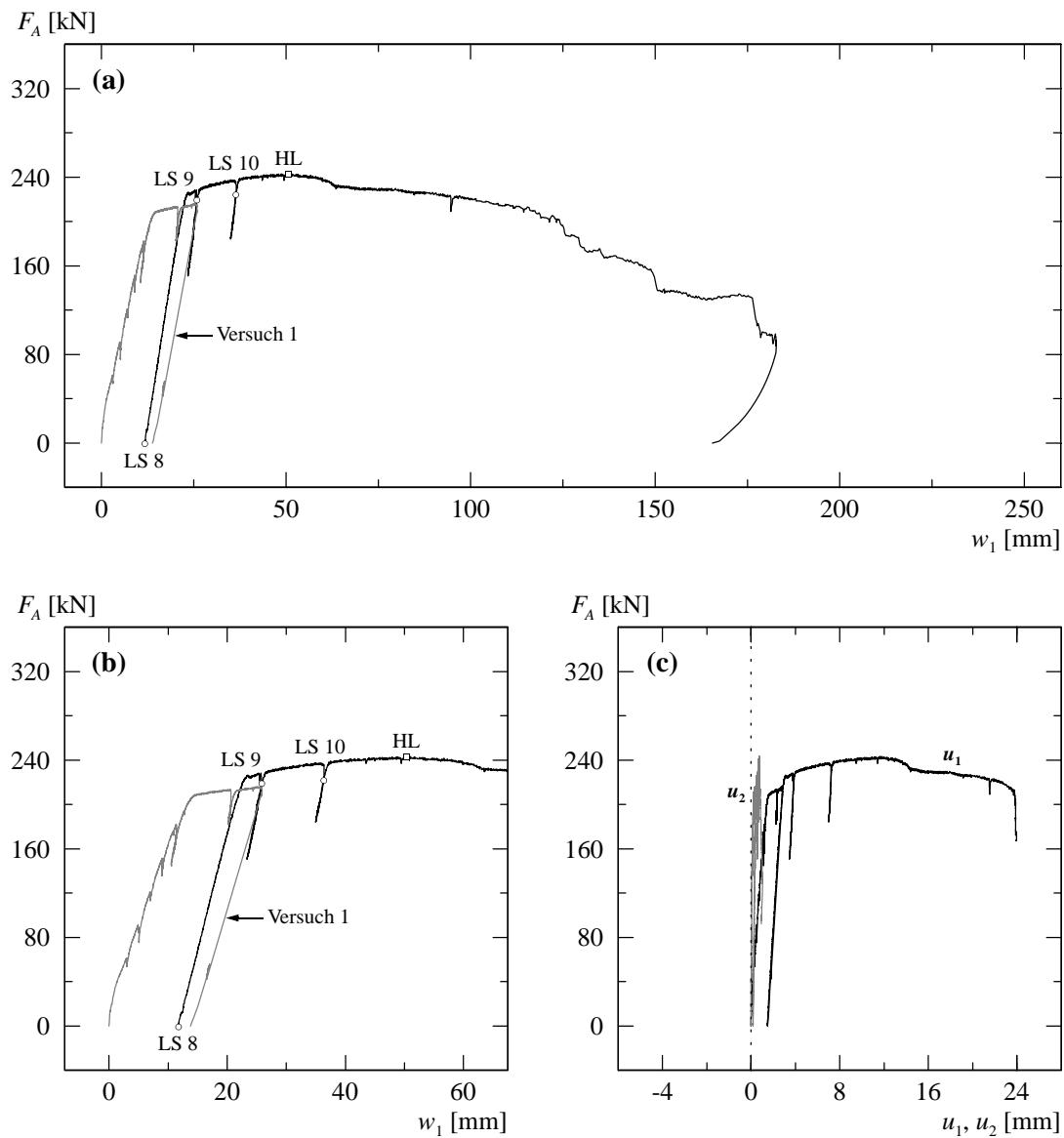


Bild 4.110: A7V2 – (a) und (b) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K1; (c) Verformungen der Zugzone über Auflager NORD.

maximal 2,05 mm gemessen. Die übrigen Rissbreiten betrugen in diesem Bereich zwischen 0,15 und 0,5 mm. Im Kragarm lagen die Rissöffnungen zwischen 0,05 und 0,25 mm und im Mittelfeld zwischen 0,3 und maximal 1,1 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite konnte die Verlängerung der bestehenden Risse im Kragarm festgestellt werden, während sich das Rissbild im Mittelfeld nicht verändert hatte. Im Auflagerbereich erstreckten sich die Risse über die oberen 85 % der Versuchskörperhöhe. Die Risse wiesen auf der Höhe der oberen Deformettermessreihe Rissbreiten von 0,05 bis maximal 1,5 mm auf. Bei den anfänglich relativ steil verlaufenden Rissen im Kragarm wurde im unteren Bereich eine deutliche Abflachung der Risse beobachtet. Auf halber Versuchskörperhöhe wurden Rissneigungen von 50 bis 70° gegenüber der x-Achse gemessen, die sich im unteren Bereich schliesslich auf 30 bis 45° verringerten. Ausser zwei flachen Verästelungsrissen auf halber Versuchskörperhöhe verliefen die Risse im Mittelfeld ungefähr vertikal und zeigten nur im untersten Bereich eine teilweise flachere Fortsetzung gegen das Lager. Die Rissbreiten betragen auf halber Versuchskörperhöhe noch maximal 0,45 mm. Der Längsriss auf der Unterseite im Kragarm wies an der Stirnseite eine unveränderte Rissbreite von 0,1 mm auf.

Mit zunehmender Kragarmdurchbiegung wurde bei einer Durchbiegung von $w_1 = 50,3$ mm beim Kragarm K1 die Höchstlast erreicht. Die entsprechende Kraft betrug $F_A = 243,2$ kN. Gleich-

zeitig konnten die ersten Betonstauchungsrisse in der Biegedruckzone auf der Mittelfeldseite beim nördlichen Lager festgestellt werden.

Nach dem Überschreiten der Höchstlast lösten sich bei einer Durchbiegung von $w_1 \approx 60$ mm auf der Mittelfeldseite beim nördlichen Lager die ersten Betonplättchen in der Biegedruckzone ab. Die ersten grösseren Kraftabfälle wurden ab einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 125$ mm beobachtet. Dabei konnte das Zerreissen von Querkraftbewehrungsstäben akustisch wahrgenommen werden. Mit zunehmender Durchbiegung w_1 platzten rechts beim nördlichen Lager (im Mittelfeld) grössere Teile des Überdeckungsbetons an der Unterseite ab. Bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 183$ mm wurde der Versuch abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt noch ungefähr 36 % der Höchstlast. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden.

Bei der abschliessenden Untersuchung des Versuchskörpers konnte auf der Mittelfeldseite beim nördlichen Lager eine ausgeprägte Rissfläche festgestellt werden. Diese erstreckte sich mit einer Neigung von 45° gegenüber der x -Achse vom rechten Lagerrand bis zur Oberseite. An der Unterseite war der Überdeckungsbeton der Biegedruckzone in einem Bereich von 100 bis 160 mm rechts vom nördlichen Lager abgeplatzt, wobei die Abplatzungen in unmittelbarer Auflagernähe eine Dicke von ungefähr 30 bis 35 mm aufwiesen. Die unter 45° geneigte Rissfläche zeigte im unteren, oberhalb der Betonüberdeckung liegenden Bereich ($z \approx 65 \div 80$ mm) leichte Spuren einer Zerstörung der Rissverzahnung beziehungsweise eines gegenseitigen Abgleitens der Rissufer. Auf der Vorderseite wurde eine vertikale Relativverschiebung der rechten Versuchskörperhälfte (Mittelfeldseite) von ungefähr 25 mm gemessen, während auf der Hinterseite nur geringfügige Verschiebungen festgestellt wurden. Die unterschiedlichen Relativverschiebungen entlang der Lagerachse führten zu einer Verwindung der beiden Versuchskörperhälften. Dabei wurden auf der Oberseite grössere Teile des Überdeckungsbetons rechts vom nördlichen Lager abgelöst. Entsprechend den Relativverschiebungen erstreckten sich die Abplatzungen auf der vorderen Versuchskörperhälfte über eine Länge von 250 bis 300 mm und auf der hinteren Versuchs-

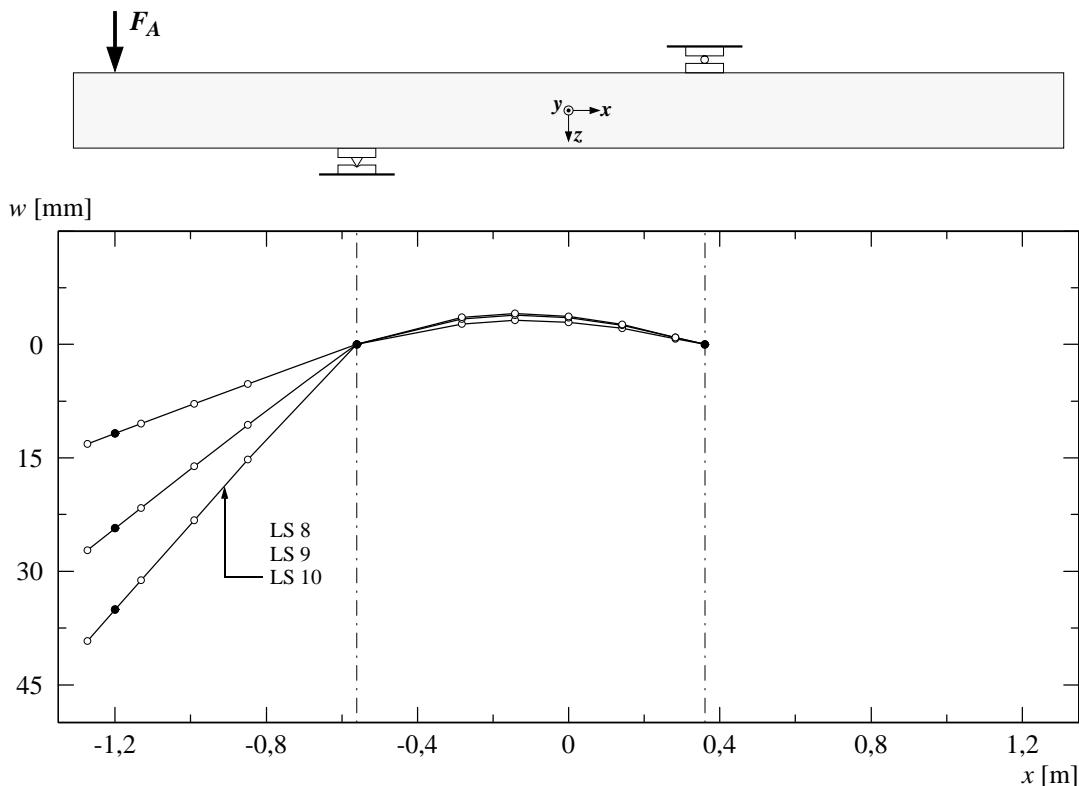


Bild 4.111: A7V2 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

körperhälfte über eine solche von 150 bis 250 mm. Weiter waren die Querkraftbewehrungsstäbe in der zweiten Reihe neben dem Auflager unterhalb der Biegebewehrungslagen zerrissen.

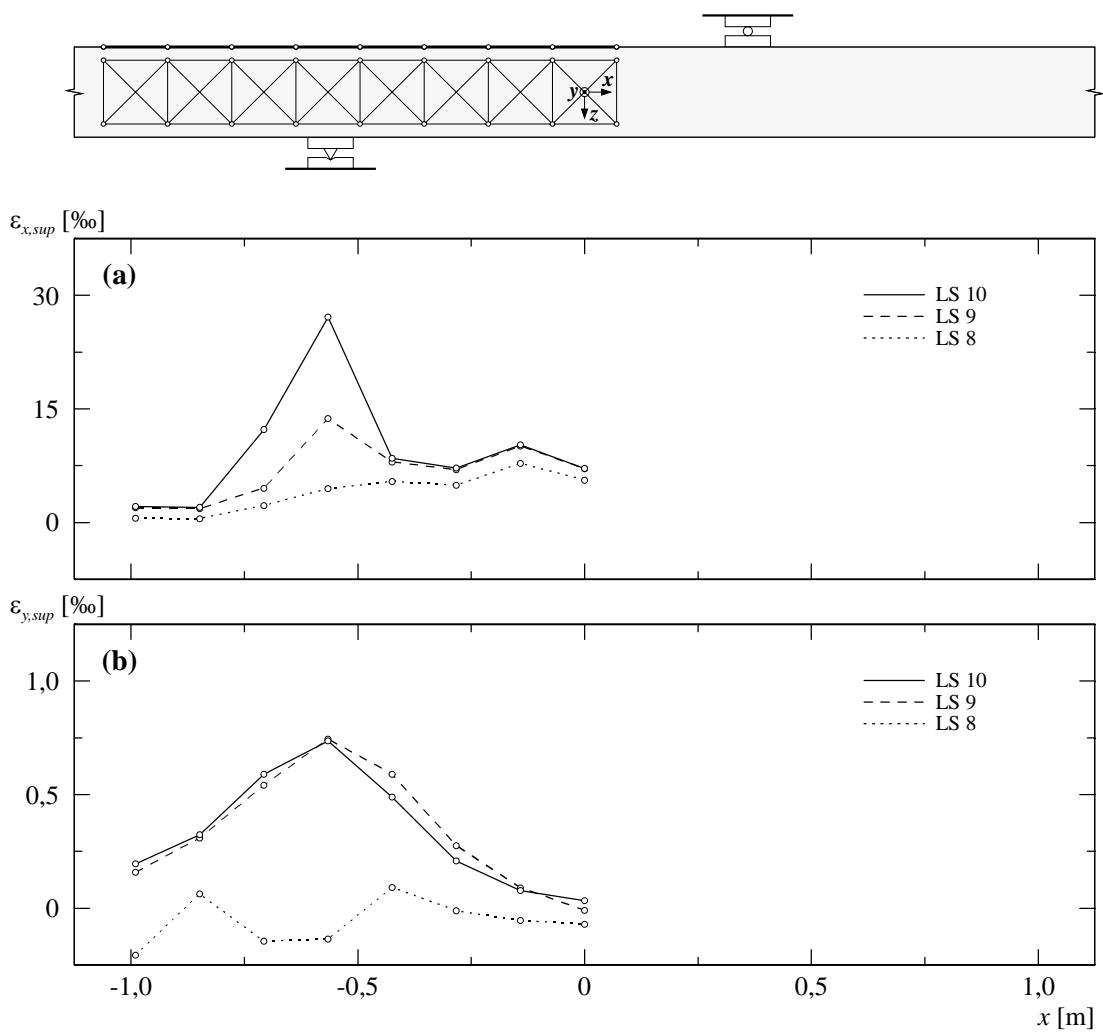


Bild 4.112: A7V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben.

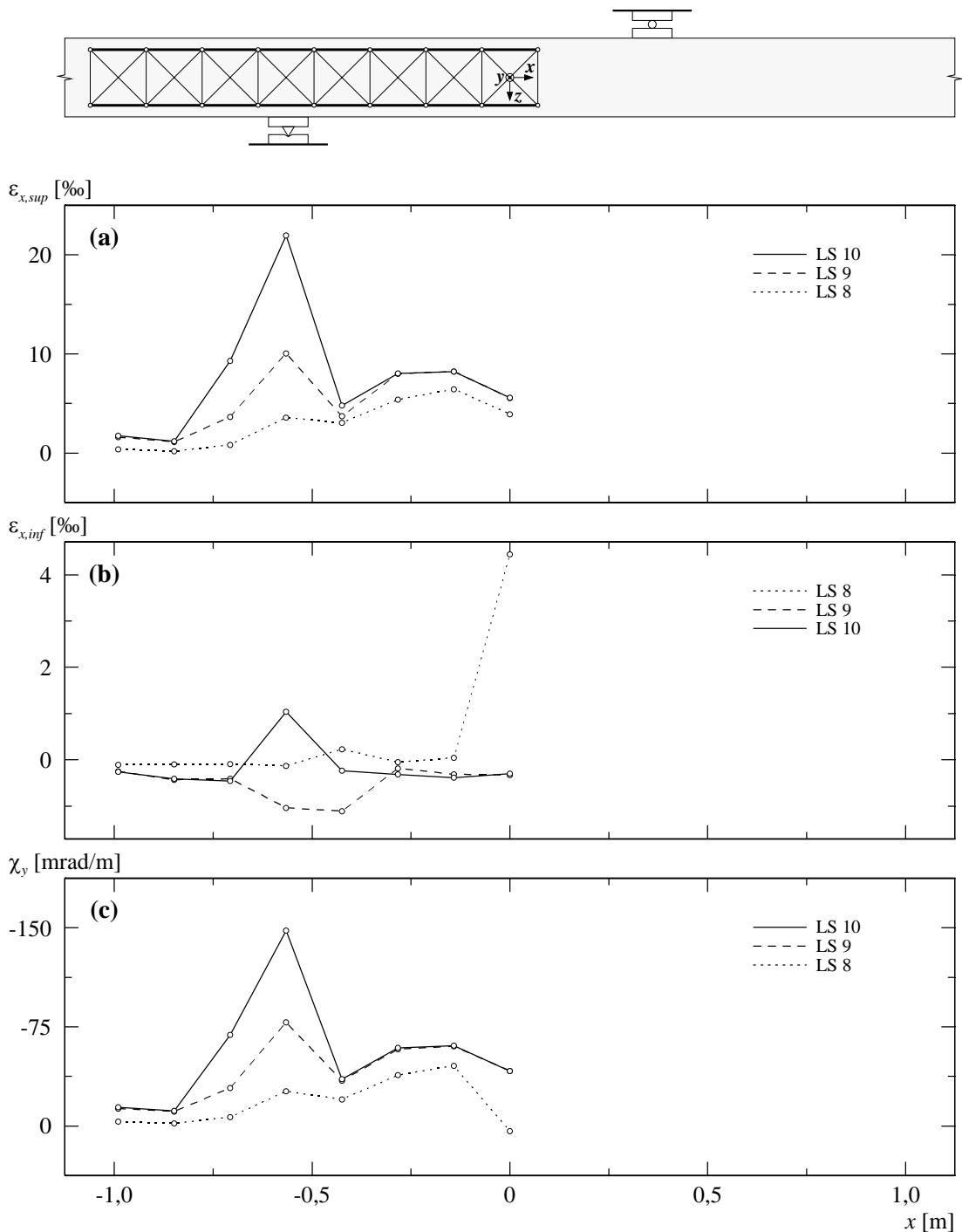


Bild 4.113: A7V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

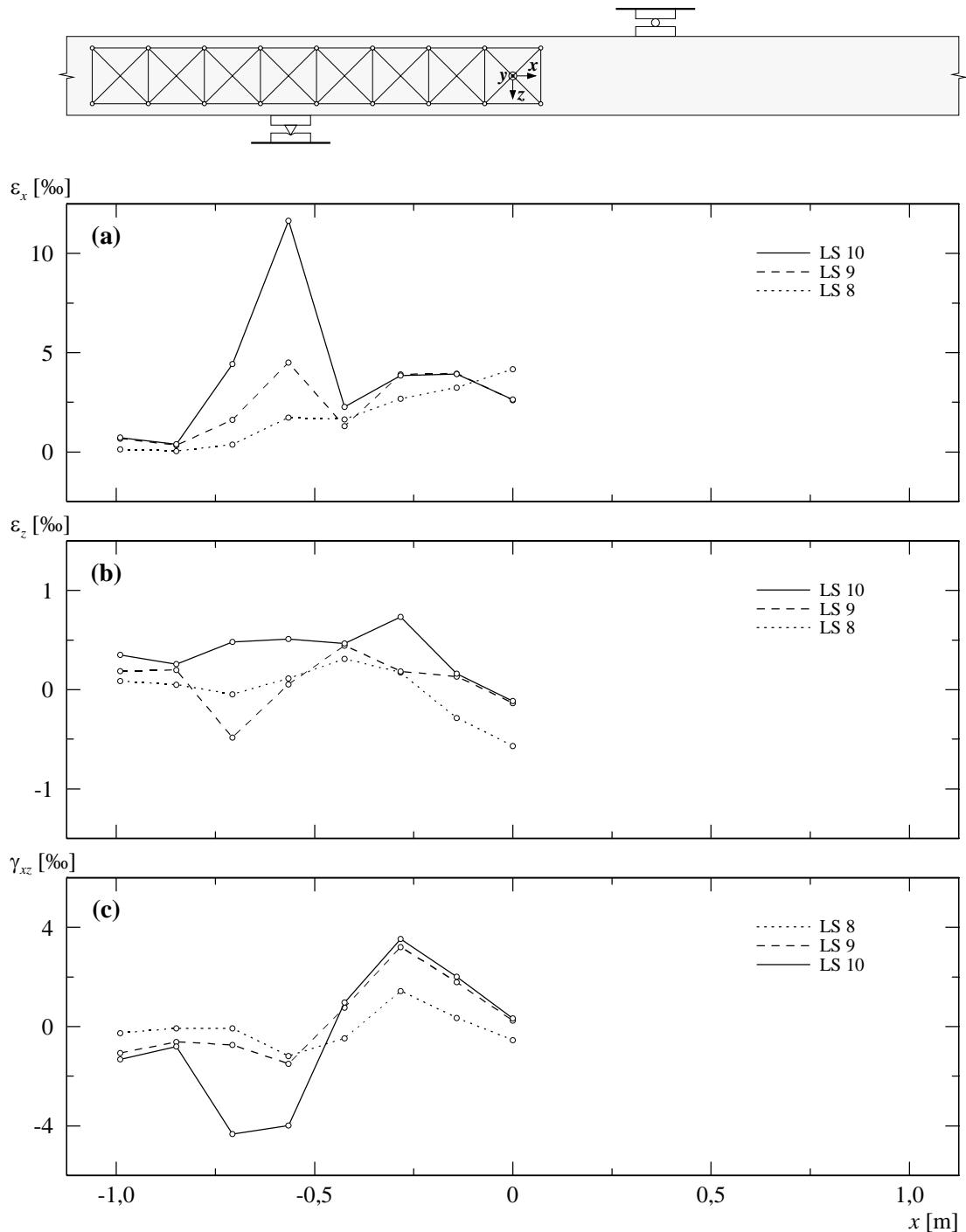
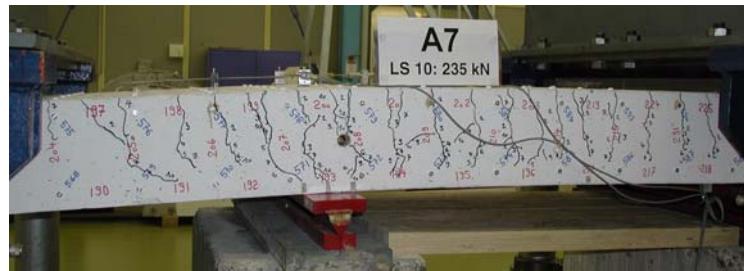


Bild 4.114: A7V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

(a)



(b)

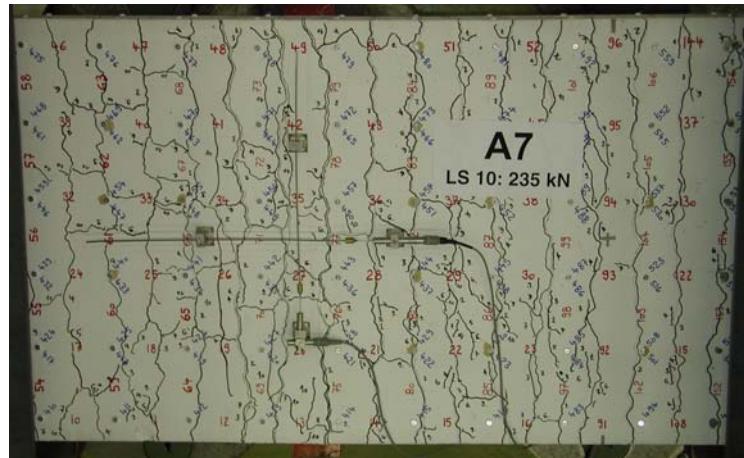


Bild 4.115: A7V2 – Rissbild bei Laststufe LS 10: (a) Vorderseite; (b) Oberseite.

(a)



(b)



(c)



Bild 4.116: A7V2 – Rissbild nach Versuchsende: (a) Vorderseite; (b) Oberseite beim nördlichen Lager; (c) Bruchzone beim nördlichen Lager.

5 Versuchsresultate Serie B

5.1 Auswertung und Darstellung der Messdaten

5.1.1 Bezeichnungen

Für die Darstellung der Messresultate und der fotografischen Aufnahmen werden dieselben Blickrichtungen verwendet. Diese entsprechen einer Ansicht von “oben” und von “vorne” auf den Versuchskörper. Bei Versuchen mit unterschiedlichen Entwicklungen der Rissbilder auf der Vorder- und Hinterseite werden zusätzlich auch fotografische Aufnahmen mit einer Ansicht von “hinten” gezeigt. Der Ursprung des zur Beschreibung der Versuchsresultate verwendeten orthogonalen rechtshändigen Koordinatensystems liegt beim festen Lager im Querschnittsmittelpunkt der Versuchskörper ($x = 0$ über festem Auflager für Versuch 1 und Versuch 2). Die positive x -Richtung zeigt nach rechts, beziehungsweise von “Süden” nach “Norden”. Die für die Auswertung und Darstellung verwendeten Bezeichnungen sind in den Bildern 5.2 und 5.3 dargestellt.

Die im Text und bei den Deformettermessungen (Bilder 3.12 bis 3.14) verwendeten Bezeichnungen “oben”, “unten”, “vorne” und “hinten” beschreiben den Standort der Messungen und Beobachtungen bezogen auf den eingebauten Versuchskörper. Der mit den Zylindern belastete Kragarm befindet sich auf der “südlichen Seite” und das bewegliche Lager mit den Flachpressen auf der “nördlichen Seite” der Versuchsanlage. Die “Vorderseite” entspricht der “Ostseite”.

Im Text werden weiter die Bezeichnungen “innere Bereiche des Kragarms / Mittelfelds”, “äussere Bereiche des Kragarms / Mittelfelds” sowie “erste Hälfte des Kragarms / Mittelfelds” verwendet. Dabei beziehen sich die “inneren Bereiche” und die “ersten Hälften” auf die Bereiche des Versuchskörpers welche unmittelbar links und rechts beim festen Lager liegen.

5.1.2 Deformettermessungen

Die Auswertung der Messdaten, die bei jeder Laststufe durch die Deformettermessungen gewonnen wurden, erfolgte in mehreren Schritten. Zuerst wurden die infolge der Erwärmung der Messgeräte entstehenden systematischen Messfehler eliminiert. Dazu wurden die Differenzen der in Kapitel 3.2.2 erwähnten Referenzmessungen am Invarstab linear auf die dazwischenliegenden Messungen verteilt. In einem zweiten Schritt wurden dann für alle Messwerte die Differenzen zur Nullmessung gebildet. Offensichtliche Fehlmessungen wurden anschliessend eliminiert.

Die Messnetze auf den vier Seiten der Versuchskörper waren überbestimmt, so dass die zufälligen Messfehler anhand einer Fehlerausgleichsrechnung, welche der Methode der kleinsten Quadrate entspricht, minimiert werden konnten. Dazu wurden die Messnetze als entsprechende, innerlich statisch unbestimmte, linear elastische Fachwerke mit gelenkigen Knoten modelliert, die mit einer aufgezwungenen Verformung in Form initialer Stabdehnungen belastet wurden. Die initialen Stabdehnungen entsprechen dabei den gemessenen Längenänderungen aus den Defometermessungen. Dividiert man die resultierenden Stabkräfte durch die Stabsteifigkeiten EA/l der ent-

sprechenden Stäbe, so erhält man die Messfehler, welche zu den gemessenen Längenänderungen addiert werden müssen, um die ausgeglichenen Werte der Längenänderungen zu erhalten. Die einzelnen Messwerte haben bei diesem Fehlerausgleich ein zu den Stabsteifigkeiten EA/l proportionales Gewicht. Unterschiedliche Messgenauigkeiten der für die verschiedenen Messstrecken eingesetzten Messgeräte konnten somit durch die entsprechende Wahl der Stabsteifigkeiten berücksichtigt werden. Offensichtliche Fehlmessungen und wegen abgefallener Bolzen fehlende Messungen konnten bei diesem Ausgleichsverfahren dank der Überbestimmtheit des Messnetzes aus den korrekt ausgeführten Messungen ermittelt werden. Dazu wurden die offensichtlichen Fehlmessungen mit einem Wert der gemessenen Längenänderung von 0 und verschwindend kleiner Stabsteifigkeit EA/l in die Fehlerausgleichsrechnung einbezogen. Die daraus resultierenden Zwangsstabkräfte dividiert durch die Stabsteifigkeiten entsprachen somit direkt den ausgeglichenen Längenänderungen.

Als letzter Schritt wurden die mittleren Verzerrungen ε_x , ε_y und $\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{xy}$ der einzelnen Maschen auf der Ober- und Unterseite sowie ε_x , ε_z und $\varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{xz}$ auf der Vorder- und Hinterseite

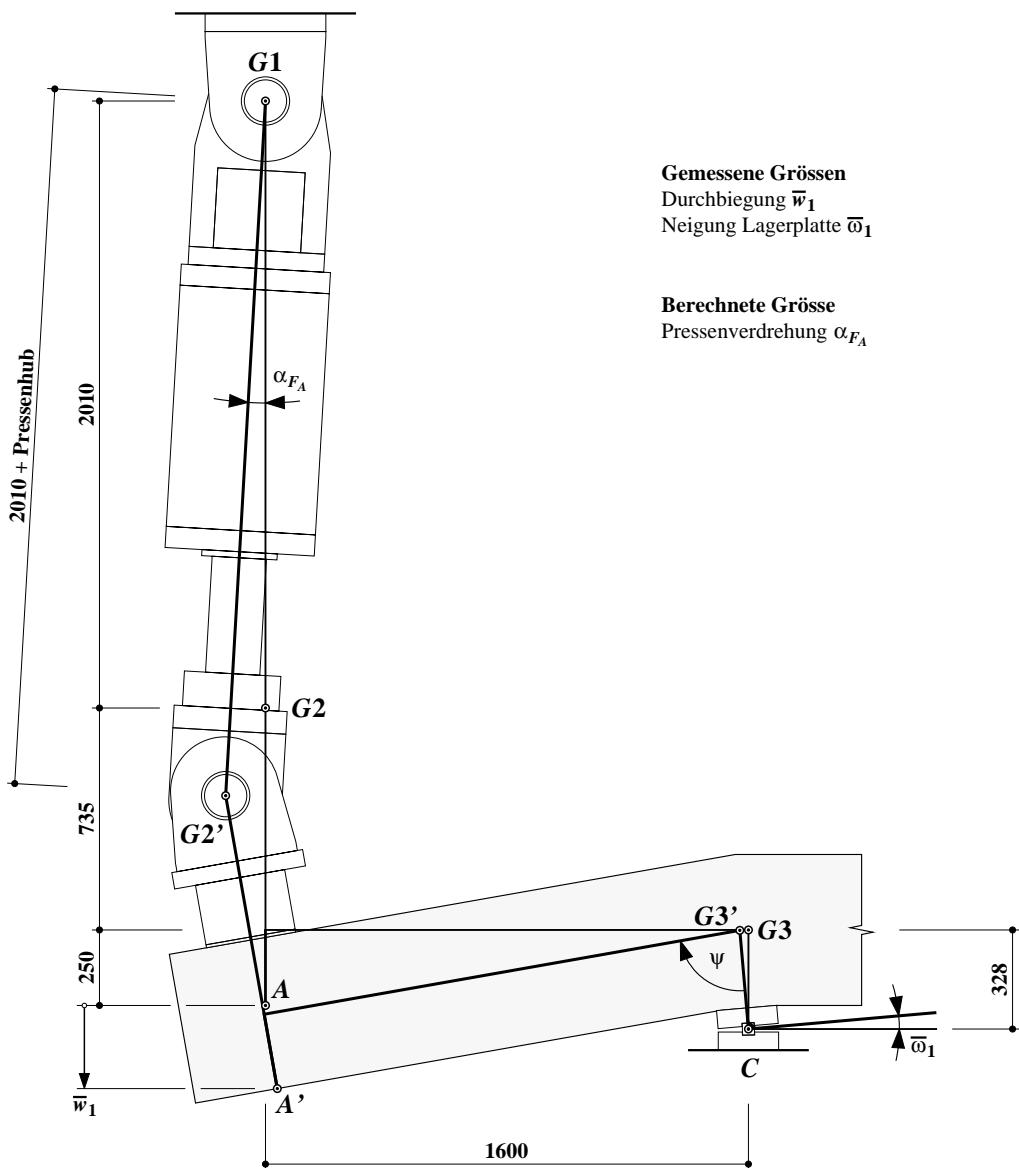


Bild 5.1: Modellannahme zur Beschreibung der Pressenverdrehung – Mechanismus für die Serie B. Abmessungen in mm.

der Versuchskörper bestimmt. Die entsprechende Maschennummerierung ist in den Bildern 3.12 bis 3.14 dargestellt.

In der Folge werden die Resultate als Mittelwerte der Maschenverzerrungen für ausgewählte Laststufen dargestellt. Auf der Ober- und Unterseite der Versuchskörper wurden dazu die Werte über die Breite gemittelt. Für die seitlichen Verzerrungen wurden die Mittelwerte von den entsprechenden Messreihen und Maschen auf der Vorder- und Hinterseite der Versuchskörper verwendet. Die Krümmungen entlang der Stabachse wurden aus den seitlichen Längsdehnungen der obersten und untersten Messreihen berechnet. Die mittleren seitlichen Dehnungen ε_x , ε_z und die Schiebungen γ_{xz} entsprechen den über die Dicke des Plattenkerns gemittelten Verzerrungen entlang der x -Achse.

5.1.3 Kontinuierliche Messungen

Die Bilder 5.2 und 5.3 zeigen die für die Auswertung der Versuche verwendeten statischen Systeme mit den Bezeichnungen für die Verformungen, Kräfte und Schnittgrößen. Die Eigenlast der Versuchskörper (g_{K1} , g_{K2} und g_M) wurde aus der Rohdichte der Betonprüfkörper und dem Bewehrungsgehalt der einzelnen Bereiche Kragarm K1, Mittelfeld und Kragarm K2 bestimmt. Die entsprechenden Werte sind in der Tabelle 5.1 zusammengestellt. Die Eigenlast der Belastungseinrichtung auf der "südlichen Seite" (Lastverteilträger und Kolbenstange der Hydraulikzylinder inklusive Anschlussteile) wurde mit $G_A = 25,09$ kN und auf der "nördlichen Seite" (Teflon-Gleitlager, Lastverteilträger und Flachpressen) mit $G_B = 3,64$ kN beim Grundversuch, respektive mit $G_B = 5,95$ kN beim Folgeversuch berücksichtigt. Die Messwerte der Durchbiegungen w_1 und w_2 sowie der Lagerverdrehung ω_1 entsprechen den Mittelwerten der vorderen und hinteren Messwerte.

Die Abweichung α_{F_A} der Hydraulikzylinder aus der Vertikalen wurde bei der Auswertung berücksichtigt. Bild 5.1 zeigt den angenommenen Mechanismus mit dem die Verdrehung der Hydraulikzylinder beschrieben wurde. Die Punkte C und G1 stellen die festen Gelenkpunkte des Mechanismus dar. Unter der Annahme starrer Stabelemente konnte die Lage der Gelenkpunkte

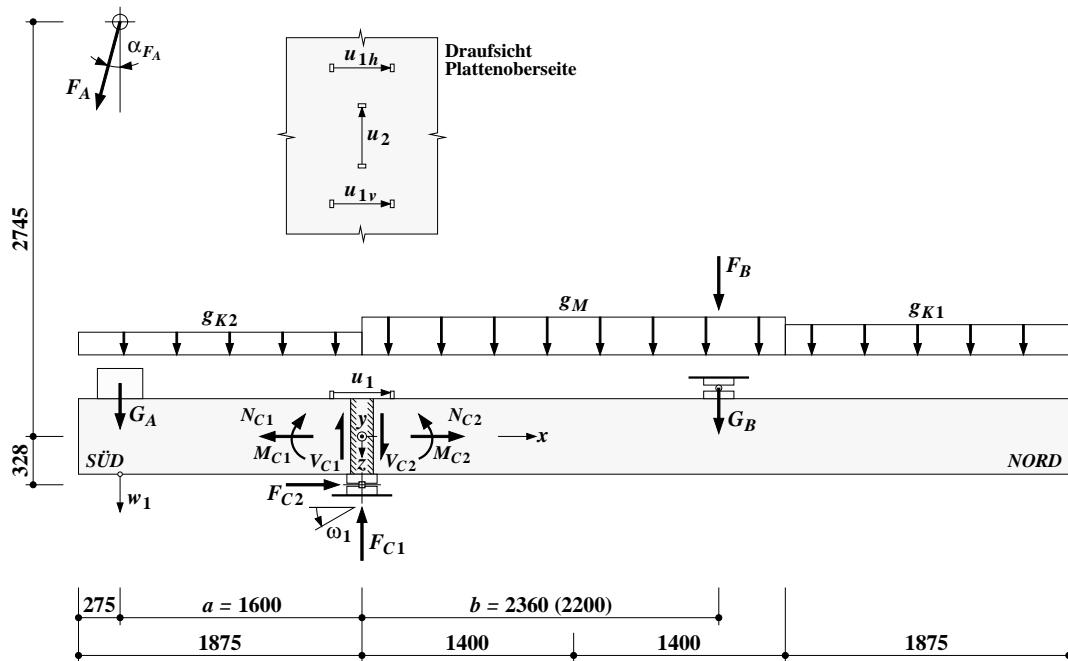


Bild 5.2: Bezeichnungen für die Serie B – Versuch 1. Abmessungen in mm.

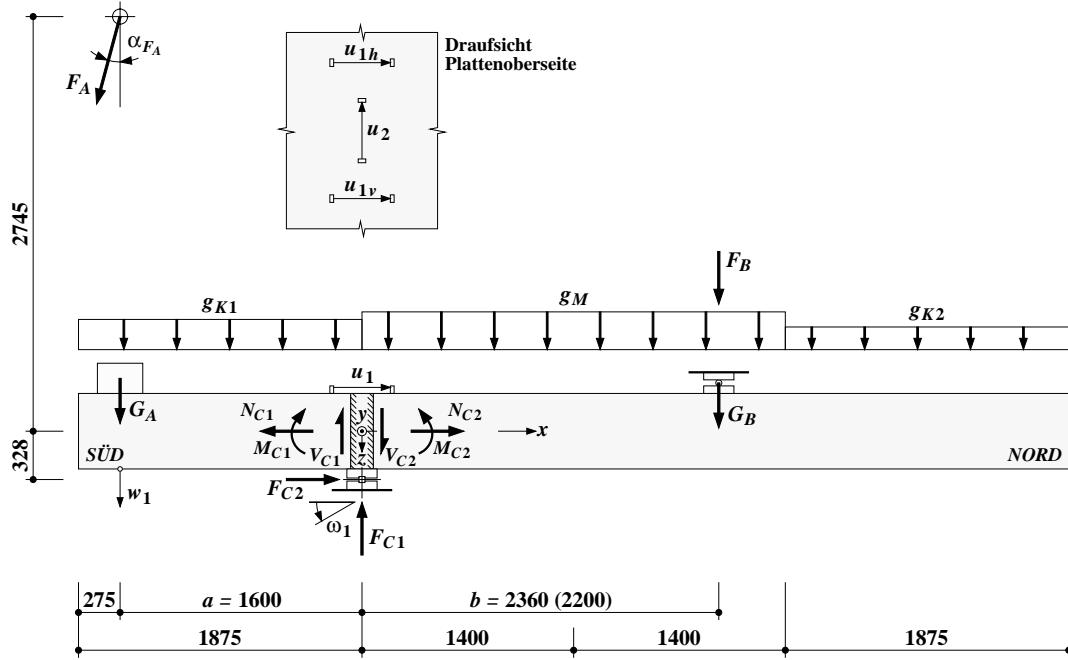


Bild 5.3: Bezeichnungen für die Serie B – Versuch 2. Abmessungen in mm.

$G2'$ und $G3'$ aus den gemessenen Verformungen \bar{w}_1 (vertikale Einsenkung des Punkts A) und Lagerverdrehungen $\bar{\omega}_1$ ermittelt werden. Anschliessend wurde die Verdrehung der Hydraulikzylinder α_{F_A} und der entsprechende Pressenhub bestimmt.

Die gemessenen Durchbiegungen \bar{w}_1 und \bar{w}_2 sowie die Lagerverdrehungen $\bar{\omega}_1$ wurden derart umgeformt, dass die Einsenkung w_2 an der Stelle B (bewegliches Lager) zu Null wurde. Diese Umformung umfasste eine Starrkörperrotation um das feste Lager.

Die Verformung u_1 entspricht dem Mittelwert der beiden Messwerte für die Verformungen u_{1v} und u_{1h} in Längsrichtung.

Ausser den gemessenen Kräften und Verformungen werden auch berechnete Auflagerreaktionen und Schnittgrößen in den Punkten B und C der Versuchskörper angegeben, die anhand der Beziehungen

$$F_B = \frac{1}{b} \cdot F_A \cdot (1,6 \cdot \cos \alpha_{F_A} + 3,073 \cdot \sin \alpha_{F_A}) + \frac{1,6}{b} \cdot G_A - G_B + \dots + \frac{1,758}{b} \cdot g_{K2(K1)} - \frac{3,92}{b} \cdot g_M - \frac{7,008}{b} \cdot g_{K1(K2)} \quad (5.1)$$

$$F_{C1} = \frac{1}{b} \cdot F_A \cdot ((1,6 + b) \cdot \cos \alpha_{F_A} + 3,073 \cdot \sin \alpha_{F_A}) + \frac{1,6 + b}{b} \cdot G_A + \dots + \frac{1,875 \cdot b + 1,758}{b} \cdot g_{K2(K1)} + \frac{2,8 \cdot b - 3,92}{b} \cdot g_M - \frac{1,875 \cdot b + 7,008}{b} \cdot g_{K1(K2)} \quad (5.2)$$

$$F_{C2} = N_{C1} = F_A \cdot \sin \alpha_{F_A} \quad (5.3)$$

$$-V_{C1} = F_A \cdot \cos \alpha_{F_A} + G_A + 1,875 \cdot g_{K2(K1)} \quad (5.4)$$

$$V_{C2} = F_{C1} + V_{C1} \quad (5.5)$$

$$M_{C1} = M_C + 0,328 \cdot F_A \cdot \sin \alpha_{F_A} \quad (5.6)$$

$$-M_C = -M_{C2} = F_A \cdot (1,6 \cdot \cos \alpha_{F_A} + 3,073 \cdot \sin \alpha_{F_A}) + 1,6 \cdot G_A + 1,758 \cdot g_{K2(K1)} \quad (5.7)$$

(g_{K1}, g_M, g_{K2} in kN/m; $F_A, F_B, F_{C1}, F_{C2}, G_A, G_B, V_{C1}, V_{C2}$ in kN; M_C, M_{C1}, M_{C2} in kNm)

Versuchskörper		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Eigenlast Kragarm K1 – g_{K1}	[kN/m]	26,64	26,29	25,16	25,15	24,69	24,76	24,64
Eigenlast Kragarm K2 – g_{K2}	[kN/m]	25,89	26,14	24,83	24,97	24,51	24,76	24,64
Eigenlast Mittelfeld – g_M	[kN/m]	26,62	26,34	25,19	25,16	24,70	24,79	24,68

Tabelle 5.1: Eigenlasten Prüfkörper Serie B (Bezeichnungen gemäss Bild 5.2 und 5.3).

berechnet wurden. Bei den Eigenlasten der Kragarme K1 und K2 steht der erste Index für den Versuch 1, während der zweite Index im Klammerausdruck für den Versuch 2 steht. In den nachfolgenden Kapiteln ist für jeden Versuch der Versuchsablauf mit den wichtigsten Resultaten tabellarisch dargestellt. Eine vollständige Zusammenstellung aller Kräfte, Verformungen und Schnittgrößen kann der beiliegenden Daten-CD entnommen werden.

5.1.4 Darstellung der Resultate

In der Folge werden die wichtigsten Resultate jedes einzelnen Versuchs dargestellt. Es werden gezeigt:

- Eine tabellarische Zusammenstellung des Versuchsablaufs. Diese beinhaltet die aus den fest verdrahteten Messungen gewonnenen Messwerte und berechneten Größen zu Beginn und Ende der Laststufen sowie bei den Belastungszuständen Höchst- und Bruchlast.
- Kraft-Durchbiegungsdiagramme für die Durchbiegung w_1 mit der entsprechenden Kraft F_A an der Stelle der Lasteinleitung für den gesamten Versuchsablauf und als Ausschnitt bis zum Erreichen der Höchstlast.
- Momenten-Durchbiegungsdiagramm für die Durchbiegung w_1 an der Stelle der Lasteinleitung mit dem entsprechenden Moment M_C bezogen auf den Rotationspunkt des festen Lagers für den gesamten Versuchsablauf.
- Lagerkraftdiagramm für die Lagerkräfte F_{C1} und F_{C2} des festen Lagers für den gesamten Versuchsablauf.
- Last-Verformungsdiagramm für die horizontalen Verformungen u_1 , u_2 (Basislänge $l_0 = 400$ mm) mit der entsprechenden Kraft F_A auf der Oberseite der Versuchskörper für den gesamten Versuchsablauf.
- Eine tabellarische Zusammenstellung der gemessenen Rissbreiten für ausgewählte Laststufen.
- Biegelinien für ausgewählte Laststufen, ermittelt aus den Messwerten der Deformermessungen.
- Mittlere Längs- und Querdehnungen auf der Ober- und Unterseite für ausgewählte Laststufen, ermittelt aus den Messwerten der Deformermessungen.
- Mittlere seitliche Längsdehnungen entlang der obersten und untersten Messreihen des Messrasters und die daraus berechneten Krümmungen für ausgewählte Laststufen, ermittelt aus den Messwerten der Deformermessungen.
- Mittlere seitliche Dehnungen ε_x , ε_z und Schiebungen γ_{xz} des Plattenkerns für ausgewählte Laststufen, ermittelt aus den Messwerten der Deformermessungen.
- Rissbilder von der Ober- und Vorderseite aller Versuchskörper sowie Rissbilder von der Hinterseite der Versuchskörper mit unterschiedlicher Rissentwicklung auf der Vorder- und Hinterseite.

5.2 Versuchskörper B1

Der als Vorversuch konzipierte Versuchskörper A1 entsprach einem 40 %-Modell des Versuchskörpers B1. Der fiktive geometrische Bewehrungsgehalt in x -Richtung betrug beim Versuchskörper B1 $\rho_x = 1,538\%$, und für die Bewehrungsrichtung galt $\varphi_0 = 45^\circ$. In beiden Bewehrungsrichtungen (n - und t -Richtung) waren zwei Bewehrungslagen mit Stäben Ø 30 mm und einem Stababstand von 200 mm angeordnet. Zur Sicherstellung des Gleichgewichts im oberen Sandwichdeckel und der damit verbundenen Krafteinleitung der Bewehrungskraft in das einachsiale Druckfeld im Beton musste die Biegebewehrung bei den Ankerplatten vollständig verankert sein. Die beiden Kragarmbereiche wiesen Querkraftbewehrungsgehalte von $\rho_z = 0\%$ (Kragarm K2) und 0,611 % (Kragarm K1) auf.

5.2.1 Versuch B1V1

Mit dem Versuch B1V1 wurde der Kragarm K2 ($\rho_z = 0\%$) geprüft. Dabei betrug der Abstand zwischen dem festen und beweglichen Lager 2,20 m (Abstand b). Am ersten Versuchstag wurden die beiden Nullmessungen sowie die Laststufen LS 2 und LS 3 durchgeführt. Die Laststufe LS 4 folgte am zweiten Versuchstag. Über Nacht wurde der Versuchsträger entlastet.

Bei einer Kraft von $F_A \approx 400$ kN wurde die erste Laststufe LS 2 durchgeführt. Der gerissene Bereich erstreckte sich über die ganze Oberseite, und die Risse wiesen mittlere Rissabstände von 150 bis 250 mm auf. Im Kragarm und Mittelfeld lagen die Rissbreiten zwischen 0,05 bis maximal 0,25 mm, während über dem festen Auflager (Stelle C) Rissbreiten zwischen 0,15 und 0,3 mm gemessen wurden. Auf der Vorder- und Hinterseite des Versuchskörpers hatten sich ungefähr vertikal verlaufende Risse gebildet. In der ersten Hälfte des Kragarms und des Mittelfelds sowie im Bereich des festen Lagers ($x \approx -450 \div 450$ mm) reichten diese über die oberen drei Viertel der Versuchskörperhöhe. Für die folgenden Laststufen wurde bis zum Erreichen der Bruchlast ein Belastungsintervall von $\Delta F_A \approx 200$ kN gewählt.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 3 ($F_A \approx 600$ kN) bildeten sich auf der Oberseite vereinzelte Verästelungsrisse, und die bereits vorhandenen Risse öffneten sich weiter. Über dem festen Lager wurden maximale Rissbreiten von 0,5 mm gemessen. Die übrigen Rissbreiten im Kragarm und Mittelfeld vergrösserten sich auf 0,15 bis 0,4 mm. Im äusseren Kragarmbereich entstanden auf der Vorderseite zwei neue Risse und auf der Hinterseite ein neuer Riss, während sich die bereits vorhandenen Risse fortpflanzten. In der äusseren Kragarmhälfte verliefen diese im oberen Bereich vertikal, setzten sich dann aber im unteren Bereich mit einer flachen Neigung gegen das feste Auflager fort. Im unteren Bereich wiesen die schrägen Risse Neigungen von 35

Laststufe (LS)	F_A [kN]	F_B [kN]	F_{C1} [kN]	F_{C2} [kN]	$-V_{C1}$ [kNm]	$-M_C$ [kNm]	w_1 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	$\alpha(F_A)$ [°]	Bemerkungen
1	0	-97	105	0	74	86	0	0	0	0	Nullmessung
2	408 398	200 193	809 792	0,3 0,2	481 471	739 723	9,5 9,6	0,63 0,64	-0,04 -0,04	0,04 0,03	Belastungsende Messende
3	600 564	341 315	1143 1081	1,5 1,3	673 638	1050 992	16,2 16,3	1,07 1,06	-0,04 -0,04	0,15 0,13	Belastungsende Messende
Entlastung 3a	0 0	-97 -97	105 105	0 0	74 74	86 86	3,0 3,0	0,25 0,25	0,01 0,01	-0,17 -0,16	Entlastungsende Belastungsbeginn
4	734 673	441 397	1377 1272	3,2 3,0	808 747	1270 1172	23,6 23,6	1,46 1,42	-0,05 -0,07	0,25 0,25	Belastungsende Messende
Bruch K2	779	475	1456	4,0	852	1344	26,4	1,57	-0,07	0,30	Schubbruch

Tabelle 5.2: B1V1 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 5.2).

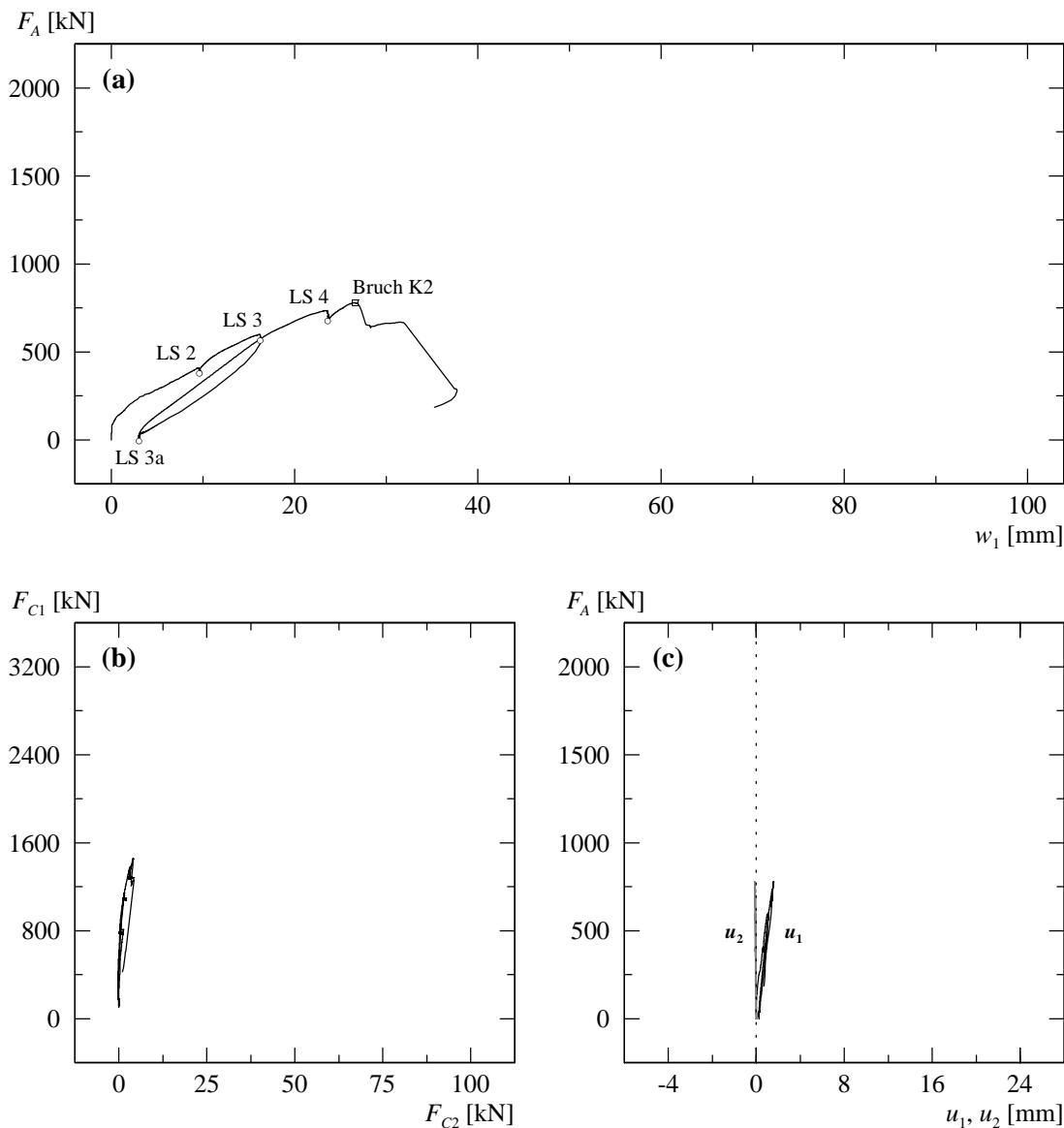


Bild 5.4: B1V1 – (a) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K2; (b) berechnete Lagerreaktionen beim Auflager C; (c) Verformungen der Zugzone über Auflager C.

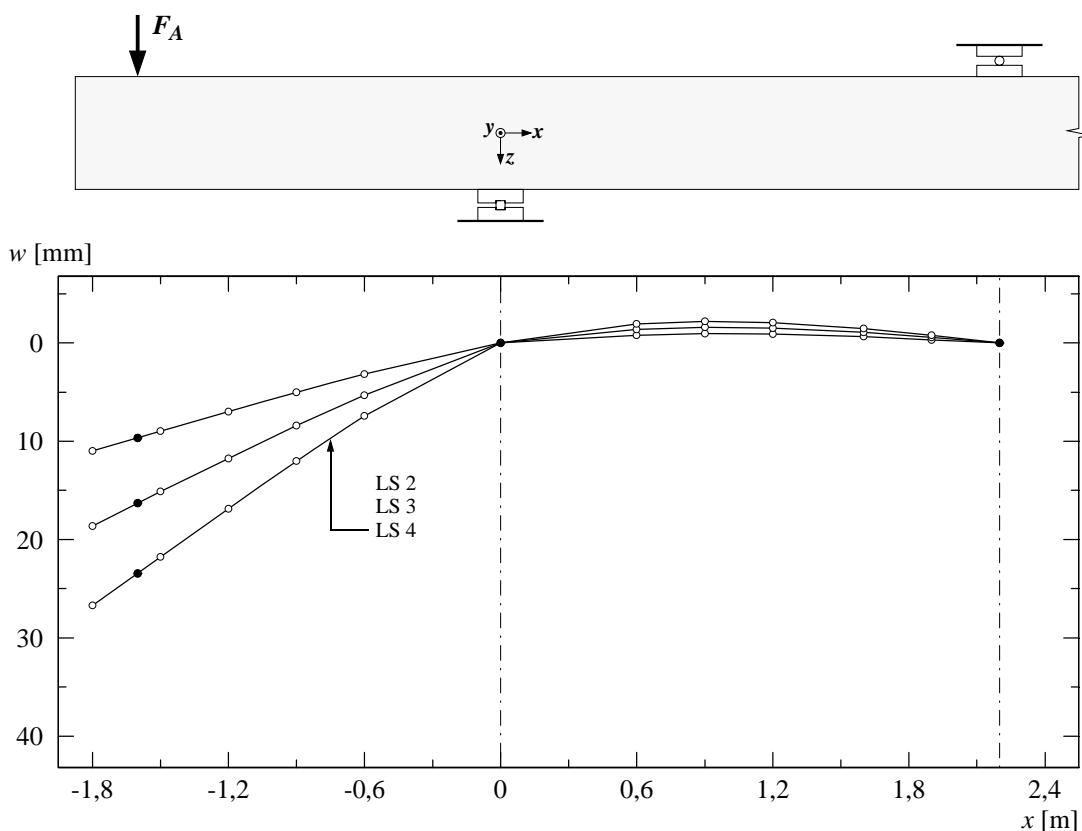
bis 45° gegenüber der x -Achse auf, während die Risse in der inneren Hälfte und beim festen Lager ungefähr vertikal verliefen. Die Risse erstreckten sich über die oberen drei Viertel der Versuchskörperhöhe. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe (≈ 50 mm unterhalb der Oberkante) wurden im Bereich des festen Lagers Rissbreiten von 0,15 bis 0,45 mm gemessen, während im Kragarm die Rissbreiten bei maximal 0,15 mm lagen. Unterhalb der Bereiche, in denen die Biegebewehrungsverankerungen lagen, verringerten sich die Rissbreiten stark; auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) betrugen sie sowohl beim festen Lager als auch im Kragarm maximal 0,1 bis 0,15 mm.

Die letzte Laststufe LS 4 wurde bei einer Kraft von $F_A \approx 750$ kN durchgeführt. Gegenüber der Laststufe LS 3 hatten sich sowohl auf der Oberseite als auch auf der Vorder- und Hinterseite neue Risse gebildet. Neben vereinzelten Verlängerungen und Verästelungen der vorhandenen Risse sowie der Bildung von neuen Rissen beim Kragarmende wurde auf der Oberseite eine Vergrößerung der Rissbreiten beobachtet. Die Rissbreiten betrugen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 150 mm im Kragarm und Mittelfeld 0,15 bis 0,45 mm, über dem festen Lager 0,2 bis 0,6 mm. Bei dieser Laststufe war auf der Vorder- und Hinterseite eine unterschiedliche Entwicklung des

Laststufe	Oberseite			Vorderseite – Kragarm		Vorderseite – Festes Lager	
	Kragarm w_{cr} [mm]	Festes Lager w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 2	0,05...0,15	0,15...0,30	0,05...0,25	HR...0,10	HR...0,05	0,05...0,20	HR...0,05
LS 3	0,15...0,30	0,15...0,50	0,15...0,40	0,10...0,15	HR...0,10	0,15...0,45	HR...0,15
LS 4	0,15...0,35	0,20...0,60	0,15...0,45	0,10...0,40	0,05...0,15	0,30...0,70	0,05...0,25

Tabelle 5.3: B1V1 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

Rissbildes feststellbar. Auf der Hinterseite pflanzte sich der äusserste Schrägriss im Kragarm mit einer flachen Neigung bis zur Unterseite des Versuchskörpers fort. In der Biegedruckzone wies dieser eine Neigung von 10 bis 15° gegenüber der x -Achse auf. Der Riss hatte sich über die oberen 80 % der Versuchskörperhöhe ($z \approx -250 \div 150$ mm) zwischen 0,6 und 0,9 mm weit geöffnet, während auf der Höhe der untersten Deformatormessreihe (≈ 50 mm oberhalb der Unterkante) noch eine Rissbreite von 0,35 mm gemessen wurde. Die übrigen Risse auf der Vorder- und Hinterseite erstreckten sich über die oberen 80 bis 85 % der Versuchskörperhöhe. Neben der Bildung vereinzelter, ungefähr horizontal verlaufender Risse im Bereich der Biegebewehrungsverankerungen setzten sich nun die schräg verlaufenden Risse im unteren Bereich bedeutend flacher fort. Die Neigung der Risse betrug auf halber Versuchskörperhöhe ungefähr 35 bis 45° gegenüber der x -Achse. Im unteren Bereich verringerte sich die Rissneigung schliesslich auf 10 bis 30°. Im Bereich des festen Lagers konnte nur eine geringfügige Verlängerung der ungefähr vertikal verlaufenden Risse beobachtet werden, wobei die Risse im untersten Bereich stark abdrehten und sich dann mit sehr flachen Neigungen gegen das feste Lager fortpflanzten. Auf der Höhe der obersten Deformatormessreihe lagen die Rissbreiten im Bereich des festen Lagers zwischen 0,3 und 0,7 mm und im Kragarm zwischen 0,1 und 0,4 mm. Unterhalb der Verankerbereiche der Biegebewehrung, auf halber Versuchskörperhöhe, wurden über dem festen Lager maximale Rissbreiten von 0,25 mm und im Kragarm solche von 0,15 mm gemessen.

**Bild 5.5:** B1V1 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

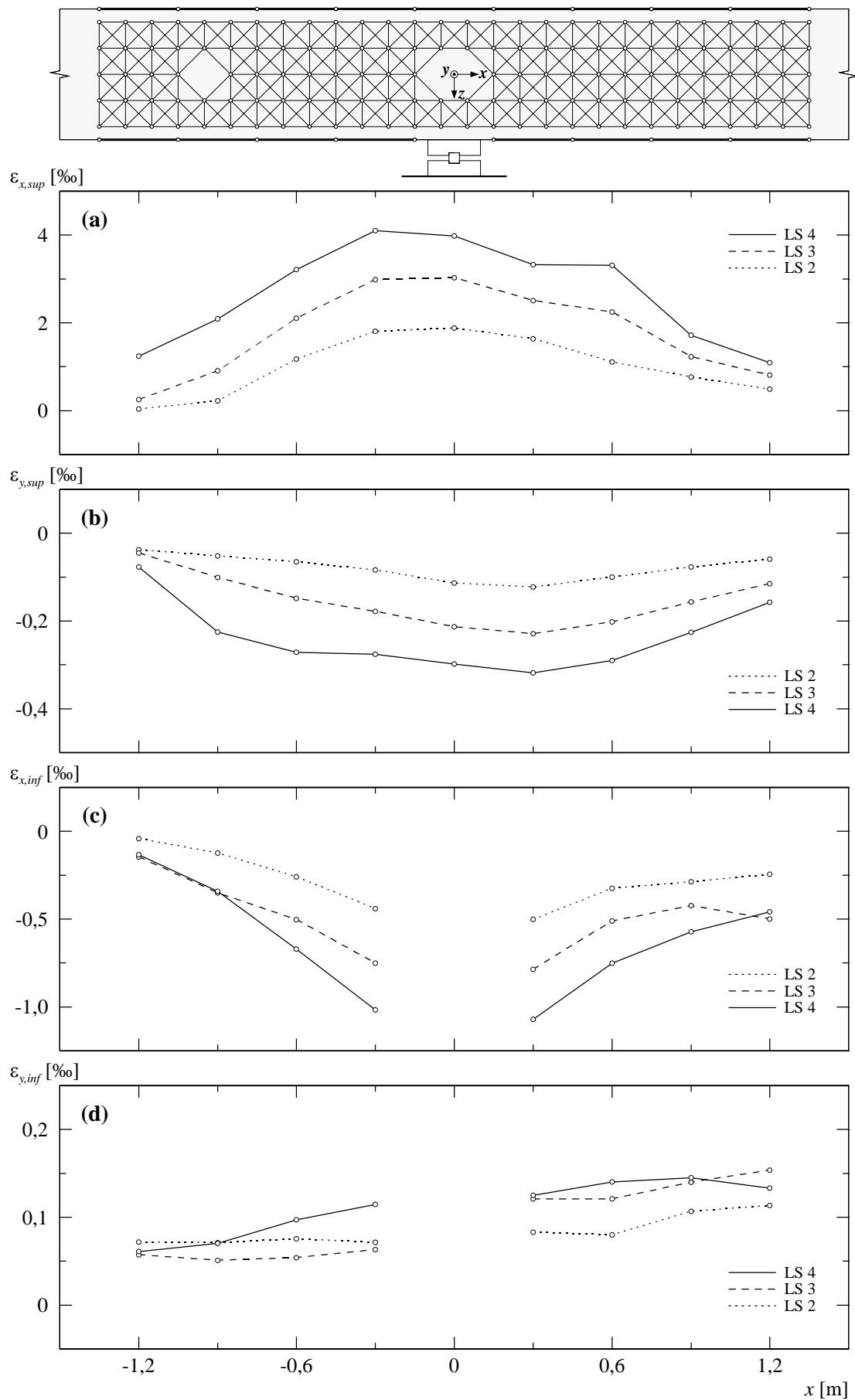


Bild 5.6: B1V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben; (c) mittlere Längsdehnungen unten; (d) mittlere Querdehnungen unten.

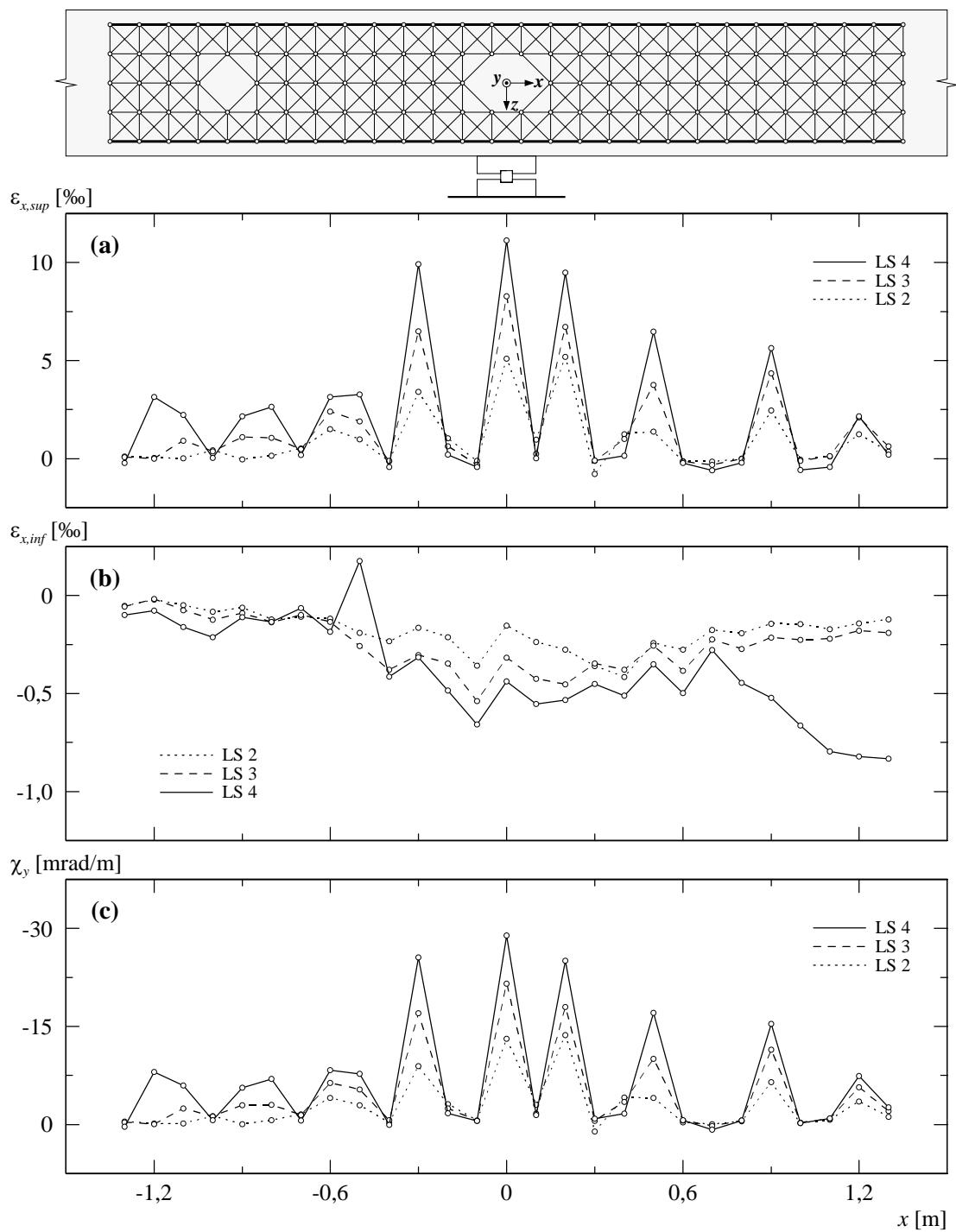


Bild 5.7: B1V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

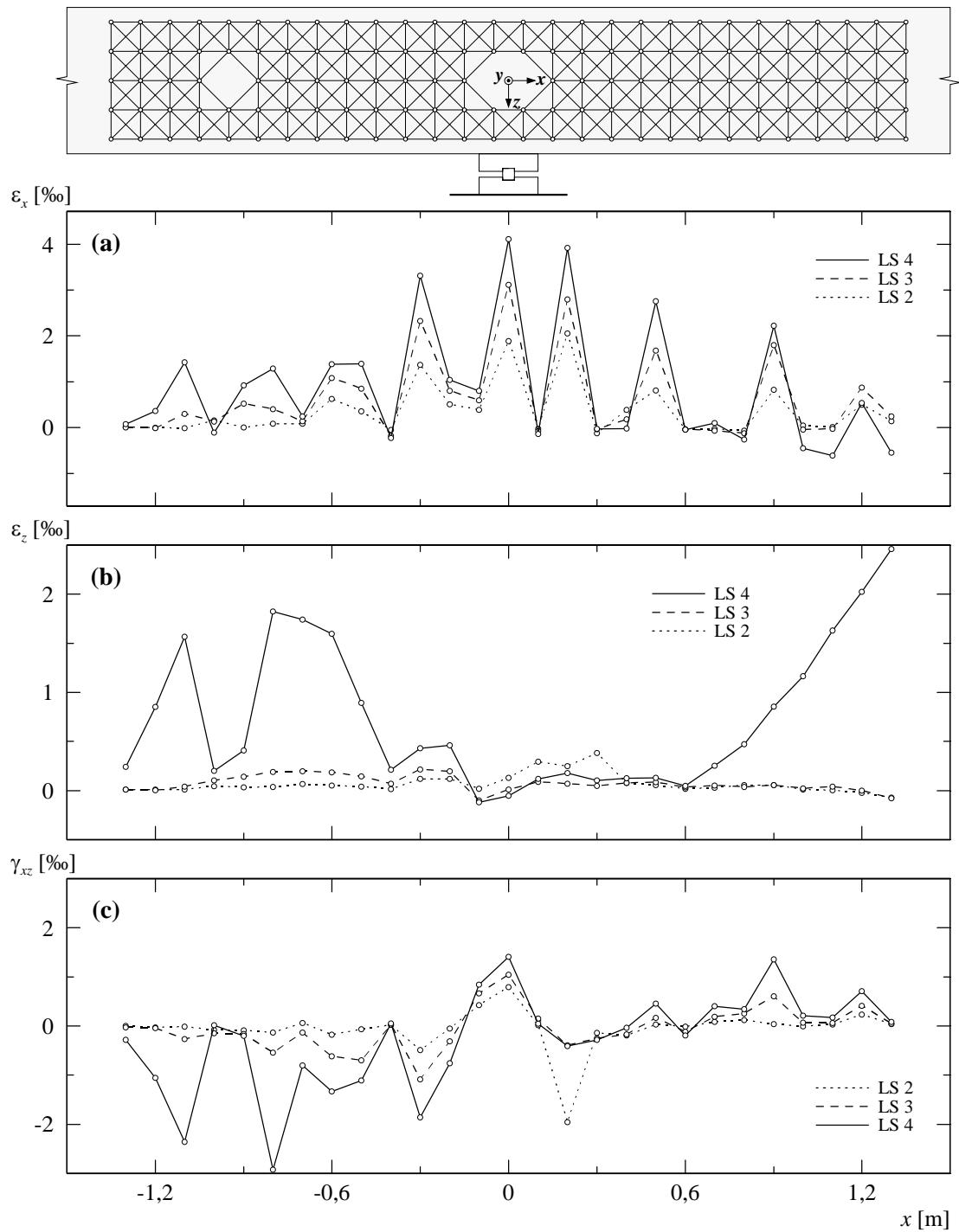
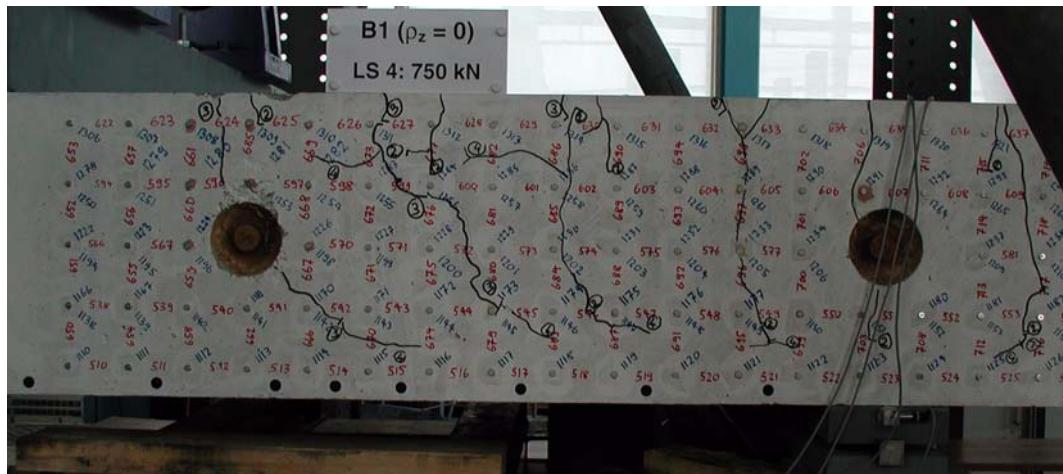
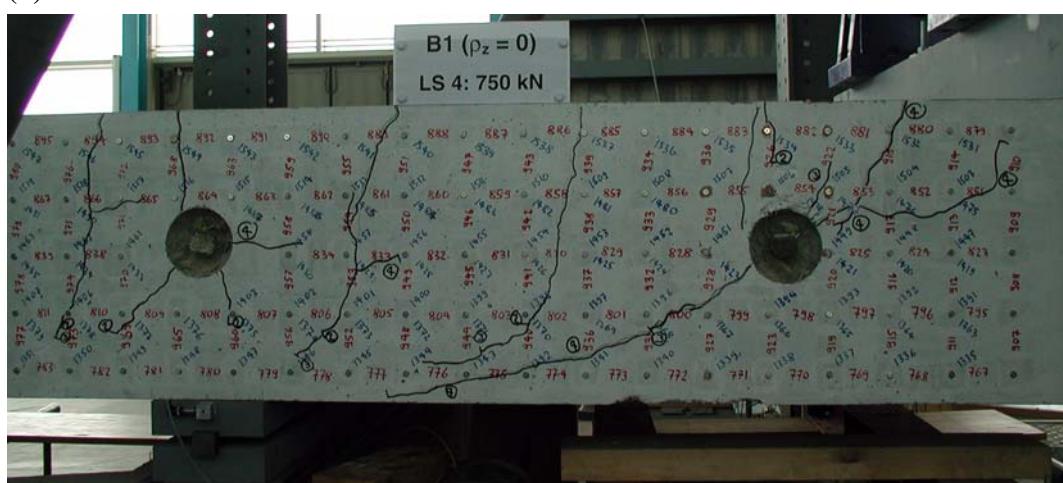


Bild 5.8: B1V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

(a)



(b)



(c)

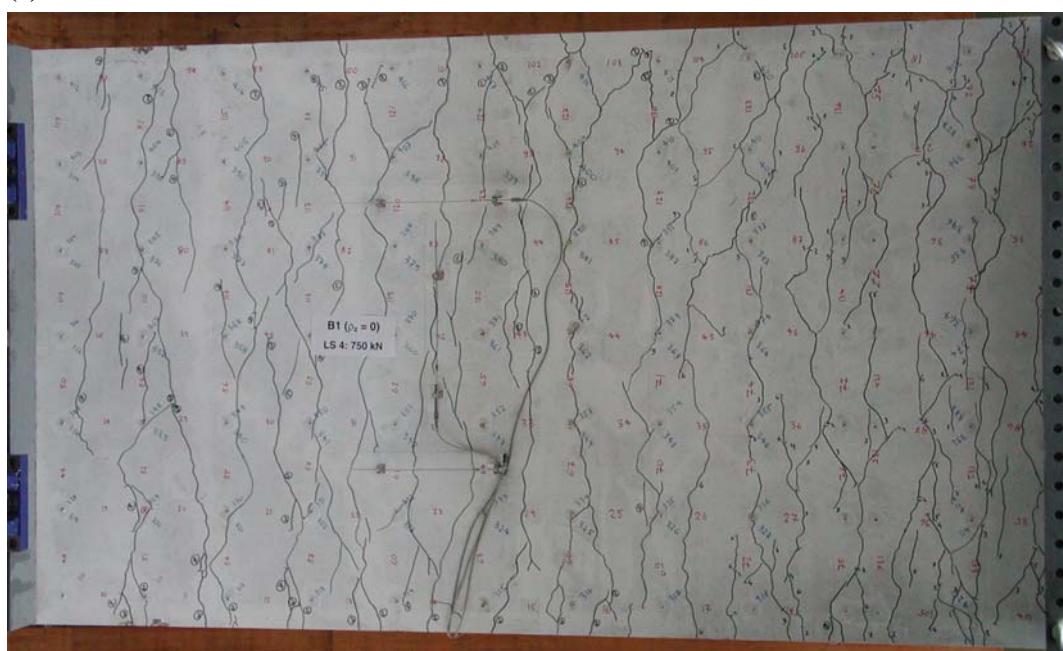
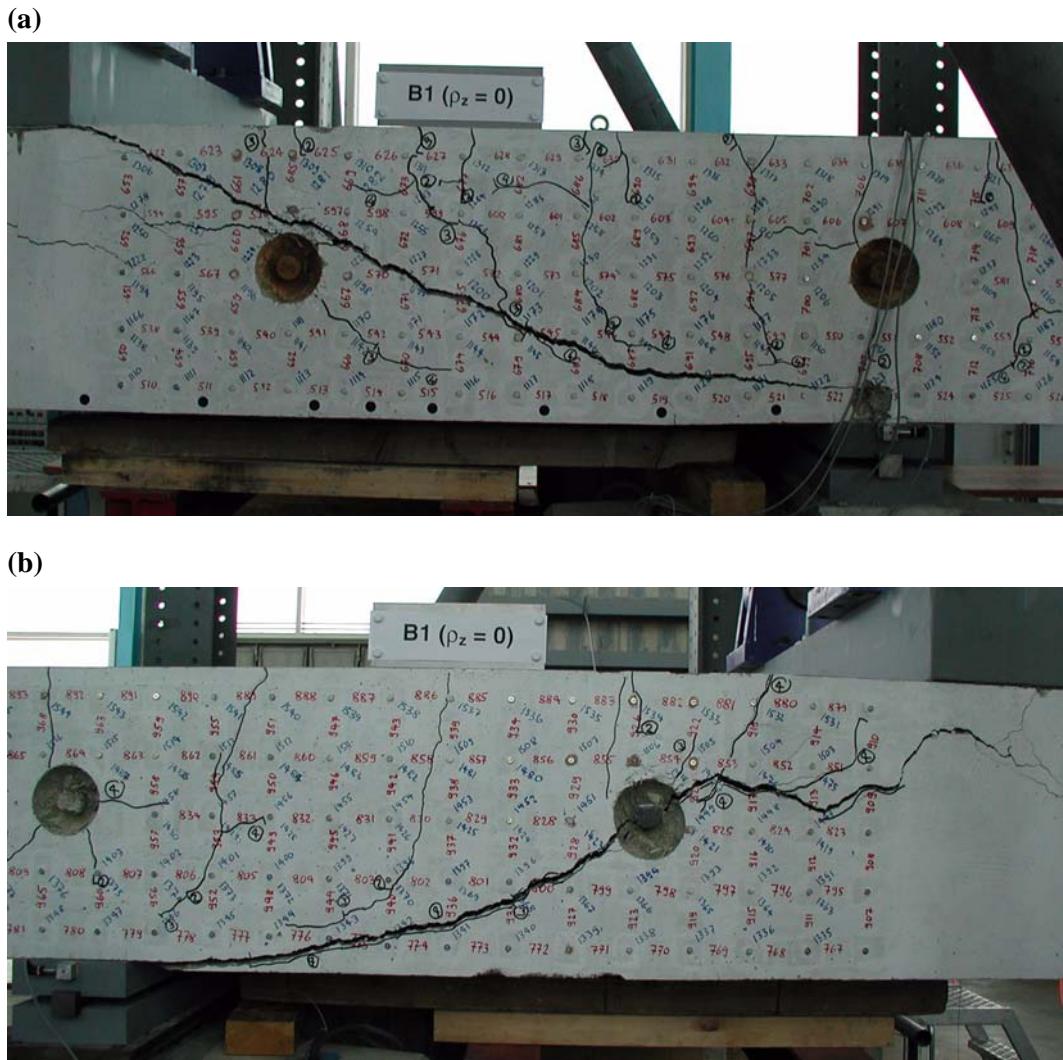


Bild 5.9: B1V1 – Rissbild bei Laststufe LS 4: (a) Vorderseite Kragarm; (b) Hinterseite Kragarm; (c) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.



5.2.2 Versuch B1V2

Mit dem Versuch B1V2 wurde der Kragarm K1 ($\rho_z = 0,611\%$) geprüft. Dabei betrug der Abstand zwischen dem festen und beweglichen Lager 2,36 m (Abstand b). Am ersten Versuchstag wurden die beiden Nullmessungen und die Laststufe LS 2 durchgeführt. Die Laststufen LS 3 bis LS 6 folgten am zweiten, die Laststufen LS 7 und LS 8 am dritten Versuchstag. Über Nacht wurde der Versuchsträger jeweils entlastet.

Bei einer Kraft von $F_A \approx 400$ kN wurde die erste Laststufe LS 2 durchgeführt. Der gerissene Bereich erstreckte sich über die ganze Oberseite, und die Risse wiesen mittlere Rissabstände von 150 bis 300 mm auf. Im Kragarm und Mittelfeld lagen die Rissbreiten zwischen 0,05 und 0,1 mm, während über dem festen Auflager (Stelle C) Rissbreiten zwischen 0,1 und 0,15 mm gemessen wurden. Auf der Vorder- und Hinterseite des Versuchskörpers hatten sich ungefähr vertikal verlaufende Risse gebildet. In der ersten Hälfte des Kragarms und des Mittelfelds sowie im Bereich des festen Lagers ($x \approx -450 \div 450$ mm) reichten diese über die oberen 70 % der Versuchskörperhöhe. Für die folgenden Laststufen wurde bis zum Erreichen der Höchstlast ein Belastungsintervall von $\Delta F_A \approx 200$ kN gewählt.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 3 ($F_A \approx 600$ kN) bildeten sich vorwiegend in den äusseren Bereichen des Kragarms und des Mittelfelds weitere Risse. Neben der Bildung von neuen Rissen in den äusseren Bereichen des Kragarms und des Mittelfelds sowie vereinzelten Verlängerungen und Verästelungen der vorhandenen Risse wurde auf der Oberseite eine Vergrösserung der Rissbreiten beobachtet. Über dem festen Lager wurden maximale Rissbreiten von 0,4 mm gemessen. Die übrigen Rissbreiten im Kragarm und Mittelfeld vergrösserten sich auf 0,1 bis 0,25 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite bildeten sich im Kragarmbereich zwei neue Risse, während sich die bereits vorhandenen Risse fortpflanzten. In der äusseren Kragarmhälfte verliefen diese im oberen Bereich vertikal, setzten sich aber im unteren Bereich mit einer leichten Neigung gegen das feste Auflager fort. Im unteren Bereich wiesen die schrägen Risse Neigungen von 45 bis 50° gegenüber der x -Achse auf, während die Risse in der inneren Hälfte und beim festen

Laststufe (LS)	F_A [kN]	F_B [kN]	F_{C1} [kN]	F_{C2} [kN]	$-V_{C1}$ [kN]	$-M_C$ [kNm]	w_1 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	$\alpha(F_A)$ [°]	Bemerkungen
1	0	-88	114	0	75	87	0	0	0	0	Nullmessung
2	422 339	200 143	824 683	1,3 0,8	497 414	767 631	9,6 9,6	0,63 0,61	0,02 0,03	0,18 0,14	Belastungsende Messende
3	601 589	324 316	1127 1107	3,5 3,7	676 664	1060 1040	20,1 20,5	1,29 1,29	-0,01 -0,03	0,33 0,36	Belastungsende Messende
4	800 757	463 434	1465 1393	6,8 6,4	875 833	1387 1319	28,3 28,3	1,77 1,76	-0,07 -0,08	0,49 0,49	Belastungsende Messende
5	1000 938	604 562	1806 1702	11,2 10,5	1075 1013	1721 1621	38,2 38,2	2,37 2,36	-0,15 -0,17	0,64 0,64	Belastungsende Messende
6	1199 1119	748 692	2149 2013	17,3 16,2	1274 1194	2059 1928	50,2 50,3	3,17 3,18	-0,25 -0,28	0,83 0,83	Belastungsende Messende
Entlastung 6a	0 0	-88 114	114 0	0 75	75 87	87 13,2	13,8 0,86	0,90 -0,14	-0,14 -0,14	0,06 0,08	Entlastungsende Belastungsbeginn
HL	1405	901	2508	28,3	1480	2421	72,1	5,56	-0,39	1,15	Höchstlast
7	1392 1248	894 792	2487 2241	29,2 26,3	1467 1322	2403 2164	75,5 75,5	6,21 6,35	-0,42 -0,46	1,20 1,21	Belastungsende Messende
8	1281 1149	833 739	2315 2089	40,7 36,9	1355 1224	2261 2038	116,9 117,4	14,73 15,22	-1,13 -1,25	1,82 1,84	Belastungsende Messende
Entlastung	1259 0	862 -88	2320 114	75,3 0	1331 75	2329 87	243,1 184,5	—	-4,63 -3,63	3,43 2,73	Entlastungsbeginn Versuchsende
Versuchsumbau											
Folge- versuch	0 1167	-90 783	114 2153	0 64,0	75 1241	87 2149	184,5 391,0	—	—	0 3,14	Versuchsbeginn Entlastungsbeginn

Tabelle 5.4: B1V2 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 5.3).

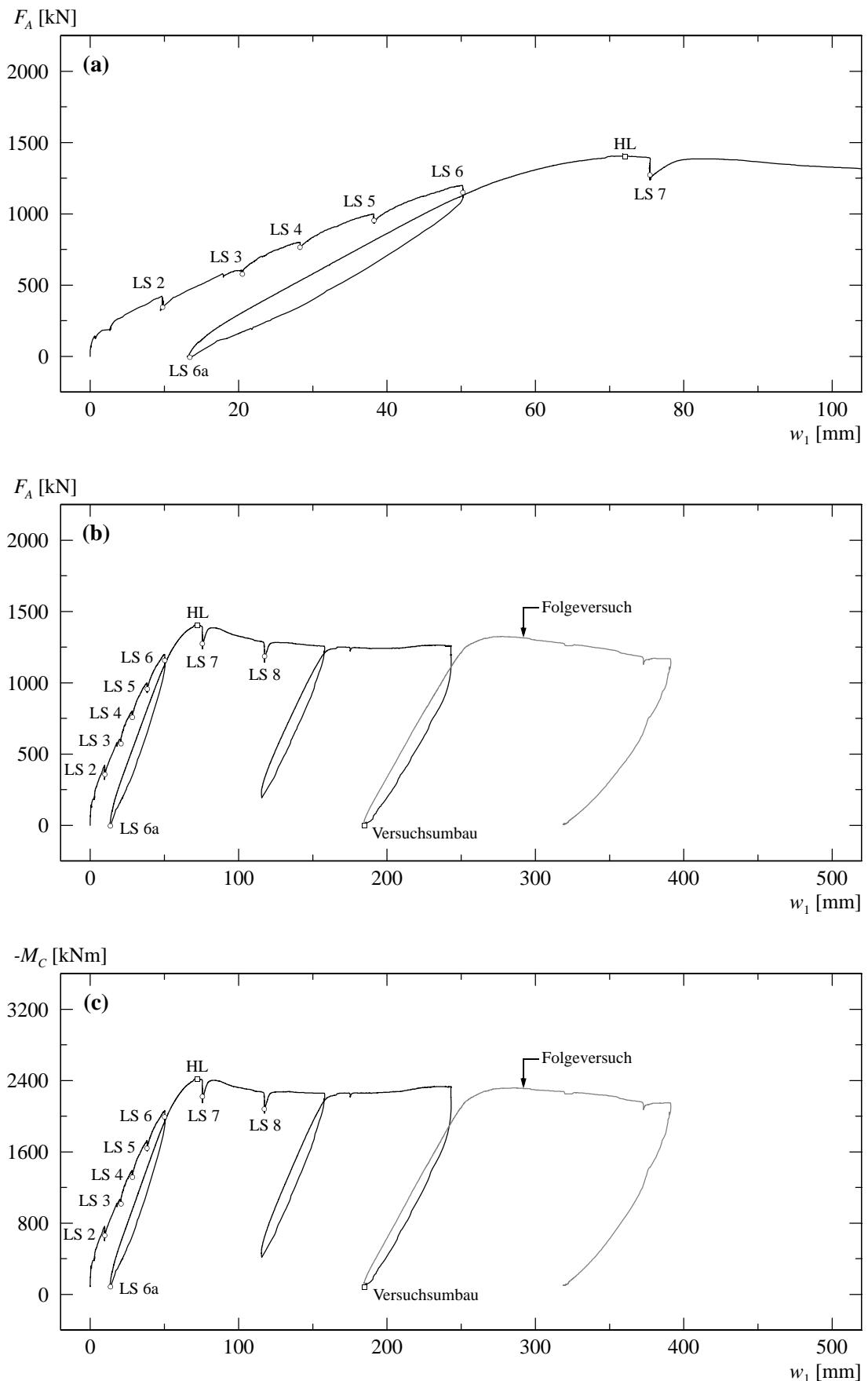


Bild 5.11: B1V2 – (a) und (b) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K1; (c) berechnetes Momenten-Durchbiegungsdiagramm.

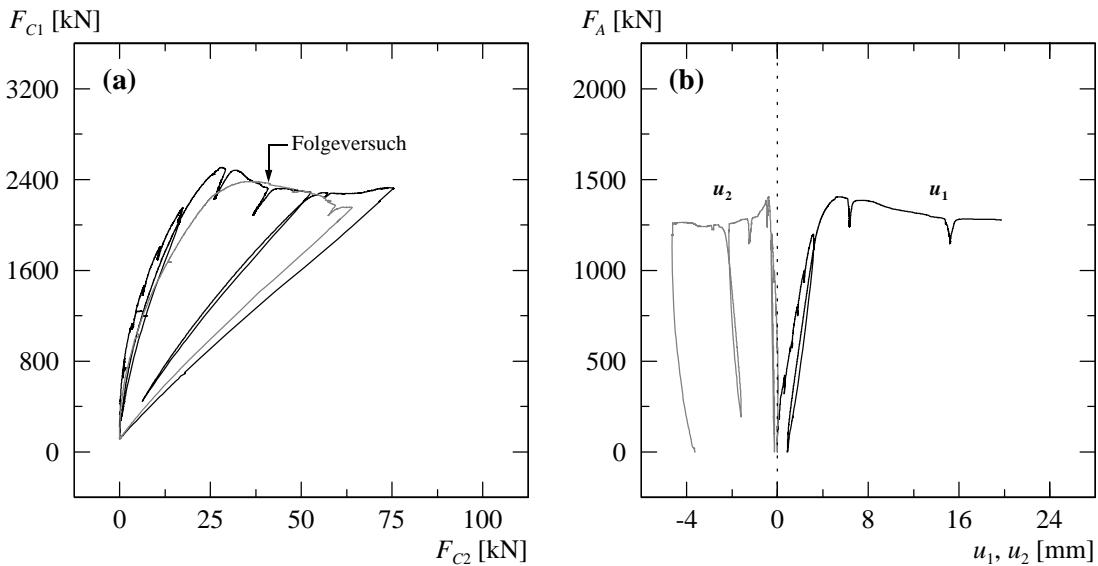


Bild 5.12: B1V2 – (a) Berechnete Lagerreaktionen beim Auflager C; (b) Verformungen der Zugzone über Auflager C.

Lager ungefähr vertikal verliefen. Die Risse erstreckten sich über die oberen drei Viertel der Versuchskörperhöhe. Auf der Höhe der obersten Deformatormessreihe (≈ 50 mm unterhalb der Oberkante) wurden im Bereich des festen Lagers Rissbreiten von 0,05 bis 0,5 mm gemessen, während im Kragarm die Rissbreiten bei maximal 0,3 mm lagen. Unterhalb der Bereiche, in denen die Biegebewehrungsverankerungen lagen, verringerten sich die Rissbreiten stark; auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) betragen sie sowohl beim festen Lager als auch im Kragarm maximal 0,1 bis 0,15 mm.

Während der Belastung zwischen den Laststufen LS 3 und LS 4 ($F_A \approx 600 \div 800$ kN) bildete sich im Kragarm auf der Unterseite ein Längsriss, der eine Länge von ca. 400 mm hatte und ungefähr parallel zur x -Richtung im mittleren Drittelbereich ($y \approx 50 \div 150$ mm) verlief. Unten an der Stirnseite des Versuchskörpers betrug die Rissbreite 0,15 mm.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 6 ($F_A \approx 1200$ kN) bildeten sich sowohl auf der Oberseite als auch auf der Vorder- und Hinterseite neue Risse. Neben der Bildung von neuen Rissen wurde auf der Oberseite eine Verästelung der bestehenden Risse beobachtet, wobei die Verästelungsrisse mehrheitlich in den Verankerungsbereichen der Biegebewehrung endeten. Die Rissbreiten betrugen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 100 bis 200 mm im Kragarm und Mittelfeld 0,2 bis 0,6 mm, über dem festen Lager 0,3 bis maximal 1 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite wurde die Bildung horizontal verlaufender Risse im Bereich der Biegebewehrungsverankerungen und eines neuen Risses beim Kragarmende sowie die Verlängerung und Verästelung der bestehenden Risse festgestellt. Dabei erstreckten sich die Risse über die oberen 80 % der Versuchskörperhöhe. Bei den anfänglich relativ steil verlaufenden Rissen im Kragarm wurde im unteren Bereich eine deutliche Abflachung der Risse beobachtet. Die Neigung der Risse betrug im unteren Bereich 30 bis 45° gegenüber der x -Achse. Im Bereich des festen Lagers verliefen die Verästelungsrisse links beim Lager (Kragarmseite) ungefähr vertikal, während diejenigen rechts beim Lager (Mittelfeldseite) eine Neigung von 45° gegenüber der x -Achse aufwiesen. Auf der Höhe der obersten Deformatormessreihe betragen die Rissbreiten im Bereich des festen Lagers 0,25 bis 1,6 mm und im Kragarm 0,4 bis 1,2 mm. Unterhalb der Verankerungsbereiche der Biegebewehrung und auf halber Versuchskörperhöhe lagen die Rissbreiten über dem festen Lager zwischen 0,1 und 0,5 mm und im Kragarm zwischen 0,1 und 0,25 mm. Der Längsriss auf der Unterseite im Kragarm pflanzte sich mit einer leichten Neigung gegenüber der x -Richtung im mittleren Drittelbereich ($y \approx -150 \div 150$ mm) fort und erreichte eine Länge von ca. 1100 mm. Dabei vergrößerte sich die Rissbreite an der Stirnseite auf 0,25 mm.

Laststufe	Oberseite			Vorderseite – Kragarm		Vorderseite – Festes Lager	
	Kragarm w_{cr} [mm]	Festes Lager w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 2	0,05...0,10	0,10...0,15	0,05...0,10	HR...0,10	HR...0,05	0,05...0,20	HR...0,05
LS 3	0,10...0,25	0,10...0,40	0,15...0,25	0,05...0,30	HR...0,10	0,05...0,50	HR...0,15
LS 4	0,10...0,40	0,15...0,70	0,15...0,50	0,05...0,40	0,05...0,15	0,10...0,80	0,05...0,30
LS 5	0,15...0,50	0,20...0,80	0,20...0,55	0,15...0,70	0,05...0,20	0,25...1,20	0,10...0,45
LS 6	0,20...0,60	0,30...1,00	0,20...0,60	0,40...1,20	0,10...0,25	0,25...1,60	0,10...0,50
LS 7	0,30...0,95	0,30...1,60	0,30...0,70	0,50...1,40	0,15...0,50	0,70...3,00	0,15...0,65

Tabelle 5.5: B1V2 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

Im weiteren Versuchsfortschritt, zwischen den Laststufen LS 6 und LS 7, wurde bei einer Durchbiegung von $w_1 = 72,1$ mm beim Kragarm K1 die Höchstlast erreicht. Die entsprechende Kraft betrug $F_A = 1405$ kN. Gleichzeitig bildeten sich auf der Mittelfeldseite und über der Lagerplatte die ersten Betonstauchungsrisse in der Biegedruckzone beim festen Lager.

Nach Erreichen der Höchstlast wurde bei einer Kraft von $F_A \approx 1400$ kN und einer Durchbiegung von $w_1 \approx 75,5$ mm die Laststufe LS 7 durchgeführt. Auf der Mittelfeldseite beim festen Lager konnten an der Unterseite erste Abplatzungen von Betonplättchen festgestellt werden. Ausser der Verlängerung und Verästelung der bestehenden Risse wurde bis zur Laststufe LS 7 keine grosse Veränderung des Rissbildes beobachtet. Auf der Oberseite wurde beim festen Lager ein Riss mit einer Breite von 1,6 mm gemessen. Die übrigen Risse über dem festen Lager sowie im Kragarm und Mittelfeld wiesen Breiten von 0,3 bis 0,95 mm auf. Die Risse auf der Vorder- und Hinterseite erstreckten sich über die oberen 80 bis 85 % der Versuchskörperhöhe. Neben der Bildung weiterer Verästelungsrisse und vereinzelter, ungefähr horizontal verlaufender Risse im Bereich der Biegebewehrungsverankerungen setzten sich nun die schräg verlaufenden Risse im unteren Bereich bedeutend flacher fort. Die Neigung der Risse betrug auf halber Versuchskörperhöhe ungefähr 30 bis 45° gegenüber der x-Achse. Im unteren Bereich verringerte sich die Rissneigung schliesslich auf 10 bis 25°. Im Bereich des festen Lagers konnte nur eine geringfügige Verlängerung der ungefähr vertikal verlaufenden Risse beobachtet werden, wobei die Risse im untersten Bereich stark abdrehten und sich dann mit sehr flachen Neigungen gegen das feste Lager fortpflanzten. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe hatten sich über dem festen Lager drei Risse zwischen 2 und 3 mm weit geöffnet. Die übrigen Rissbreiten lagen im Bereich des festen Lagers zwischen 0,7 und 1,2 mm und im Kragarm zwischen 0,5 und 1,4 mm. Unterhalb der Bereiche, in denen die Biegebewehrungsverankerungen lagen, verringerten sich die Rissbreiten stark; auf halber Versuchskörperhöhe betragen sie beim festen Lager 0,15 bis 0,65 mm und im Kragarm 0,15 bis 0,5 mm. Die Rissbreite des Längsrisses auf der Unterseite im Kragarm betrug an der Stirnseite 0,35 mm.

Anschliessend wurde die Durchbiegung des Kragarms K1 vergrössert. Im weiteren Versuchsfortschritt wurden in dem zur y-Achse parallel verlaufenden Druckfeld auf der Oberseite (Biegezugzone) die ersten Betonstauchungsrisse beim festen Lager beobachtet. Gleichzeitig platzten auf der Mittelfeldseite beim festen Lager grössere Teile des Überdeckungsbetons an der Unterseite ab. Die letzte Laststufe LS 8 wurde bei einer Kraft von $F_A \approx 1300$ kN und einer Durchbiegung von $w_1 \approx 116,9$ mm durchgeführt. Neben der weiteren Ausdehnung der Betonstauchungsrisse in der Biegedruckzone und in dem zur y-Achse parallel verlaufenden Druckfeld auf der Oberseite konzentrierte sich die Bildung neuer Risse sowie das Rissbreitenwachstum der bestehenden Risse vorwiegend auf die Bereiche beim festen Lager.

Mit zunehmender Kragarmdurchbiegung versagte beim festen Lager allmählich der Beton im Verankerungsbereich von je zwei Stabpaaren der Biegebewehrung auf der Vorder- und Hinterseite, wobei Teile des Überdeckungsbetons auf der Oberseite in y-Richtung stark gestaucht wurden. Die Bruchzone erstreckte sich in x-Richtung über eine Länge von 500 bis 600 mm. Diese Zerstörung des Druckfeldes führte zu geringfügigen horizontalen Verschiebungen der

Biegebewehrungsstäbe entlang ihrer Stabachse und zu einem kleinen vertikalen Versatz der Ankerplatten, wobei die Querkraftbewehrungsstäbe die Verankerungszone und somit die Biegebewehrung stabilisierten. Gleichzeitig platzten auf der Mittelfeldseite beim festen Lager weitere Teile des Überdeckungsbetons an der Unterseite ab. Bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 243$ mm wurde der Grundversuch abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt noch ungefähr 89 % der Höchstlast. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden.

Nach Beendigung des Grundversuchs musste die Versuchsanlage für den Folgeversuch umgebaut werden. Mit dem Folgeversuch wurde das Trag- und Verformungsverhalten des Kragarms K1 weiter geprüft. Während der Wiederbelastung im Folgeversuch konnte das Belastungsniveau des Grundversuchs bei Entlastungsbeginn erreicht werden. Mit zunehmender Kragarmdurchbiegung bildeten sich links beim festen Lager (Kragarmseite) Betonstauchungsrisse in der Biegedruckzone, welche zu Abplatzungen von Betonplättchen an der Unterseite führten. Der Folgeversuch wurde schliesslich bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 391$ mm abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt noch ungefähr 83 % der Höchstlast. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden.

Für die abschliessende Untersuchung des Versuchskörpers wurde auf der Oberseite der abgeplatzte Überdeckungsbeton der Biegezugzone entfernt. Die Bruchzone erstreckte sich auf einer Länge von 500 bis 600 mm beim festen Lager über die gesamte Versuchskörperbreite. Im Verankerungsbereich der Biegebewehrung konnten kleine vertikale Relativverschiebungen der Ankerplatten festgestellt werden, wobei aber keine zerrissenen Querkraftbewehrungsstäbe entdeckt wurden. An der Unterseite war der Überdeckungsbeton der Biegendruckzone in einem Bereich von 350 bis 500 mm rechts vom festen Lager (im Mittelfeld) abgeplatzt. Die Oberfläche der abgeplatzten Bereiche zeigte neben dem Lager keine Spuren einer Zerstörung der Rissverzahnung oder eines gegenseitigen Abgleitens der Rissflächen.

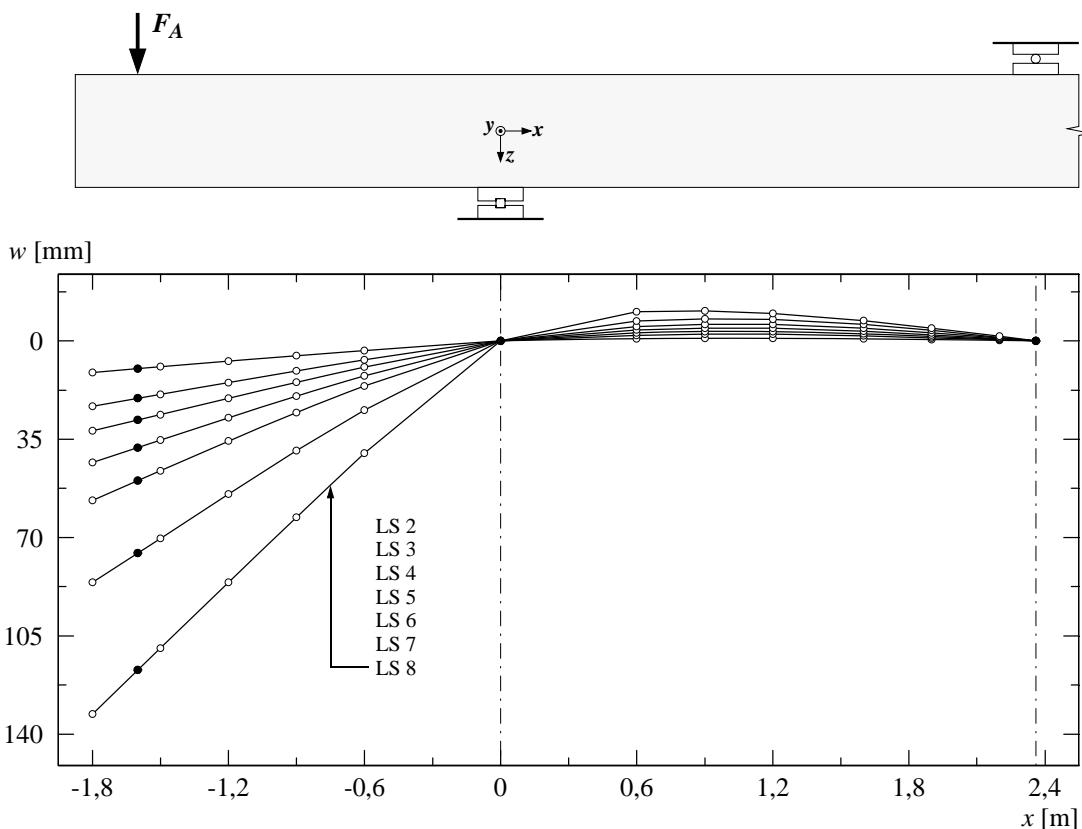


Bild 5.13: B1V2 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

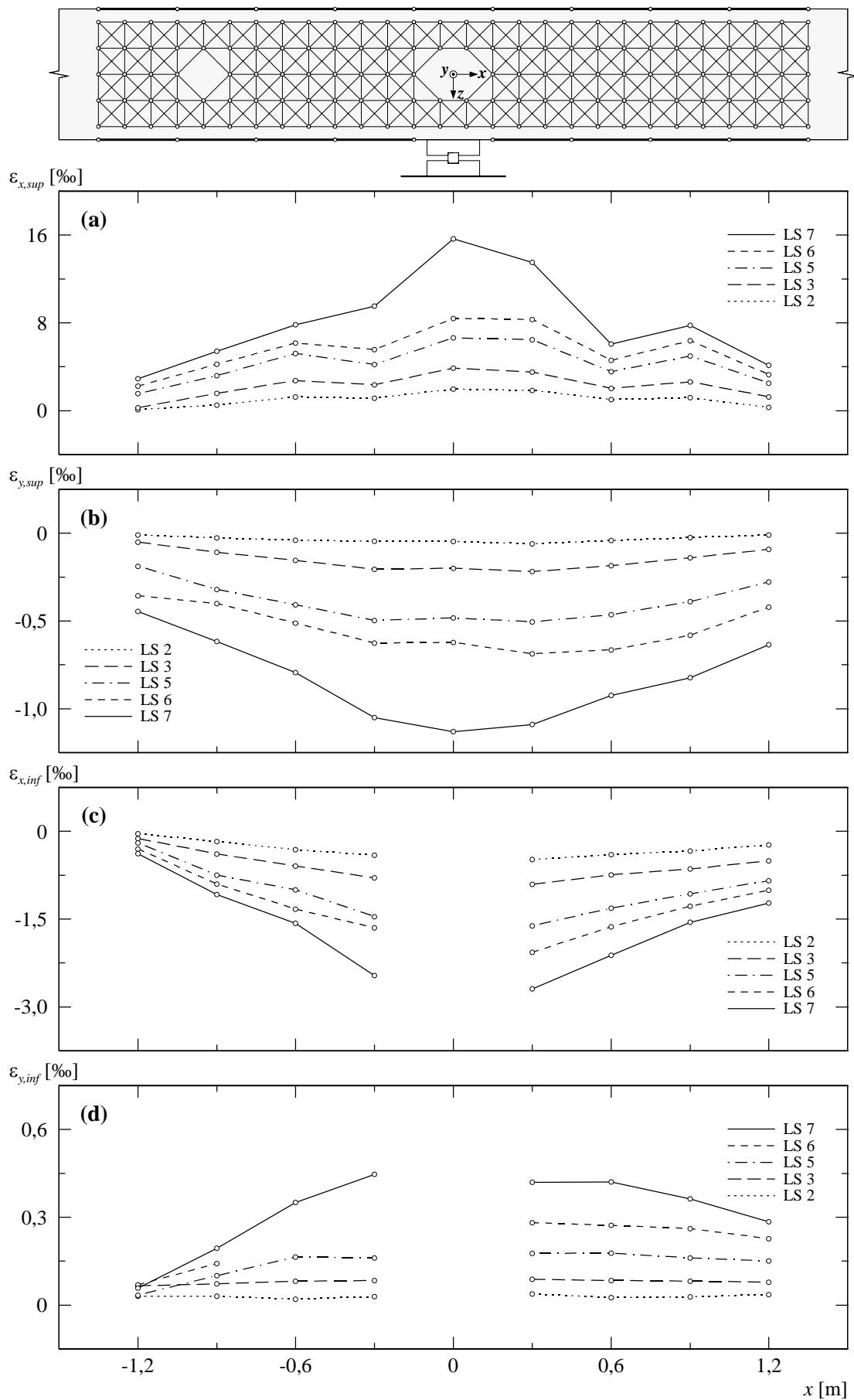


Bild 5.14: B1V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben; (c) mittlere Längsdehnungen unten; (d) mittlere Querdehnungen unten.

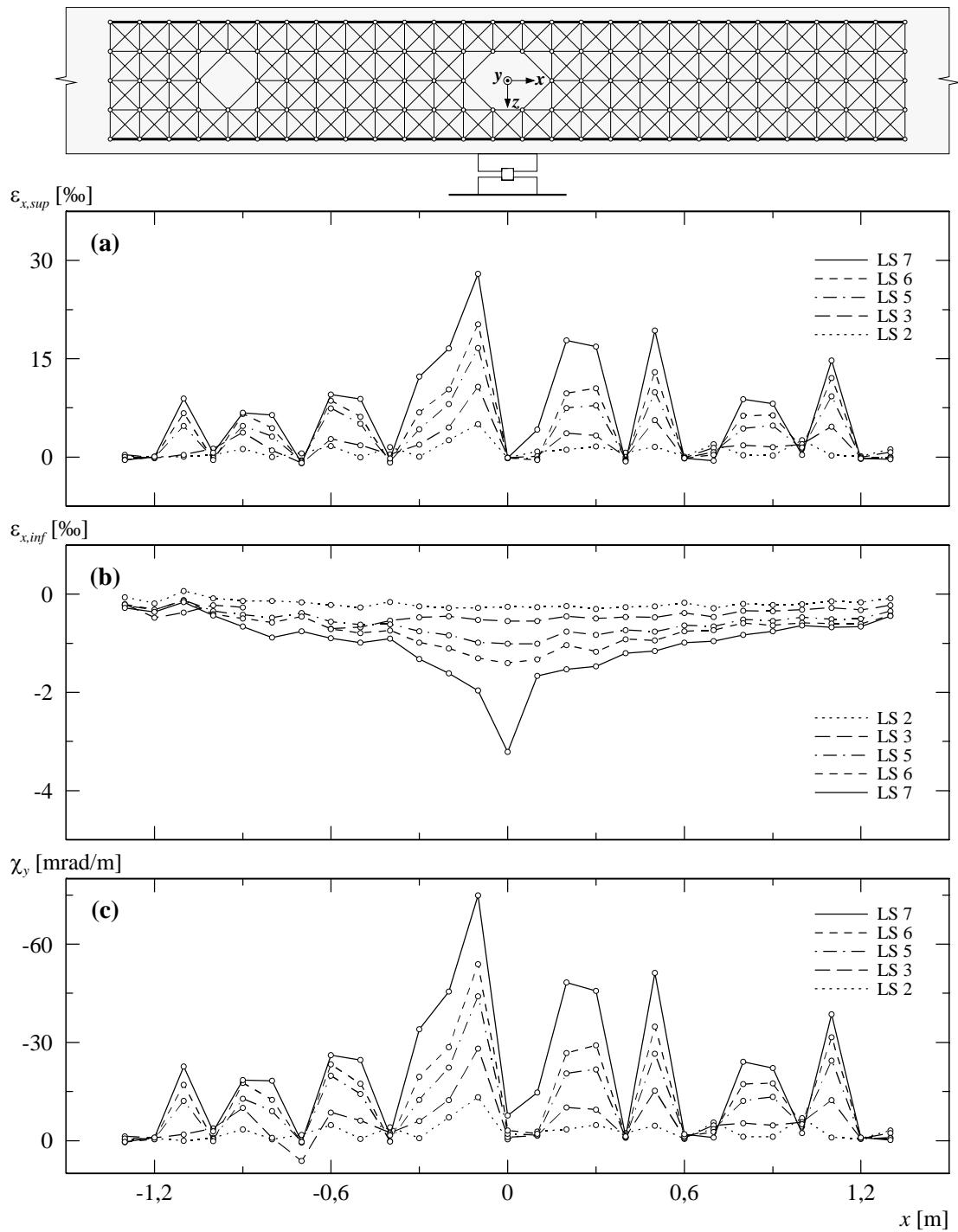


Bild 5.15: B1V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

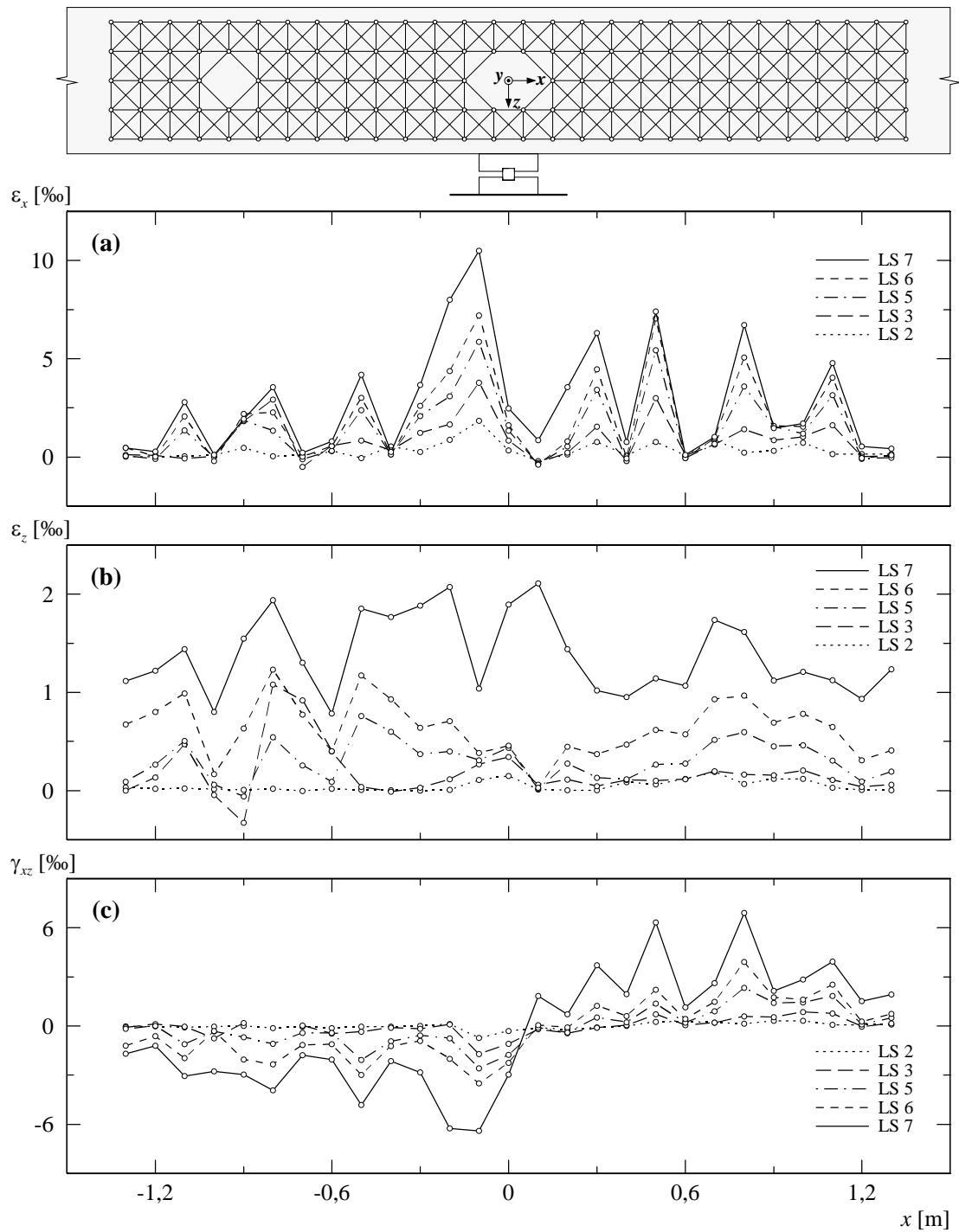


Bild 5.16: B1V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

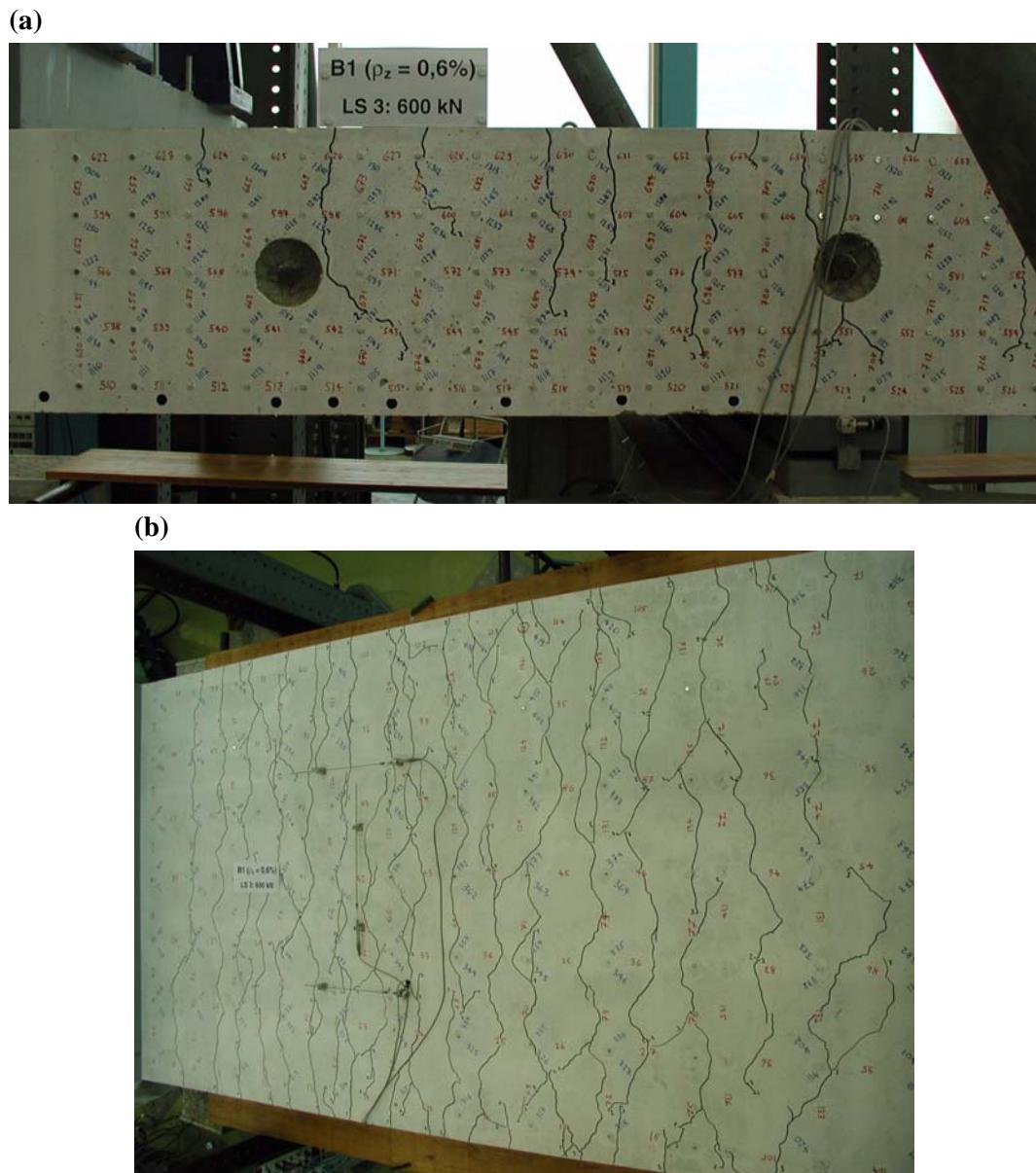


Bild 5.17: B1V2 – Rissbild bei Laststufe LS 3: (a) Vorderseite Kragarm; (b) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.

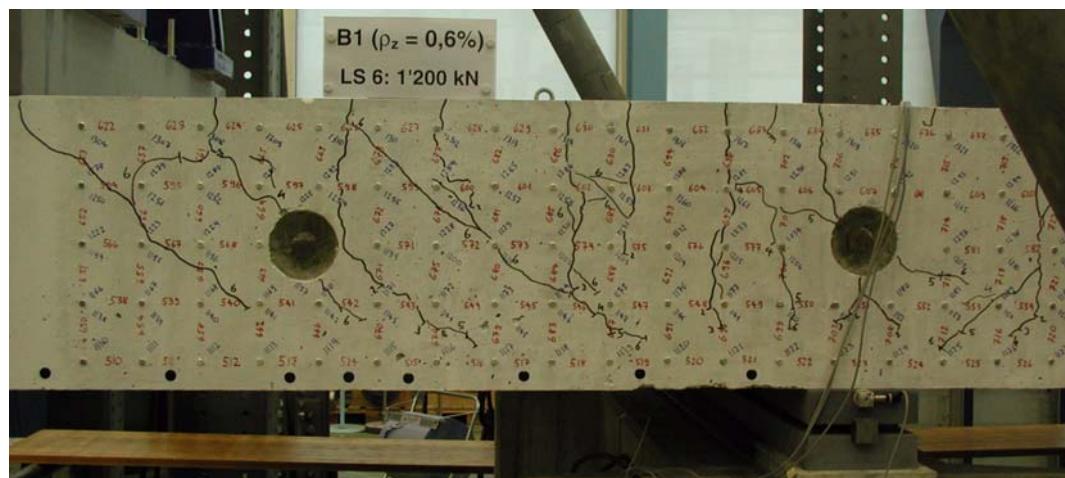


Bild 5.18: B1V2 – Rissbild bei Laststufe LS 6: Vorderseite Kragarm.

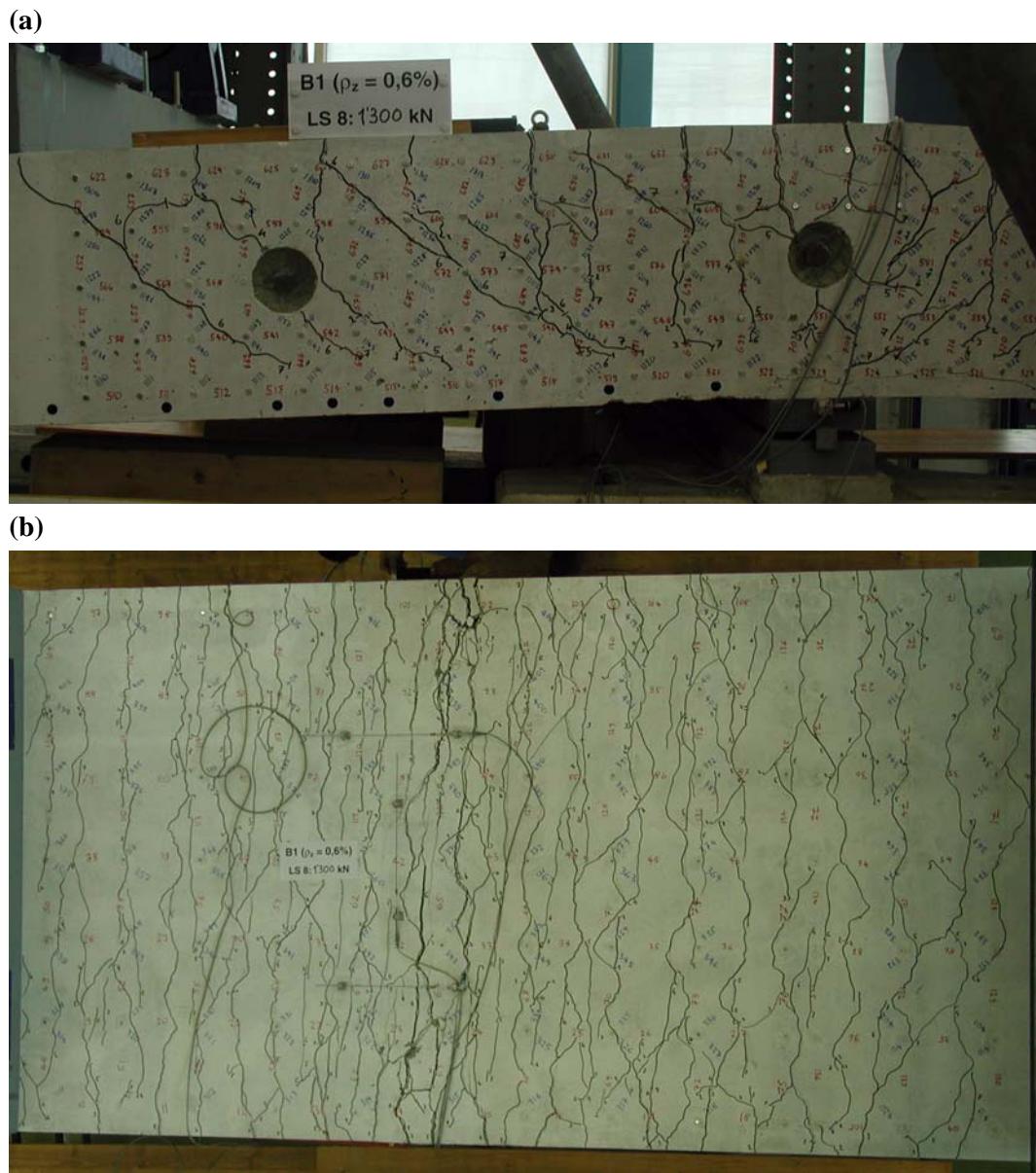


Bild 5.19: B1V2 – Rissbild bei Laststufe LS 8: (a) Vorderseite Kragarm; (b) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.

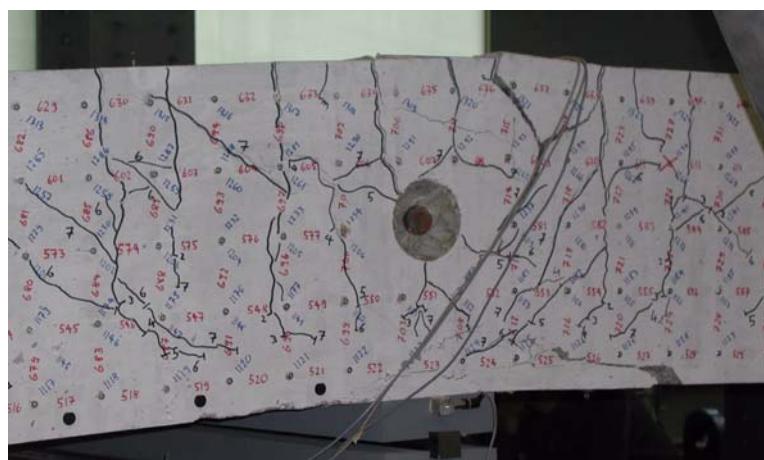


Bild 5.20: B1V2 – Rissbild bei $w_1 \approx 175$ mm: Vorderseite beim festen Lager.

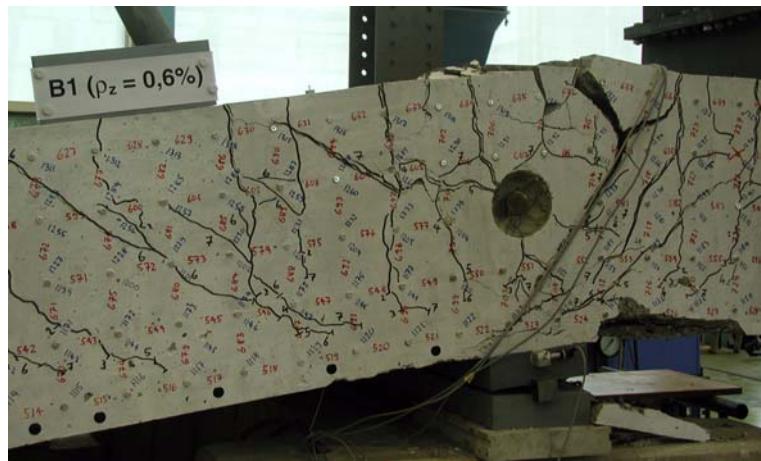


Bild 5.21: B1V2 – Bruchzone nach Ende des Grundversuchs: Vorderseite beim festen Lager.

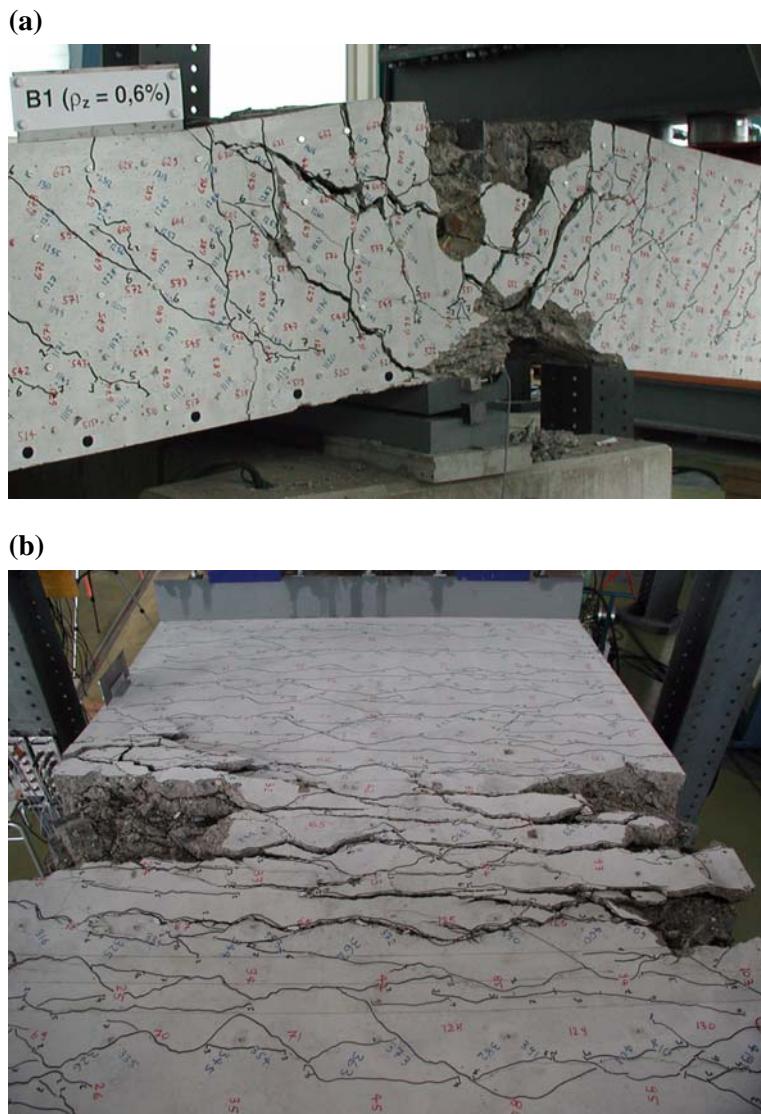


Bild 5.22: B1V2 – Bruchzone nach Ende des Folgeversuchs: (a) Vorderseite beim festen Lager; (b) Oberseite beim festen Lager und im Kragarm.

5.3 Versuchskörper B2

Die Biegebewehrung des Versuchskörpers B2 war mit derjenigen des Versuchskörpers B1 identisch. Der fiktive geometrische Bewehrungsgehalt in x -Richtung betrug $\rho_x = 1,538 \%$, und für die Bewehrungsrichtung galt $\varphi_0 = 45^\circ$. In beiden Bewehrungsrichtungen (n - und t -Richtung) waren zwei Bewehrungslagen mit Stäben $\varnothing 30$ mm und einem Stababstand von 200 mm angeordnet. Im Gegensatz zum Versuchskörper B1 wiesen die beiden Kragarmbereiche Querkraftbewehrungsgehalte von $\rho_z = 0,163 \%$ (Kragarm K2) und $0,327 \%$ (Kragarm K1) auf.

5.3.1 Versuch B2V1

Mit dem Versuch B2V1 wurde der Kragarm K2 ($\rho_z = 0,163 \%$) geprüft. Dabei betrug der Abstand zwischen dem festen und beweglichen Lager 2,36 m (Abstand b). Am ersten Versuchstag wurden die beiden Nullmessungen durchgeführt. Die Laststufen LS 2 und LS 3 folgten am zweiten, die Laststufen LS 4 bis LS 6 am dritten und die Laststufe LS 7 am vierten Versuchstag. Über Nacht wurde der Versuchsträger jeweils entlastet, wobei die erste Belastung am zweiten Versuchstag erfolgte.

Bei einer Kraft von $F_A \approx 400$ kN wurde die erste Laststufe LS 2 durchgeführt. Der gerissene Bereich erstreckte sich über die inneren 70 % des Kragarms und Mittelfelds, und die Risse wiesen mittlere Rissabstände von 200 bis 300 mm auf. Im Kragarm und Mittelfeld lagen die Rissbreiten auf der Oberseite zwischen 0,05 und 0,15 mm, während über dem festen Auflager (Stelle C) Rissbreiten zwischen 0,1 und 0,25 mm gemessen wurden. Auf der Vorder- und Hinterseite des Versuchskörpers hatten sich ungefähr vertikal verlaufende Risse gebildet. In der ersten Hälfte des Kragarms und des Mittelfelds sowie im Bereich des festen Lagers ($x \approx -450 \div 450$ mm) reichten diese über die oberen 70 % der Versuchskörperhöhe. Für die folgenden Laststufen wurde bis zum Erreichen der Höchstlast ein Belastungsintervall von $\Delta F_A \approx 200$ kN gewählt.

Laststufe (LS)	F_A [kN]	F_B [kN]	F_{C1} [kN]	F_{C2} [kN]	$-V_{C1}$ [kN]	$-M_C$ [kNm]	w_1 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	$\alpha(F_A)$ [°]	Bemerkungen
1	0	-89	112	0	74	86	0	0	0	0	Nullmessung
2	400 387	183 175	784 762	1,0 1,1	474 461	729 709	9,4 9,5	0,61 0,60	0,03 0,02	0,15 0,16	Belastungsende Messende
3	600 576	321 305	1122 1082	2,8 2,7	674 650	1055 1016	17,7 17,7	1,06 1,05	0,03 0,03	0,26 0,26	Belastungsende Messende
Entlastung 3a	0 0	-89 -89	112 112	0 0	74 74	86 86	4,1 4,0	0,23 0,23	0,02 0,02	-0,09 -0,08	Entlastungsende Belastungsbeginn
4	800 705	460 395	1460 1300	5,3 4,7	874 779	1382 1228	25,1 25,3	1,50 1,49	0,02 0,02	0,38 0,38	Belastungsende Messende
5	999 952	602 569	1802 1721	10,5 9,9	1073 1026	1717 1639	39,1 39,3	2,29 2,28	-0,04 -0,05	0,60 0,59	Belastungsende Messende
6	1200 1139	746 704	2147 2044	16,9 16,3	1274 1213	2057 1959	51,9 52,5	3,10 3,13	-0,14 -0,15	0,81 0,82	Belastungsende Messende
Entlastung 6a	0 0	-89 -89	112 112	0 0	74 74	86 86	12,7 12,7	0,72 0,72	-0,06 -0,06	0,16 0,17	Entlastungsende Belastungsbeginn
HL	1396	895	2492	28,9	1470	2409	78,9	6,25	-0,31	1,18	Höchstlast
7	1358 1228	869 778	2427 2206	29,0 26,6	1431 1302	2347 2132	82,2 82,3	7,27 7,45	-0,32 -0,33	1,22 1,24	Belastungsende Messende
Entlastung	449	239	888	18,4	522	860	216,6	13,04	-0,47	2,35	Entlastungsbeginn

Tabelle 5.6: B2V1 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäß Bild 5.2).

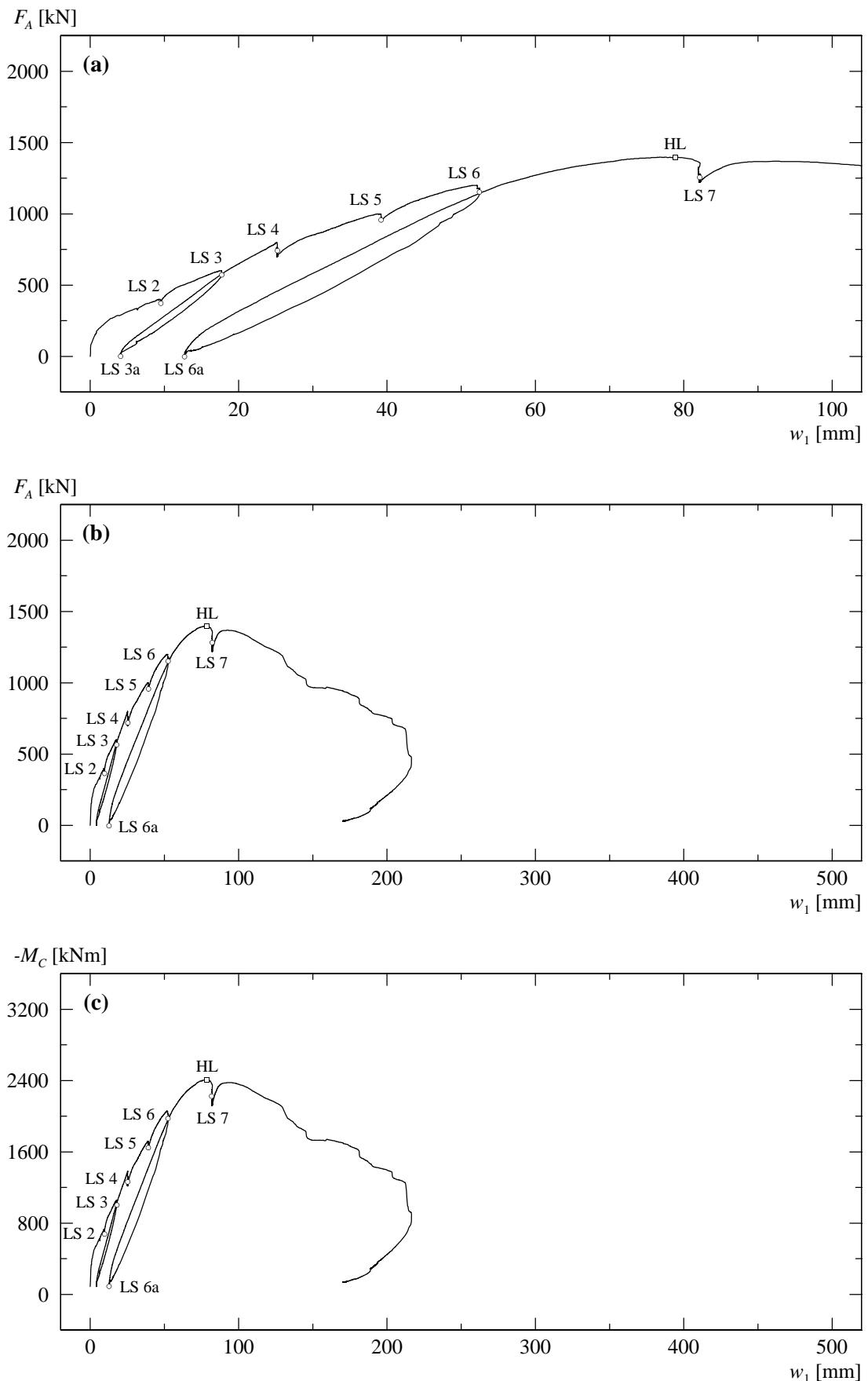


Bild 5.23: B2V1 – (a) und (b) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K2; (c) berechnetes Momenten-Durchbiegungsdiagramm.

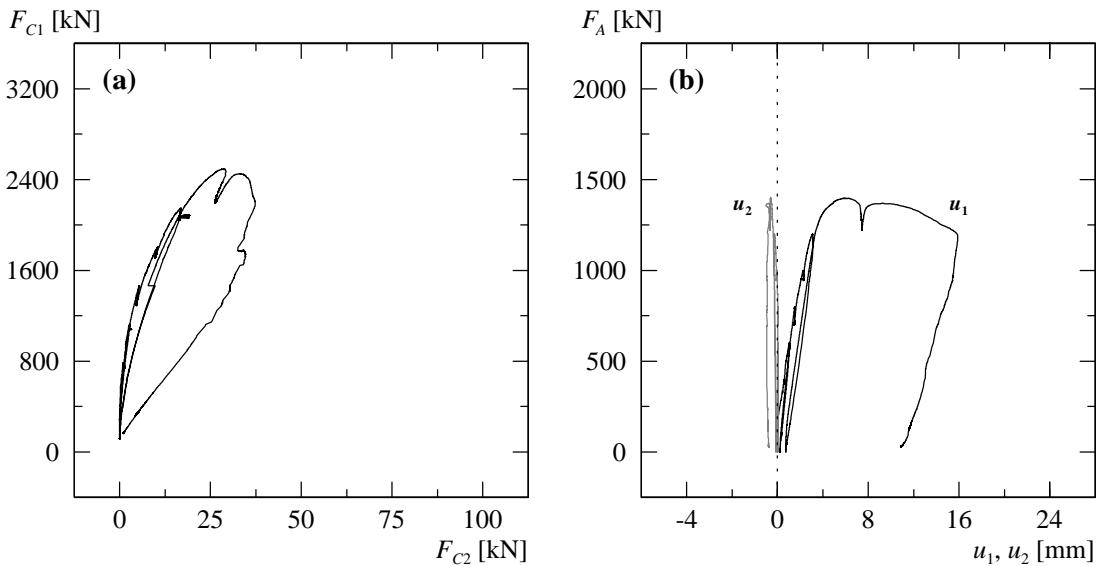


Bild 5.24: B2V1 – (a) Berechnete Lagerreaktionen beim Auflager C; (b) Verformungen der Zugzone über Auflager C.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 4 ($F_A \approx 800$ kN) bildeten sich vorwiegend in den äusseren Bereichen des Kragarms und des Mittelfelds weitere Risse. Neben der Bildung von neuen Rissen in den äusseren Bereichen des Kragarms und des Mittelfelds sowie vereinzelten Verlängerungen und Verästelungen der vorhandenen Risse wurde auf der Oberseite eine Vergrösserung der Rissbreiten beobachtet. Über dem festen Lager wurden maximale Rissbreiten von 0,55 mm gemessen. Die übrigen Rissbreiten vergrösserten sich im Kragarm auf 0,1 bis 0,3 mm und im Mittelfeld auf 0,15 bis 0,4 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite bildeten sich im Kragarmbereich zwei neue Risse, während sich die bereits vorhandenen Risse fortpflanzten. Im Kragarm verliefen diese im oberen Bereich vertikal, setzten sich dann aber im unteren Bereich mit einer flachen Neigung gegen das feste Auflager fort. Im unteren Bereich wiesen die schrägen Risse Neigungen von 35 bis 50° gegenüber der x-Achse auf, während die Risse über dem festen Lager ungefähr vertikal verliefen. Die Risse erstreckten sich über die oberen 80 % der Versuchskörperhöhe. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe (≈ 50 mm unterhalb der Oberkante) wurden im Bereich des festen Lagers Rissbreiten von 0,5 bis 0,9 mm gemessen, während im Kragarm die Rissbreiten zwischen 0,1 und 0,55 mm lagen. Unterhalb der Bereiche, in denen die Biegebewehrungsverankerungen lagen, verringerten sich die Rissbreiten stark; auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) betrugen sie beim festen Lager maximal 0,35 mm und im Kragarm maximal 0,2 mm.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 6 ($F_A \approx 1200$ kN) bildeten sich sowohl auf der Oberseite als auch auf der Vorder- und Hinterseite neue Risse. Neben der Bildung von neuen Rissen wurde auf der Oberseite eine Verästelung der bestehenden Risse beobachtet, wobei die Verästelungsrisse mehrheitlich in den Verankerungsbereichen der Biegebewehrung endeten. Die Rissbreiten betrugen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 100 bis 200 mm im Kragarm 0,25 bis 0,7 mm, im Mittelfeld 0,2 bis 0,5 mm und über dem festen Lager 0,25 bis maximal 0,75 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite wurde die Bildung horizontal verlaufender Risse im Bereich der Biegebewehrungsverankerungen und eines neuen Risses beim Kragarmende sowie die Verlängerung und Verästelung der bestehenden Risse festgestellt. Dabei erstreckten sich die Risse über die oberen 90 % der Versuchskörperhöhe. Bei den anfänglich relativ steil verlaufenden Rissen im Kragarm wurde im unteren Bereich eine deutliche Abflachung der Risse beobachtet. Die Neigung der Risse betrug auf halber Versuchskörperhöhe ungefähr 30 bis 55° gegenüber der x-Achse. Im unteren Bereich verringerte sich die Rissneigung schliesslich auf 20 bis 30°. Die Risse im Mittelfeld verliefen im oberen Bereich ungefähr vertikal, setzten sich dann aber im unteren Bereich mit einer flachen Neigung gegen das feste Lager fort, wobei die Risse Neigungen zwischen 30 und

Laststufe	Oberseite			Vorderseite – Kragarm		Vorderseite – Festes Lager	
	Kragarm w_{cr} [mm]	Festes Lager w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 2	0,05...0,10	0,10...0,25	0,05...0,15	HR...0,05	HR	0,05...0,25	HR...0,10
LS 3	0,05...0,20	0,15...0,50	0,15...0,30	0,05...0,30	HR...0,10	0,30...0,60	0,05...0,20
LS 4	0,10...0,30	0,20...0,55	0,15...0,40	0,10...0,55	0,05...0,20	0,50...0,90	0,15...0,35
LS 5	0,15...0,55	0,25...0,65	0,15...0,50	0,30...1,20	0,15...0,30	0,80...1,30	0,25...0,50
LS 6	0,25...0,70	0,25...0,75	0,20...0,50	0,50...1,20	0,20...0,40	1,20...1,80	0,30...0,60
LS 7	0,25...1,00	0,60...1,60	0,20...0,60	0,60...1,60	0,35...0,55	1,20...3,10	0,50...1,20

Tabelle 5.7: B2V1 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

45° gegenüber der x -Achse aufwiesen. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe betragen die Rissbreiten im Bereich des festen Lagers 1,2 bis 1,8 mm und im Kragarm 0,5 bis 1,2 mm. Unterhalb der Verankerungsbereiche der Biegebewehrung und auf halber Versuchskörperhöhe lagen die Rissbreiten über dem festen Lager zwischen 0,3 und 0,6 mm und im Kragarm zwischen 0,2 und 0,4 mm.

Im weiteren Versuchsfortschritt, zwischen den Laststufen LS 6 und LS 7, wurde bei einer Durchbiegung von $w_1 = 78,9$ mm beim Kragarm K2 die Höchstlast erreicht. Die entsprechende Kraft betrug $F_A = 1396$ kN. Gleichzeitig bildeten sich über der Lagerplatte sowie auf der Kragarm- und Mittelfeldseite die ersten Betonstauchungsrisse in der Biegedruckzone beim festen Lager.

Nach Erreichen der Höchstlast wurde bei einer Kraft von $F_A \approx 1400$ kN und einer Durchbiegung von $w_1 \approx 82,2$ mm die letzte Laststufe LS 7 durchgeführt. Ausser den BetonstauchungsrisSEN in der Biegedruckzone sowie der Verlängerung und Verästelung der bestehenden Risse wurde bis zur Laststufe LS 7 keine grosse Veränderung des Rissbildes beobachtet. Auf der Oberseite hatte sich beim festen Lager ein Riss 1,6 mm weit geöffnet. Die übrigen Risse über dem festen Lager wiesen Breiten von 0,6 bis 1,2 mm auf. Im Kragarm lagen die Rissbreiten zwischen 0,25 und 1 mm, im Mittelfeld zwischen 0,2 und 0,6 mm. Die Risse auf der Vorder- und Hinterseite erstreckten sich über die oberen 90 % der Versuchskörperhöhe. Neben der Bildung weiterer Verästelungsrisse und vereinzelter, ungefähr horizontal verlaufender Risse im Bereich der Biegebewehrungsverankerungen pflanzten sich die bestehenden Risse nur geringfügig fort. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe wurde über dem festen Lager je ein Riss mit einer Rissbreite von 2,5 und 3,1 mm gemessen. Die übrigen Rissbreiten lagen im Bereich des festen Lagers zwischen 1,2 und 1,6 mm und im Kragarm zwischen 0,6 und 1,6 mm. Unterhalb der Bereiche, in denen die Biegebewehrungsverankerungen lagen, verringerten sich die Rissbreiten stark; auf halber Versuchskörperhöhe betrugen sie beim festen Lager 0,5 bis maximal 1,2 mm und im Kragarm 0,35 bis 0,55 mm.

Anschliessend wurde die Durchbiegung des Kragarms K2 vergrössert. Mit zunehmender Kragarmdurchbiegung wurden in dem zur y -Achse parallel verlaufenden Druckfeld auf der Oberseite (Biegezugzone) die ersten Betonstauchungsrisse beim festen Lager beobachtet. Gleichzeitig platzten auf der Kragarmseite beim festen Lager erste Teile des Überdeckungsbetons an der Unterseite ab. Im weiteren Versuchsfortschritt versagte beim festen Lager allmählich der Beton im Verankerungsbereich von je zwei Stabpaaren der Biegebewehrung auf der Vorder- und Hinterseite, wobei Teile des Überdeckungsbetons auf der Oberseite in y -Richtung gestaucht wurden. Die Bruchzone erstreckte sich in x -Richtung über eine Länge von 600 bis 700 mm. Diese Zerstörung des Druckfeldes führte zu geringfügigen horizontalen Verschiebungen der Biegebewehrungsstäbe entlang ihrer Stabachse und zu einem kleinen vertikalen Versatz der Ankerplatten, wobei die Querkraftbewehrungsstäbe die Verankerungszone und somit die Biegebewehrung stabilisierten. Ab einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 150$ mm war auf der Vorder- und Hinterseite eine unterschiedliche Entwicklung des Riss- beziehungsweise Bruchbildes feststellbar, während an der Unterseite grössere Teile des Überdeckungsbetons links beim festen Lager abplatzten. Auf der Vorderseite dehnten sich die Betonstauchungsrisse links beim festen Lager

(Kragarmseite) über die unteren 30 % der Versuchskörperhöhe ($z \approx 100 \div 250$ mm) aus, wobei sich im Bereich der unteren Querkraftbewehrungsverankerungen ein horizontal verlaufender Trennriss bildete und der Überdeckungsbeton an der Unterseite in x -Richtung über eine Länge von ungefähr 650 mm ($x \approx -750 \div -100$ mm) abgelöst wurde. Auf der Hinterseite platzte unterhalb der Biegebewehrungslagen der seitliche Überdeckungsbeton in der inneren Hälfte des Kragarms in x -Richtung über eine Länge von ungefähr 750 mm ($x \approx -850 \div -100$ mm) ab. Die Dicke der abgeplatzten Betonschicht betrug ca. 100 mm. Mit zunehmender Steigerung der Kragarmdurchbiegung konnte sukzessive das Zerreissen von Querkraftbewehrungsstäben akustisch wahrgenommen werden. Bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 216$ mm wurde der Versuch abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt noch ungefähr 32 % der Höchstlast. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden.

Bei der abschliessenden Untersuchung des Versuchskörpers konnte auf der Hinterseite eine ausgeprägte Rissfläche im Kragarm festgestellt werden. Diese erstreckte sich mit einer Neigung von 45° gegenüber der x -Achse vom Lagerplattenrand des festen Lagers bis zur Biegebewehrung und setzte sich dann entlang der Biegebewehrung bis zur Krafteinleitung beim Kragarmende fort. Im Bereich des ungefähr horizontal verlaufenden Trennrisses war der Überdeckungsbeton der Biegezugzone auf der Oberseite vollständig abgelöst und die unter 45° geneigte Rissfläche zeigte im unteren, oberhalb der Betonüberdeckung liegenden Bereich ($z \approx 100 \div 200$ mm) leichte Spuren einer Zerstörung der Rissverzahnung beziehungsweise eines gegenseitigen Abgleitens der Rissufer. An der Unterseite war der Überdeckungsbeton der Biegedruckzone in einem Bereich von 650 bis 750 mm links vom festen Lager (im Kragarm) abgeplatzt, wobei die Abplatzungen eine Dicke von ungefähr 50 bis 60 mm aufwiesen. Weiter wurde auf der Hinterseite im oberen Bereich der unter 45° geneigten Rissfläche ein Querkraftbewehrungsstab entdeckt, welcher unterhalb der Bewehrungslagen zerrissen war. Dabei zeigte der abgetrennte Querkraftbewehrungsstab eine Bruchfläche, die unter einem Winkel von ungefähr 45° gegenüber der Stabachse verlief.

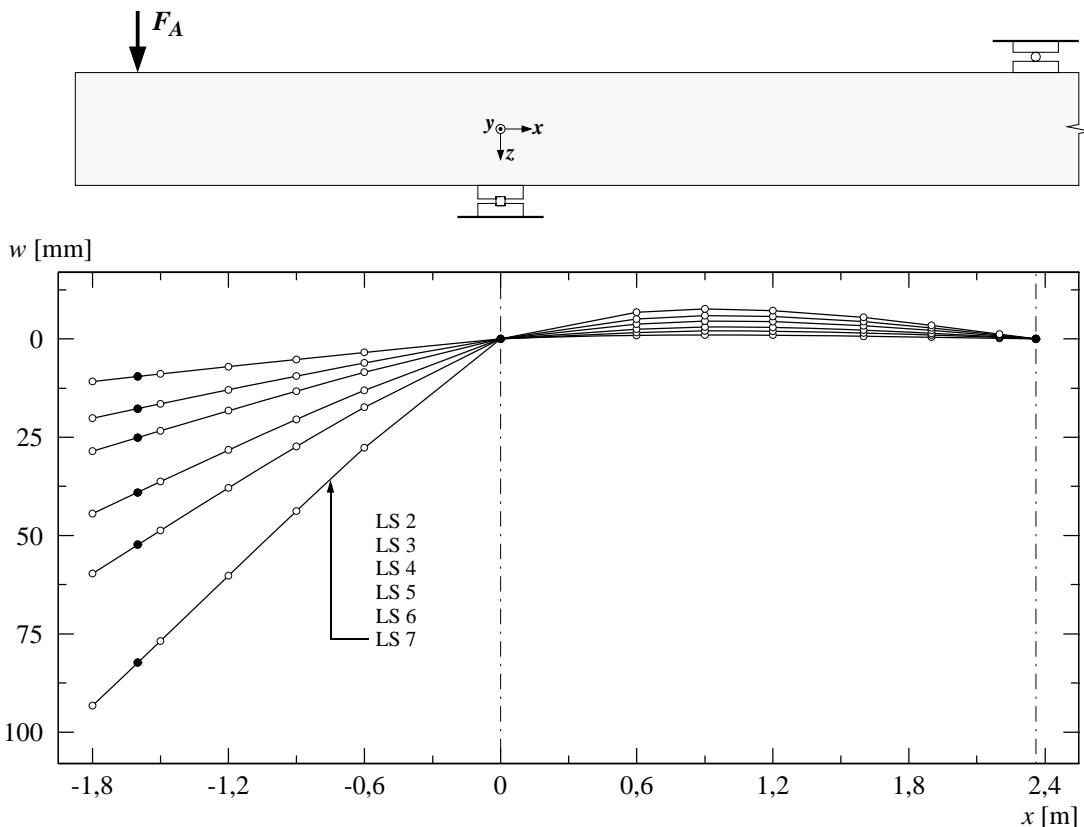


Bild 5.25: B2V1 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

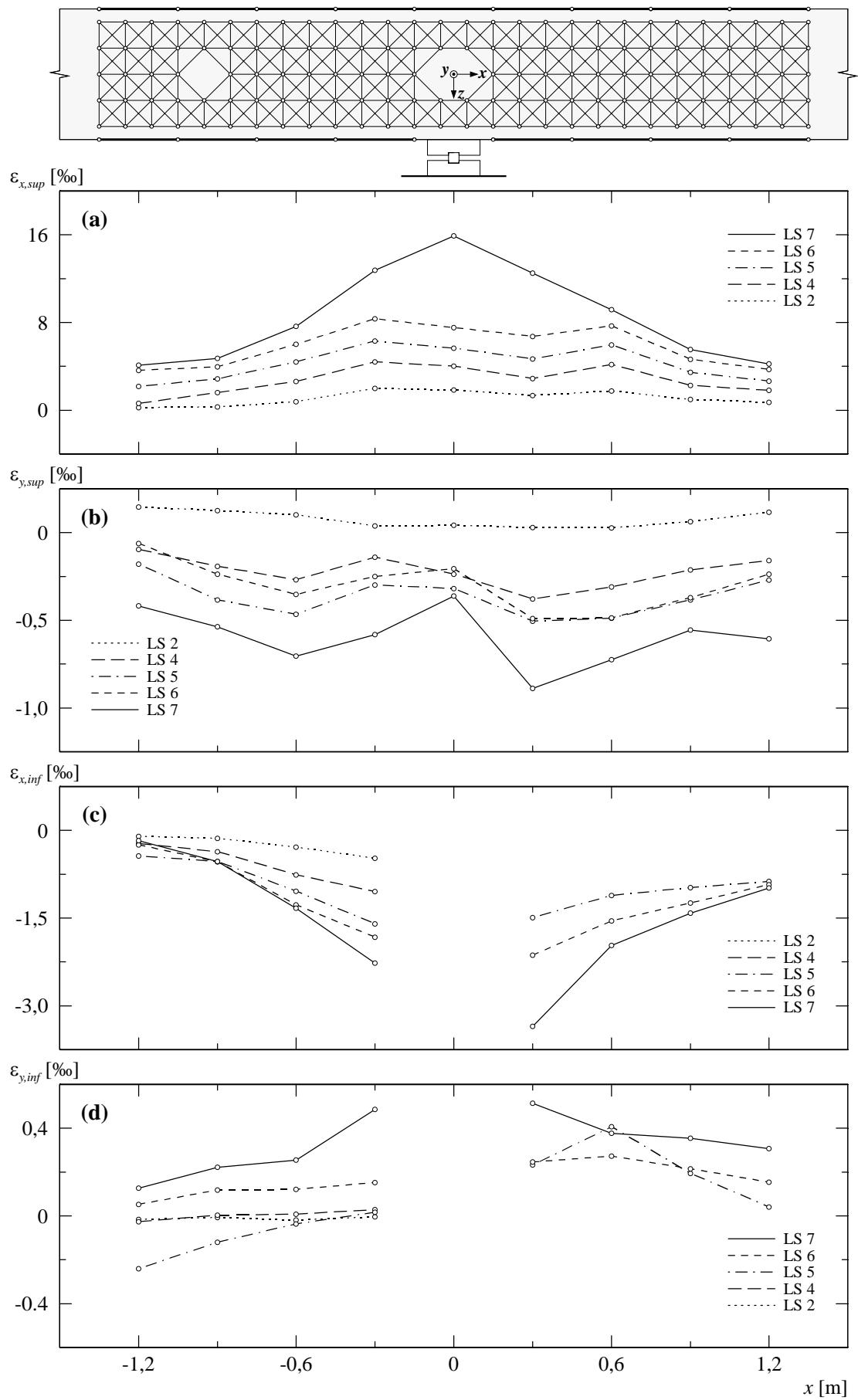


Bild 5.26: B2V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben; (c) mittlere Längsdehnungen unten; (d) mittlere Querdehnungen unten.

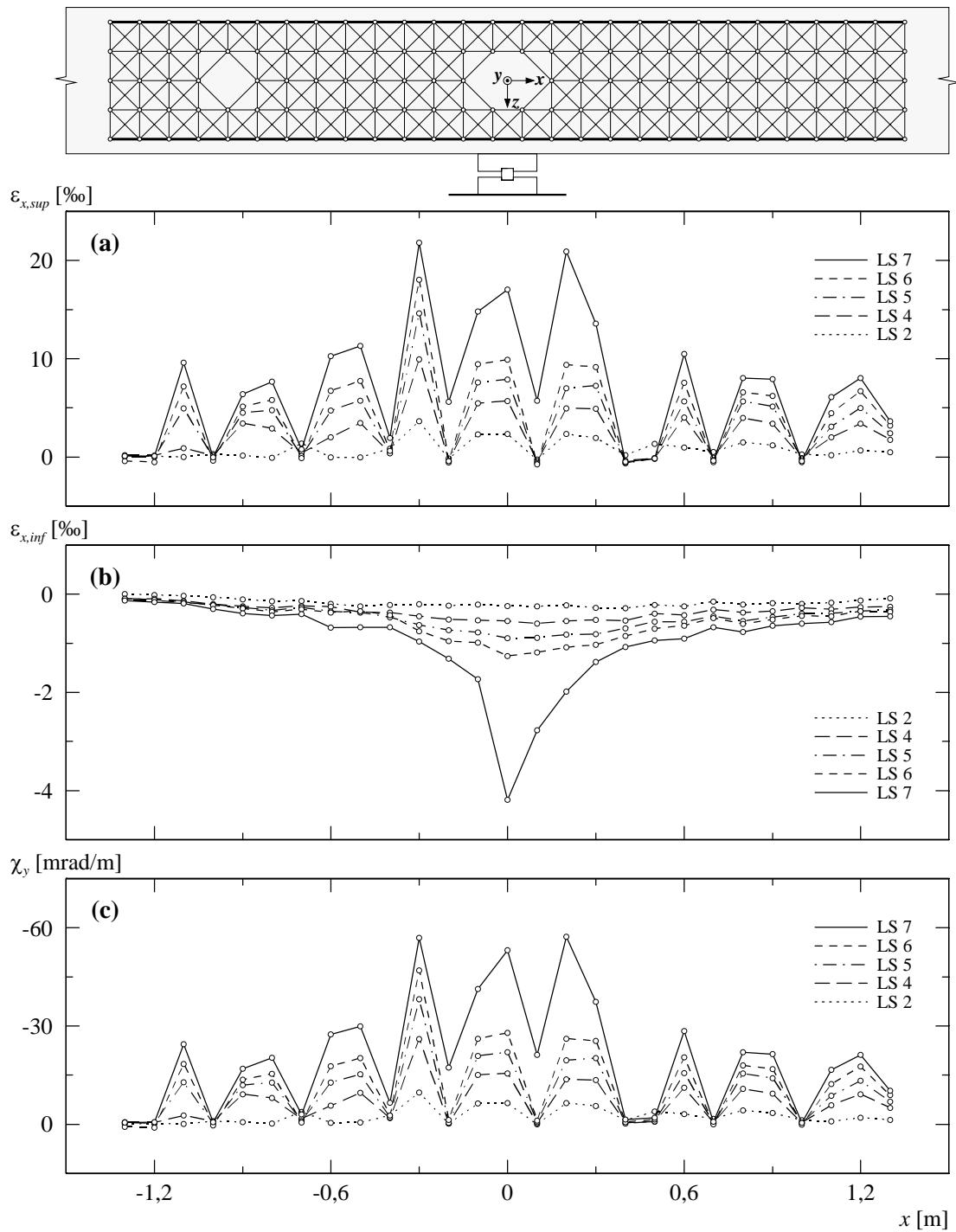


Bild 5.27: B2V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

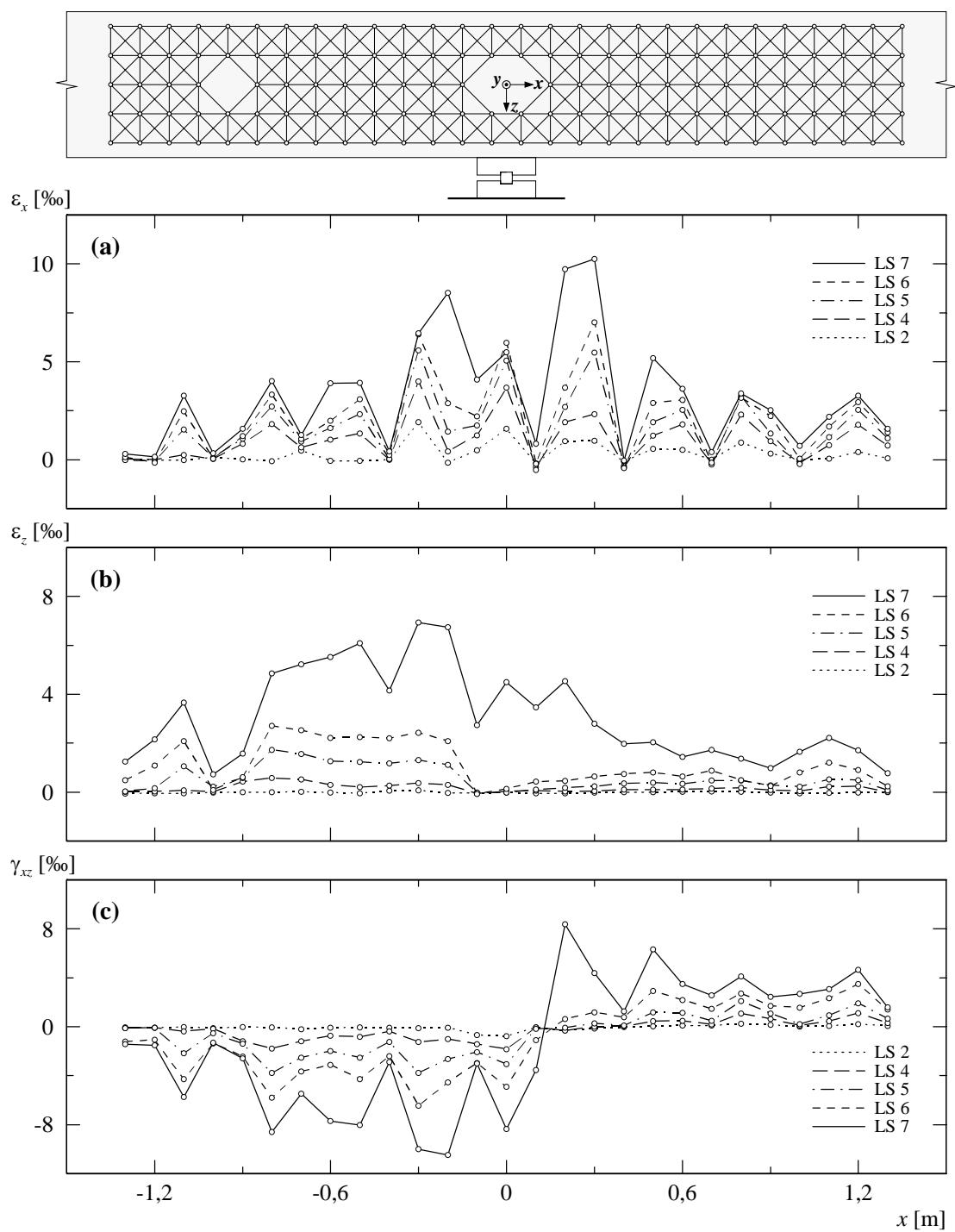
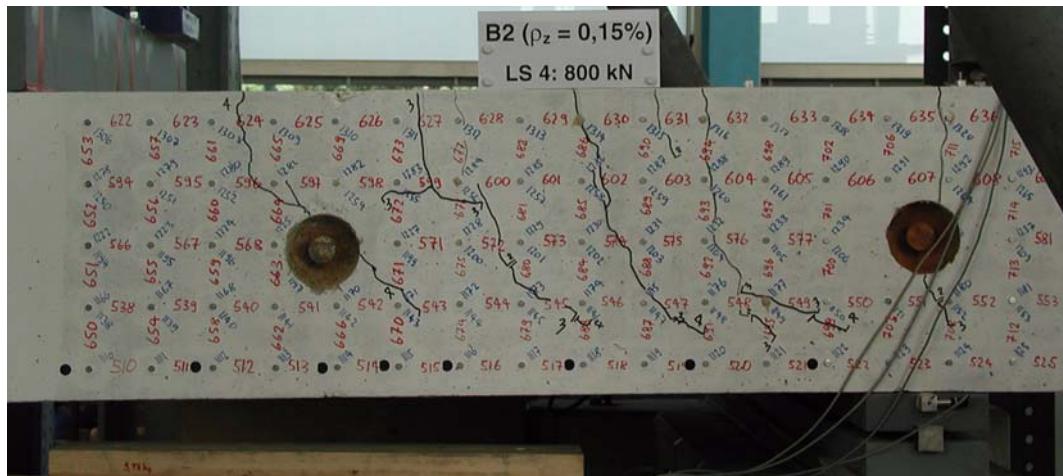


Bild 5.28: B2V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

(a)



(b)

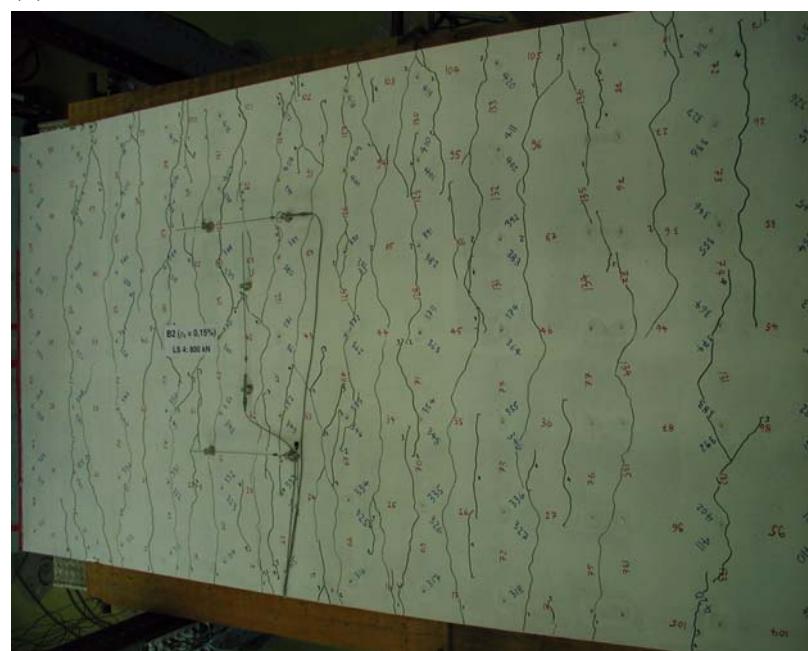


Bild 5.29: B2V1 – Rissbild bei Laststufe LS 4: (a) Vorderseite Kragarm; (b) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.

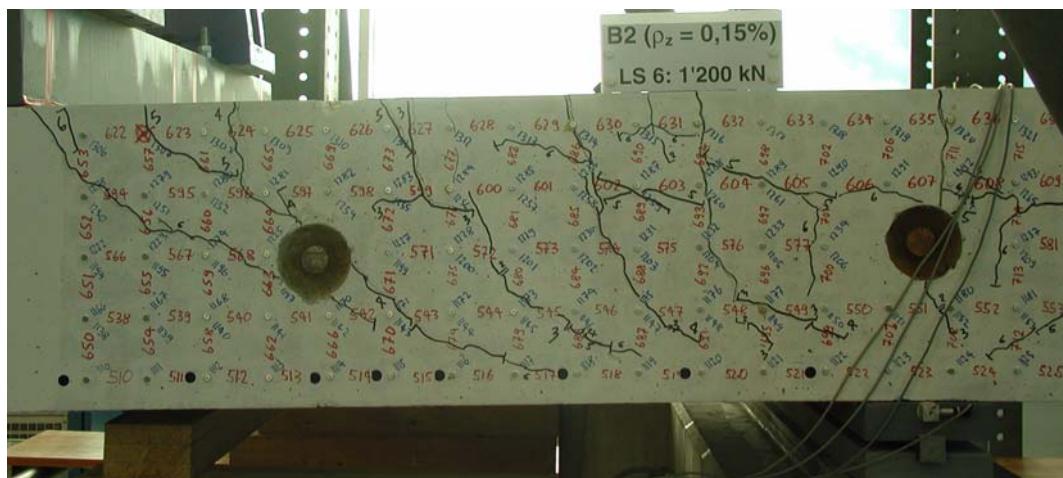
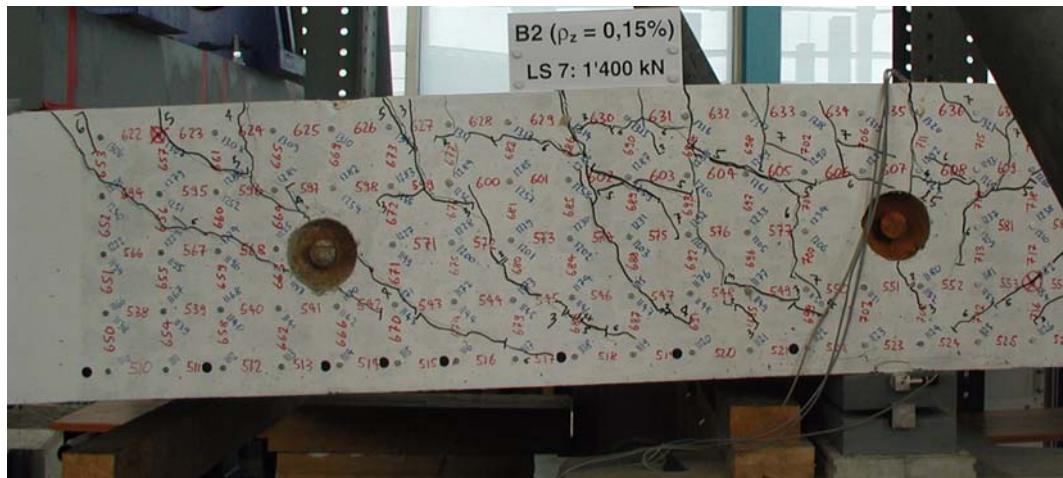
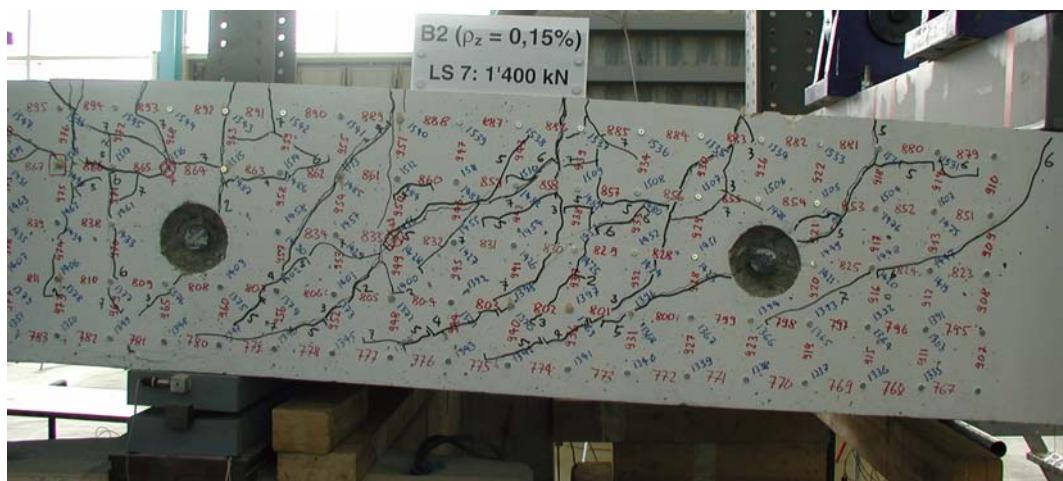


Bild 5.30: B2V1 – Rissbild bei Laststufe LS 6: Vorderseite Kragarm.

(a)



(b)



(c)



Bild 5.31: B2V1 – Rissbild bei Laststufe LS 7: (a) Vorderseite Kragarm; (b) Hinterseite Kragarm; (c) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.

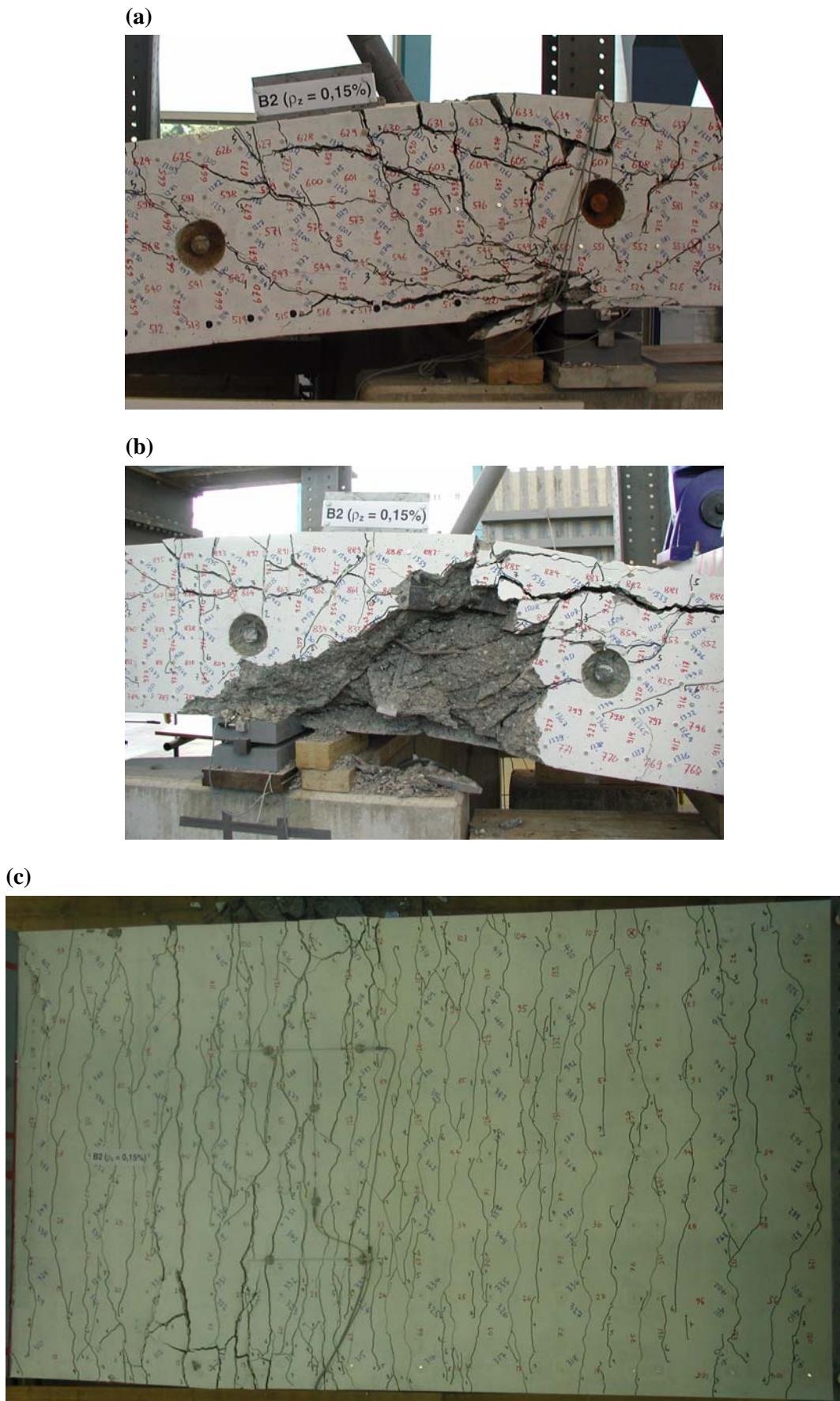


Bild 5.32: B2V1 – Bruchzone und Rissbild nach Versuchsende: (a) Vorderseite beim festen Lager; (b) Hinterseite beim festen Lager; (c) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.

Der untere Betonkeil, welcher durch die ausgeprägte Rissfläche im Kragarm begrenzt ist, wurde während des Versuchs entlang der unter 45° geneigten Rissfläche nach unten geschoben beziehungsweise erfuhr der Betonkeil eine Rotationsbewegung, wobei das Rotationszentrum im Bereich der Krafteinleitung beim Kragarmende lag. Die Rotation führte zur Bildung des Trennrisses entlang der Biegebewehrung und zum gegenseitigen Abgleiten der unter 45° geneigten Rissufer. Dabei wurden die Querkraftbewehrungsstäbe in der geneigten Rissfläche zerrissen sowie die Rissverzahnung der geneigten Rissufer zerstört.

5.3.2 Versuch B2V2

Mit dem Versuch B2V2 wurde der Kragarm K1 ($\rho_z = 0,327\%$) geprüft. Dabei betrug der Abstand zwischen dem festen und beweglichen Lager 2,36 m (Abstand b). Am ersten Versuchstag wurde die erste Nullmessung durchgeführt. Die zweite Nullmessung sowie die Laststufen LS 2 und LS 3 folgten am zweiten, die Laststufen LS 4 und LS 5 am dritten Versuchstag. Über Nacht wurde der Versuchsträger jeweils entlastet.

Bei einer Kraft von $F_A \approx 400$ kN wurde die erste Laststufe LS 2 durchgeführt. Der gerissene Bereich erstreckte sich über die inneren 70 % des Kragarms und das gesamte Mittelfeld, und die Risse wiesen mittlere Rissabstände von 150 bis 300 mm auf. Im Kragarm und Mittelfeld lagen die Rissbreiten auf der Oberseite zwischen 0,05 und 0,25 mm, während über dem festen Auflager (Stelle C) Rissbreiten zwischen 0,1 und 0,35 mm gemessen wurden. Auf der Vorder- und Hinterseite des Versuchskörpers hatten sich ungefähr vertikal verlaufende Risse gebildet. In der ersten Hälfte des Kragarms und des Mittelfelds sowie im Bereich des festen Lagers ($x \approx -450 \div 450$ mm) reichten diese über die oberen 65 % der Versuchskörperhöhe. Für die folgenden Laststufen wurde bis zum Erreichen der Höchstlast ein Belastungsintervall von $\Delta F_A \approx 400$ kN gewählt.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 3 ($F_A \approx 800$ kN) bildeten sich vorwiegend im Kragarm weitere Risse. Neben der Bildung von neuen Rissen in den äusseren Bereichen des Kragarms und über dem festen Lager sowie vereinzelten Verlängerungen und Verästelungen der vorhandenen Risse wurde auf der Oberseite eine Vergrösserung der Rissbreiten beobachtet. Die mittleren Rissabstände lagen zwischen 100 und 200 mm. Über dem festen Lager wurden maximale Rissbreiten von 0,65 mm gemessen. Die übrigen Rissbreiten im Kragarm und Mittelfeld vergrösserten sich auf 0,1 bis 0,5 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite bildeten sich im äusseren Bereich des Kragarms zwei neue Risse, während sich die bereits vorhandenen Risse fortpflanzten. Im Kragarm verliefen diese im oberen Bereich vertikal, setzten sich aber im unteren Bereich mit einer leichten Neigung gegen das feste Auflager fort. Im unteren Bereich wiesen die schrägen Risse Neigungen von 45 bis 55° gegenüber der x -Achse auf, während die Risse beim festen Lager ungefähr vertikal verliefen. Die Risse erstreckten sich über die oberen 80 % der Versuchskörperhöhe. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe (≈ 50 mm unterhalb der Oberkante)

Laststufe (LS)	F_A [kN]	F_B [kN]	F_{C1} [kN]	F_{C2} [kN]	$-V_{C1}$ [kNm]	$-M_C$ [kNm]	w_1 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	$\alpha(F_A)$ [°]	Bemerkungen
1	0	-88	112	0	74	86	0	0	0	0	Nullmessung
2	405 378	189 170	795 749	2,2 2,1	479 452	741 697	10,2 10,4	0,87 0,87	-0,07 -0,07	0,32 0,31	Belastungsende Messende
3	833 753	487 432	1521 1385	8,6 7,6	907 827	1445 1314	27,8 27,9	2,05 2,02	-0,16 -0,17	0,59 0,58	Belastungsende Messende
Entlastung 3a	0 0	-88 112	112 0	0 74	74 86	86 5,8	6,0 0,39	0,42 -0,10	-0,10 0,12	0,06 0,12	Entlastungsende Belastungsbeginn
4	1211 1139	761 710	2173 2049	21,9 20,5	1285 1213	2091 1971	53,7 54,4	3,79 3,89	-0,45 -0,48	1,04 1,03	Belastungsende Messende
Höchstlast	1391	896	2487	32,2	1465	2410	75,1	7,49	-0,58	1,33	Höchstlast
5	1342 1194	865 760	2407 2154	33,8 30,1	1416 1268	2336 2088	83,1 82,9	10,49 10,41	-0,62 -0,67	1,44 1,44	Belastungsende Messende
Entlastung	1057 0	711 -88	1966 112	64,8 0	1129 74	1973 86	234,5 182,5	-	-1,30 -1,28	3,51 2,88	Entlastungsbeginn Versuchsende
Versuchsumbau											
Folgeversuch	0 923	-91 598	112 1722	0 49,1	74 996	86 1711	182,5 362,9	-	-	0 3,05	Versuchsbeginn Entlastungsbeginn

Tabelle 5.8: B2V2 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 5.3).

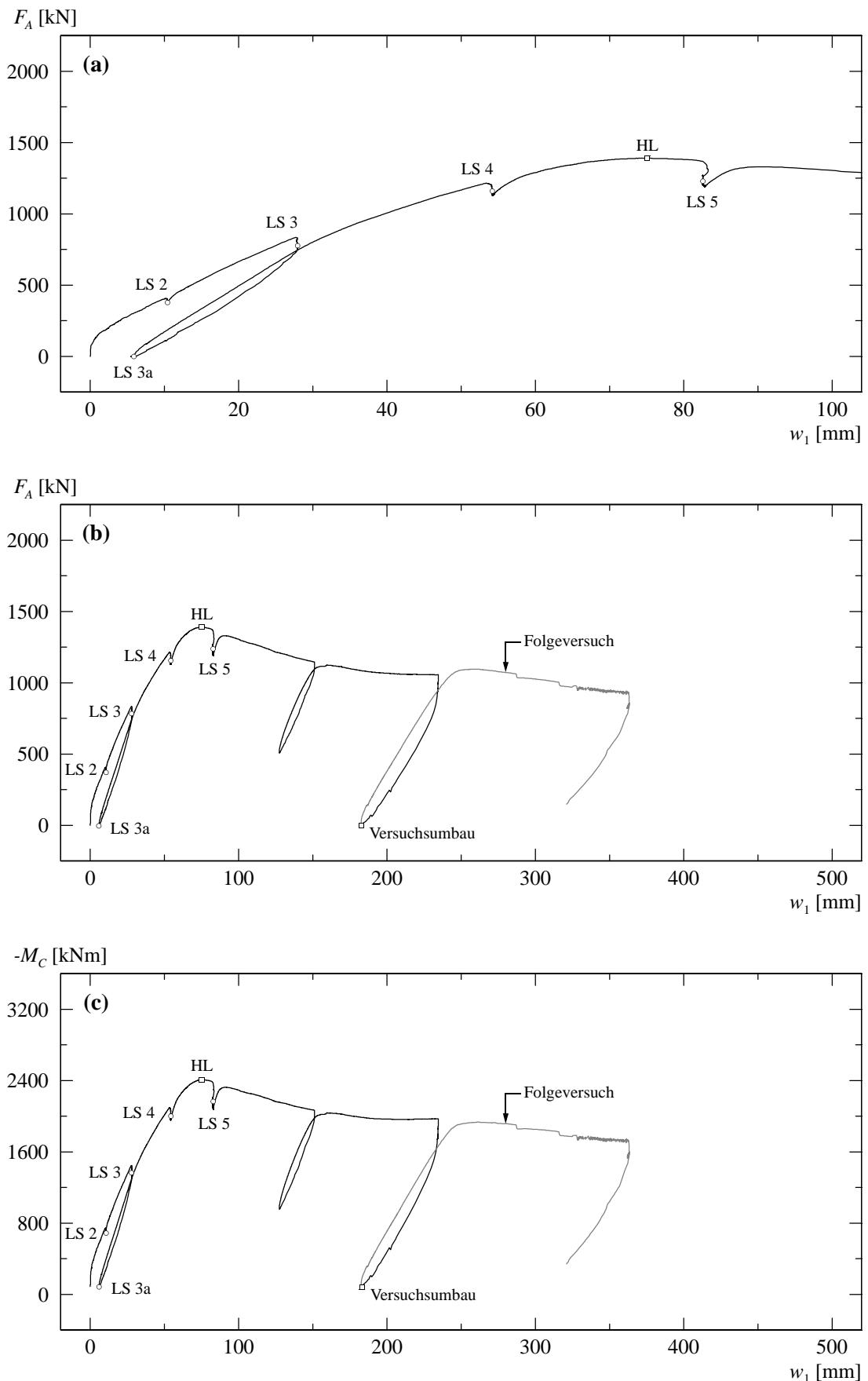


Bild 5.33: B2V2 – (a) und (b) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K1; (c) berechnetes Momenten-Durchbiegungsdiagramm.

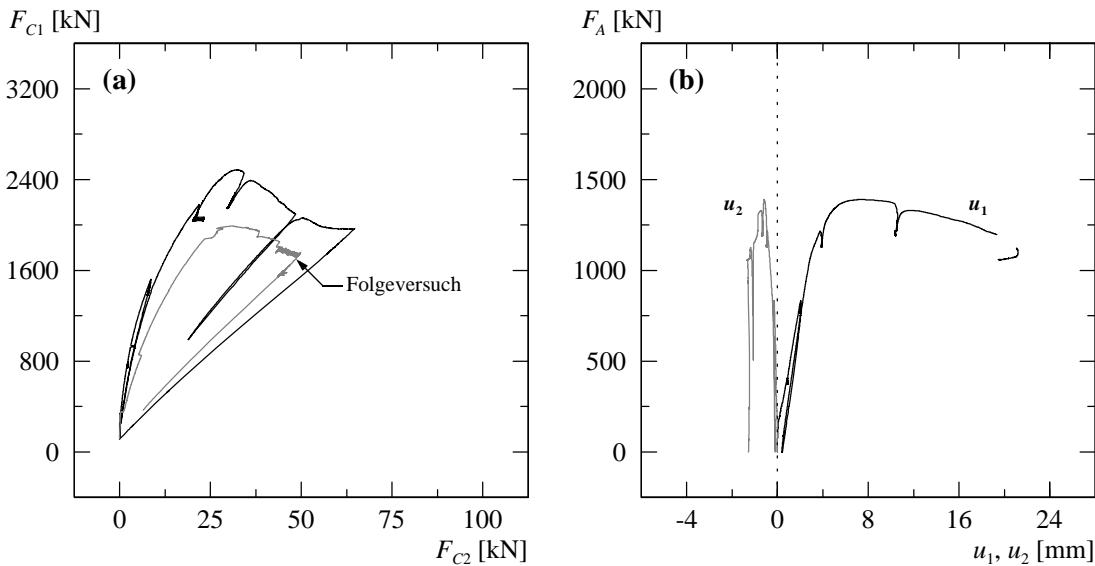


Bild 5.34: B2V2 – (a) Berechnete Lagerreaktionen beim Auflager C; (b) Verformungen der Zugzone über Auflager C.

wurden im Bereich des festen Lagers Rissbreiten von 0,6 bis 1 mm gemessen, während im Kragarm die Rissbreiten bei maximal 0,75 mm lagen. Unterhalb der Bereiche, in denen die Biegebewehrungsverankerungen lagen, verringerten sich die Rissbreiten stark; auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) betragen sie sowohl beim festen Lager als auch im Kragarm 0,1 bis maximal 0,35 mm.

Während der Belastung zwischen den Laststufen LS 3 und LS 4 ($F_A \approx 800 \div 1200$ kN) bildete sich im Kragarm auf der Unterseite ein Längsriss, der eine Länge von ca. 1250 mm hatte und ungefähr parallel zur x -Richtung im mittleren Drittbereich ($y \approx -150 \div 50$ mm) verlief. Unten an der Stirnseite des Versuchskörpers betrug die Rissbreite 0,3 mm.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 4 ($F_A \approx 1200$ kN) bildeten sich sowohl auf der Oberseite als auch auf der Vorder- und Hinterseite neue Risse. Neben der Bildung von neuen Rissen wurde auf der Oberseite eine Verästelung der bestehenden Risse beobachtet, wobei die Verästelungsrisse mehrheitlich in den Verankerungsbereichen der Biegebewehrung endeten. Die Rissbreiten betrugen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 75 bis 150 mm im Kragarm 0,2 bis 0,65 mm, im Mittelfeld 0,3 bis 0,7 mm und über dem festen Lager 0,35 bis maximal 1 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite wurde die Bildung horizontal verlaufender Risse im Bereich der Biegebewehrungsverankerungen und zweier neuer Risse im Kragarm sowie die Verlängerung und Verästelung der bestehenden Risse festgestellt. Dabei erstreckten sich die Risse über die oberen 80 bis 85 % der Versuchskörperhöhe. Bei den anfänglich relativ steil verlaufenden Rissen im äusseren Bereich des Kragarms wurde im unteren Bereich eine deutliche Abflachung der Risse beobachtet. Die Neigung der Risse betrug im unteren Bereich 20 bis 45° gegenüber der x -Achse. Die Risse im inneren Bereich des Kragarms und im Mittelfeld verliefen im oberen Bereich ungefähr vertikal, setzten sich dann aber im unteren Bereich mit einer leichten Neigung gegen das feste Lager fort, wobei die Risse Neigungen zwischen 40 und 50° gegenüber der x -Achse aufwiesen. Auf der Höhe der obersten Deformmetermessreihe betragen die Rissbreiten im Bereich des festen Lagers 1,4 bis 2 mm und im Kragarm 0,25 bis 1,2 mm. Unterhalb der Verankerungsbereiche der Biegebewehrung und auf halber Versuchskörperhöhe lagen die Rissbreiten über dem festen Lager zwischen 0,4 und 0,5 mm und im Kragarm zwischen 0,2 und 0,4 mm.

Im weiteren Versuchsfortschritt, zwischen den Laststufen LS 4 und LS 5, wurde bei einer Durchbiegung von $w_1 = 75,1$ mm beim Kragarm K1 die Höchstlast erreicht. Die entsprechende

Laststufe	Oberseite			Vorderseite – Kragarm		Vorderseite – Festes Lager	
	Kragarm w_{cr} [mm]	Festes Lager w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 2	0,05...0,25	0,10...0,35	0,05...0,25	HR...0,10	HR	0,10...0,40	HR...0,10
LS 3	0,10...0,45	0,15...0,65	0,15...0,50	0,25...0,75	0,10...0,30	0,60...1,00	0,15...0,35
LS 4	0,20...0,65	0,35...1,00	0,30...0,70	0,25...1,20	0,20...0,40	1,40...2,00	0,40...0,50
LS 5	0,20...0,80	0,40...2,50	0,35...1,20	0,80...1,20	0,15...0,55	0,90...4,50	0,50...0,90

Tabelle 5.9: B2V2 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

Kraft betrug $F_A = 1391$ kN. Gleichzeitig bildeten sich auf der Mittelfeldseite und über der Lagerplatte die ersten Betonstauchungsrisse in der Biegedruckzone beim festen Lager.

Nach Erreichen der Höchstlast wurde bei einer Kraft von $F_A \approx 1400$ kN und einer Durchbiegung von $w_1 \approx 83,1$ mm die letzte Laststufe LS 5 durchgeführt. Auf der Mittelfeldseite beim festen Lager konnten an der Unterseite erste Abplatzungen von Betonplättchen festgestellt werden. Ausser der Verlängerung und Verästelung der bestehenden Risse wurde bis zur Laststufe LS 5 keine grosse Veränderung des Rissbildes beobachtet. Auf der Oberseite wurde beim festen Lager ein Riss mit einer Breite von 2,5 mm gemessen. Die übrigen Risse über dem festen Lager wiesen Breiten von 0,35 bis 1,4 mm auf. Im Kragarm lagen die Rissbreiten zwischen 0,2 und 0,8 mm, im Mittelfeld zwischen 0,35 und 1,2 mm. Die Risse auf der Vorder- und Hinterseite erstreckten sich über die oberen 80 bis 85 % der Versuchskörperhöhe. Neben der Bildung weiterer Verästelungsrisse und vereinzelter Risse im Bereich der Biegebewehrungsverankerungen setzten sich die schräg verlaufenden Risse im Kragarm sowie die ungefähr vertikal verlaufenden Risse im Bereich des festen Lagers nur geringfügig fort. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe hatte sich über dem festen Lager ein Riss 4,5 mm weit geöffnet. Die übrigen Rissbreiten lagen im Bereich des festen Lagers zwischen 0,9 und 2 mm und im Kragarm zwischen 0,8 und 1,2 mm. Unterhalb der Bereiche, in denen die Biegebewehrungsverankerungen lagen, verringerten sich die Rissbreiten stark; auf halber Versuchskörperhöhe betragen sie beim festen Lager 0,5 bis 0,9 mm und im Kragarm 0,15 bis 0,55 mm.

Anschliessend wurde die Durchbiegung des Kragarms K1 vergrössert. Im weiteren Versuchsfortschritt wurden in dem zur y-Achse parallel verlaufenden Druckfeld auf der Oberseite (Biegezugzone) die ersten Betonstauchungsrisse beim festen Lager beobachtet. Gleichzeitig platzten auf der Mittelfeldseite beim festen Lager grössere Teile des Überdeckungsbetons an der Unterseite ab. Mit zunehmender Kragarmdurchbiegung versagte beim festen Lager allmählich der Beton im Verankerungsbereich von drei Stabpaaren der Biegebewehrung auf der Vorder- sowie von zwei Stabpaaren auf der Hinterseite, wobei Teile des Überdeckungsbetons auf der Oberseite in y-Richtung stark gestaucht wurden. Die Bruchzone erstreckte sich in x-Richtung über eine Länge von 600 bis 1000 mm. Diese Zerstörung des Druckfeldes führte zu geringfügigen horizontalen Verschiebungen der Biegebewehrungsstäbe entlang ihrer Stabachse und zu einem kleinen vertikalen Versatz der Ankerplatten, wobei die Querkraftbewehrungsstäbe die Verankerungszone und somit die Biegebewehrung stabilisierten. Gleichzeitig platzten auf der Mittelfeldseite beim festen Lager weitere Teile des Überdeckungsbetons an der Unterseite ab. Bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 234$ mm wurde der Grundversuch abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt noch ungefähr 76 % der Höchstlast. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden.

Nach Beendigung des Grundversuchs musste die Versuchsanlage für den Folgeversuch umgebaut werden. Mit dem Folgeversuch wurde das Trag- und Verformungsverhalten des Kragarms K1 weiter geprüft. Während der Wiederbelastung im Folgeversuch konnte das Belastungsniveau des Grundversuchs bei Entlastungsbeginn erreicht werden. Mit zunehmender Steigerung der Kragarmdurchbiegung konnte sukzessive das Zerreissen von einzelnen Querkraftbewehrungsstäben akustisch wahrgenommen werden. Der Folgeversuch wurde schliesslich bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 363$ mm abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt

noch ungefähr 66 % der Höchstlast. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden.

Für die abschliessende Untersuchung des Versuchskörpers wurde auf der Oberseite der abgeplatzte Überdeckungsbeton der Biegezugzone entfernt. Die Bruchzone dehnte sich beim festen Lager über die gesamte Versuchskörperbreite aus und erstreckte sich in der vorderen Hälfte auf eine Länge von ungefähr 800 bis 1000 mm und in der hinteren Hälfte auf ungefähr 600 mm. Im Verankerungsbereich der Biegebewehrung konnten grössere vertikale Relativverschiebungen der Ankerplatten festgestellt werden, wobei aber keine zerrissenen Querkraftbewehrungsstäbe entdeckt wurden. An der Unterseite war der Überdeckungsbeton der Biegendruckzone in einem Bereich von 350 bis 600 mm rechts vom festen Lager (im Mittelfeld) abgeplatzt. Die Oberfläche der abgeplatzten Bereiche zeigte neben dem Lager keine Spuren einer Zerstörung der Rissverzahnung oder eines gegenseitigen Abgleitens der Rissflächen.

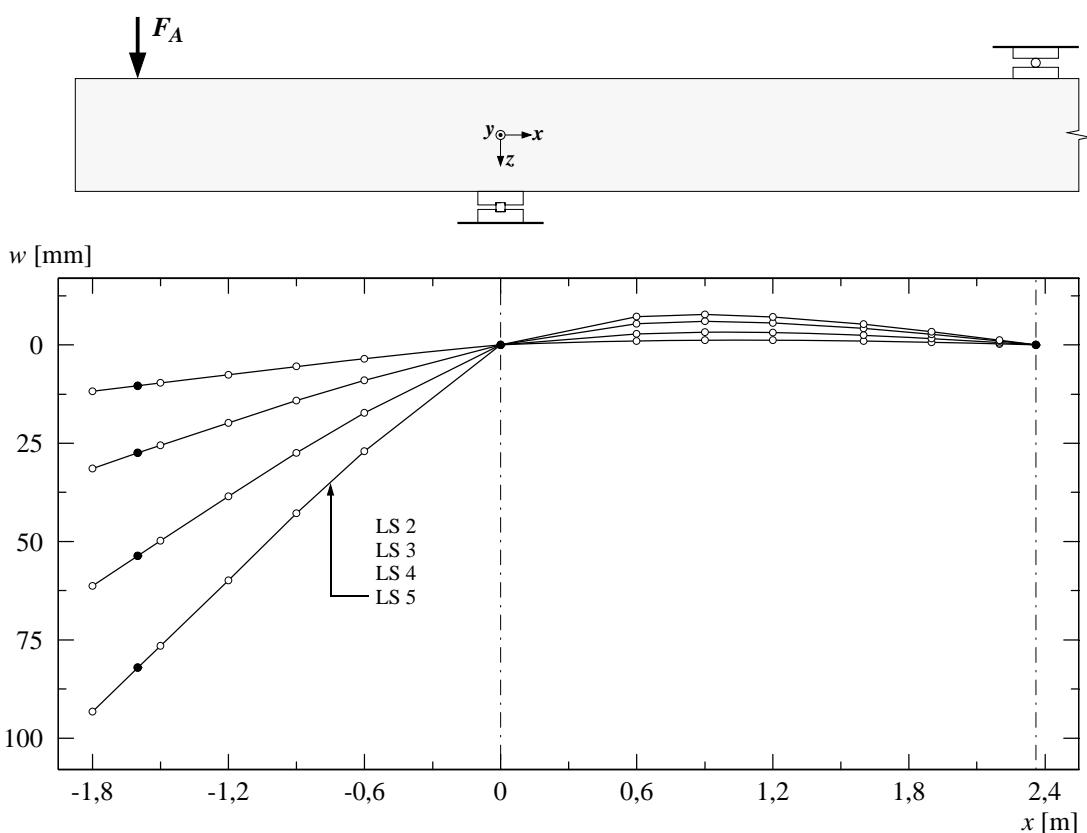


Bild 5.35: B2V2 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

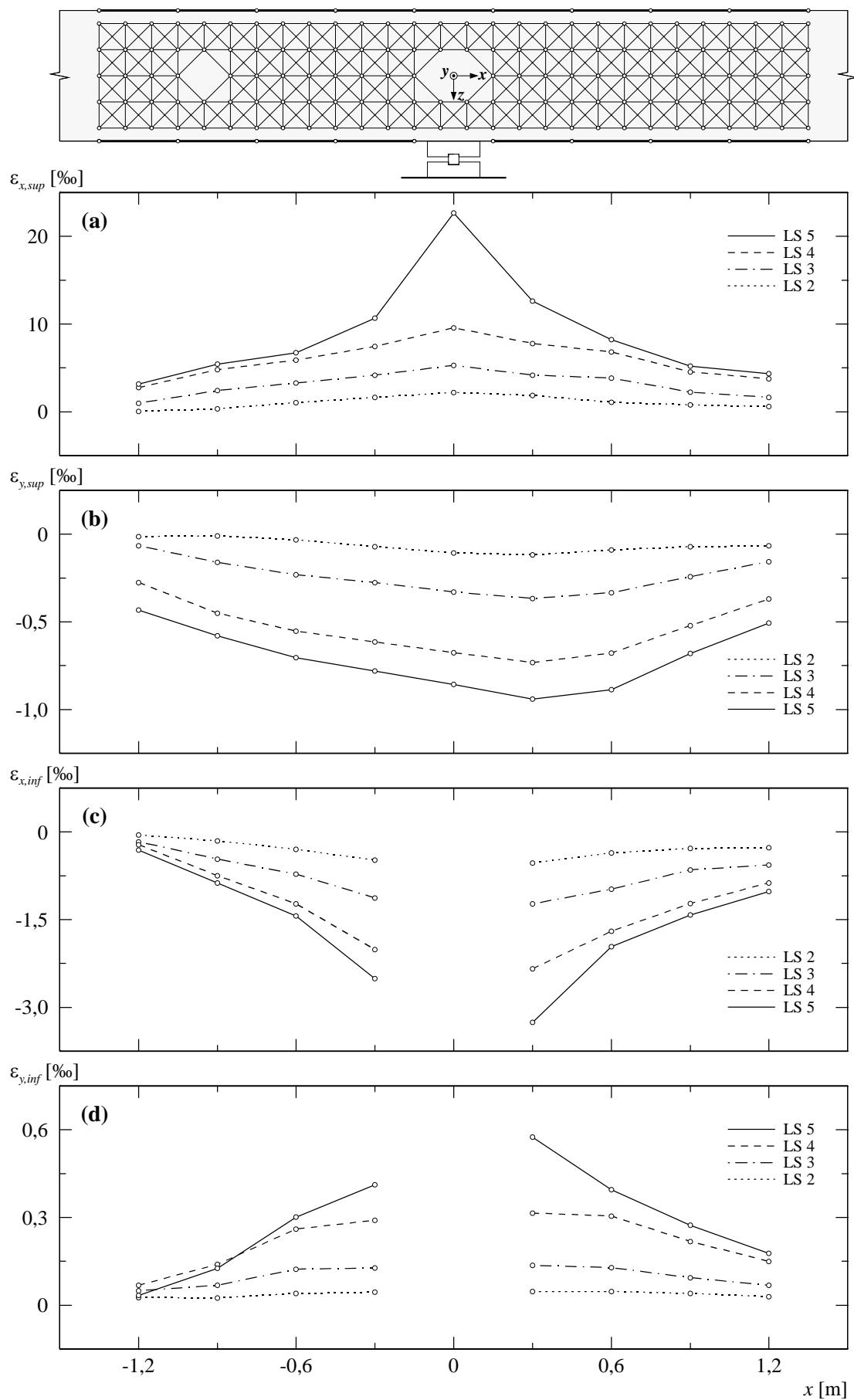


Bild 5.36: B2V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben; (c) mittlere Längsdehnungen unten; (d) mittlere Querdehnungen unten.

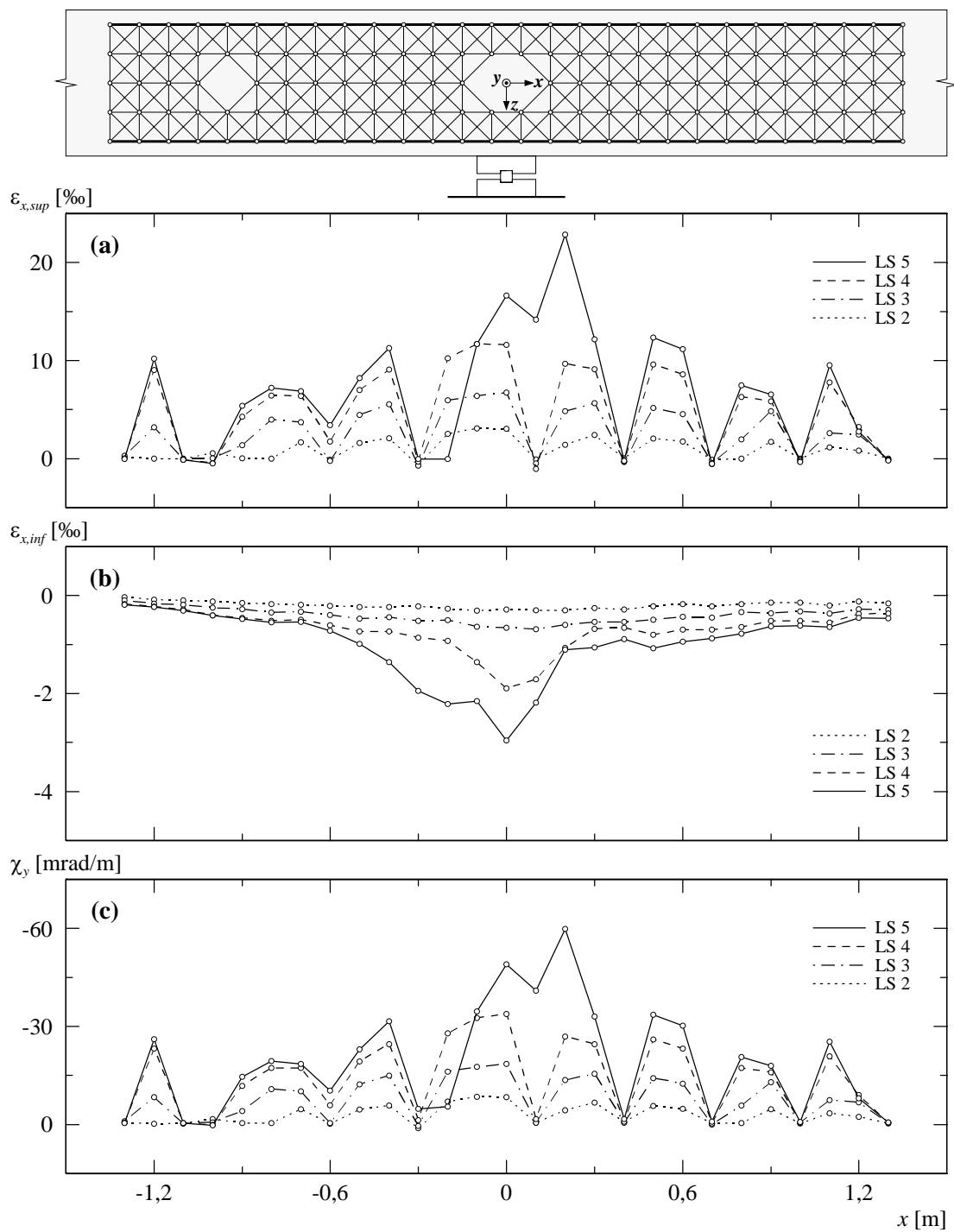


Bild 5.37: B2V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

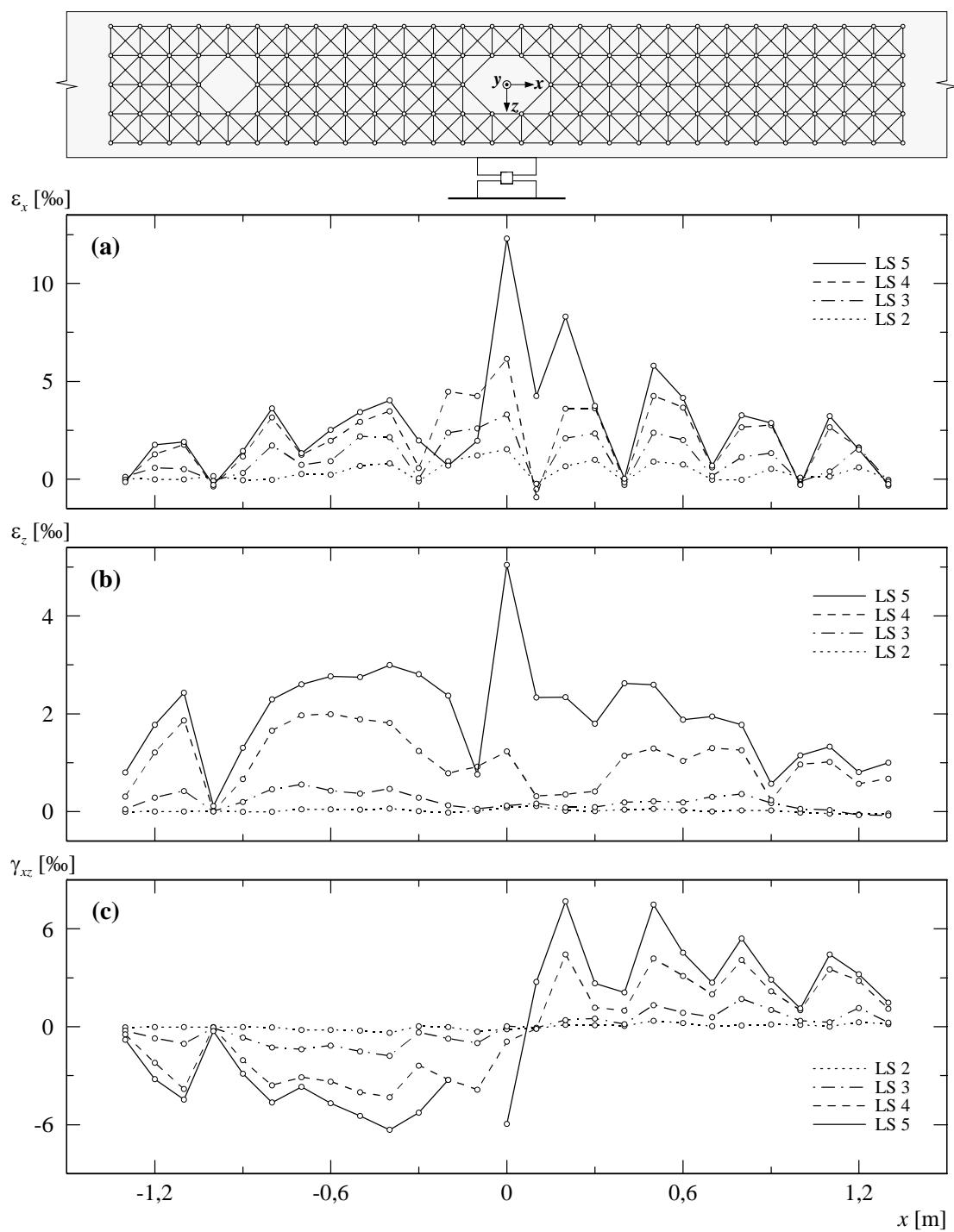
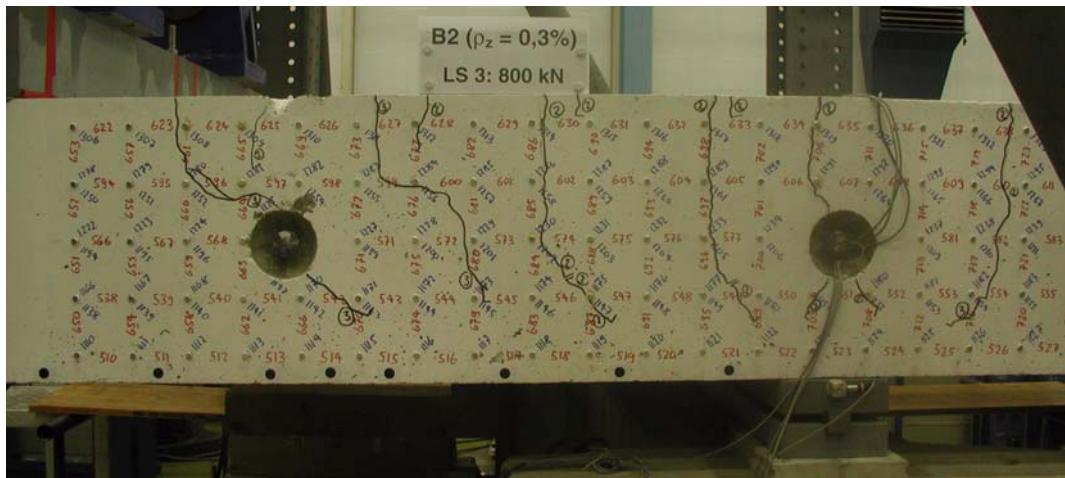


Bild 5.38: B2V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

(a)



(b)

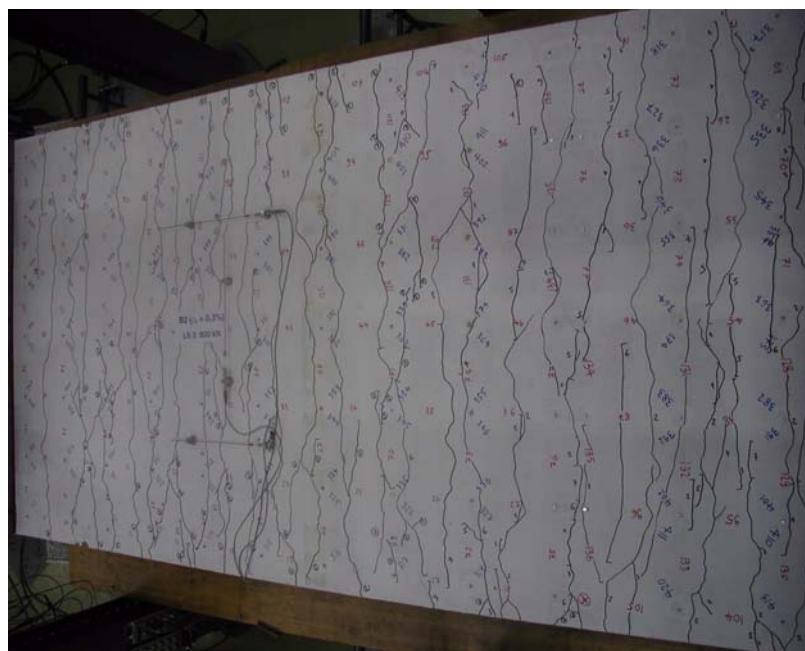


Bild 5.39: B2V2 – Rissbild bei Laststufe LS 3: (a) Vorderseite Kragarm; (b) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.

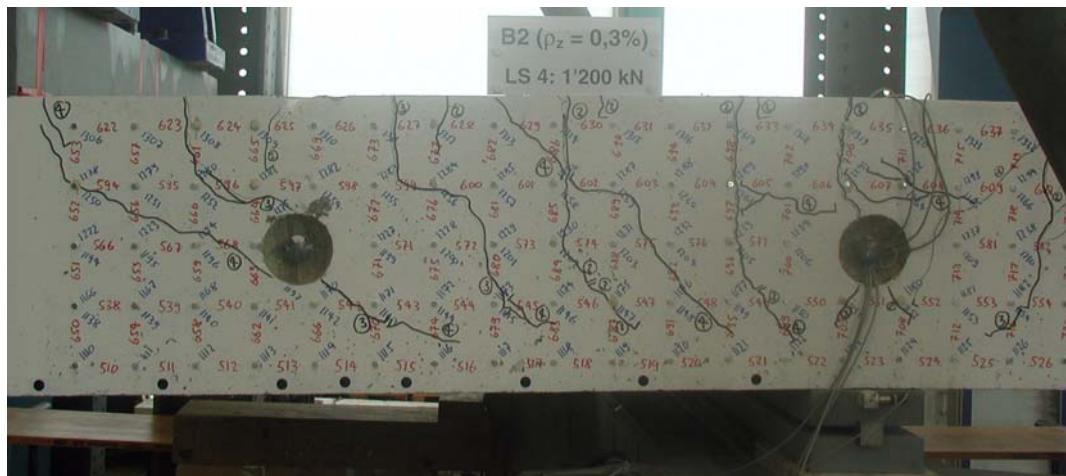
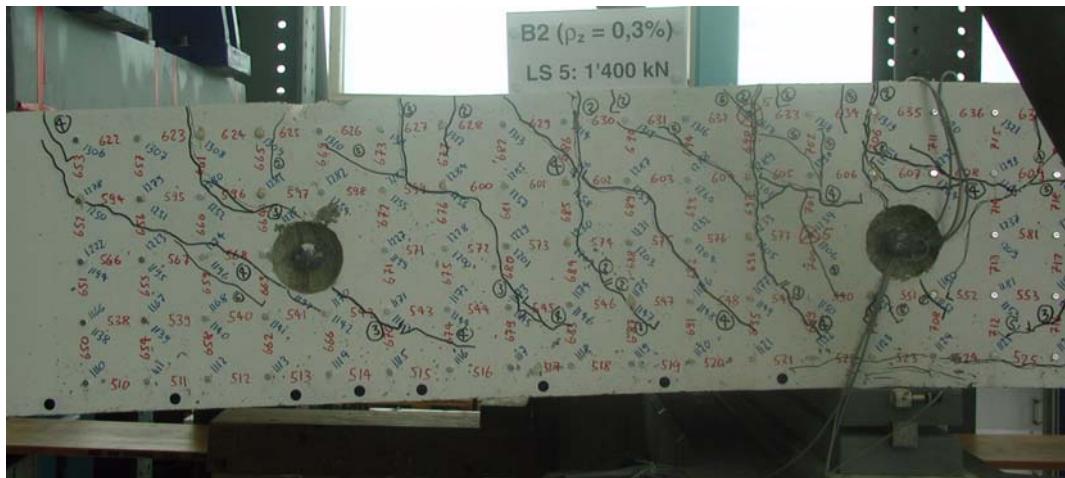


Bild 5.40: B2V2 – Rissbild bei Laststufe LS 4: Vorderseite Kragarm.

(a)



(b)

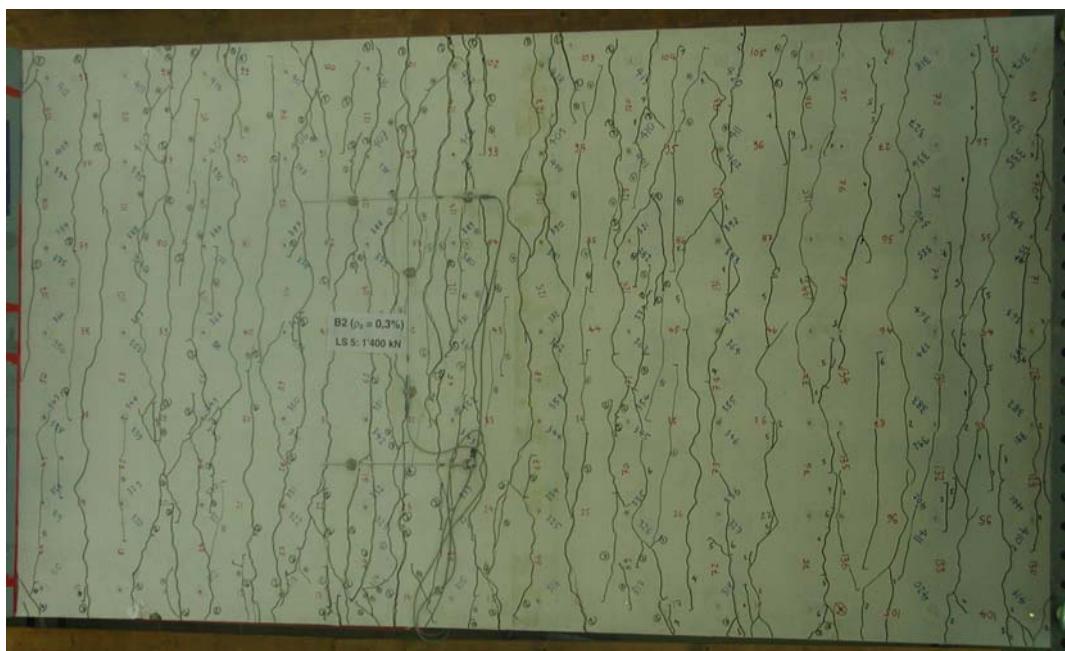


Bild 5.41: B2V2 – Rissbild bei Laststufe LS 5: (a) Vorderseite Kragarm; (b) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.

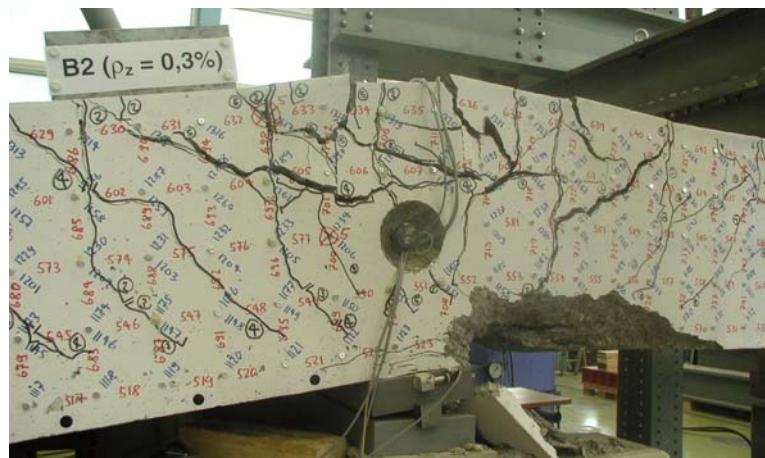


Bild 5.42: B2V2 – Bruchzone nach Ende des Grundversuchs: Vorderseite beim festen Lager.

(a)



(b)



Bild 5.43: B2V2 – Bruchzone nach Ende des Folgeversuchs: (a) Vorderseite beim festen Lager; (b) Oberseite beim festen Lager.



Bild 5.44: B2V2 – Freigelegte Biegebewehrung beim festen Lager.

5.4 Versuchskörper B3

Der Versuchskörper B3 war als Vergleichsversuch zu den Versuchskörpern B1 und B2 konzipiert. Dieser Versuch sollte den Einfluss der Biegebewehrungsrichtungen auf das Trag- und Verformungsverhalten aufzeigen. Der geometrische Bewehrungsgehalt in x -Richtung betrug $\rho_x = 1,745 \%$, und für die Bewehrungsrichtung galt $\varphi_0 = 0^\circ$. In der Hauptbewehrungsrichtung (x -Richtung) waren zwei Bewehrungslagen, in der Querrichtung (y -Richtung) eine Bewehrungslage mit Stäben $\varnothing 30$ mm und einem Stababstand von 200 mm angeordnet. Die beiden Kragarmbereiche wiesen Querkraftbewehrungsgehalte von $\rho_z = 0 \%$ (Kragarm K2) und 0,308 % (Kragarm K1) auf.

5.4.1 Versuch B3V1

Mit dem Versuch B3V1 wurde der Kragarm K2 ($\rho_z = 0 \%$) geprüft. Dabei betrug der Abstand zwischen dem festen und beweglichen Lager 2,36 m (Abstand b). Am ersten Versuchstag wurden die beiden Nullmessungen durchgeführt. Die Laststufen LS 2 und LS 3 folgten am zweiten, die Laststufen LS 4 und LS 5 am dritten Versuchstag. Am vierten Versuchstag wurde der Versuchskörper erneut belastet und der Versuch abgeschlossen. Über Nacht und über das Wochenende zwischen dem dritten und vierten Versuchstag wurde der Versuchsträger jeweils entlastet, wobei die erste Belastung am zweiten Versuchstag erfolgte.

Bei einer Kraft von $F_A \approx 400$ kN wurde die erste Laststufe LS 2 durchgeführt. Der gerissene Bereich erstreckte sich über die inneren 70 % des Kragarms und Mittelfelds. Die Risse auf der Oberseite wiesen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 200 bis 250 mm Breiten von 0,05 mm auf. Auf der Vorder- und Hinterseite des Versuchskörpers hatten sich ungefähr vertikal verlaufende Risse gebildet. In der ersten Hälfte des Kragarms und des Mittelfelds sowie im Bereich des festen Lagers ($x \approx -450 \div 450$ mm) reichten diese über die obere Hälfte der Versuchskörperhöhe. Für die folgenden Laststufen wurde bis zum Erreichen der Bruchlast ein Belastungsspielraum von $\Delta F_A \approx 200$ kN gewählt.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 4 ($F_A \approx 800$ kN) bildeten sich vorwiegend in den äusseren Bereichen des Kragarms und des Mittelfelds weitere Risse. Der gerissene Bereich erstreckte sich über die ganze Oberseite, wobei sich die Rissbreiten der vorhandenen Risse kaum vergrösserten. Über dem festen Lager (Stelle C) wurden maximale Rissbreiten von 0,2 mm

Laststufe (LS)	F_A [kN]	F_B [kN]	F_{C1} [kN]	F_{C2} [kN]	$-V_{C1}$ [kN]	$-M_C$ [kNm]	w_1 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	$\alpha(F_A)$ [°]	Bemerkungen
1	0	-85	108	0	72	84	0	0	0	0	Nullmessung
2	401 364	187 163	781 720	0,3 0,4	472 436	726 668	3,1 3,2	0,21 0,21	0,01 0,02	0,05 0,06	Belastungsende Messende
3	600 553	324 292	1117 1038	1,2 1,1	672 625	1048 972	6,2 6,2	0,39 0,38	0,03 0,02	0,12 0,11	Belastungsende Messende
Entlastung 3a	0 0	-85 108	108 0	0 72	72 84	2,1 2,1	0,12 0,14	0,01 0,03	0,00 -0,02	Entlastungsende Belastungsbeginn	
4	801 732	461 414	1455 1339	2,0 2,1	873 803	1371 1261	9,3 9,2	0,57 0,56	0,06 0,05	0,15 0,17	Belastungsende Messende
5	1001 944	599 560	1794 1697	4,0 3,5	1073 1016	1698 1606	12,6 12,6	0,75 0,74	0,06 0,05	0,23 0,21	Belastungsende Messende
Entlastung 5a	0 0	-85 -85	108 108	0 0	72 72	84 84	3,1 2,9	0,16 0,11	0,03 -0,01	-0,02 0,04	Entlastungsende Belastungsbeginn
Bruch K2	1211	745	2149	7,0	1282	2042	16,4	0,89	0,03	0,33	Schubbruch

Tabelle 5.10: B3V1 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 5.2).

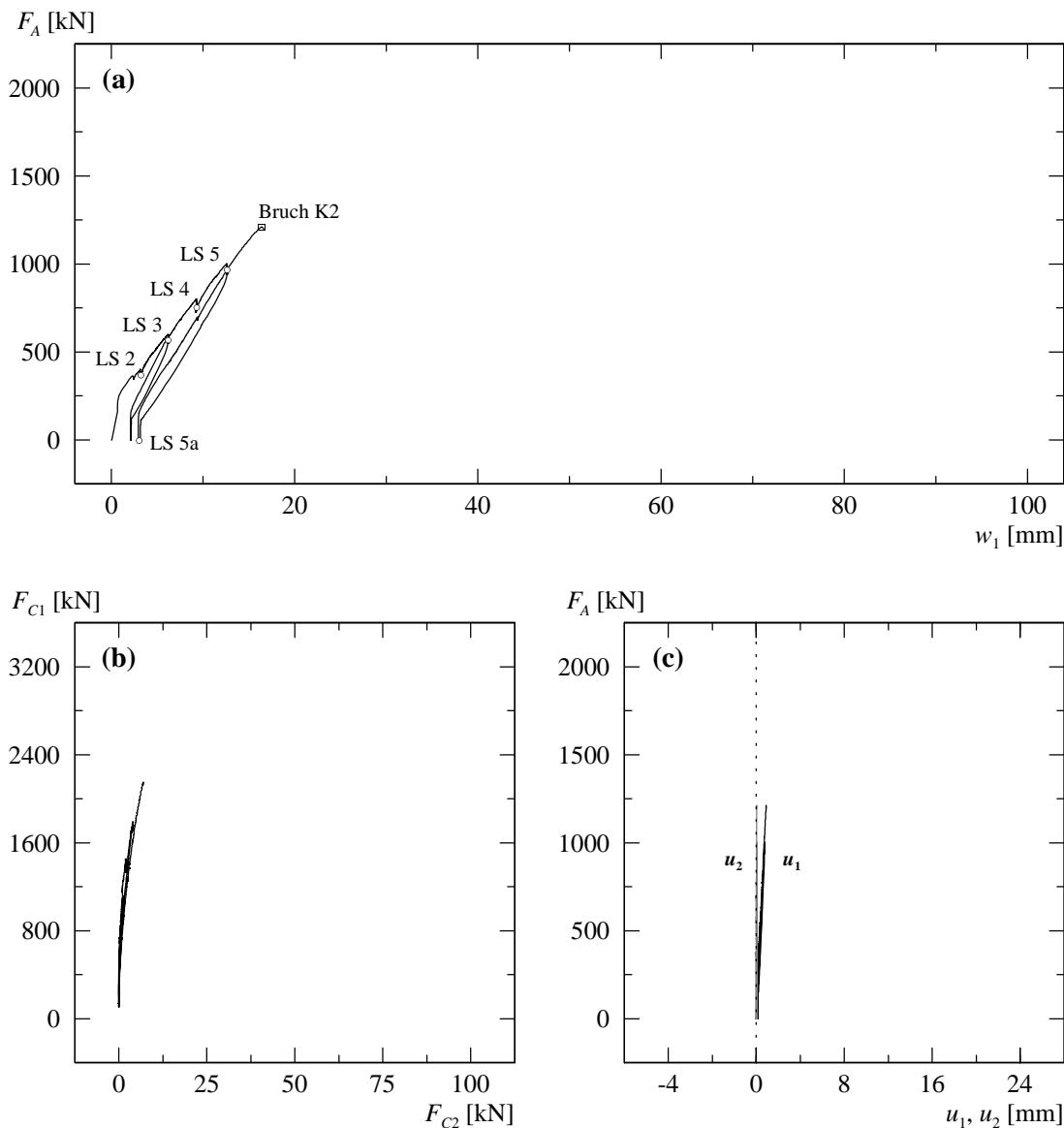


Bild 5.45: B3V1 – (a) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K2; (b) berechnete Lagerreaktionen beim Auflager C; (c) Verformungen der Zugzone über Auflager C.

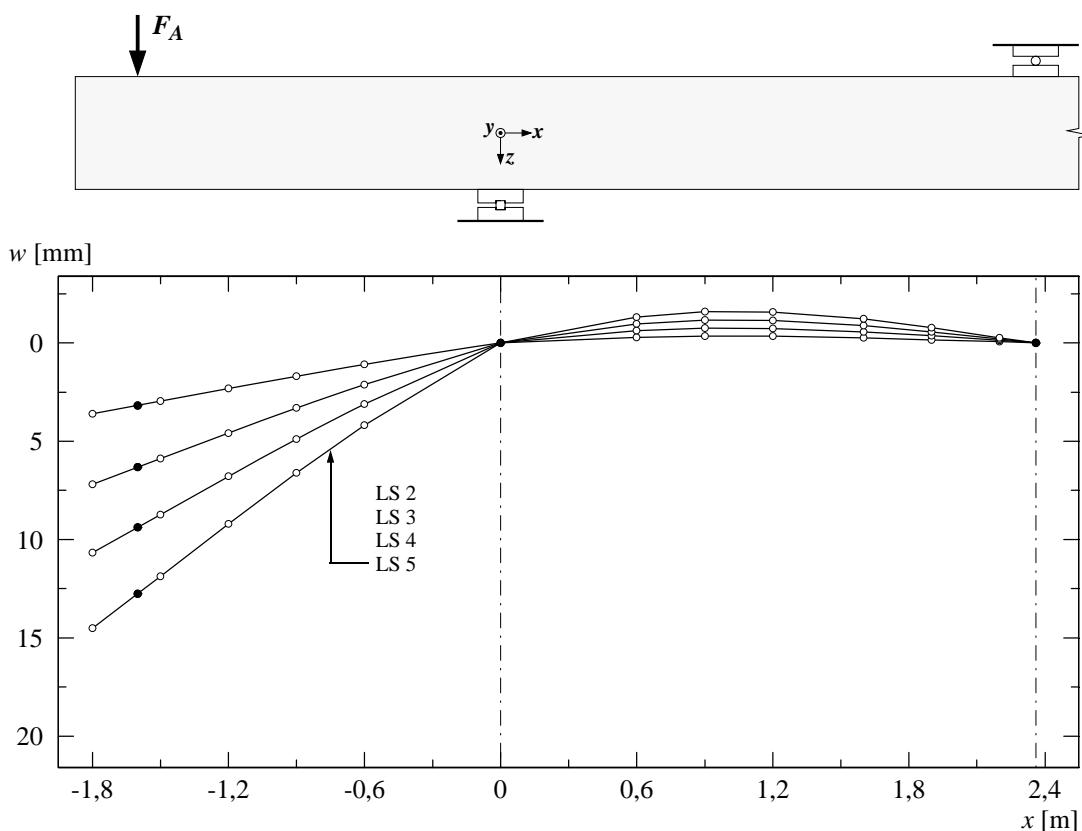
gemessen, während sich die übrigen Risse im Kragarm und Mittelfeld auf maximal 0,15 mm öffneten. Im Kragarm entstanden auf der Vorderseite zwei und auf der Hinterseite vier neue Risse, während sich die bereits vorhandenen Risse fortplanzten. Die Risse verliefen in den oberen Bereichen des Kragarms und Mittelfelds vertikal, setzten sich aber im unteren Bereich mit einer leichten Neigung gegen das feste Auflager fort. Im unteren Bereich wiesen die schrägen Risse Neigungen von 50 bis 75° gegenüber der x -Achse auf, während die Risse beim festen Lager ungefähr vertikal verliefen. Die Risse erstreckten sich über die oberen 60 bis 70 % der Versuchskörperhöhe. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe (≈ 50 mm unterhalb der Oberkante) wurden im Bereich des festen Lagers Rissbreiten von 0,15 bis 0,25 mm gemessen, während im Kragarm die Rissbreiten bei maximal 0,1 mm lagen. Auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) betrugen sie beim festen Lager maximal 0,1 mm und im Kragarm maximal 0,05 mm.

Die letzte Laststufe LS 5 wurde bei einer Kraft von $F_A \approx 1000$ kN durchgeführt. Gegenüber der Laststufe LS 4 hatte sich das Rissbild kaum verändert. Neben der Bildung vereinzelter Verästelungsrisse und in x -Richtung verlaufender Verbundrisse über dem festen Lager sowie von je einem neuen Riss in den äusseren Bereichen des Kragarms und Mittelfelds wurde auf der Ober-

Laststufe	Oberseite			Vorderseite – Kragarm		Vorderseite – Festes Lager	
	Kragarm w_{cr} [mm]	Festes Lager w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 2	0,05	0,05	0,05	HR...0,05	–	0,05...0,10	HR
LS 3	0,05...0,10	0,10...0,15	0,05...0,10	0,05...0,10	HR	0,10...0,15	HR...0,05
LS 4	0,05...0,15	0,10...0,20	0,05...0,15	0,05...0,10	HR...0,05	0,15...0,25	0,05...0,10
LS 5	0,05...0,15	0,10...0,30	0,10...0,20	0,05...0,15	HR...0,05	0,15...0,30	0,05...0,15

Tabelle 5.11: B3V1 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

seite eine Vergrösserung der Rissbreiten festgestellt. Die Rissbreiten betragen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 200 mm im Kragarm und Mittelfeld 0,05 bis 0,2 mm, über dem festen Lager 0,1 bis 0,3 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite wurde die Verlängerung der bereits vorhandenen Risse beobachtet. Dabei erstreckten sich die Risse über die oberen 65 bis 70 % der Versuchskörperhöhe. Die schräg verlaufenden Risse im Kragarm setzten sich nun im unteren Bereich flacher fort, während sich die Risse im Mittelfeld bei ungefähr gleichbleibender Rissneigung verlängerten. Die Neigung der Risse betrug im unteren Bereich des Kragarms ungefähr 45 bis 55° gegenüber der x -Achse, wobei auf der Vorderseite ein Riss im unteren Bereich stark abdrehte und sich dann mit einer sehr flachen Neigung gegen das feste Lager fortpflanzte. Im Mittelfeld konnte auf der Hinterseite nur eine geringfügige Verlängerung der ungefähr vertikal verlaufenden Risse beobachtet werden, während auf der Vorderseite bei vereinzelten Rissen im untersten Bereich eine deutliche Abflachung der Rissneigung feststellbar war. Auf der Höhe der obersten Deformationsreihe lagen die Rissbreiten im Bereich des festen Lagers zwischen 0,15 und 0,3 mm und im Kragarm zwischen 0,05 und 0,15 mm. Auf halber Versuchskörperhöhe wurden über dem festen Lager noch Rissbreiten von 0,05 bis 0,15 mm und im Kragarm solche von maximal 0,05 mm gemessen.

**Bild 5.46:** B3V1 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

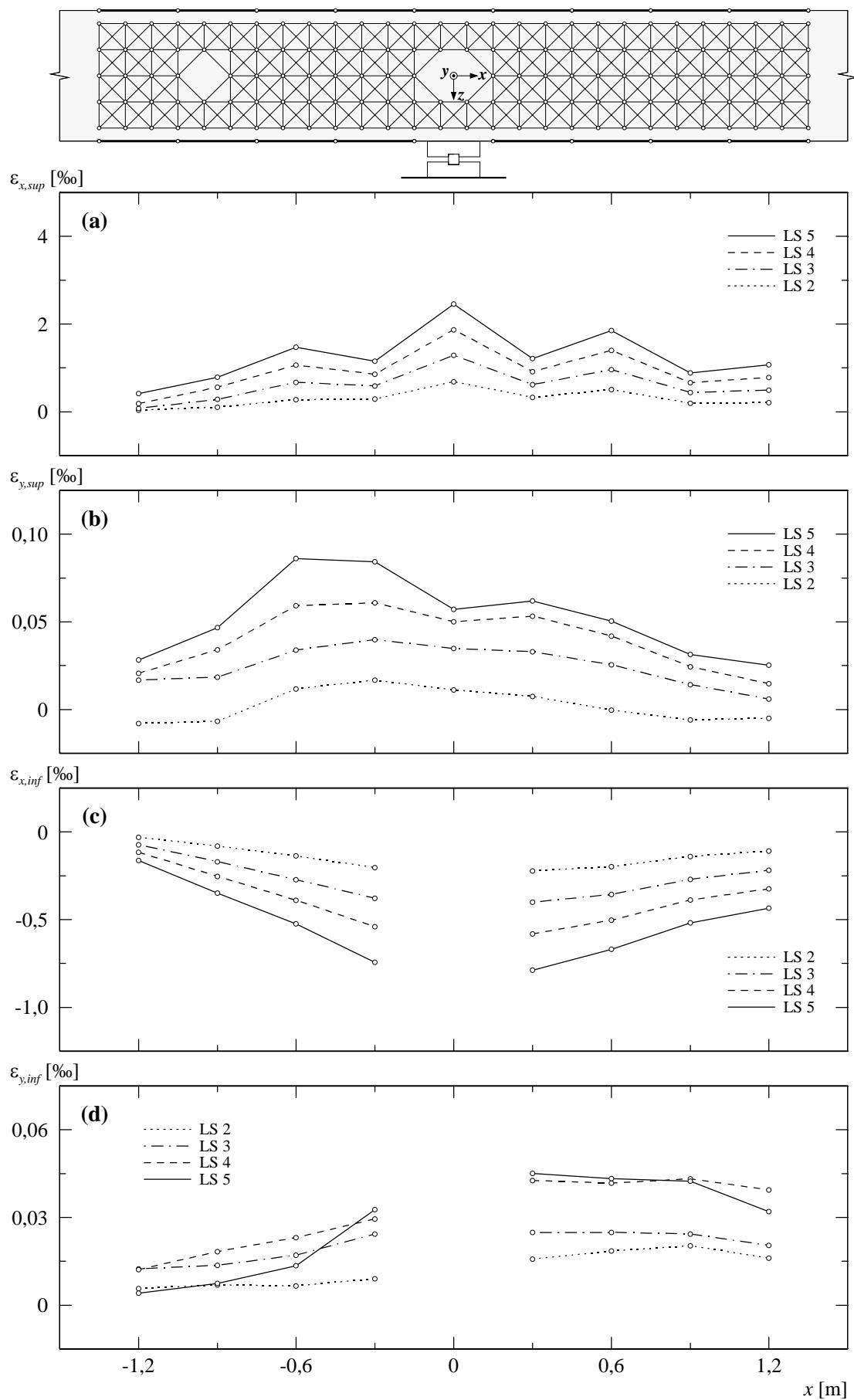


Bild 5.47: B3V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben; (c) mittlere Längsdehnungen unten; (d) mittlere Querdehnungen unten.

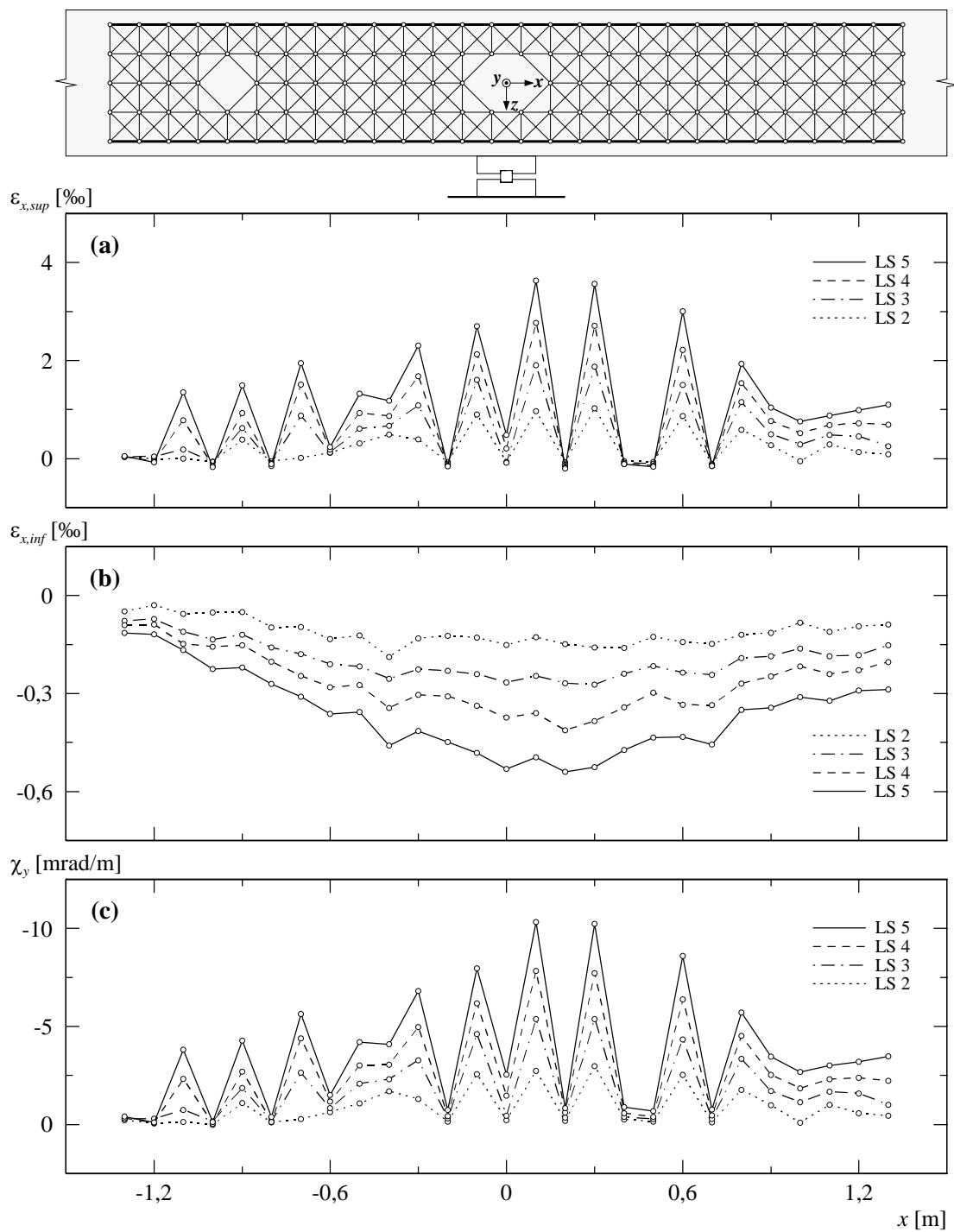


Bild 5.48: B3V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

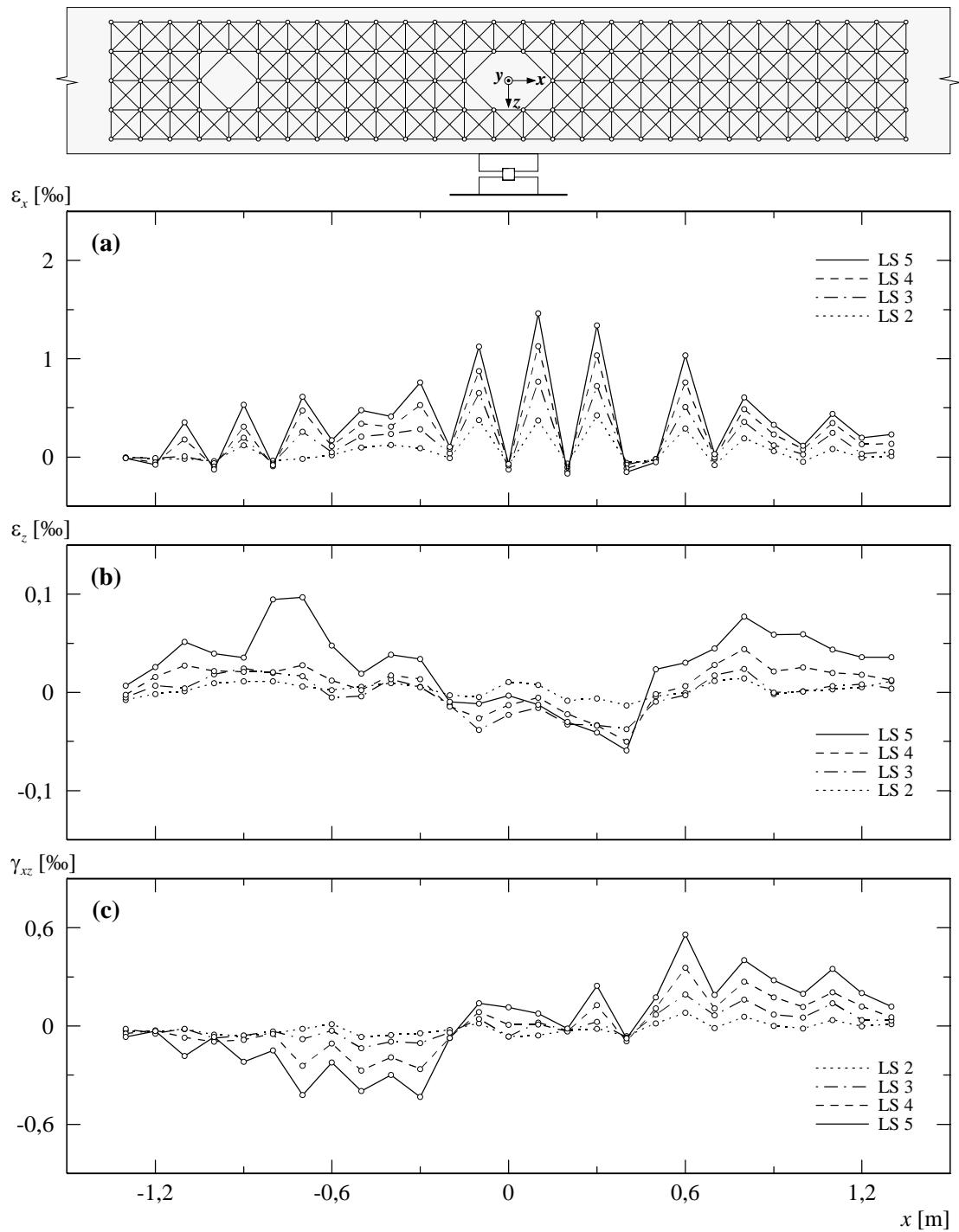
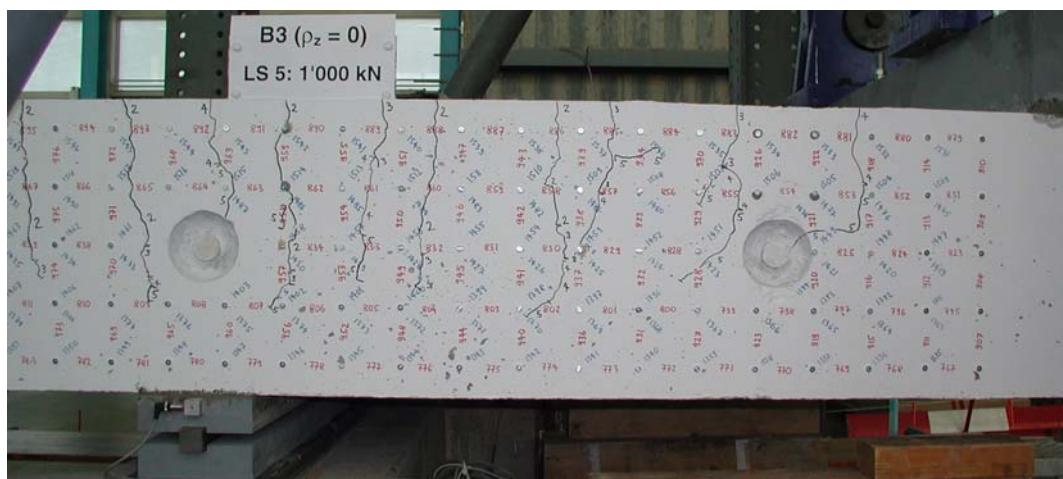


Bild 5.49: B3V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

(a)



(b)



(c)

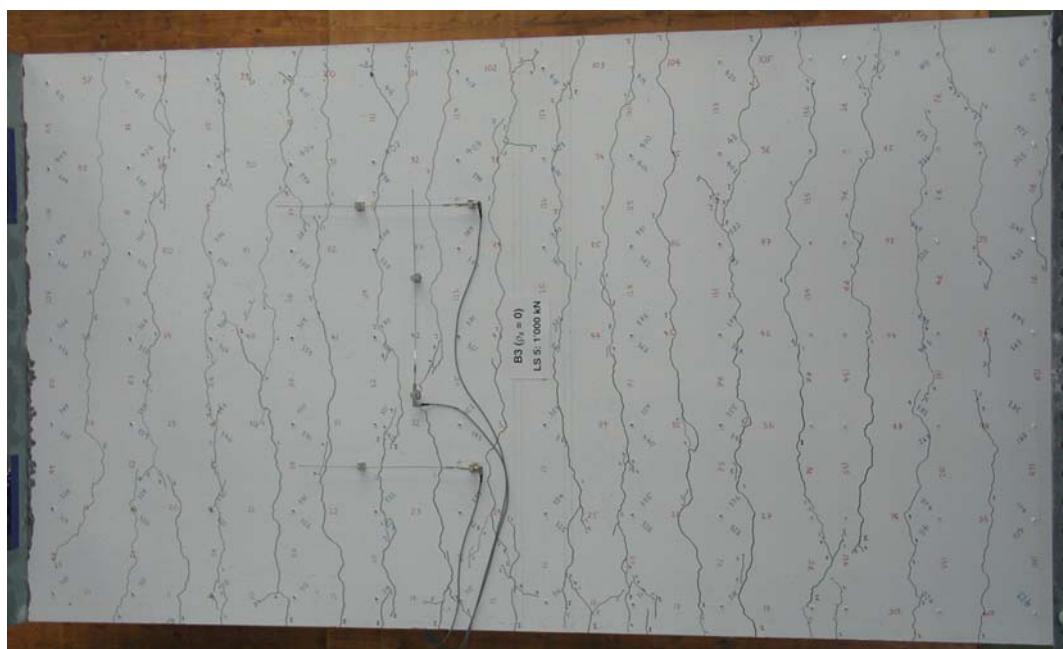
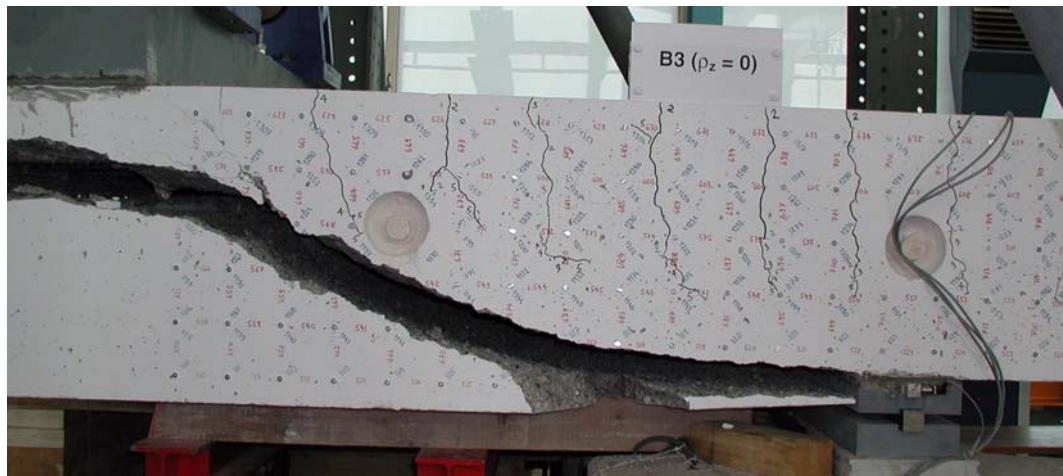
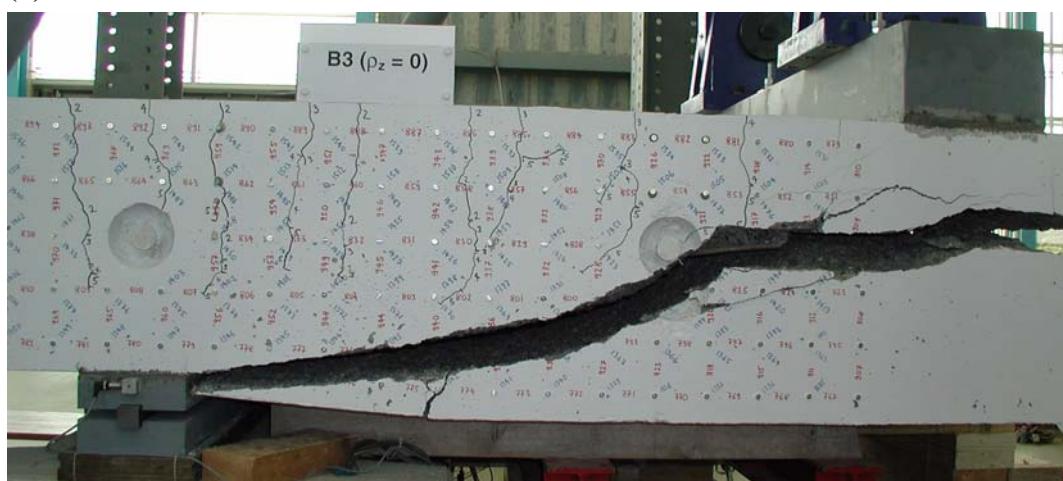


Bild 5.50: B3V1 – Rissbild bei Laststufe LS 5: (a) Vorderseite Kragarm; (b) Hinterseite Kragarm; (c) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.

(a)



(b)



(c)



Bild 5.51: B3V1 – Schubbruch im Kragarm K2: (a) Vorderseite; (b) Hinterseite; (c) Ansicht Stirn- und Vorderseite.

Im weiteren Versuchsfortschritt erfolgte bei einer Kraft von $F_A = 1211 \text{ kN}$ ein spröder Schubbruch des Kragarms. Die dazugehörige Durchbiegung betrug $w_1 = 16,4 \text{ mm}$ beim Kragarm K2. Bis zum Erreichen der Bruchlast waren keine Anzeichen feststellbar, die auf ein baldiges Versagen hinwiesen. Erst zwei Sekunden vor dem Bruch konnte ein Knistern wahrgenommen und die Bildung der s-förmig gekrümmten Bruchfläche beobachtet werden. Unmittelbar nach der Entstehung setzte ein unkontrolliertes Risswachstum ein. Der eigentliche Bruchprozess erfolgte schlagartig, wobei der untere Betonkeil vollständig abgetrennt wurde. Der sich bis zur Krafteinleitung erstreckende Trennriss entlang der Biegebewehrung entstand unmittelbar beim Bruch, während sich die leicht s-förmig gekrümmte Bruchfläche bereits zwei Sekunden vor dem Versagen des Kragarms bildete. Die Steifigkeit der Versuchsanlage genügte nicht, um ein schlagartiges Abtrennen des unteren Betonkeils zu verhindern.

Nach Versuchsende wurde der untere Betonkeil entfernt. Die abschliessende Untersuchung zeigte eine rauhe Beschaffenheit der Bruchfläche und einen gleichmässigen Oberflächenverlauf über die Versuchskörperbreite. Der mittlere, steil verlaufende Teil wies eine Neigung von ungefähr 30° gegenüber der x -Achse auf. Im unteren Teil verlief die Bruchfläche über eine Länge von etwa 450 mm bis zum Auflager sehr flach, wobei die Dicke der Abplatzungen in der Biegendruckzone beim Auflagerbereich noch ungefähr 20 mm betrug.

5.4.2 Versuch B3V2

Mit dem Versuch B3V2 wurde der Kragarm K1 ($\rho_z = 0,308\%$) geprüft. Dabei betrug der Abstand zwischen dem festen und beweglichen Lager 2,36 m (Abstand b). Am ersten Versuchstag wurden die beiden Nullmessungen durchgeführt. Die Laststufen LS 2 bis LS 4 folgten am zweiten, die Laststufen LS 5 und LS 6 am dritten, die Laststufen LS 7 und LS 8 am vierten, die Laststufe LS 9 am fünften und die Laststufe LS 10 am sechsten Versuchstag. Am siebten Versuchstag wurde der Versuchskörper erneut belastet und der Grundversuch abgeschlossen. Über Nacht und über das Wochenende zwischen den Laststufen LS 8 und LS 9 wurde der Versuchsträger jeweils entlastet, wobei die erste Belastung am zweiten Versuchstag erfolgte.

Bei einer Kraft von $F_A \approx 400$ kN wurde die erste Laststufe LS 2 durchgeführt. Der gerissene Bereich erstreckte sich über die inneren 70 % des Kragarms und das gesamte Mittelfeld, und die Risse wiesen mittlere Rissabstände von 200 bis 250 mm auf. Im Kragarm und Mittelfeld lagen die Rissbreiten auf der Oberseite bei maximal 0,05 mm, während über dem festen Auflager (Stelle C) Rissbreiten zwischen 0,05 und 0,1 mm gemessen wurden. Auf der Vorder- und Hinterseite des

Laststufe (LS)	F_A [kN]	F_B [kN]	F_{C1} [kN]	F_{C2} [kN]	$-V_{C1}$ [kN]	$-M_C$ [kNm]	w_1 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	$\alpha(F_A)$ [°]	Bemerkungen
1	0	-83	110	0	72	84	0	0	0	0	Nullmessung
2	400 363	188 163	780 719	0,3 0,1	472 435	725 666	3,3 3,4	0,23 0,24	0,03 0,03	0,05 0,02	Belastungsende Messende
3	602 558	326 296	1121 1047	0,8 0,7	674 630	1050 979	6,2 6,2	0,41 0,40	0,05 0,03	0,08 0,07	Belastungsende Messende
4	804 752	464 428	1461 1374	1,7 1,4	876 825	1376 1292	9,2 9,2	0,59 0,58	0,05 0,05	0,12 0,11	Belastungsende Messende
Entlastung 4a	0 0	-83 -83	110 110	0 0	72 72	84 84	2,5 2,5	0,16 0,17	0,02 0,04	-0,03 -0,02	Entlastungsende Belastungsbeginn
5	1005 922	602 545	1800 1660	3,1 2,5	1078 995	1702 1568	12,4 12,4	0,79 0,80	0,08 0,10	0,18 0,15	Belastungsende Messende
6	1201 1124	737 684	2131 2002	4,5 4,2	1273 1197	2020 1896	15,9 16,0	1,01 0,98	0,12 0,10	0,22 0,21	Belastungsende Messende
Entlastung 6a	0 0	-83 -83	110 110	0 0	72 72	84 84	3,3 3,2	0,19 0,20	0,05 0,06	-0,04 -0,02	Entlastungsende Belastungsbeginn
7	1403 1303	877 807	2473 2303	7,0 4,9	1475 1376	2350 2185	20,1 20,2	1,23 1,27	0,16 0,21	0,29 0,22	Belastungsende Messende
8	1600 1499	1012 943	2805 2635	8,1 8,2	1672 1571	2669 2508	24,5 24,6	1,56 1,54	0,22 0,20	0,29 0,31	Belastungsende Messende
Entlastung 8a	0 0	-83 -83	110 110	0 0	72 72	84 84	5,1 4,7	0,33 0,29	0,13 0,10	-0,09 0,04	Entlastungsende Belastungsbeginn
9	1802 1666	1160 1063	3155 2922	16,7 13,5	1874 1738	3019 2791	30,3 30,7	1,96 2,07	0,18 0,23	0,53 0,47	Belastungsende Messende
Entlastung 9a	0 0	-83 -83	110 110	0 0	72 72	84 84	6,7 6,1	0,53 0,50	0,10 0,09	0,04 0,07	Entlastungsende Belastungsbeginn
HL	1912	1244	3350	24,1	1984	3218	46,1	5,39	0,27	0,72	Höchstlast
10	1866 1647	1215 1062	3274 2902	25,6 21,9	1938 1719	3149 2787	50,1 49,9	6,02 6,03	0,27 0,27	0,79 0,76	Belastungsende Messende
Entlastung 10a	0 0	-83 -83	110 110	0 0	72 72	84 84	23,1 22,3	4,29 4,22	0,20 0,15	0,18 0,27	Entlastungsende Belastungsbeginn
Entlastung	888 0	596 -83	1674 110	60,2 0	958 72	1687 84	268,6 238,9	—	0,17 0,21	3,89 3,39	Entlastungsbeginn Versuchsende
Versuchsumbau											
Folge- versuch	0 435	-86 244	110 874	0 27,6	72 506	84 864	238,9 458,5	—	—	0 3,64	Versuchsbeginn Entlastungsbeginn

Tabelle 5.12: B3V2 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 5.3).

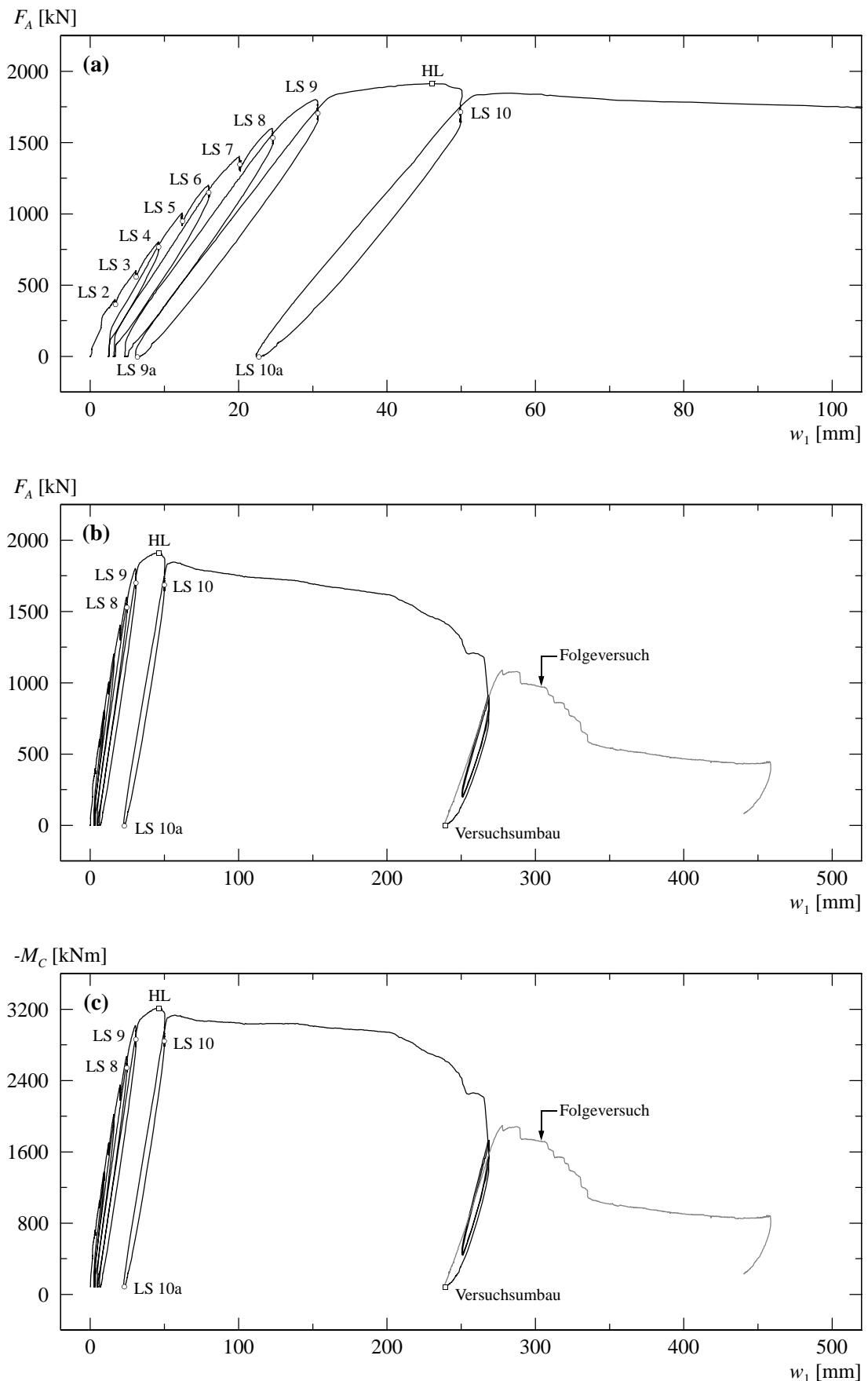


Bild 5.52: B3V2 – (a) und (b) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K1; (c) berechnetes Momenten-Durchbiegungsdiagramm.

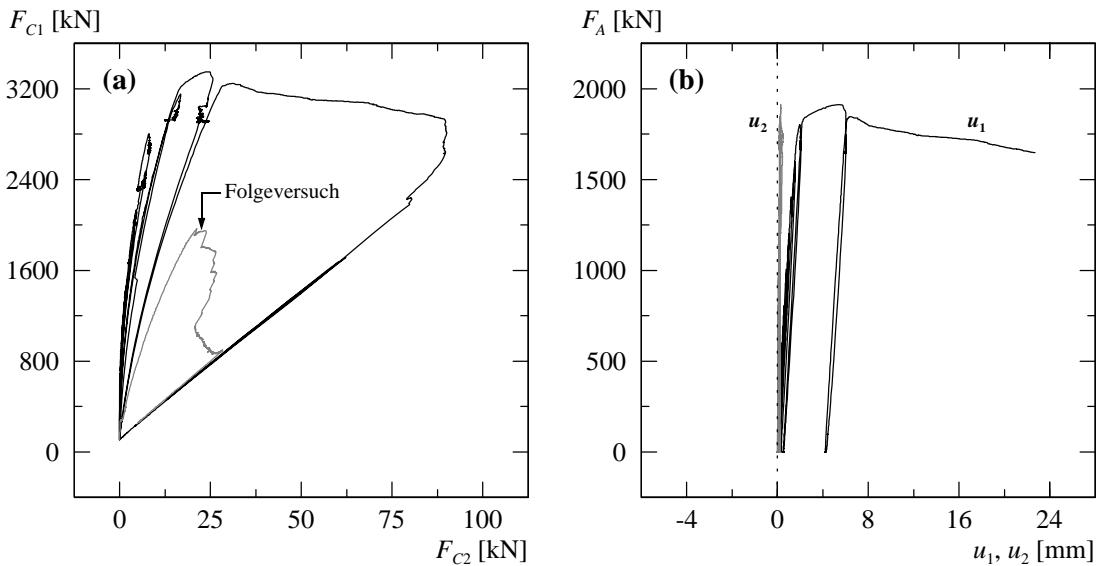


Bild 5.53: B3V2 – (a) Berechnete Lagerreaktionen beim Auflager C; (b) Verformungen der Zugzone über Auflager C.

Versuchskörper hatten sich ungefähr vertikal verlaufende Risse gebildet. In der ersten Hälfte des Kragarms und des Mittelfelds sowie im Bereich des festen Lagers ($x \approx -450 \div 450$ mm) reichten diese über die oberen 50 bis 60 % der Versuchskörperhöhe. Für die folgenden Laststufen wurde bis zum Erreichen der Höchstlast ein Belastungsintervall von $\Delta F_A \approx 200$ kN gewählt.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 5 ($F_A \approx 1000$ kN) bildeten sich vorwiegend in den äusseren Bereichen des Kragarms sowie über dem festen Lager weitere Risse. Neben der Bildung vereinzelter Verästelungsrisse und in x -Richtung verlaufender Verbundrisse über dem festen Lager sowie von zwei neuen Rissen beim Kragarmende wurde auf der Oberseite eine Vergrösserung der Rissbreiten festgestellt. Die Rissbreiten betragen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 200 bis 250 mm im Kragarm und Mittelfeld 0,1 bis 0,2 mm, über dem festen Lager 0,2 bis 0,35 mm. Im Kragarm entstanden auf der Vorderseite zwei neue Risse und auf der Hinterseite ein neuer Riss, während sich die bereits vorhandenen Risse fortpflanzten. Die Risse verliefen in den oberen Bereichen des Kragarms und Mittelfelds vertikal, setzten sich aber im unteren Bereich mit einer leichten Neigung gegen das feste Auflager fort. Im unteren Bereich wiesen die schrägen Risse im Kragarm Neigungen von 35 bis 45° und im Mittelfeld solche von 60 bis 75° gegenüber der x -Achse auf, während die Risse beim festen Lager ungefähr vertikal verliefen. Die Risse erstreckten sich über die oberen 65 bis 70 % der Versuchskörperhöhe. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe (≈ 50 mm unterhalb der Oberkante) wurden im Bereich des festen Lagers Rissbreiten von 0,1 bis 0,35 mm gemessen, während im Kragarm die Rissbreiten zwischen 0,05 und 0,2 mm lagen. Auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) betrugen sie sowohl beim festen Lager als auch im Kragarm maximal 0,05 mm.

Bis zur Laststufe LS 9 ($F_A \approx 1800$ kN) entstanden auf der Oberseite mehrere in x -Richtung verlaufende Verbundrisse. Neben der Vergrösserung der Rissbreiten wurde bei den bestehenden Rissen eine weitere Verästelung beobachtet. In der ersten Hälfte des Kragarms und Mittelfelds sowie im Bereich des festen Lagers wiesen die Risse einen mittleren Rissabstand von 100 bis 150 mm auf, während in den äusseren Bereichen des Kragarms und Mittelfelds die Rissabstände bei ungefähr 200 mm lagen. Die Rissbreiten betragen im Kragarm 0,15 bis 0,4 mm, im Mittelfeld 0,1 bis 0,6 mm und über dem festen Lager 0,2 bis 0,7 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite konnte die Verlängerung sowie eine ausgedehnte Verästelung der bestehenden Risse festgestellt werden. Dabei erstreckten sich die Risse im Kragarm über die oberen 80 % und im Mittelfeld über die oberen 75 % der Versuchskörperhöhe. Bei den anfänglich relativ steil verlaufenden Rissen im Bereich des Kragarms wurde im unteren Bereich eine deutliche Abflachung der Risse beobachtet.

Laststufe	Oberseite			Vorderseite – Kragarm		Vorderseite – Festes Lager	
	Kragarm w_{cr} [mm]	Festes Lager w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 2	0,05	0,05...0,10	0,05	HR...0,05	–	0,05...0,10	HR
LS 3	0,05...0,10	0,10...0,15	0,05...0,10	0,05...0,10	HR	0,05...0,15	HR...0,05
LS 4	0,05...0,15	0,15...0,25	0,10...0,15	0,05...0,15	HR...0,05	0,10...0,20	0,05...0,10
LS 5	0,10...0,20	0,20...0,35	0,10...0,20	0,05...0,20	HR...0,15	0,10...0,35	0,05...0,15
LS 6	0,15...0,25	0,20...0,40	0,10...0,30	0,05...0,25	0,05...0,20	0,15...0,40	0,05...0,15
LS 7	0,15...0,35	0,20...0,45	0,10...0,35	0,05...0,35	0,05...0,25	0,15...0,50	0,05...0,15
LS 8	0,15...0,40	0,20...0,60	0,10...0,40	0,10...0,35	0,05...0,30	0,15...0,60	0,05...0,15
LS 9	0,15...0,40	0,20...0,70	0,10...0,60	0,10...0,40	0,05...0,35	0,15...0,70	0,05...0,30
LS 10	0,15...0,35	0,20...2,50	0,10...0,60	0,10...0,40	0,05...0,35	0,15...2,50	0,05...0,55

Tabelle 5.13: B3V2 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

Auf halber Versuchskörperhöhe wurden Rissneigungen von ungefähr 35 bis 45° gegenüber der x -Achse gemessen, die sich im unteren Bereich schliesslich auf 10 bis 25° verringerten. Die Risse im Mittelfeld und in unmittelbarer Nähe des festen Lagers verliefen im oberen Bereich ungefähr vertikal, setzten sich dann aber im unteren Bereich mit einer leichten Neigung gegen das feste Lager fort, wobei mehrere Risse im untersten Bereich stark abdrehten und sich dann mit flachen Neigungen gegen das feste Lager fortpflanzten. Die Neigung der Risse lag auf halber Versuchskörperhöhe zwischen 40 und 75° gegenüber der x -Achse. Im untersten Bereich wiesen vereinzelte Risse noch Neigungen von 20 bis 45° auf. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe betragen die Rissbreiten im Bereich des festen Lagers $0,15$ bis maximal $0,7$ mm und im Kragarm $0,1$ bis $0,4$ mm. Auf halber Versuchskörperhöhe lagen die Rissbreiten über dem festen Lager zwischen $0,05$ und $0,3$ mm und im Kragarm zwischen $0,05$ und $0,35$ mm.

Ab einer Kraft von $F_A \approx 1850$ kN und einer dazugehörenden Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 32$ mm konnte der Fliessbeginn der Biegebewehrung festgestellt werden. Im weiteren Versuchsfortschritt, zwischen den Laststufen LS 9 und LS 10, wurde bei einer Durchbiegung von $w_1 = 46,1$ mm beim Kragarm K1 die Höchstlast erreicht. Die entsprechende Kraft betrug $F_A = 1912$ kN. Gleichzeitig bildeten sich auf der Mittelfeldseite die ersten Betonstauchungsrisse in der Biegendruckzone beim festen Lager.

Nach Erreichen der Höchstlast wurde bei einer Kraft von $F_A \approx 1900$ kN und einer Durchbiegung von $w_1 \approx 50,1$ mm die letzte Laststufe LS 10 durchgeführt. Auf der Mittelfeldseite beim festen Lager konnten an der Unterseite erste Abplatzungen von Betonplättchen festgestellt werden. Neben der Verlängerung und Verästelung der bestehenden Risse wurde bis zur Laststufe LS 10 keine grosse Veränderung des Rissbildes beobachtet. Dabei konzentrierte sich das Rissbreitenwachstum der bestehenden Risse vorwiegend auf die Bereiche beim festen Lager. Auf der Oberseite bildeten sich weitere in x -Richtung verlaufende Verbundrisse sowie vereinzelte Verästelungsrisse, wobei die Rissabstände zwischen 50 und 200 mm lagen. Beim festen Lager wurden zwei Risse mit einer Breite von 2 und $2,5$ mm gemessen. Die übrigen Risse über dem festen Lager wiesen Breiten von $0,2$ bis $1,4$ mm auf. Im Mittelfeld lagen die Rissbreiten zwischen $0,1$ und $0,6$ mm, während sich die Rissbreiten im Kragarm nur wenig vergrösserten und $0,15$ bis $0,35$ mm betrugen. Ausser der Ausdehnung der Betonstauchungsrisse in der Biegendruckzone und der Bildung vereinzelter Verästelungsrisse sowie geringfügiger Verlängerungen der bestehenden Risse wurde keine Veränderung des Rissbildes auf der Vorder- und Hinterseite festgestellt. Die schräg verlaufenden Risse setzten sich nun im untersten Bereich des Kragarms und Mittelfelds mit sehr flacher Neigung gegen das feste Lager fort, während sich die Risse über dem festen Lager bei ungefähr gleichbleibender Rissneigung verlängerten. Im Kragarm erstreckten sich die Risse über die oberen 80 bis 85% und im Mittelfeld über die oberen 75% der Versuchskörperhöhe. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe wiesen zwei Risse über dem festen Lager eine Rissbreite von $1,8$ und $2,5$ mm auf. Die übrigen Rissbreiten lagen im Bereich des festen Lagers zwischen

0,15 und 1,2 mm und im Kragarm zwischen 0,1 und 0,4 mm. Auf halber Versuchskörperhöhe wurden über dem festen Lager noch Rissbreiten von 0,05 bis 0,55 mm gemessen, während im Kragarm die Rissbreiten bei 0,05 bis 0,35 mm verharrten.

Der Versuchskörper wurde nach der Durchführung der Laststufe LS 10 entlastet. Im weiteren Versuchsfortschritt konnte mit einer Kraft von $F_A \approx 1850$ kN das alte Belastungsniveau bei der Wiederbelastung wieder knapp erreicht werden. Anschliessend wurde die Durchbiegung des Kragarms K1 vergrössert. Bei einer Durchbiegung von $w_1 \approx 60$ mm platzten auf der Mittelfeldseite beim festen Lager erste Teile des Überdeckungsbetons an der Unterseite ab, wobei sich mit zunehmender Kragarmdurchbiegung wiederholt grössere Teile des Überdeckungsbetons ablösten. Bis zu einer Durchbiegung von $w_1 \approx 205$ mm war ein gleichmässiger Kraftabfall beziehungsweise eine ungefähr konstante Biegemomentenbeanspruchung beim festen Auflager feststellbar. Die ersten grösseren Kraftabfälle erfolgten ab einer Durchbiegung von $w_1 \approx 205$ mm. Im weiteren Versuchsfortschritt konnte bei Kragarmdurchbiegungen von $w_1 \approx 255$ bis 280 mm das Zerreissen von drei Querkraftbewehrungsstäben akustisch wahrgenommen werden. Bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 268$ mm wurde der Grundversuch abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt noch ungefähr 46 % der Höchstlast. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden.

Nach Beendigung des Grundversuchs wurde der Versuchskörper begutachtet. An der Unterseite war der Überdeckungsbeton der Biegedruckzone in einem Bereich von ungefähr 350 mm rechts vom festen Lager (im Mittelfeld) abgeplatzt, wobei die Abplatzungen in unmittelbarer Auflagernähe, in einem Abstand von 100 mm vom rechten Lagerplattenrand ($x \approx 200$ mm), eine Dicke von ungefähr 100 mm aufwiesen. Die Oberfläche der abgeplatzten Bereiche zeigte neben dem Auflager im unteren, oberhalb der Betonüberdeckung liegenden Bereich ($z \approx 150 \div 170$ mm) leichte Spuren einer Zerstörung der Rissverzahnung. Weiter konnten in der ersten Reihe neben dem Auflager keine zerrissenen Querkraftbewehrungsstäbe entdeckt werden.

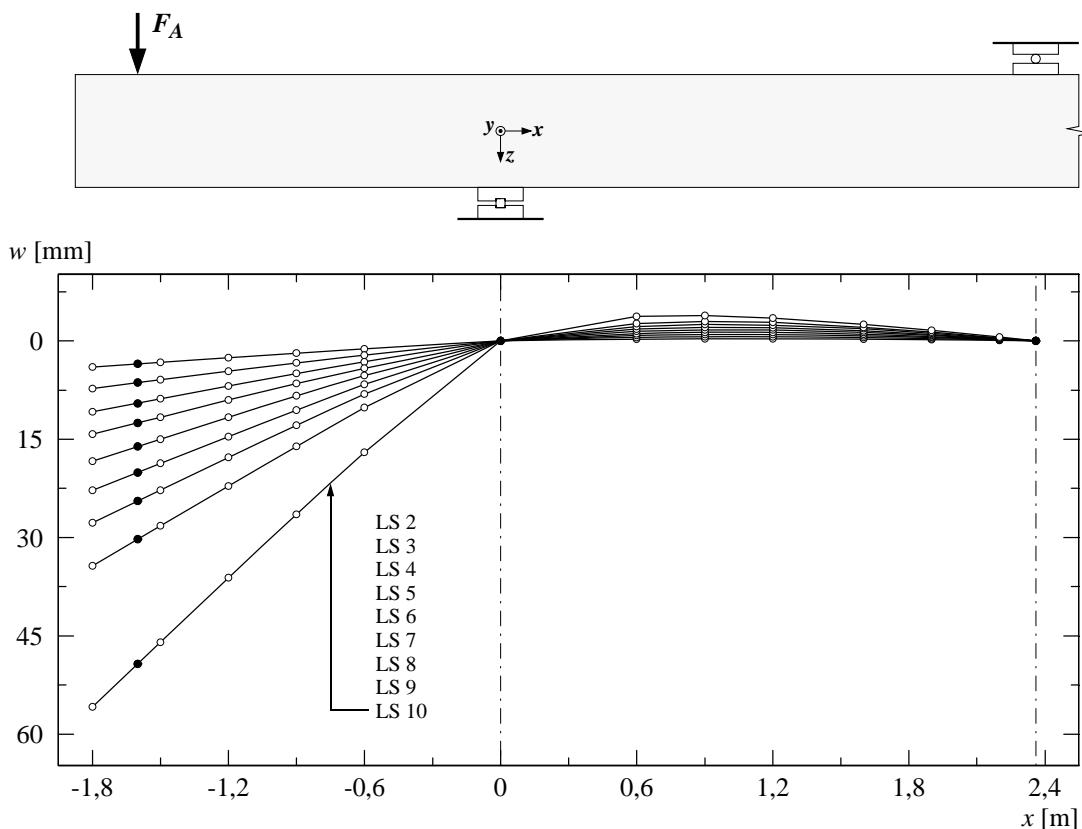


Bild 5.54: B3V2 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

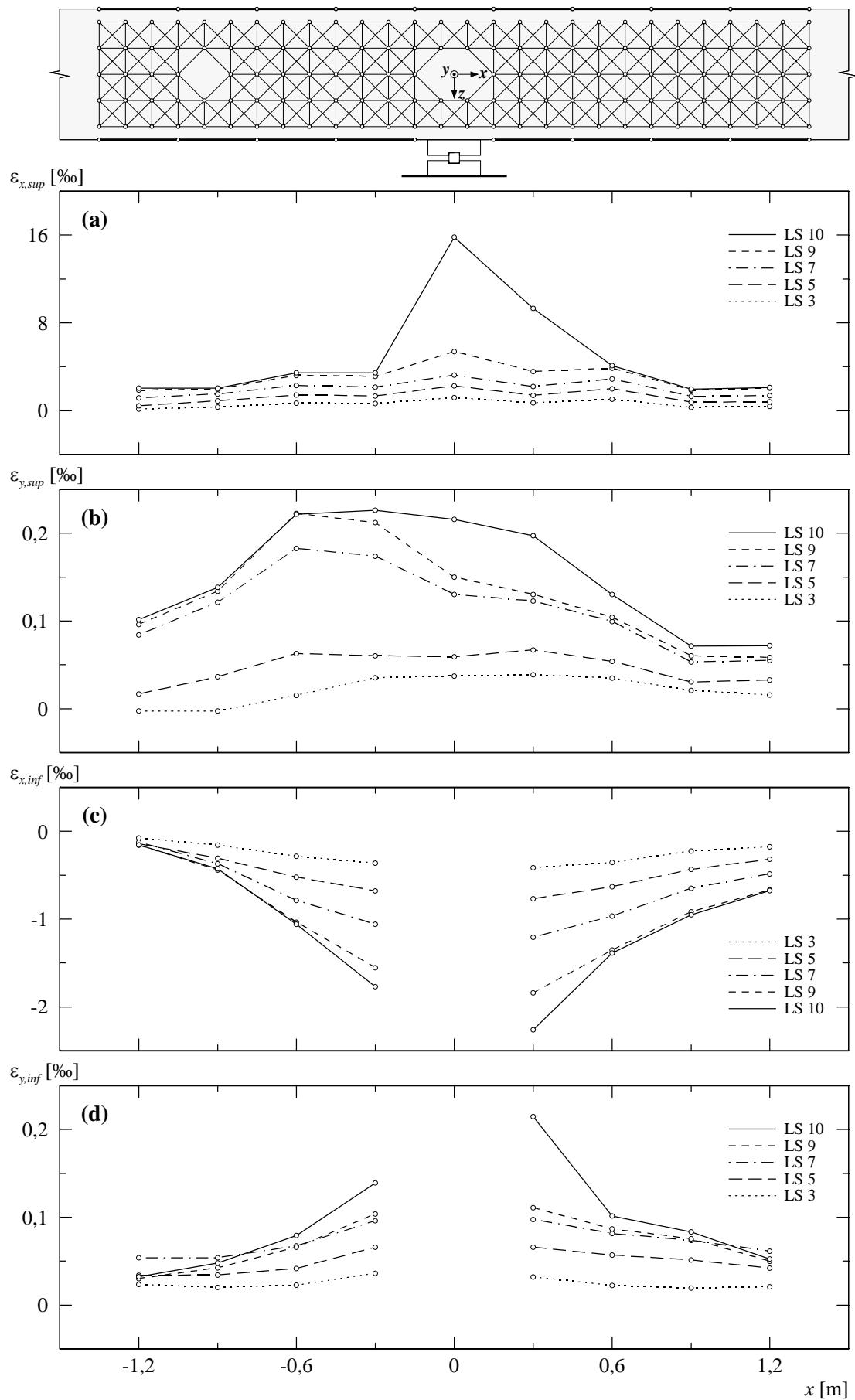


Bild 5.55: B3V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben; (c) mittlere Längsdehnungen unten; (d) mittlere Querdehnungen unten.

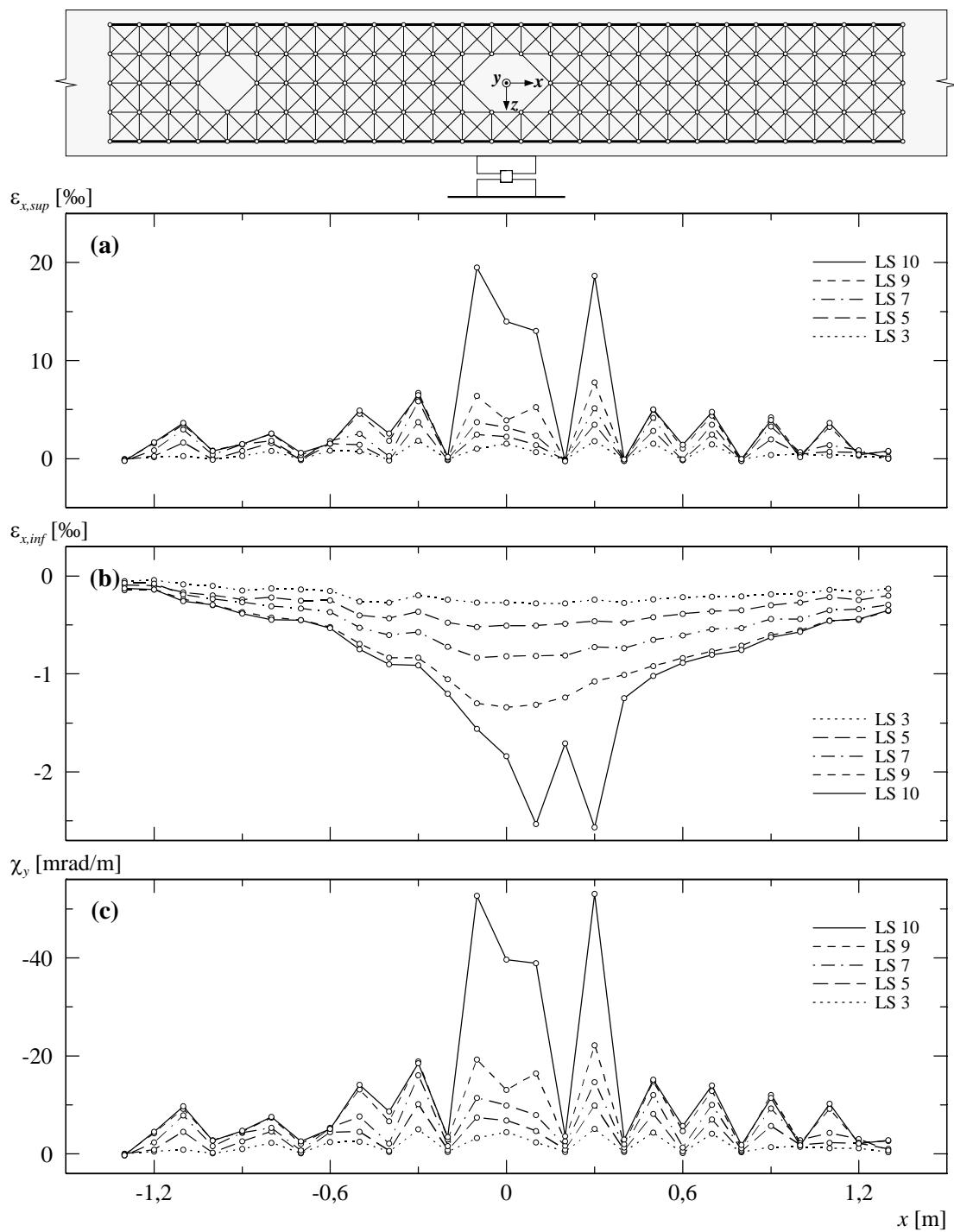


Bild 5.56: B3V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

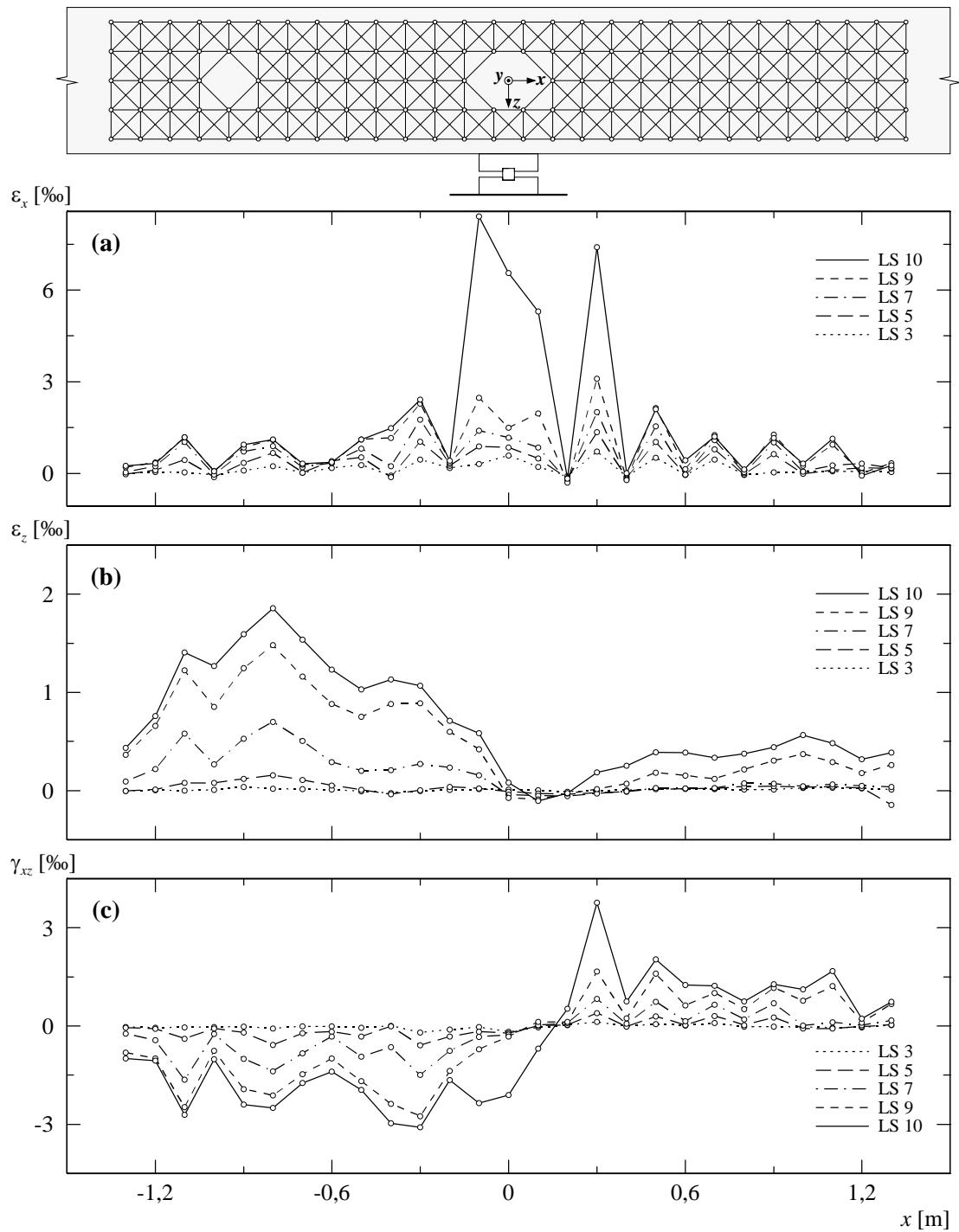
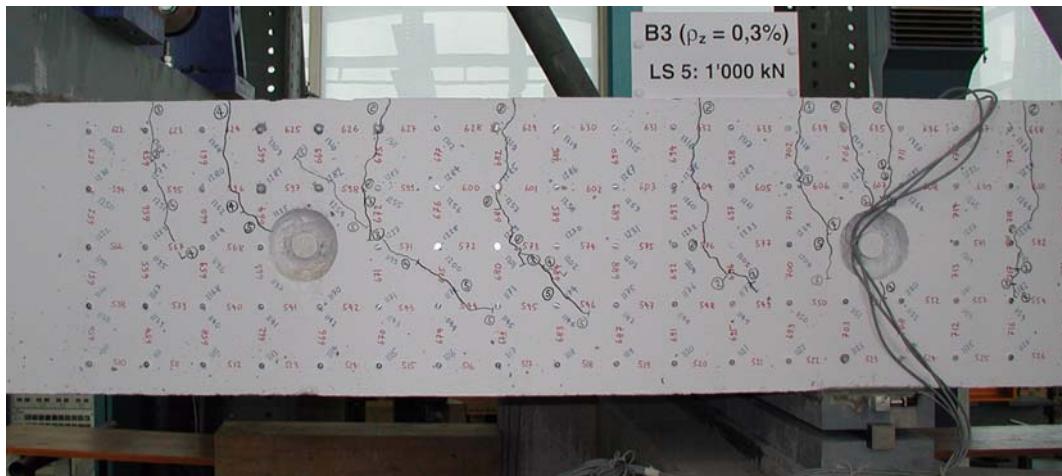


Bild 5.57: B3V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

(a)



(b)

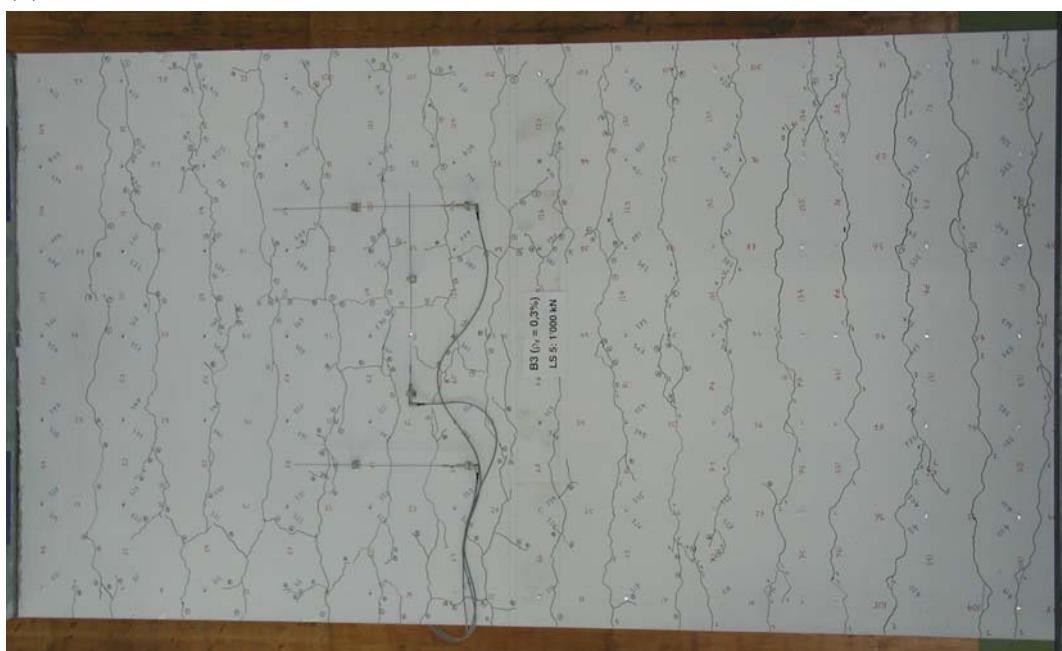


Bild 5.58: B3V2 – Rissbild bei Laststufe LS 5: (a) Vorderseite Kragarm; (b) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.

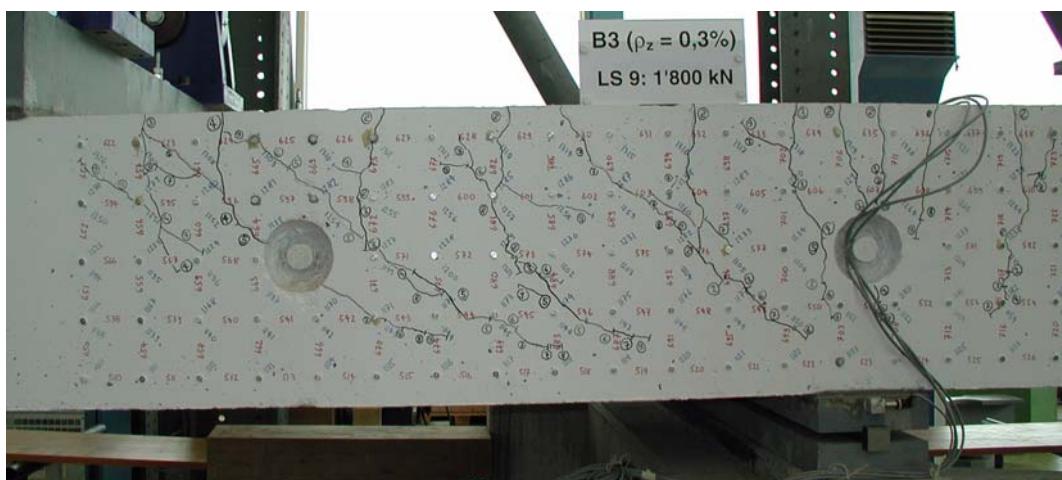
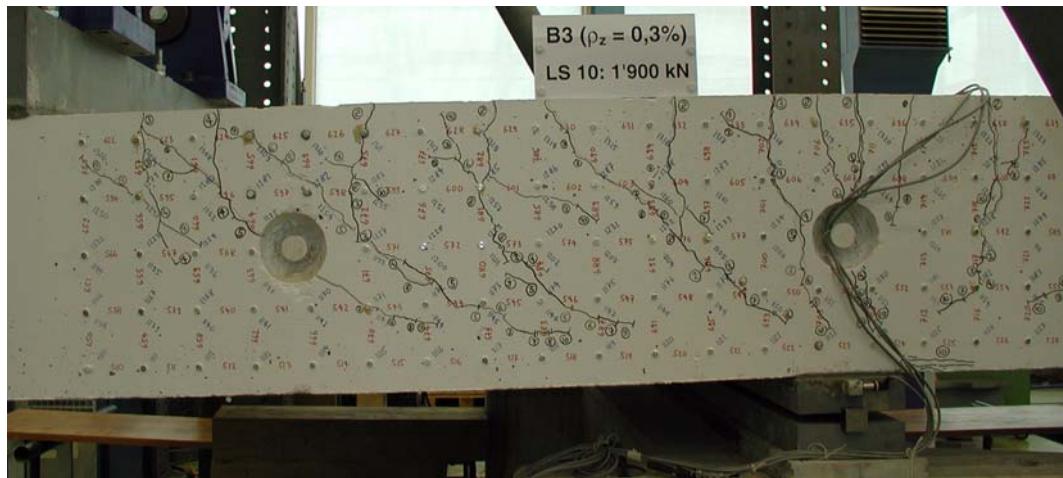
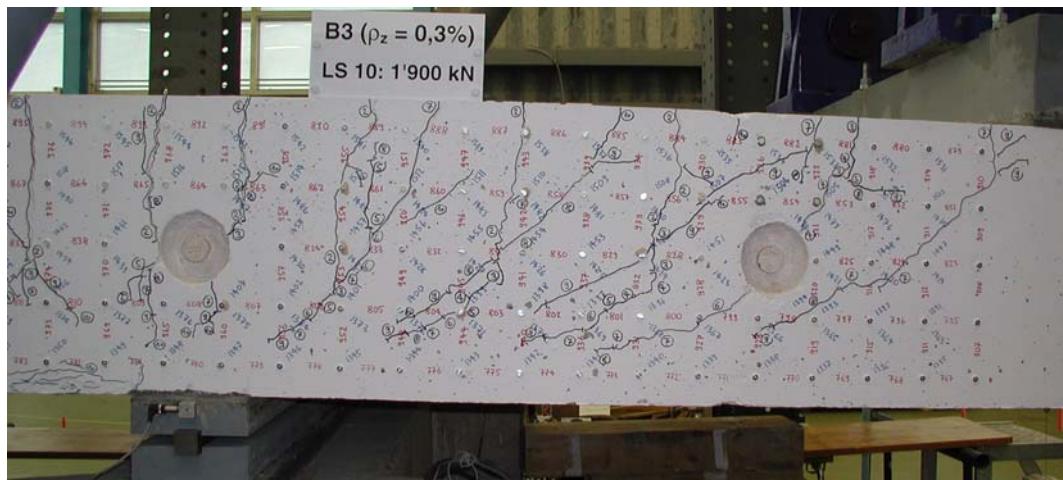


Bild 5.59: B3V2 – Rissbild bei Laststufe LS 9: Vorderseite Kragarm.

(a)



(b)



(c)

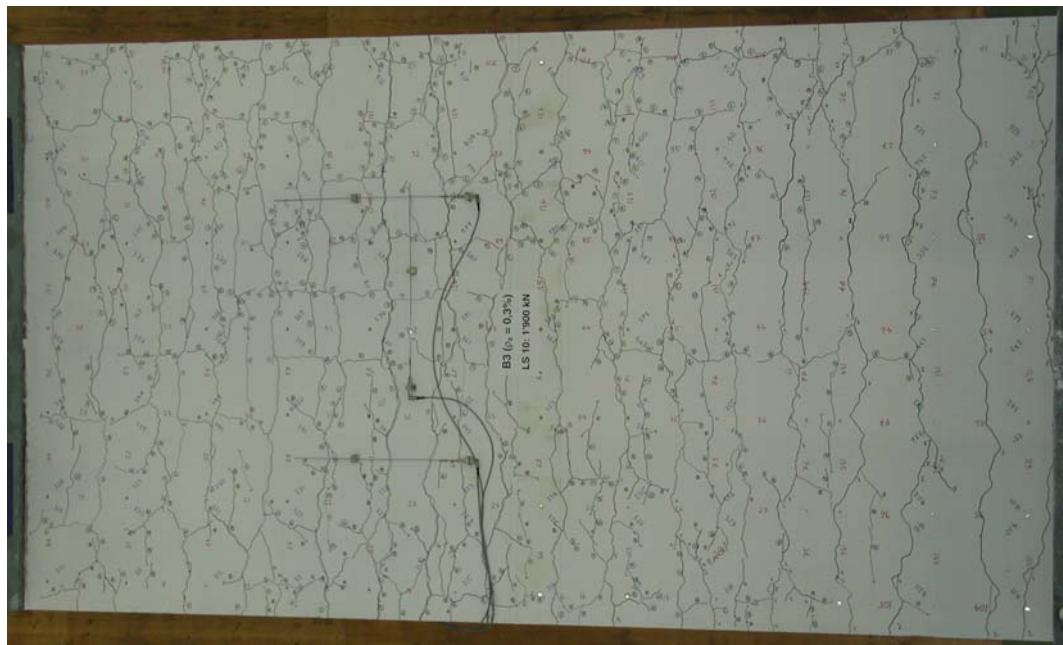


Bild 5.60: B3V2 – Rissbild bei Laststufe LS 10: (a) Vorderseite Kragarm; (b) Hinterseite Kragarm; (c) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.

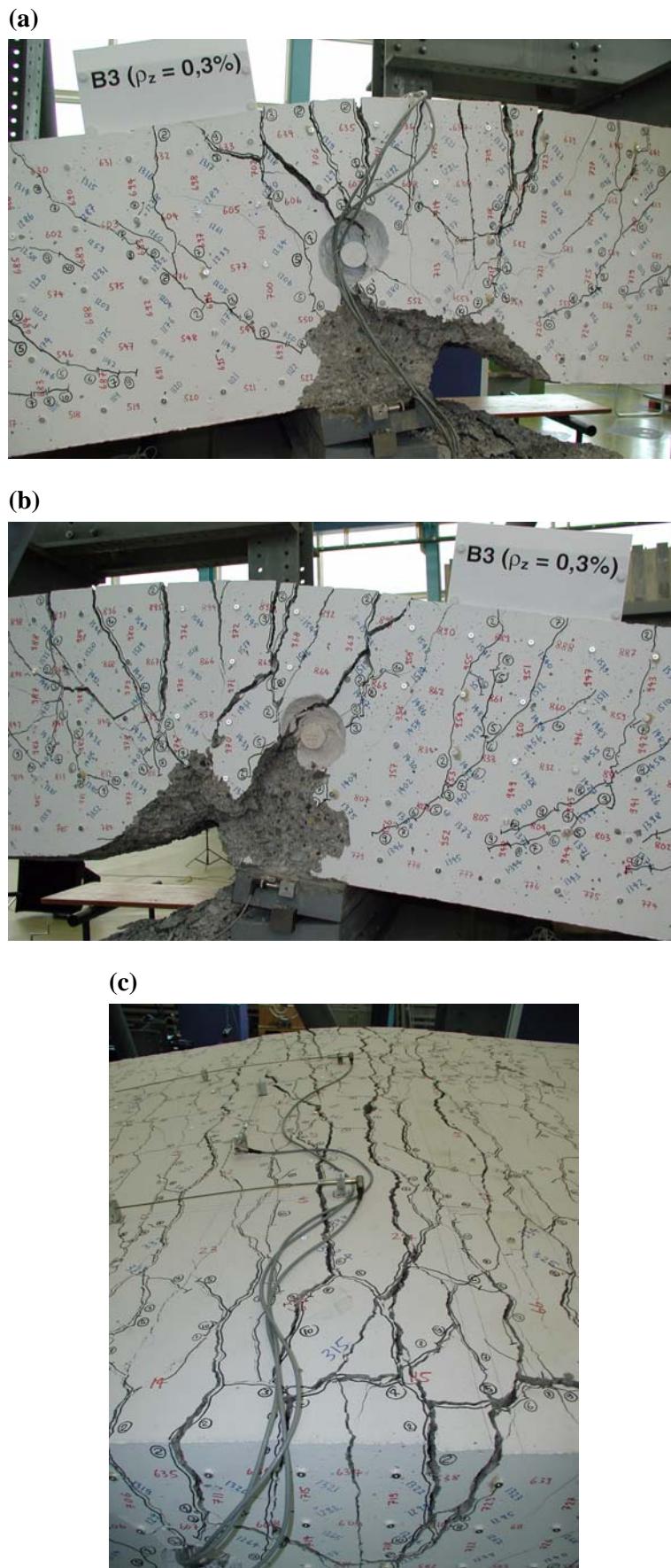


Bild 5.61: B3V2 – Bruchzone nach Ende des Grundversuchs: (a) Vorderseite beim festen Lager; (b) Hinterseite beim festen Lager; (c) Oberseite beim festen Lager.

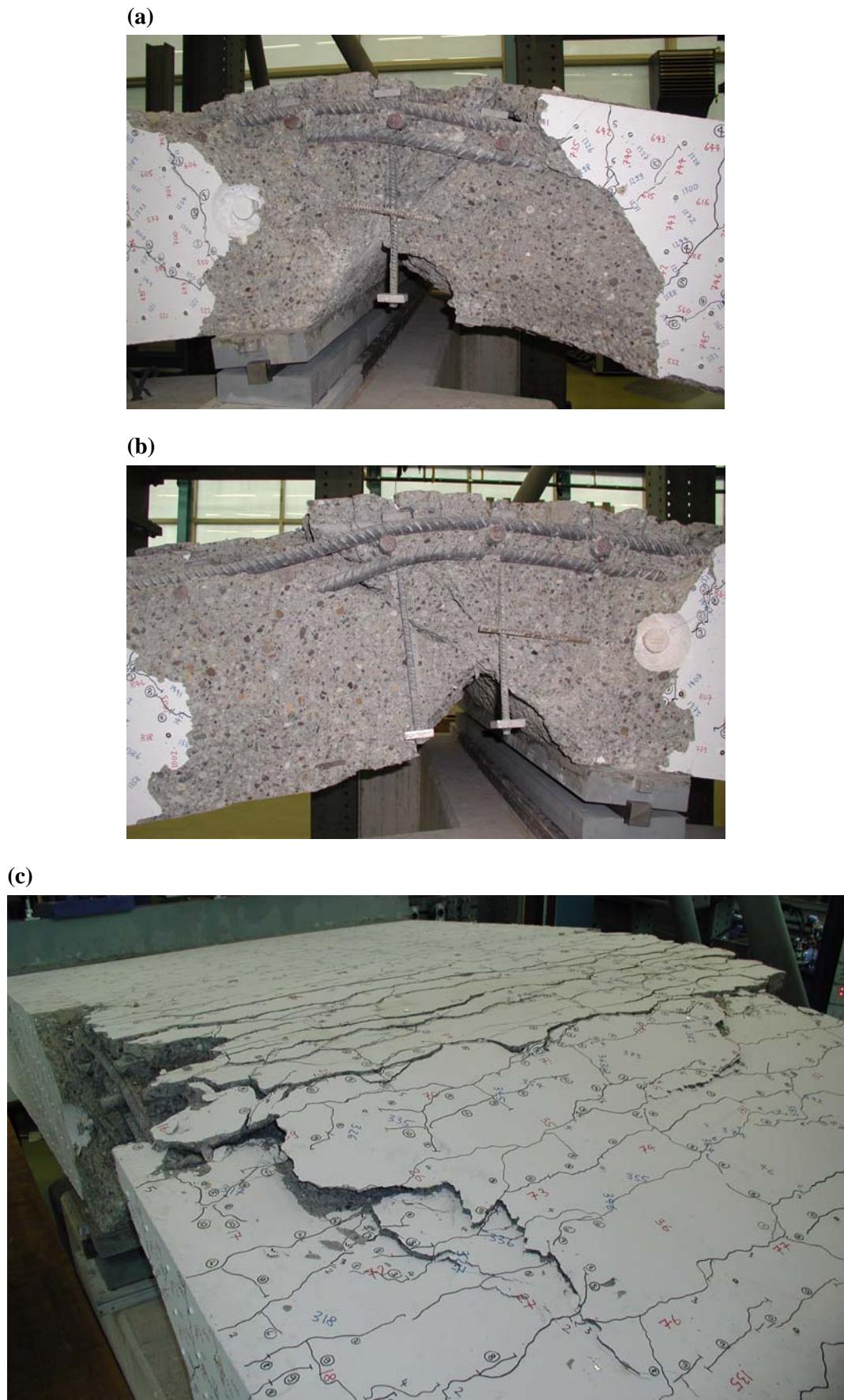


Bild 5.62: B3V2 – Bruchzone nach Ende des Folgeversuchs: (a) Vorderseite beim festen Lager; (b) Hinterseite beim festen Lager; (c) Oberseite beim festen Lager.

Für den Folgeversuch musste die Versuchsanlage umgebaut werden. Mit dem Folgeversuch wurde das Trag- und Verformungsverhalten des Kragarms K1 weiter geprüft. Während der Wiederbelastung im Folgeversuch konnte das Belastungsniveau des Grundversuchs bei Entlastungsbeginn erreicht werden. Mit zunehmender Steigerung der Kragarmdurchbiegung konnte sukzessive das Zerreissen von einzelnen Querkraftbewehrungsstäben akustisch wahrgenommen werden. Der Folgeversuch wurde schliesslich bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 458$ mm abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt noch ungefähr 23 % der Höchstlast. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden.

Bei der abschliessenden Untersuchung des Versuchskörpers konnte auf der Mittelfeldseite beim festen Lager eine ausgeprägte Rissfläche festgestellt werden. Diese erstreckte sich mit einer Neigung von 45° gegenüber der x -Achse vom rechten Lagerrand bis zur Oberseite. An der Unterseite war der Überdeckungsbeton der Biegedruckzone in einem Bereich von ungefähr 900 mm rechts vom nördlichen Lager (im Mittelfeld) abgeplatzt. In unmittelbarer Auflagernähe, in einem Abstand von 140 mm vom rechten Lagerplattenrand ($x \approx 240$ mm), wiesen die Abplatzungen eine maximale Dicke von ungefähr 140 mm auf. Mit zunehmendem Abstand zum Lager verringerten sich diese stark, und die Dicke betrug in einer Entfernung von 280 mm ($x \approx 380$ mm) noch ungefähr 50 mm. Im äusseren Bereich ($x \approx 380 \div 900$ mm) wurde eine Dicke von ungefähr 20 bis 30 mm gemessen, wobei die abgeplatzte Betonschicht unterhalb der Ankerplatten der Querkraftbewehrungsstäbe lag. Die unter 45° geneigte Rissfläche zeigte im unteren, oberhalb der Betonüberdeckung liegenden Bereich ($z \approx 110 \div 170$ mm) ausgeprägte Spuren einer Zerstörung der Rissverzahnung beziehungsweise eines gegenseitigen Abgleitens der Rissufer. Auf der Vorder- und Hinterseite wurde eine vertikale Relativverschiebung der rechten Versuchskörperhälfte (Mittelfeldseite) von ungefähr 20 bis 40 mm gemessen. Ausser den beiden äussersten Querkraftbewehrungsstäben waren in der ersten Reihe neben dem Auflager alle Stäbe in der Rissfläche zerriissen. Dabei zeigten alle abgetrennten Querkraftbewehrungsstäbe eine Bruchfläche, die unter einem Winkel von ungefähr 45° gegenüber der Stabachse verlief.

5.5 Versuchskörper B4

Gegenüber den Versuchskörpern B1 und B2 wurden die Biegebewehrungsquerschnitte des Versuchskörpers B4 in beiden Bewehrungsrichtungen (n - und t -Richtung) um einen Drittel reduziert. Der fiktive geometrische Bewehrungsgehalt in x -Richtung betrug $\rho_x = 0,952 \%$, und für die Bewehrungsrichtung galt $\phi_0 = 45^\circ$. In beiden Bewehrungsrichtungen war eine Bewehrungslage mit Stäben Ø 30 mm und einem Stababstand von 150 mm angeordnet. Die beiden Kragarmbereiche wiesen Querkraftbewehrungsgehalte von $\rho_z = 0 \%$ (Kragarm K2) und 0,154 % (Kragarm K1) auf.

5.5.1 Versuch B4V1

Mit dem Versuch B4V1 wurde der Kragarm K2 ($\rho_z = 0 \%$) geprüft. Dabei betrug der Abstand zwischen dem festen und beweglichen Lager 2,36 m (Abstand b). Am ersten Versuchstag wurde die erste Nullmessung durchgeführt. Die zweite Nullmessung sowie die Laststufen LS 2 und LS 3 folgten am zweiten Versuchstag. Am dritten Versuchstag versagte der Versuchskörper während der Belastungspause für die Laststufe LS 4. Über Nacht wurde der Versuchsträger jeweils entlastet.

Bei einer Kraft von $F_A \approx 400 \text{ kN}$ wurde die erste Laststufe LS 2 durchgeführt. Der gerissene Bereich erstreckte sich über die inneren drei Viertel des Kragarms und Mittelfelds, und die Risse wiesen mittlere Rissabstände von 150 bis 300 mm auf. Im Kragarm und Mittelfeld lagen die Rissbreiten zwischen 0,05 und 0,15 mm, während über dem festen Auflager (Stelle C) Rissbreiten zwischen 0,05 und 0,25 mm gemessen wurden. Auf der Vorder- und Hinterseite des Versuchskörpers hatten sich ungefähr vertikal verlaufende Risse gebildet. In der ersten Hälfte des Kragarms und des Mittelfelds sowie im Bereich des festen Lagers ($x \approx -450 \div 450 \text{ mm}$) reichten diese über die oberen drei Viertel der Versuchskörperhöhe. Für die folgenden Laststufen wurde bis zum Erreichen der Bruchlast ein Belastungsspielraum von $\Delta F_A \approx 200 \text{ kN}$ gewählt.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 3 ($F_A \approx 600 \text{ kN}$) bildeten sich sowohl auf der Oberseite wie auch auf der Vorder- und Hinterseite neue Risse. Neben vereinzelten Verlängerungen und Verästelungen der vorhandenen Risse sowie der Bildung von neuen Rissen über dem festen Lager und in den äusseren Bereichen des Kragarms und Mittelfelds wurde auf der Oberseite eine Vergrößerung der Rissbreiten beobachtet. Die mittleren Rissabstände lagen zwischen 100 und 200 mm. Über dem festen Lager wurden maximale Rissbreiten von 0,4 mm gemessen. Die übrigen Rissbreiten im Kragarm und Mittelfeld vergrößerten sich auf maximal 0,25 mm. Im inneren Kragarmbereich entstanden auf der Vorder- und Hinterseite je zwei neue Risse, während sich die bereits vorhandenen Risse fortpflanzten. Die Risse verliefen im oberen Bereich des Kragarms und Mittelfelds ungefähr vertikal, setzten sich dann aber im unteren Bereich mit einer leichten

Laststufe (LS)	F_A [kN]	F_B [kN]	F_{C1} [kN]	F_{C2} [kN]	$-V_{C1}$ [kN]	$-M_C$ [kNm]	w_1 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	$\alpha(F_A)$ [°]	Bemerkungen
1	0	-85	109	0	72	84	0	0	0	0	Nullmessung
2	403 349	191 154	787 696	1,5 1,3	475 421	734 646	10,3 10,4	0,63 0,63	0,00 0,00	0,21 0,22	Belastungsende Messende
3	603 577	329 311	1125 1081	3,9 3,7	675 648	1060 1018	20,1 20,3	1,26 1,26	-0,03 -0,04	0,37 0,36	Belastungsende Messende
Entlastung 3a	0 0	-85 -85	109 109	0 0	72 72	84 84	4,9 4,9	0,30 0,29	-0,02 -0,02	0,04 0,05	Entlastungsende Belastungsbeginn
HL	732	420	1345	6,4	804	1274	28,3	1,69	-0,07	0,50	Höchstlast
Bruch K2	497	258	948	4,5	569	893	31,7	1,32	-0,07	0,52	Kriech-Schubbruch

Tabelle 5.14: B4V1 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 5.2).

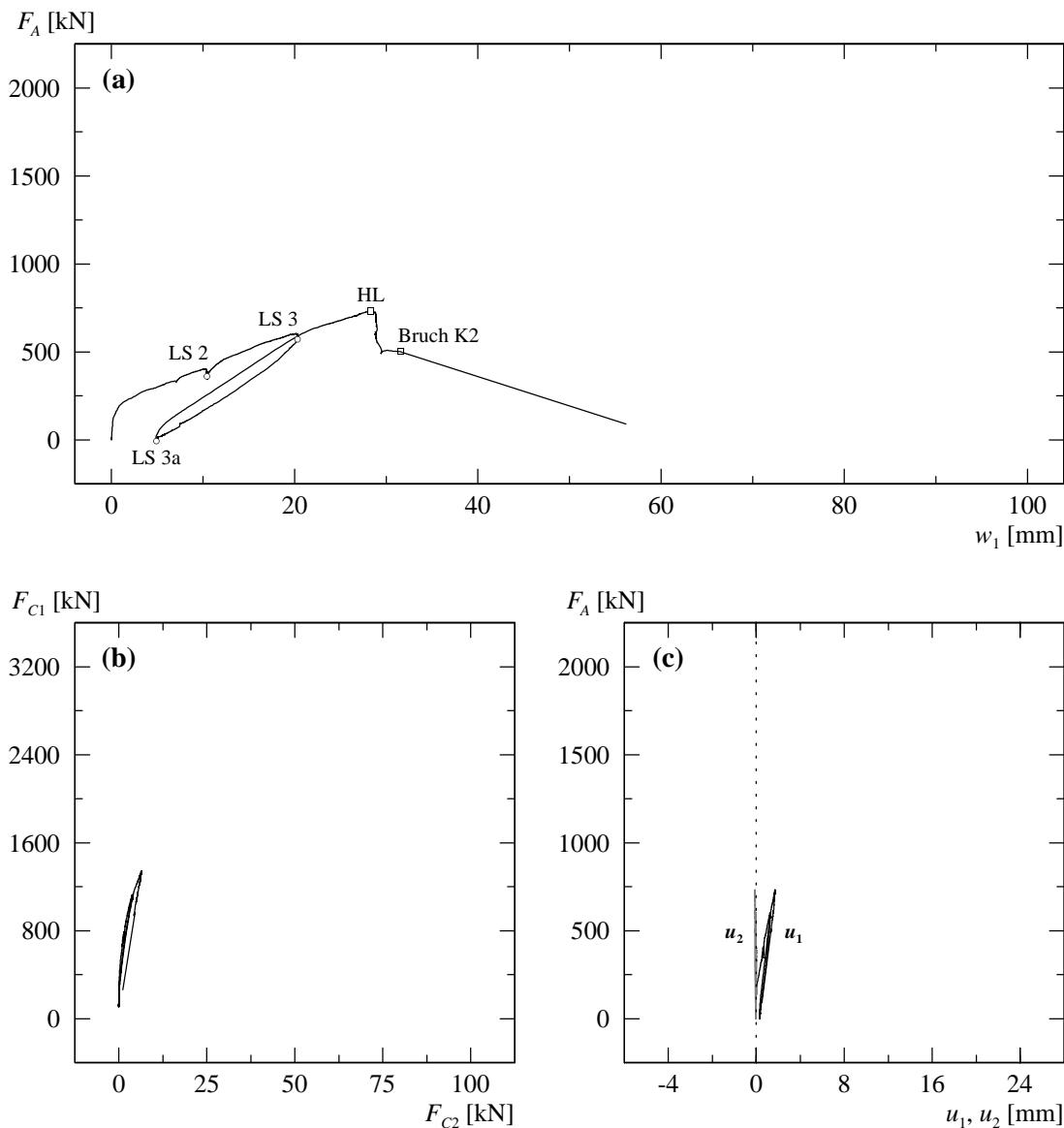


Bild 5.63: B4V1 – (a) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K2; (b) berechnete Lagerreaktionen beim Auflager C; (c) Verformungen der Zugzone über Auflager C.

Neigung gegen das feste Auflager fort. Die Neigung der Risse betrug auf halber Versuchskörperhöhe ungefähr 55 bis 80° gegenüber der x -Achse. Im unteren Bereich verringerte sich die Rissneigung schliesslich auf 30 bis 55°. Die Risse erstreckten sich über die oberen 80 bis 82 % der Versuchskörperhöhe. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe (≈ 50 mm unterhalb der Oberkante) wurden im Bereich des festen Lagers Rissbreiten von 0,4 bis 0,45 mm gemessen, während im Kragarm die Rissbreiten zwischen 0,2 und maximal 0,35 mm lagen. Unterhalb der Bereiche, in denen die Biegebewehrungsverankerungen lagen, verringerten sich die Rissbreiten stark; auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) betrugen sie sowohl beim festen Lager als auch im Kragarm maximal 0,1 bis 0,15 mm.

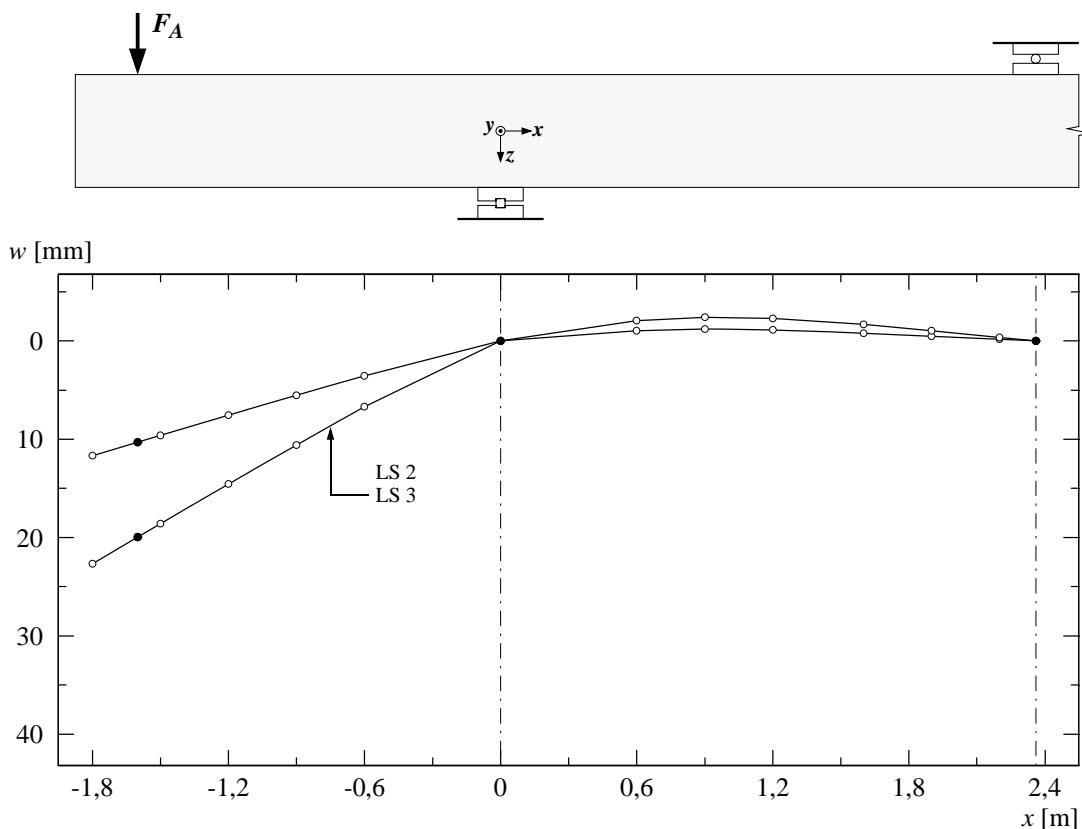
Im weiteren Versuchsfortschritt wurde die Kraft kontinuierlich gesteigert, wobei ab einer Kraft von $F_A \approx 730$ kN die Kragarmdurchbiegung w_1 gegenüber dem Kraftzuwachs ΔF_A überproportional zunahm. Bei einer Durchbiegung von $w_1 = 28,3$ mm beim Kragarm K2 wurde die Höchstlast erreicht. Die entsprechende Kraft betrug $F_A = 732$ kN. Unmittelbar nach Überschreiten der Höchstlast wurde der Belastungsvorgang zur Durchführung einer letzten Laststufe angehalten. In den ersten fünf Minuten der Belastungspause verhielten sich das Rissbild und die Verformungen des Versuchskörpers stabil, während die Kraft auf $F_A \approx 500$ kN abfiel. Bis zum Erreichen der

Laststufe	Oberseite			Vorderseite – Kragarm		Vorderseite – Festes Lager	
	Kragarm w_{cr} [mm]	Festes Lager w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 2	0,05...0,15	0,05...0,25	0,05...0,15	0,05...0,20	HR...0,05	0,15...0,30	0,05...0,10
LS 3	0,05...0,25	0,10...0,40	0,05...0,25	0,20...0,35	0,05...0,10	0,40...0,45	0,05...0,15

Tabelle 5.15: B4V1 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

Höchstlast pflanzten sich auf der Vorder- und Hinterseite die äussersten Schrägrisse im Kragarm mit einer flachen Neigung bis zur Lagerplatte des festen Lagers fort. Auf der Vorderseite verlief der Riss in unmittelbarer Auflagernähe über eine Länge von ungefähr 350 mm mit einem Abstand zwischen 10 und 30 mm von der Unterseite, während derjenige auf der Hinterseite bis zur Unterseite des Versuchskörpers reichte. In der Biegedruckzone wiesen die Risse eine Neigung von 5 bis 15° gegenüber der x -Achse auf.

Nachdem die Kragarmdurchbiegung während fünf Minuten konstant gehalten werden konnte, setzte plötzlich ein unkontrolliertes Risswachstum ein. In der Folge konnten keine Messungen der geplanten Laststufe LS 4 durchgeführt werden. Im weiteren Versuchsfortschritt erfolgte bei einer Kraft von $F_A = 497$ kN ein spröder Schubbruch des Kragarms. Die dazugehörende Durchbiegung betrug $w_1 = 31,7$ mm beim Kragarm K2. Vom Zeitpunkt des Belastungsstopps bis zum Bruch dauerte es ungefähr zehn Minuten. Während der ersten fünf Minuten waren keine Anzeichen feststellbar, die auf ein baldiges Versagen hinwiesen. Erst in den letzten fünf Minuten vor dem Bruch konnte mehrmals ein Knistern wahrgenommen und die Zunahme der Kragarmdurchbiegung beobachtet werden. Kurz vor dem Bruch setzte dann ein unkontrolliertes Risswachstum ein, wobei sich die Entwicklung der Bruchfläche abzeichnete. Der eigentliche Bruchprozess verlief relativ langsam und führte nicht zu einer Abtrennung des unteren Betonkeils. Die leicht s-förmig gekrümmte Bruchfläche folgte dem vorhandenen äussersten Schrägriss, der sich bis zur Lagerplatte ausdehnte. Der sich bis zur Krafteinleitung erstreckende Trennriss entlang der Biegebewehr-

**Bild 5.64:** B4V1 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

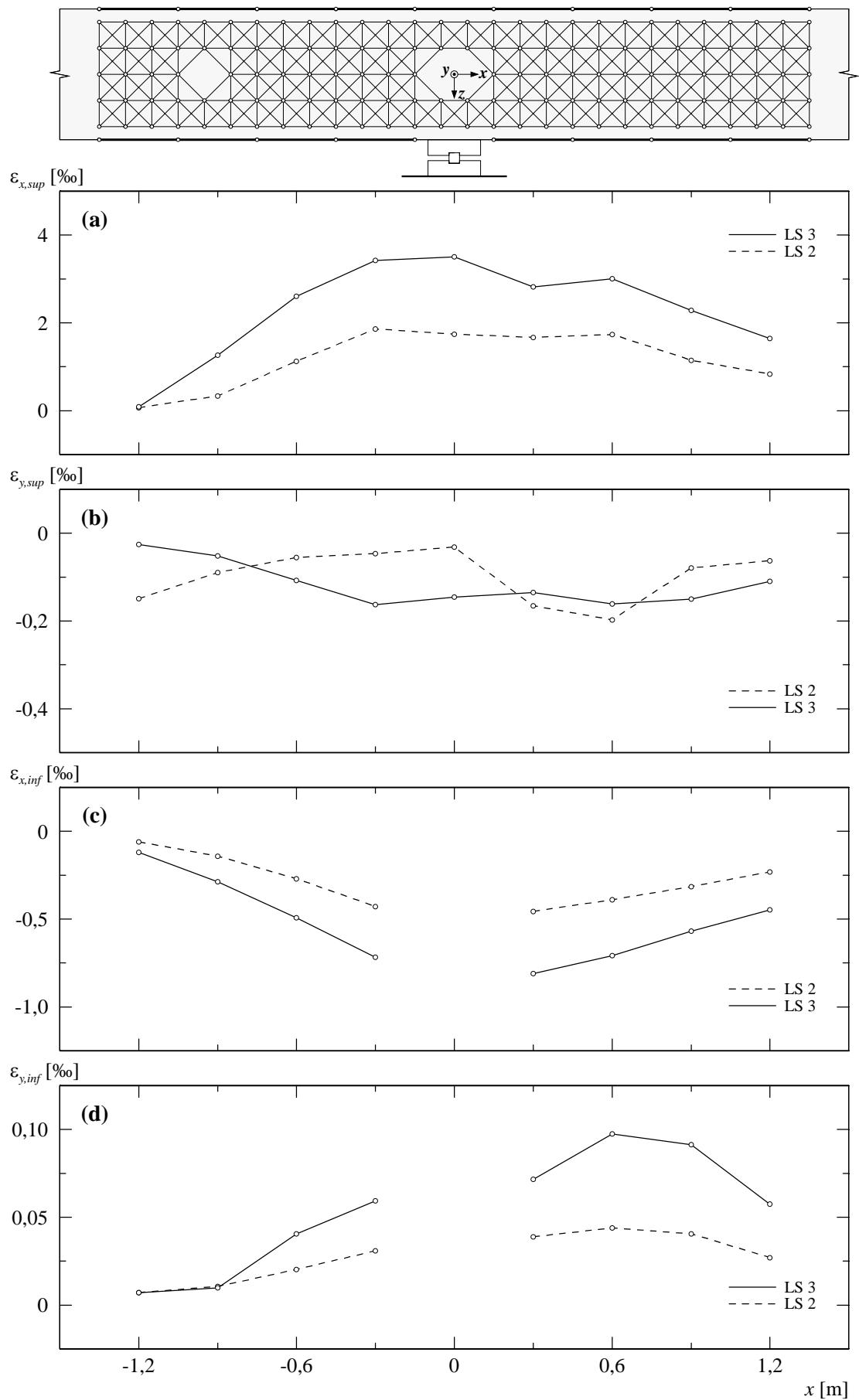


Bild 5.65: B4V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben; (c) mittlere Längsdehnungen unten; (d) mittlere Querdehnungen unten.

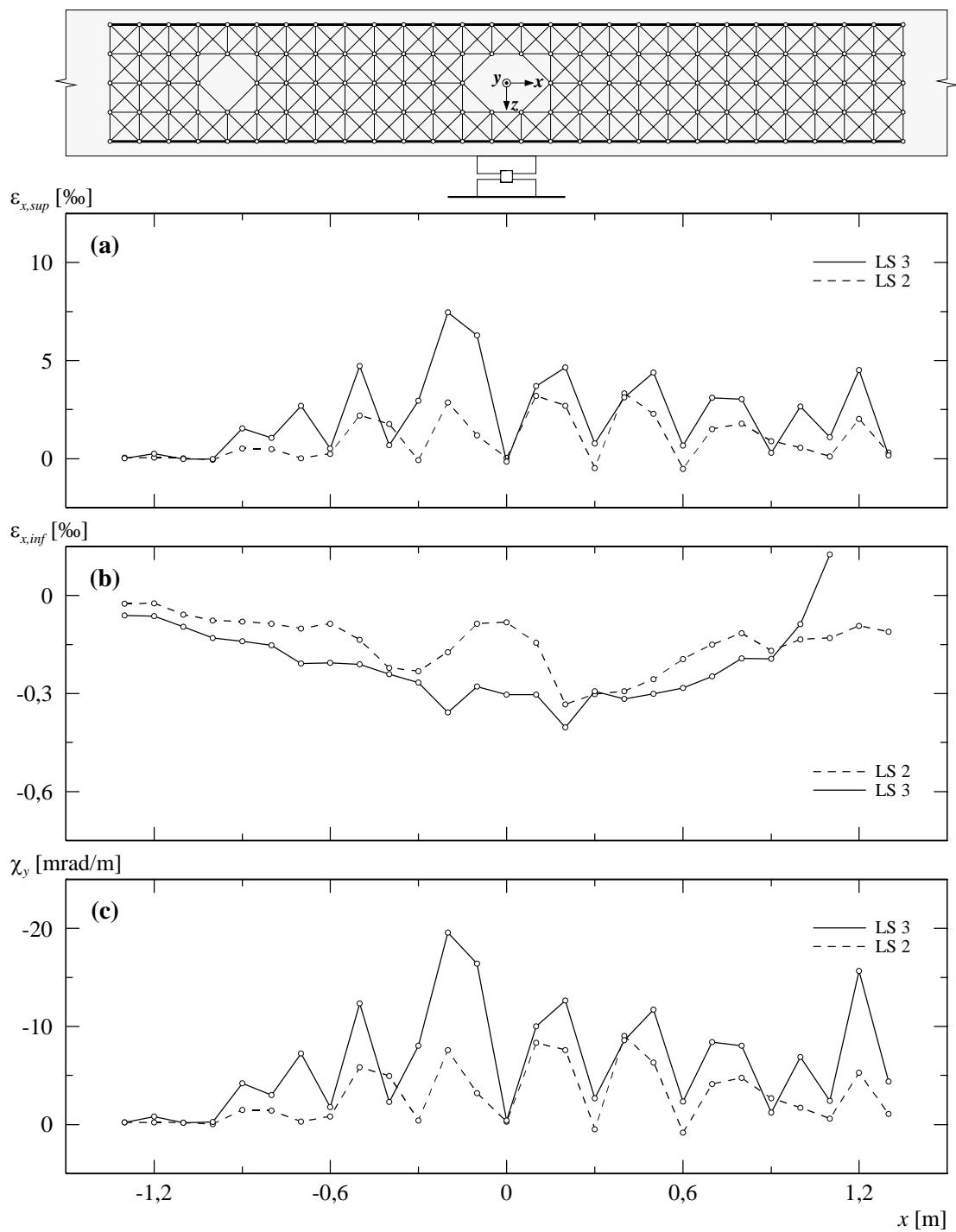


Bild 5.66: B4V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

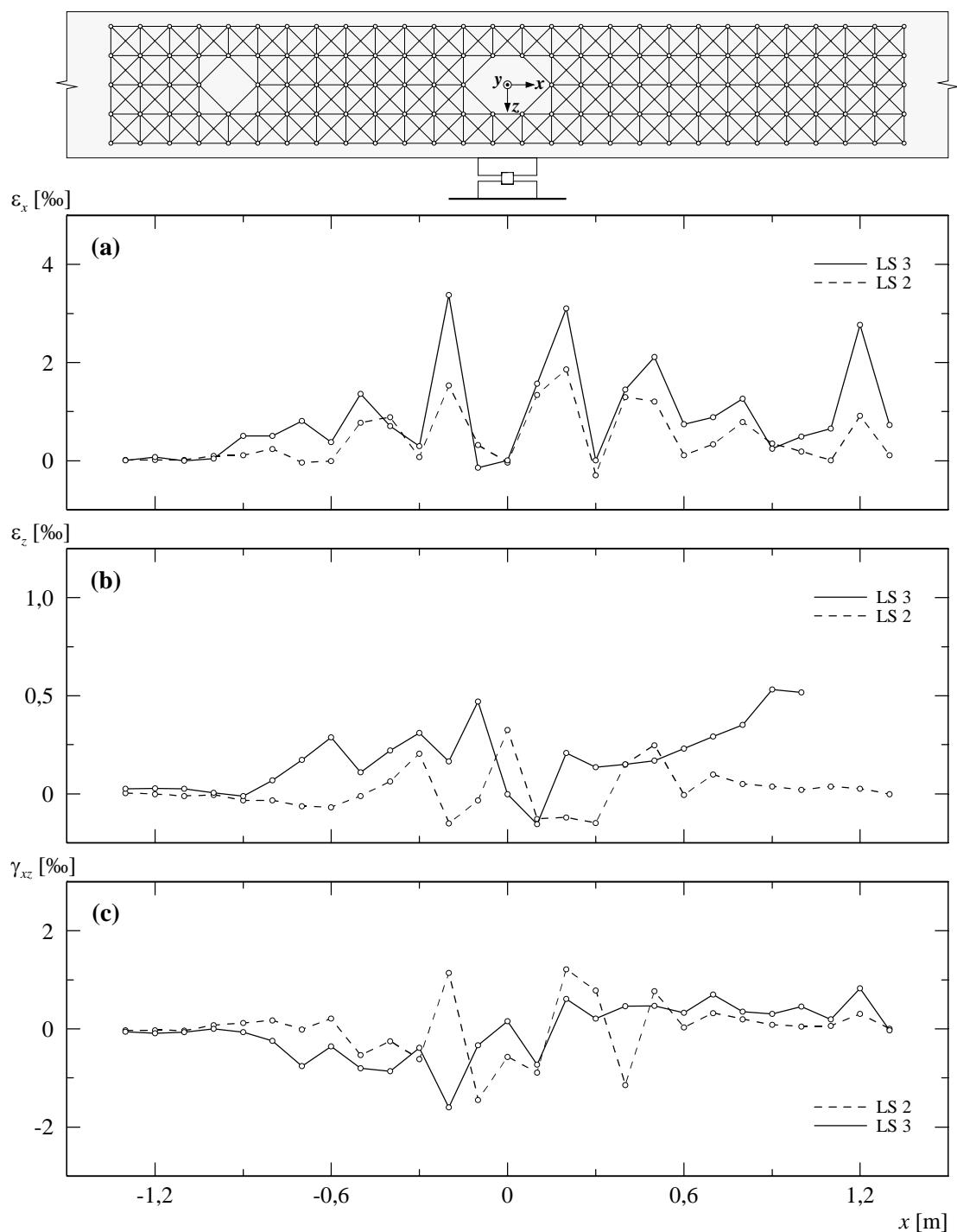
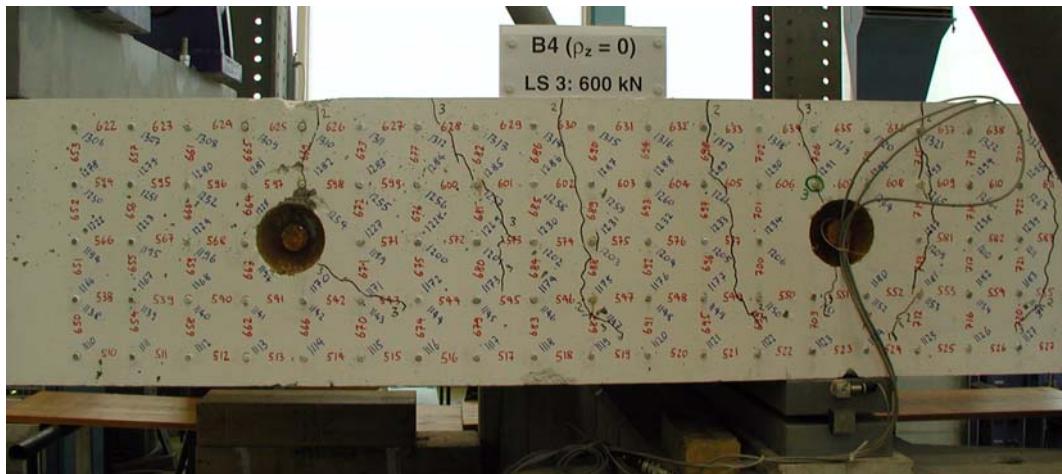
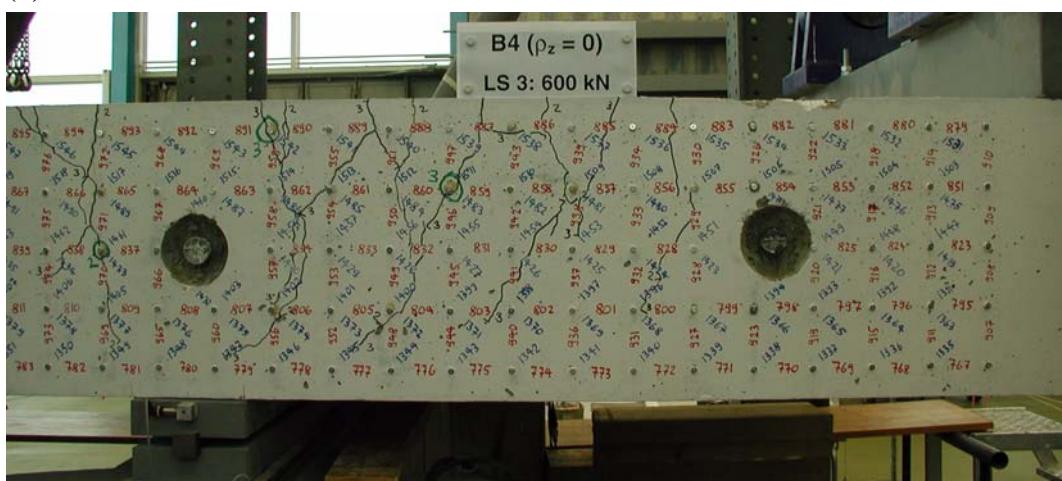


Bild 5.67: B4V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

(a)



(b)



(c)

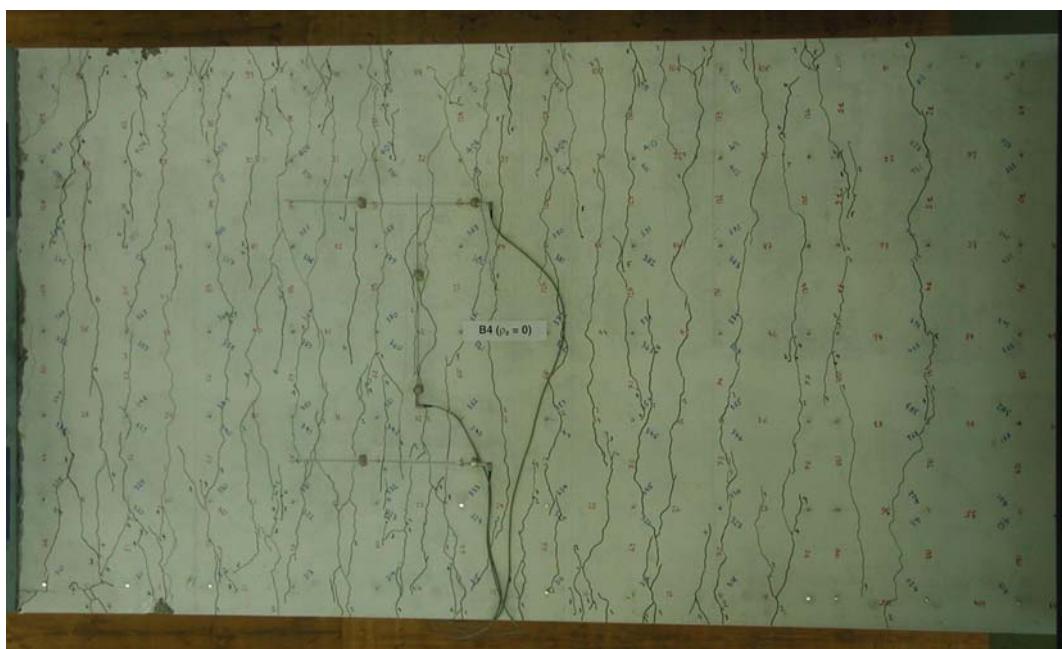
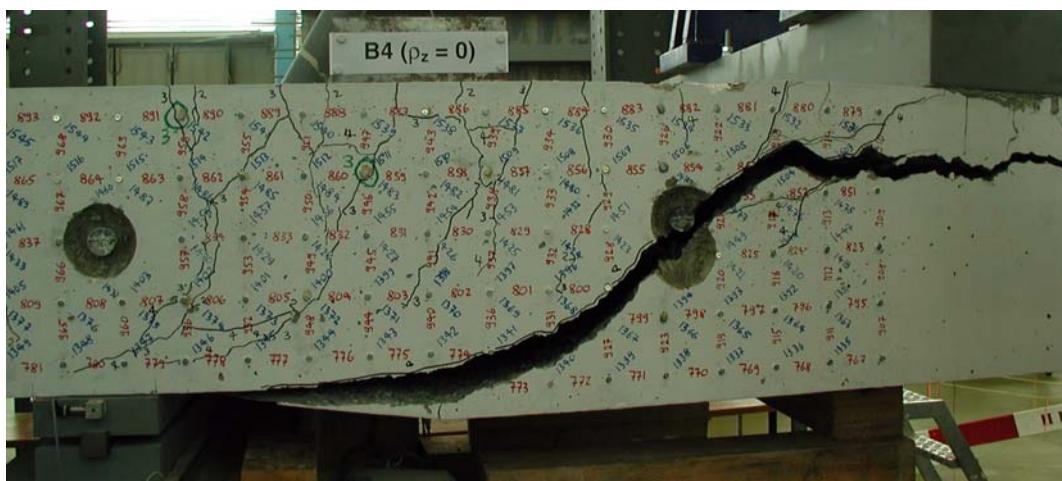


Bild 5.68: B4V1 – Rissbild bei Laststufe LS 3: (a) Vorderseite Kragarm; (b) Hinterseite Kragarm; (c) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.

(a)



(b)



(c)

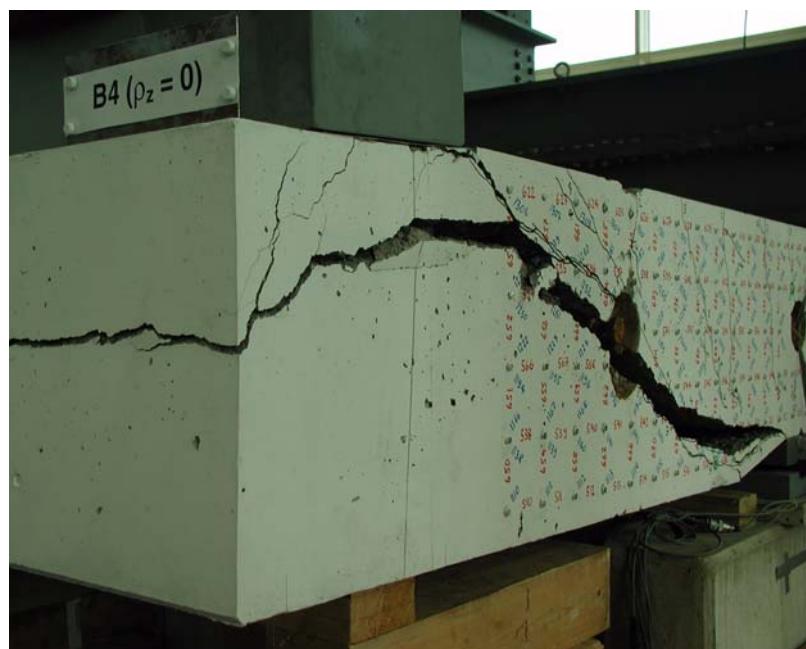


Bild 5.69: B4V1 – Schubbruch im Kragarm K2: (a) Vorderseite; (b) Hinterseite; (c) Ansicht Stirn- und Vorderseite.

rung entstand unmittelbar beim Bruch. Die Steifigkeit der Versuchsanlage genügte, um ein schlagartiges Abtrennen des unteren Betonkeils zu verhindern.

Die abschliessende Untersuchung des Versuchskörpers zeigte eine rauhe Beschaffenheit der Bruchfläche und einen gleichmässigen Oberflächenverlauf über die Versuchskörperbreite. Der mittlere, steil verlaufende Teil wies eine Neigung von ungefähr 35 bis 40° gegenüber der x -Achse auf. Im unteren Teil verlief die Bruchfläche über eine Länge von etwa 500 mm bis zum Auflager sehr flach, wobei die Dicke der Abplatzungen in der Biegedruckzone beim Auflagerbereich nur wenige Zentimeter betrug.

5.5.2 Versuch B4V2

Mit dem Versuch B4V2 wurde der Kragarm K1 ($\rho_z = 0,154\%$) geprüft. Dabei betrug der Abstand zwischen dem festen und beweglichen Lager 2,36 m (Abstand b). Am ersten Versuchstag wurden die beiden Nullmessungen und die Laststufe LS 2 durchgeführt. Die Laststufen LS 3 und LS 4 folgten am zweiten Versuchstag. Am dritten Versuchstag wurde der Versuchskörper erneut belastet und der Grundversuch abgeschlossen. Über Nacht wurde der Versuchsträger jeweils entlastet.

Bei einer Kraft von $F_A \approx 400$ kN wurde die erste Laststufe LS 2 durchgeführt. Der gerissene Bereich erstreckte sich über die inneren 70 % des Kragarms und das gesamte Mittelfeld, und die Risse wiesen mittlere Rissabstände von 150 bis 300 mm auf. Im Kragarm und Mittelfeld lagen die Rissbreiten auf der Oberseite zwischen 0,05 und 0,15 mm, während über dem festen Auflager (Stelle C) Rissbreiten zwischen 0,1 und 0,25 mm gemessen wurden. Auf der Vorder- und Hinterseite des Versuchskörpers hatten sich ungefähr vertikal verlaufende Risse gebildet, wobei die Risse im unteren Bereich des Kragarms abdrehten und dann mit einer leichten Neigung gegen das feste Lager verliefen. In der ersten Hälfte des Kragarms und des Mittelfelds sowie im Bereich des festen Lagers ($x \approx -450 \div 450$ mm) reichten diese über die oberen 80 % der Versuchskörperhöhe. Für die folgenden Laststufen wurde bis zum Erreichen der Höchstlast ein Belastungsintervall von $\Delta F_A \approx 400$ kN gewählt.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 3 ($F_A \approx 800$ kN) bildeten sich sowohl auf der Oberseite wie auch auf der Vorder- und Hinterseite neue Risse. Neben der Bildung von neuen Rissen im Kragarm, über dem festen Lager und in der inneren Hälfte des Mittelfelds wurde auf der Oberseite eine Vergrößerung der Rissbreiten sowie vereinzelte Verlängerungen und Verästelungen der vorhandenen Risse beobachtet, wobei die Verästelungsrisse in den Verankerungsbereichen der Biegebewehrung endeten. Die mittleren Rissabstände lagen zwischen 100 und 200 mm. Über dem festen Lager wurden maximale Rissbreiten von 0,6 mm gemessen. Die übrigen Rissbreiten vergrößerten sich im Kragarm auf 0,2 bis 0,65 mm und im Mittelfeld auf maximal 0,4 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite wurde die Bildung horizontal verlaufender Risse in den Verankerungsbereichen der Biegebewehrung im Mittelfeld und über dem festen Lager sowie neuer Risse in den äusseren Bereichen des Kragarms und Mittelfelds festgestellt, während sich die bereits vorhandenen Risse fortpflanzten. Dabei erstreckten sich die Risse über die oberen 82 bis 88 % der Versuchskörperhöhe. Die schrägen Risse verliefen im oberen Bereich des Kragarms und

Laststufe (LS)	F_A [kN]	F_B [kN]	F_{C1} [kN]	F_{C2} [kN]	$-V_{C1}$ [kN]	$-M_C$ [kNm]	w_1 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	$\alpha(F_A)$ [°]	Bemerkungen
1	0	-84	109	0	72	84	0	0	0	0	Nullmessung
2	402 381	191 176	786 750	1,2 1,1	475 453	732 698	10,4 10,5	0,59 0,59	-0,03 -0,03	0,17 0,16	Belastungsende Messende
Entlastung 2a	0 0	-84 -84	109 109	0 0	72 72	84 84	5,0 5,0	0,27 0,26	-0,05 -0,05	0,01 0,02	Entlastungsende Belastungsbeginn
3	800 761	469 441	1462 1395	7,8 6,9	872 833	1389 1323	32,6 32,8	1,62 1,66	-0,14 -0,12	0,56 0,52	Belastungsende Messende
Höchstlast	1121	700	2014	18,1	1193	1934	59,1	3,58	-0,23	0,93	Höchstlast
4	1101 1028	686 635	1980 1856	18,2 16,7	1173 1100	1901 1781	60,3 60,3	3,80 3,86	-0,24 -0,27	0,95 0,93	Belastungsende Messende
Entlastung 4a	0 0	-84 -84	109 109	0 0	72 72	84 84	18,4 18,0	1,48 1,46	-0,10 -0,10	0,16 0,16	Entlastungsende Belastungsbeginn
Entlastung	648 0	404 -84	1244 109	37,4 0	720 72	1235 84	248,3 205,0	— —	-4,96 -4,49	3,31 2,83	Entlastungsbeginn Versuchsende
Versuchsumbau											
Folge- versuch	0 583	-86 350	109 1128	0 31,4	72 655	84 1113	205,0 409,5	— —	0 3,08	Versuchsbeginn Entlastungsbeginn	

Tabelle 5.16: B4V2 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 5.3).

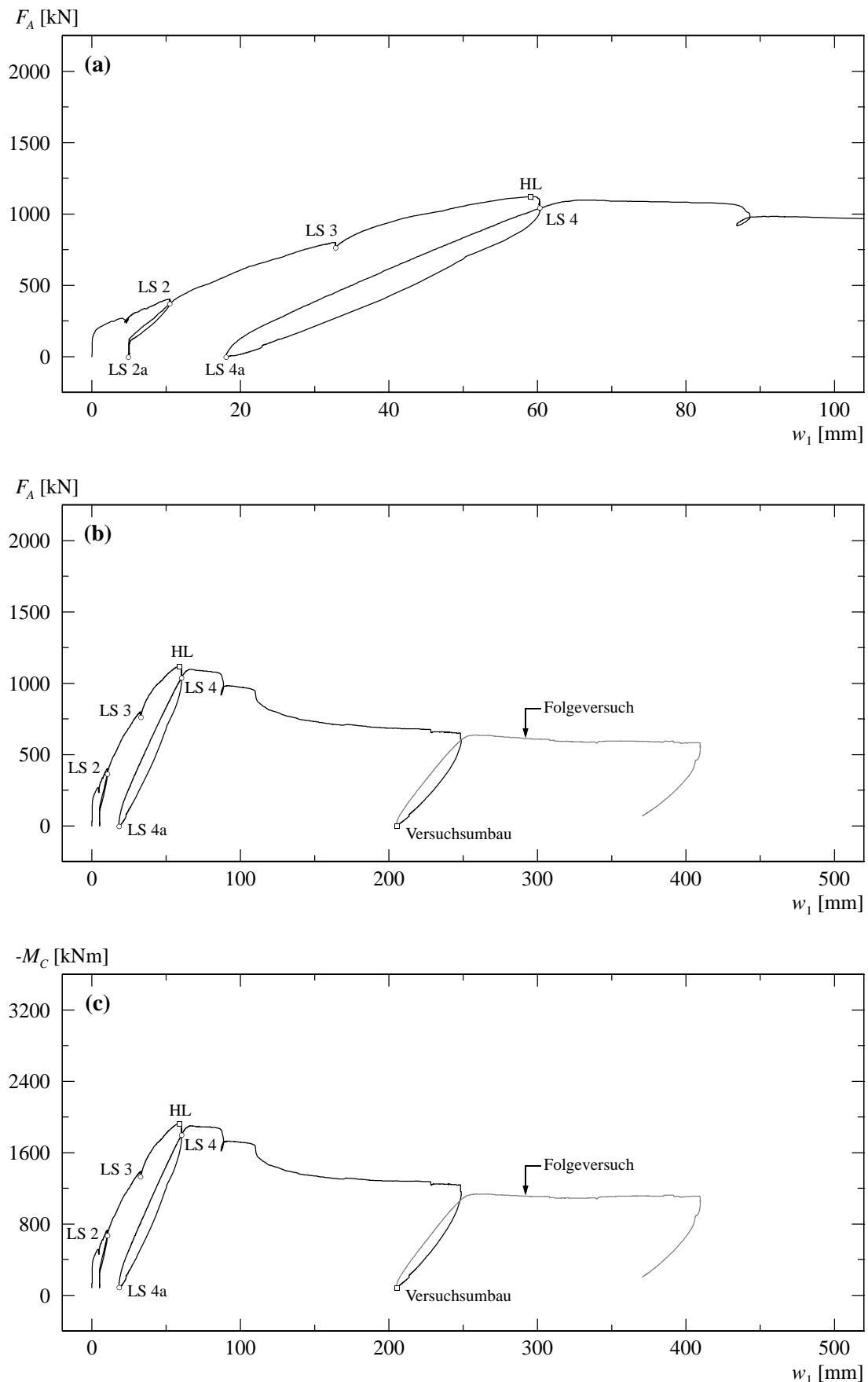


Bild 5.70: B4V2 – (a) und (b) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K1; (c) berechnetes Momenten-Durchbiegungsdiagramm.

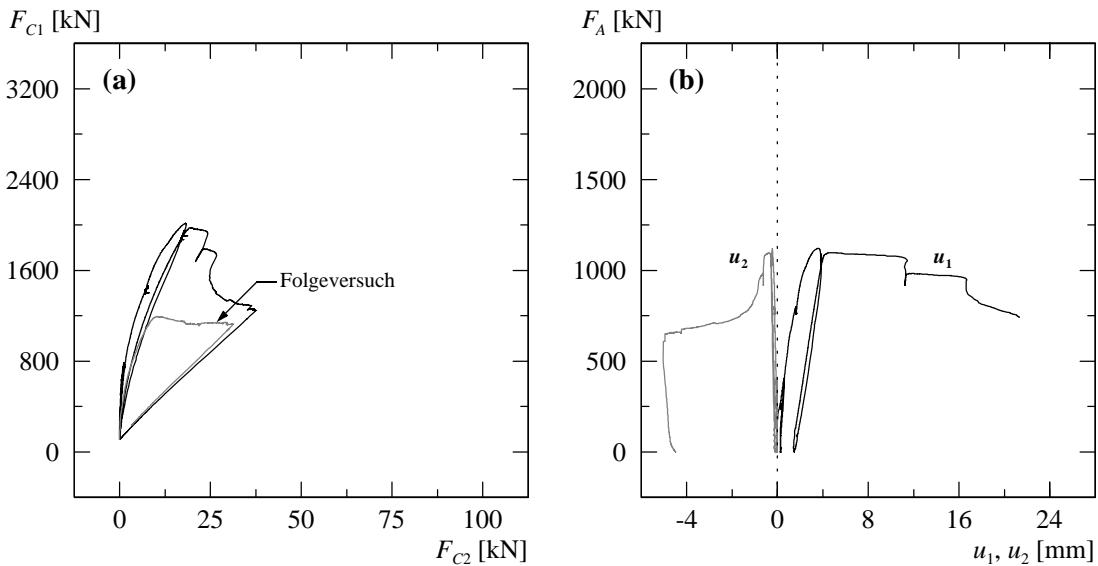


Bild 5.71: B4V2 – (a) Berechnete Lagerreaktionen beim Auflager C; (b) Verformungen der Zugzone über Auflager C.

der inneren Mittelfeldhälfte ungefähr vertikal, setzten sich dann aber im unteren Bereich mit einer flachen Neigung gegen das feste Auflager fort. Die Neigung der Risse betrug auf halber Versuchskörperhöhe ungefähr 50 bis 80° gegenüber der x -Achse. Im unteren Bereich verringerte sich die Rissneigung schliesslich auf 30 bis 45° . Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe (≈ 50 mm unterhalb der Oberkante) wurden im Bereich des festen Lagers Rissbreiten von $0,15$ bis $0,8$ mm gemessen, während im Kragarm die Rissbreiten zwischen $0,05$ und maximal $0,75$ mm lagen. Unterhalb der Bereiche, in denen die Biegebewehrungsverankerungen lagen, verringerten sich die Rissbreiten stark; auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) betrugen sie beim festen Lager $0,2$ bis $0,7$ mm und im Kragarm $0,1$ bis $0,6$ mm. Die horizontal verlaufenden Risse im Bereich der Biegebewehrungsverankerungen wiesen Rissbreiten von $0,05$ bis $0,1$ mm auf.

Im weiteren Versuchsfortschritt, zwischen den Laststufen LS 3 und LS 4, wurde bei einer Durchbiegung von $w_1 = 59,1$ mm beim Kragarm K1 die Höchstlast erreicht. Die entsprechende Kraft betrug $F_A = 1121$ kN.

Nach Erreichen der Höchstlast wurde bei einer Kraft von $F_A \approx 1100$ kN und einer Durchbiegung von $w_1 \approx 60,3$ mm die letzte Laststufe LS 4 durchgeführt. Bei dieser Laststufe konnten beim festen Lager leichte Betonstauchungen in dem zur y -Achse parallel verlaufenden Druckfeld auf der Oberseite (Biegezugzone) festgestellt werden. Ausser der Verlängerung und Verästelung der bestehenden Risse bildeten sich bis zur Laststufe LS 4 vorwiegend auf der Oberseite neue Risse. Auf der Oberseite wurde beim festen Lager ein Riss mit einer Breite von $2,4$ mm und im Kragarm ein solcher von $1,6$ mm gemessen. Die übrigen Risse wiesen mittlere Rissabstände von 75 bis 150 mm auf, und die Rissbreiten lagen sowohl über dem festen Lager als auch im Kragarm zwischen $0,2$ und $1,1$ mm, während die Rissbreiten im Mittelfeld $0,1$ bis $0,8$ mm betrugen. Die Risse auf der Vorder- und Hinterseite erstreckten sich über die oberen 85 bis 90% der Versuchskörperhöhe. Neben der Bildung weiterer Verästelungsrisse und vereinzelter Risse im Bereich der Biegebewehrungsverankerungen hatten sich die schräg verlaufenden Risse im Kragarm und über dem festen Lager verlängert, wobei im untersten Bereich eine deutliche Abflachung der Risse beobachtet wurde. Die Neigung der Risse betrug im untersten Bereich 5 bis 30° gegenüber der x -Achse. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe hatte sich im Kragarm ein Riss 2 mm weit geöffnet. Die übrigen Rissbreiten lagen im Kragarm zwischen $0,1$ und $0,9$ mm und im Bereich des festen Lagers zwischen $0,15$ und $1,4$ mm. Unterhalb der Verankerungsbereiche der

Laststufe	Oberseite			Vorderseite – Kragarm		Vorderseite – Festes Lager	
	Kragarm w_{cr} [mm]	Festes Lager w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 2	0,05...0,15	0,10...0,25	0,05...0,15	0,05...0,25	HR...0,10	0,15...0,40	0,05...0,15
LS 3	0,20...0,65	0,10...0,60	0,05...0,40	0,05...0,75	0,10...0,60	0,15...0,80	0,20...0,70
LS 4	0,20...1,60	0,25...2,40	0,10...0,80	0,10...2,00	0,10...0,70	0,15...1,40	0,20...1,20

Tabelle 5.17: B4V2 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

Biegebewehrung und auf halber Versuchskörperhöhe lagen die Rissbreiten über dem festen Lager zwischen 0,2 und 1,2 mm und im Kragarm zwischen 0,1 und 0,7 mm.

Nach der Durchführung der Laststufe LS 4 wurde der Versuchskörper entlastet. Im weiteren Versuchsfortschritt konnte das alte Belastungsniveau bei der Wiederbelastung wieder knapp erreicht werden. Anschliessend wurde die Durchbiegung des Kragarms K1 vergrössert. Ab einer Durchbiegung von $w_1 \approx 80$ mm bildeten sich in dem zur y -Achse parallel verlaufenden Druckfeld auf der Oberseite die ersten Betonstauchungsrisse beim festen Lager. Mit zunehmender Kragarmdurchbiegung kündigte sich an der Oberseite das Versagen des Überdeckungsbetons durch Abplatzungen von Betonplättchen an, wobei die Betonplättchen bis 400 mm in die Höhe geschleudert wurden. Bei einer Durchbiegung von $w_1 \approx 88$ mm versagte der Beton im Verankerungsbereich von je fünf Stabpaaren der Biegebewehrung auf der Vorder- und Hinterseite, wobei Teile des Überdeckungsbetons auf der Oberseite in y -Richtung stark gestaucht wurden. Die Bruchzone erstreckte sich in x -Richtung über eine Länge von 900 bis 1100 mm. Die Zerstörung des Druckfeldes führte zu einem vertikalen Versatz der Ankerplatten und zu horizontalen Verschiebungen der Biegebewehrungsstäbe entlang ihrer Stabachse. In der Biegendruckzone wurden die ersten Betonstauchungsrisse ab einer Durchbiegung von $w_1 \approx 150$ mm auf der Mittelfeldseite und über der Lagerplatte beim festen Lager beobachtet. In der Folge platzten auf der Mittelfeldseite nur kleinere Teile des Überdeckungsbetons an der Unterseite ab. Bei einer Kragarmdurch-

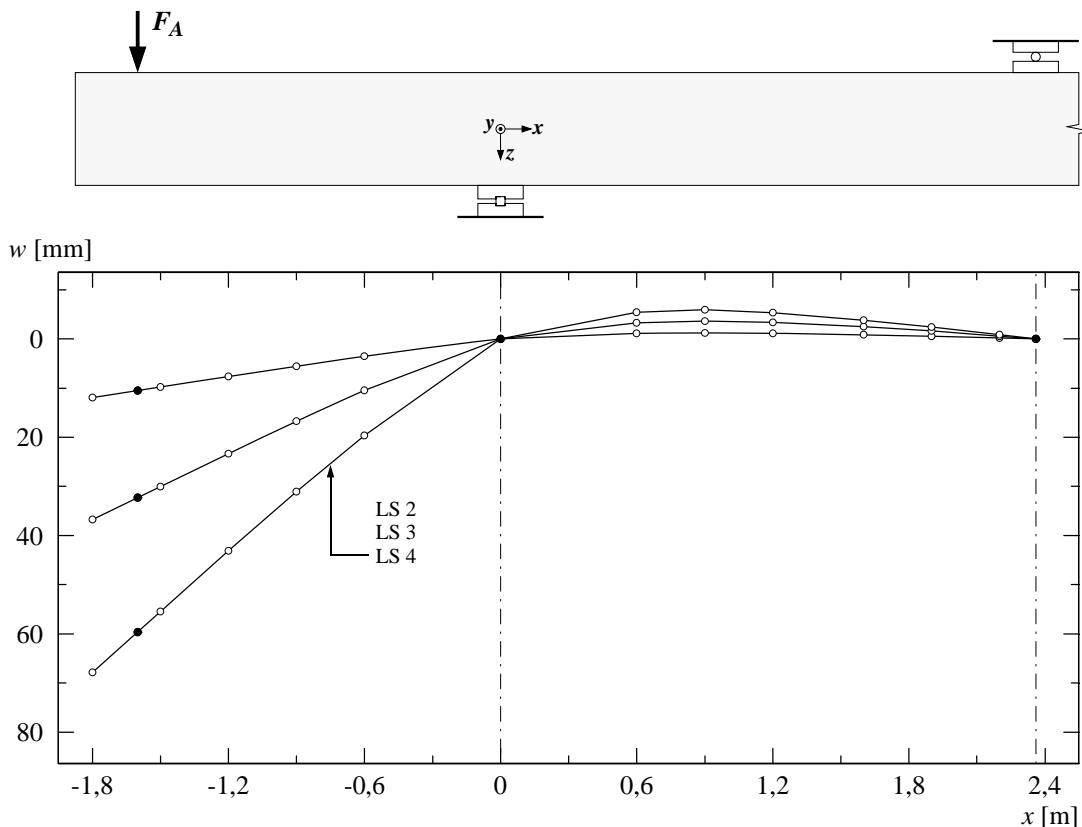


Bild 5.72: B4V2 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

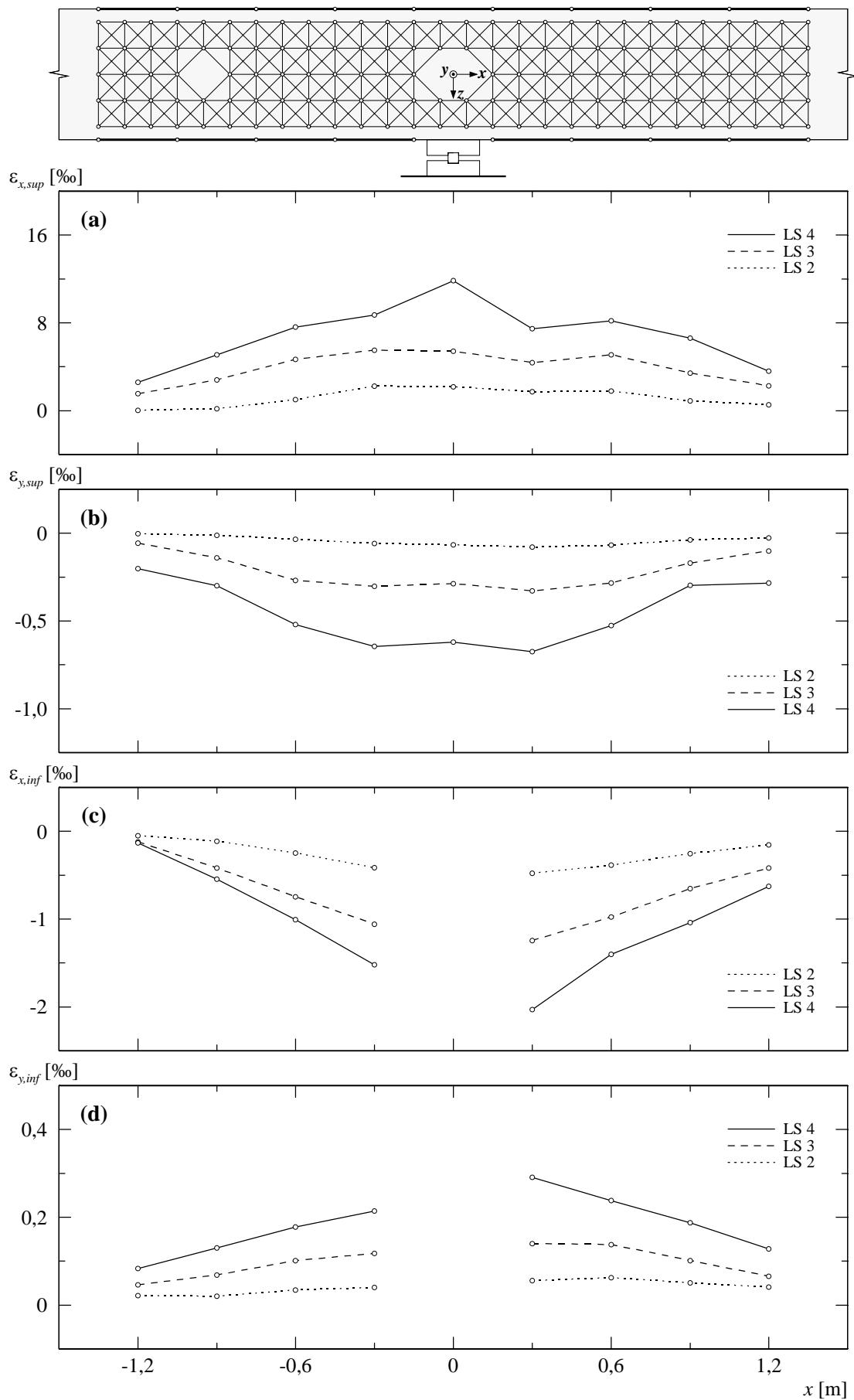
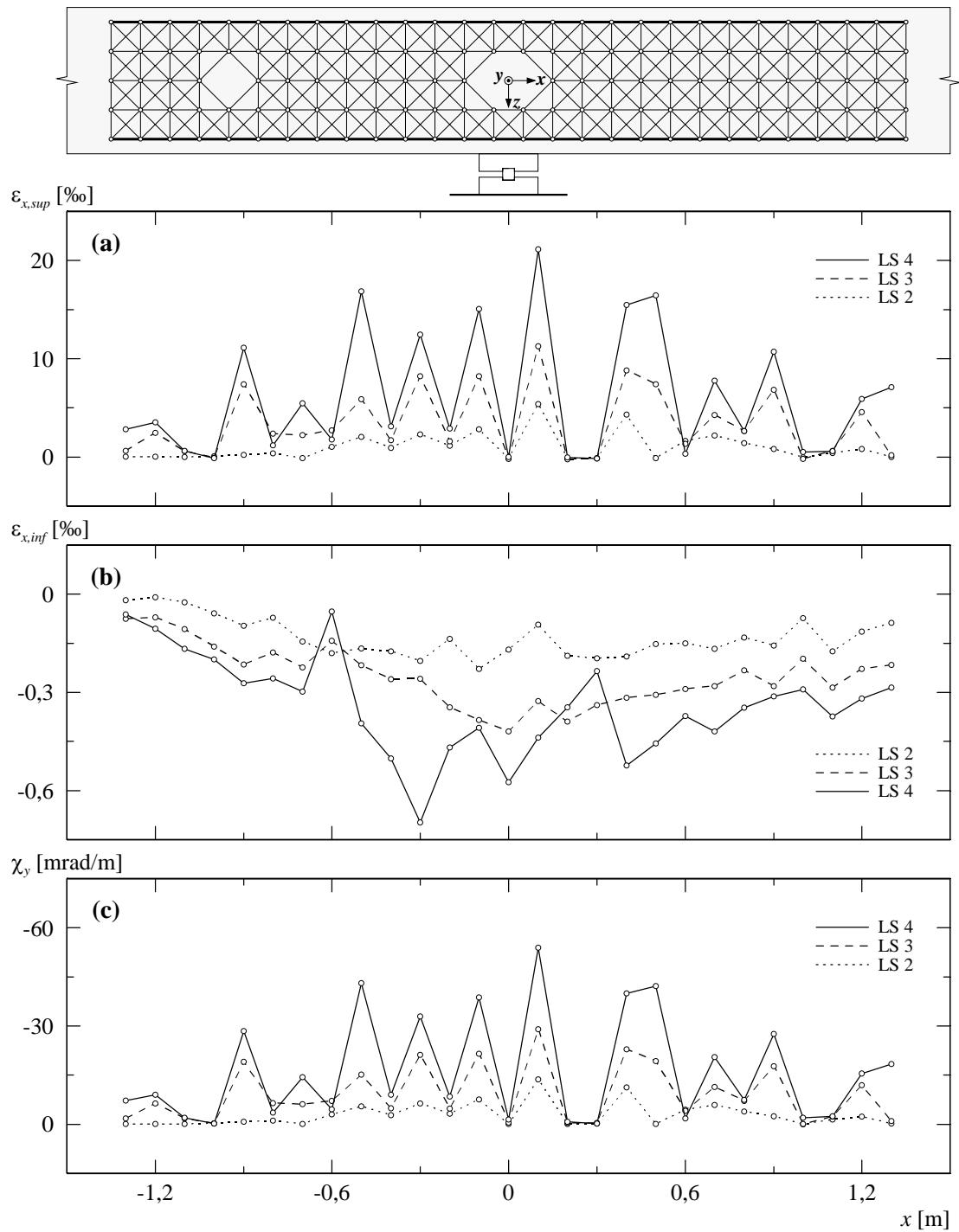


Bild 5.73: B4V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben; (c) mittlere Längsdehnungen unten; (d) mittlere Querdehnungen unten.



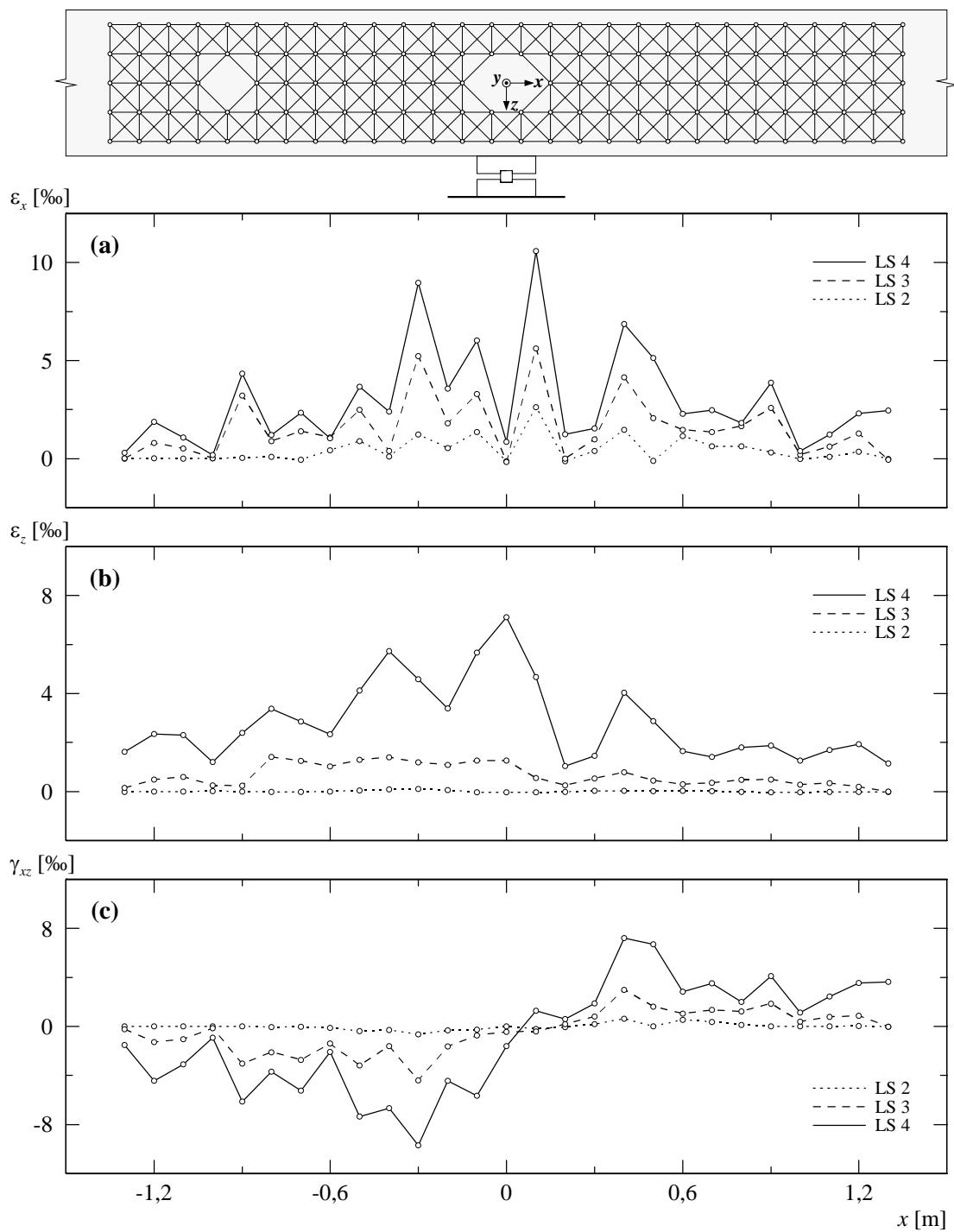


Bild 5.75: B4V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

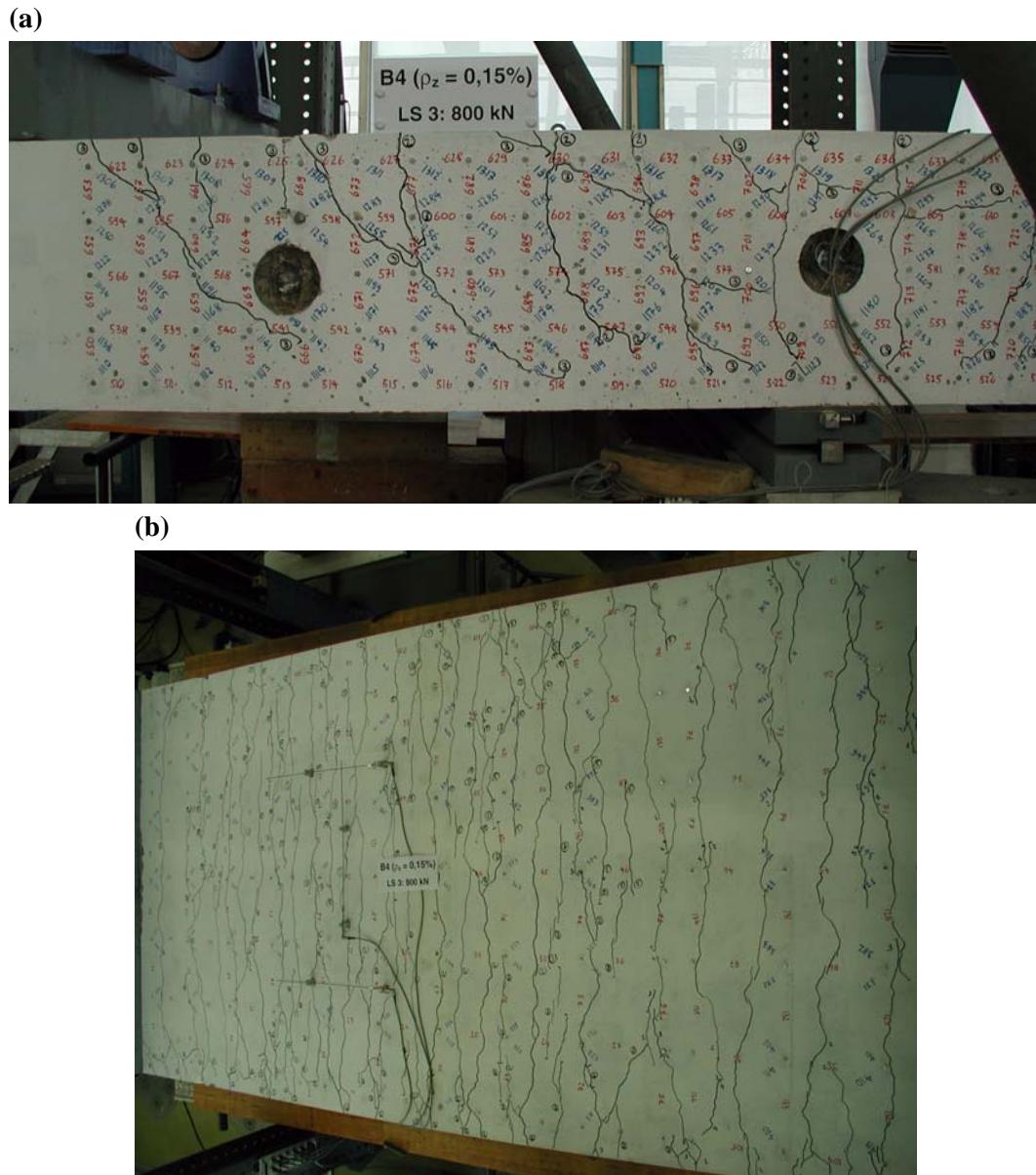


Bild 5.76: B4V2 – Rissbild bei Laststufe LS 3: (a) Vorderseite Kragarm; (b) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.

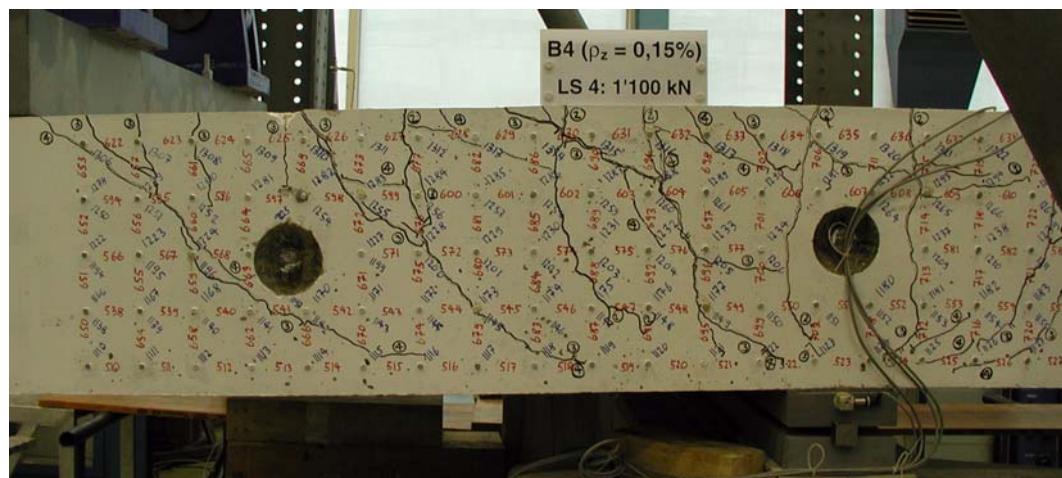


Bild 5.77: B4V2 – Rissbild bei Laststufe LS 4: Vorderseite Kragarm.

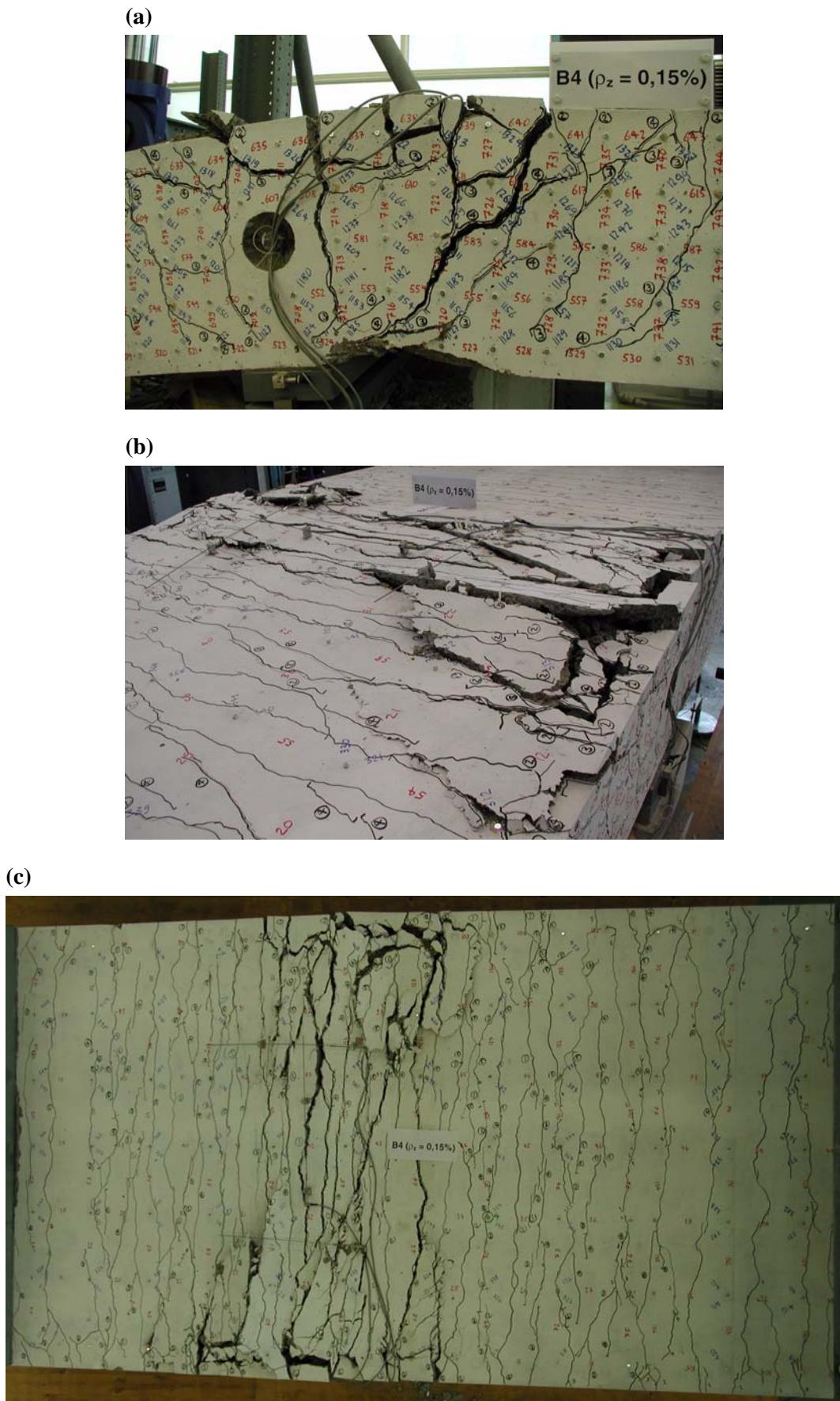


Bild 5.78: B4V2 – Bruchzone nach Ende des Grundversuchs: (a) Vorderseite beim festen Lager; (b) Oberseite beim festen Lager; (c) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.

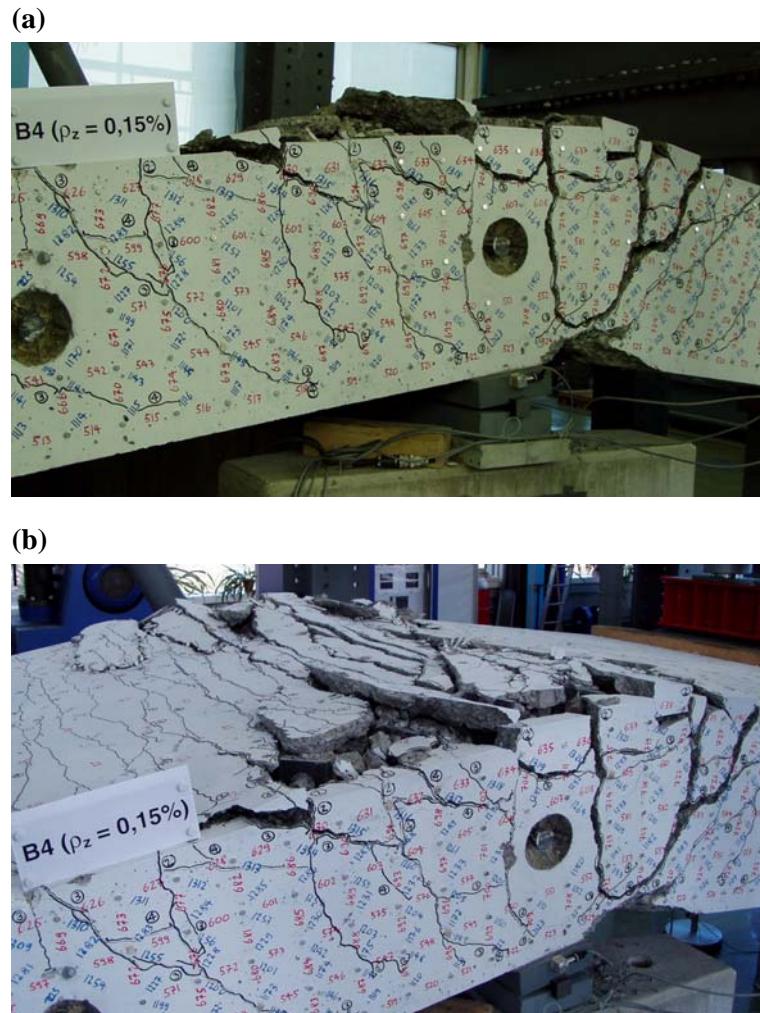


Bild 5.79: B4V2 – Bruchzone nach Ende des Folgeversuchs: (a) Vorderseite beim festen Lager; (b) Oberseite beim festen Lager.



Bild 5.80: B4V2 – Freigelegte Biegebewehrung beim festen Lager.

biegung von $w_1 \approx 248$ mm wurde der Grundversuch abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt noch ungefähr 58 % der Höchstlast. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden.

Nach Beendigung des Grundversuchs musste die Versuchsanlage für den Folgeversuch umgebaut werden. Mit dem Folgeversuch wurde das Trag- und Verformungsverhalten des Kragarms K1 weiter geprüft. Während der Wiederbelastung im Folgeversuch konnte das Belastungsniveau des Grundversuchs bei Entlastungsbeginn erreicht werden. Mit zunehmender Steigerung der Kragarmdurchbiegung konnten lediglich rechts beim festen Lager (Mittelfeldseite) kleinere Abplatzungen des Überdeckungsbetons an der Unterseite beobachtet werden. Der Folgeversuch wurde schliesslich bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 409$ mm abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt noch ungefähr 52 % der Höchstlast. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden.

Für die abschliessende Untersuchung des Versuchskörpers wurde auf der Oberseite der abgeplattete Überdeckungsbeton der Biegezugzone entfernt. Die Bruchzone dehnte sich beim festen Lager über die ganze Versuchskörperbreite aus und erstreckte sich in den äusseren Viertelsbereichen auf eine Länge von 900 bis 1100 mm und im mittleren Bereich auf ungefähr 600 mm. Im Verankerungsbereich von allen freigelegten Stabpaaren der Biegebewehrung konnten grössere vertikale und horizontale Relativverschiebungen der Ankerplatten festgestellt werden, wobei keine zerrissenen Querkraftbewehrungsstäbe entdeckt wurden. Die Querkraftbewehrungsstäbe waren jedoch unterhalb der Biegebewehrungslagen in y-Richtung stark abgebogen. Die Stauung des zur y-Achse parallel verlaufenden Druckfelds auf der Oberseite führte zu einer Abquetschung der Querkraftbewehrungsstäbe, ohne dass diese zerrissen wurden. An der Unterseite war der Überdeckungsbeton der Biegendruckzone in einem Bereich von 150 bis 200 mm rechts vom festen Lager abgeplatzt. Die Oberfläche der abgeplatzten Bereiche zeigte neben dem Lager keine Spuren einer Zerstörung der Rissverzahnung oder eines gegenseitigen Abgleitens der Rissflächen.

5.6 Versuchskörper B5

Der Versuchskörper B5 war als Vergleichsversuch zum Versuchskörper B4 konzipiert. Dieser Versuch sollte den Einfluss der Biegebewehrungsrichtungen auf das Trag- und Verformungsverhalten aufzeigen. Der geometrische Bewehrungsgehalt in x -Richtung betrug $\rho_x = 1,056 \%$, und für die Bewehrungsrichtung galt $\varphi_0 = 0^\circ$. In der Hauptbewehrungsrichtung (x -Richtung) und Querrichtung (y -Richtung) war je eine Bewehrungslage mit Stäben $\varnothing 30$ mm angeordnet, wobei die Hauptbewehrung einen Stababstand von 150 mm und die Querbewehrung einen solchen von 200 mm aufwies. Die beiden Kragarmbereiche wiesen Querkraftbewehrungsgehalte von $\rho_z = 0 \%$ (Kragarm K2) und 0,154 % (Kragarm K1) auf.

5.6.1 Versuch B5V1

Mit dem Versuch B5V1 wurde der Kragarm K2 ($\rho_z = 0 \%$) geprüft. Dabei betrug der Abstand zwischen dem festen und beweglichen Lager 2,36 m (Abstand b). Am ersten Versuchstag wurden die beiden Nullmessungen durchgeführt. Die Laststufen LS 2 und LS 3 folgten am zweiten, die Laststufen LS 4 und LS 5 am dritten Versuchstag. Über Nacht wurde der Versuchsträger entlastet, wobei die erste Belastung am zweiten Versuchstag erfolgte.

Bei einer Kraft von $F_A \approx 400$ kN wurde die erste Laststufe LS 2 durchgeführt. Der gerissene Bereich erstreckte sich über die inneren 65 % des Kragarms und Mittelfelds. Die Risse auf der Oberseite wiesen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 200 bis 250 mm maximale Breiten von 0,05 bis 0,1 mm auf. Auf der Vorder- und Hinterseite des Versuchskörpers hatten sich ungefähr vertikal verlaufende Risse gebildet. Im Bereich des festen Lagers ($x \approx -450 \div 450$ mm) reichten diese über die oberen 70 % der Versuchskörperhöhe, während sich diejenigen in der ersten Hälfte des Kragarms und des Mittelfelds über die obere Hälfte erstreckten. Für die folgenden Laststufen wurde bis zum Erreichen der Bruchlast ein Belastungsintervall von $\Delta F_A \approx 200$ kN gewählt.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 4 ($F_A \approx 800$ kN) bildeten sich vorwiegend in den äusseren Bereichen des Kragarms und des Mittelfelds weitere Risse. Der gerissene Bereich erstreckte sich über die ganze Oberseite, wobei sich die Rissbreiten der vorhandenen Risse geringfügig vergrösserten. Über dem festen Lager (Stelle C) wurden maximale Rissbreiten von 0,25 mm gemessen, während sich die übrigen Risse im Kragarm auf maximal 0,15 mm und im Mittelfeld auf maximal 0,2 mm öffneten. Im Kragarm entstanden auf der Vorder- und Hinterseite je drei neue Risse, während sich die bereits vorhandenen Risse fortpflanzten. Die Risse verliefen in den

Laststufe (LS)	F_A [kN]	F_B [kN]	F_{C1} [kN]	F_{C2} [kN]	$-V_{C1}$ [kNm]	$-M_C$ [kNm]	w_1 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	$\alpha(F_A)$ [°]	Bemerkungen
1	0	-83	107	0	71	83	0	0	0	0	Nullmessung
2	404 376	192 173	787 739	0,7 0,7	475 447	732 687	4,1 4,2	0,27 0,27	-0,01 -0,01	0,10 0,10	Belastungsende Messende
3	606 580	330 313	1126 1083	1,8 1,8	677 651	1058 1017	8,0 8,1	0,47 0,47	-0,01 -0,01	0,17 0,18	Belastungsende Messende
Entlastung 3a	0 0	-83 -83	107 107	0 0	71 71	83 83	1,7 1,8	0,10 0,11	-0,00 0,01	0,01 0,02	Entlastungsende Belastungsbeginn
4	800 765	464 440	1455 1395	3,6 3,4	871 836	1374 1317	12,0 12,2	0,69 0,69	-0,01 -0,02	0,26 0,25	Belastungsende Messende
5	1002 951	604 569	1797 1711	5,7 5,3	1073 1023	1705 1622	16,3 16,3	0,90 0,89	-0,02 -0,02	0,33 0,32	Belastungsende Messende
Bruch K2	1099	671	1961	6,7	1170	1863	18,6	1,01	-0,01	0,35	Schubbruch

Tabelle 5.18: B5V1 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 5.2).

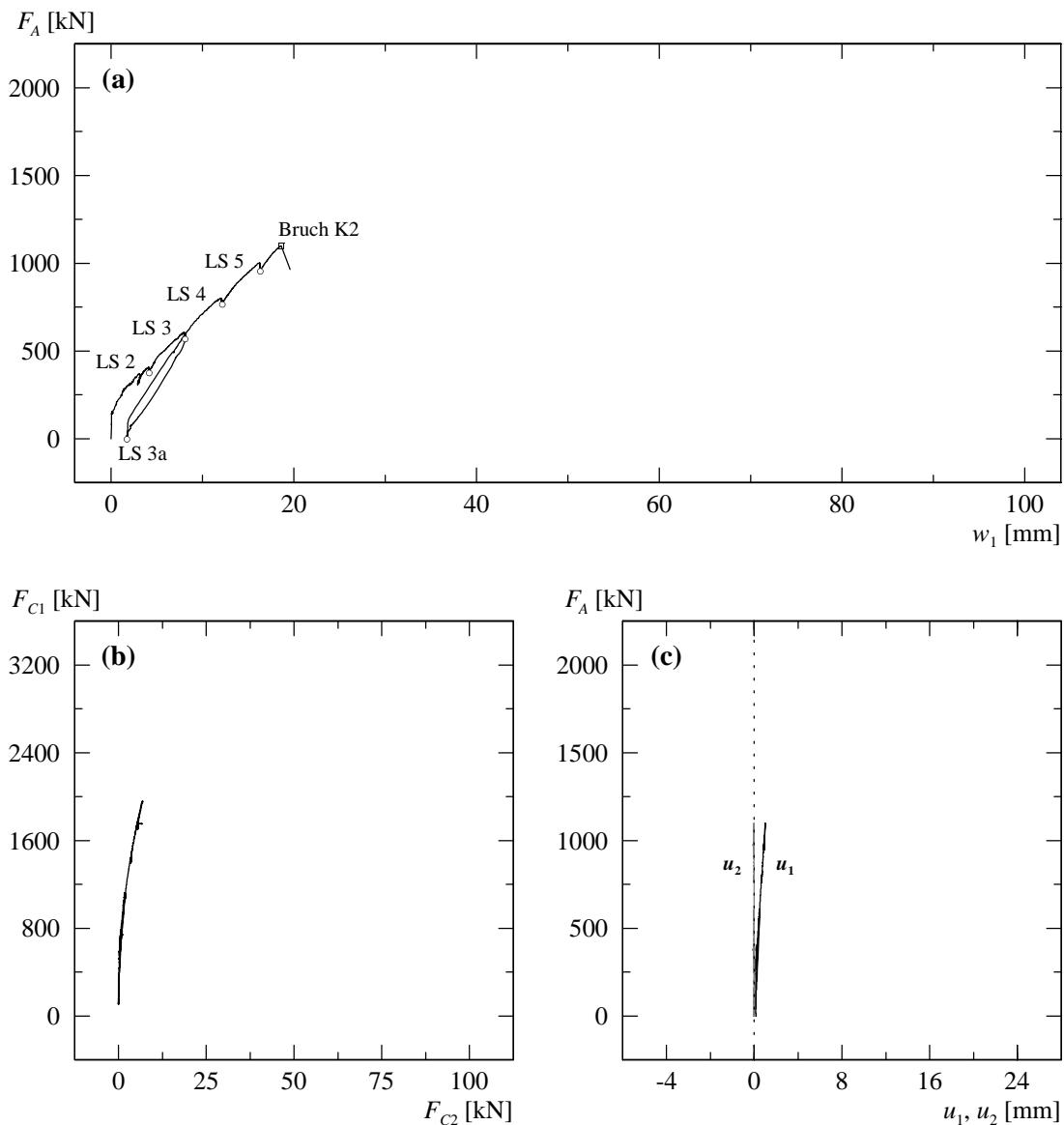


Bild 5.81: B5V1 – (a) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K2; (b) berechnete Lagerreaktionen beim Auflager C; (c) Verformungen der Zugzone über Auflager C.

oberen Bereichen des Kragarms und Mittelfelds vertikal, setzten sich aber im unteren Bereich mit einer leichten Neigung gegen das feste Auflager fort. Im unteren Bereich wiesen die schrägen Risse Neigungen von 45 bis 60° gegenüber der x -Achse auf, während die Risse beim festen Lager ungefähr vertikal verliefen. Die Risse erstreckten sich über die oberen 70 bis 75 % der Versuchskörperhöhe. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe (≈ 50 mm unterhalb der Oberkante) wurden im Bereich des festen Lagers Rissbreiten von 0,15 bis 0,25 mm gemessen, während im Kragarm die Rissbreiten bei 0,05 bis 0,15 mm lagen. Auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) betragen sie beim festen Lager maximal 0,1 mm und im Kragarm maximal 0,05 mm.

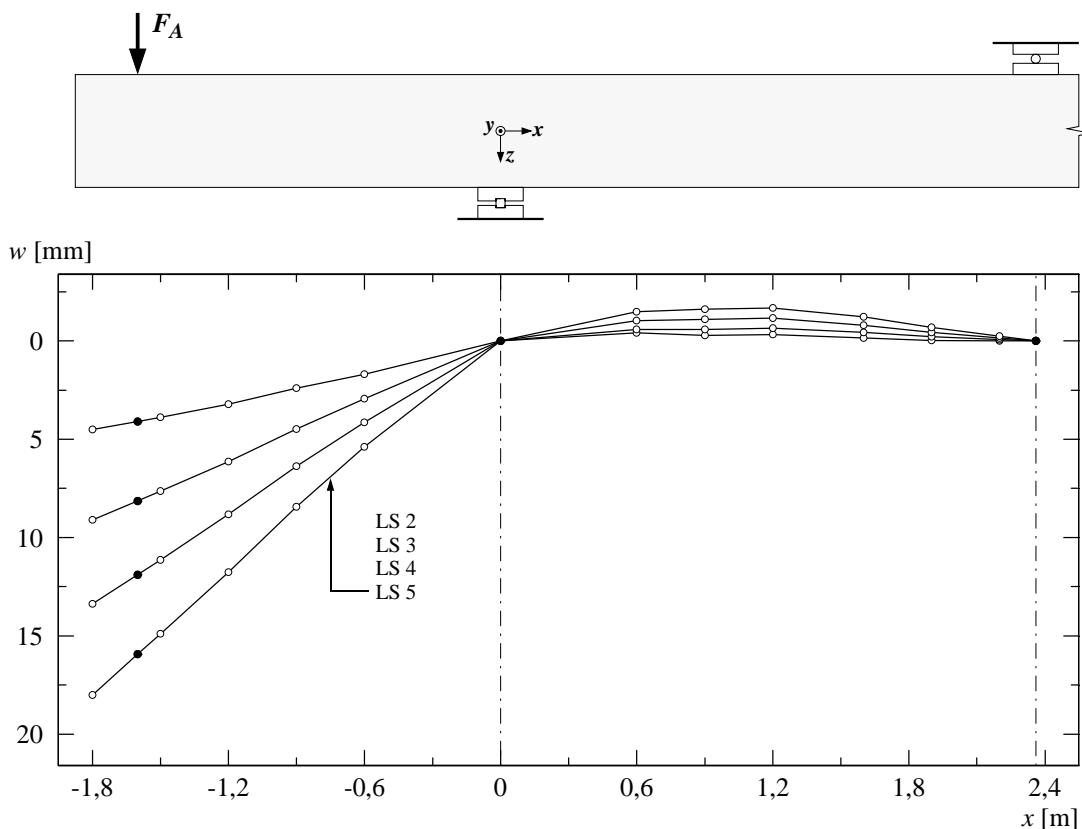
Die letzte Laststufe LS 5 wurde bei einer Kraft von $F_A \approx 1000$ kN durchgeführt. Gegenüber der Laststufe LS 4 hatte sich das Rissbild kaum verändert. Neben der Bildung vereinzelter Verästelungsrisse und in x -Richtung verlaufender Verbundrisse sowie eines neuen Risses beim Kragarmende wurde auf der Oberseite eine Vergrößerung der Rissbreiten festgestellt. Die Rissbreiten betrugen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 200 mm im Kragarm und Mittelfeld 0,05 bis 0,25 mm, über dem festen Lager 0,1 bis 0,35 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite wurde die Verlängerung der bereits vorhandenen Risse beobachtet. Dabei erstreckten sich die Risse über die

Laststufe	Oberseite			Vorderseite – Kragarm		Vorderseite – Festes Lager	
	Kragarm w_{cr} [mm]	Festes Lager w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 2	HR...0,05	0,05...0,10	0,05...0,10	HR...0,05	HR	0,05...0,10	HR
LS 3	HR...0,10	0,05...0,15	0,05...0,15	HR...0,15	HR...0,05	0,10...0,15	HR...0,05
LS 4	HR...0,15	0,10...0,25	0,05...0,20	0,05...0,15	HR...0,05	0,15...0,25	HR...0,10
LS 5	HR...0,25	0,10...0,35	0,05...0,25	0,10...0,25	0,05...0,10	0,15...0,30	0,05...0,15

Tabelle 5.19: B5V1 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

oberen 70 bis 80 % der Versuchskörperhöhe. Die schräg verlaufenden Risse im Kragarm setzten sich nun im unteren Bereich flacher fort, während sich die Risse im Mittelfeld bei ungefähr gleichbleibender Rissneigung verlängerten. Die Neigung der Risse betrug im untersten Bereich des Kragarms ungefähr 25 bis 45° gegenüber der x -Achse. Im Mittelfeld konnte nur eine geringfügige Verlängerung der ungefähr vertikal verlaufenden Risse beobachtet werden, wobei in den äusseren Bereichen des Mittelfelds bei vereinzelten Rissen im untersten Bereich eine leichte Abflachung der Rissneigung feststellbar war. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe lagen die Rissbreiten im Bereich des festen Lagers zwischen 0,15 und 0,3 mm und im Kragarm zwischen 0,1 und 0,25 mm. Auf halber Versuchskörperhöhe wurden über dem festen Lager noch Rissbreiten von 0,05 bis 0,15 mm und im Kragarm solche von maximal 0,1 mm gemessen.

Im weiteren Versuchsfortschritt erfolgte bei einer Kraft von $F_A = 1099$ kN ein spröder Schubbruch des Kragarms. Die dazugehörige Durchbiegung betrug $w_1 = 18,6$ mm beim Kragarm K2. Bis zum Erreichen der Bruchlast waren keine Anzeichen feststellbar, die auf ein baldiges Versagen hinwiesen. Erst zwei Sekunden vor dem Bruch konnte ein Knistern wahrgenommen werden. Der eigentliche Bruchprozess erfolgte schlagartig und ohne Vorankündigung, wobei der untere Betonkeil vollständig abgetrennt wurde. Die leicht s-förmig gekrümmte Bruchfläche und der sich bis zur Krafteinleitung erstreckende Trennriss entlang der Biegebewehrung entstanden unmittel-

**Bild 5.82:** B5V1 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

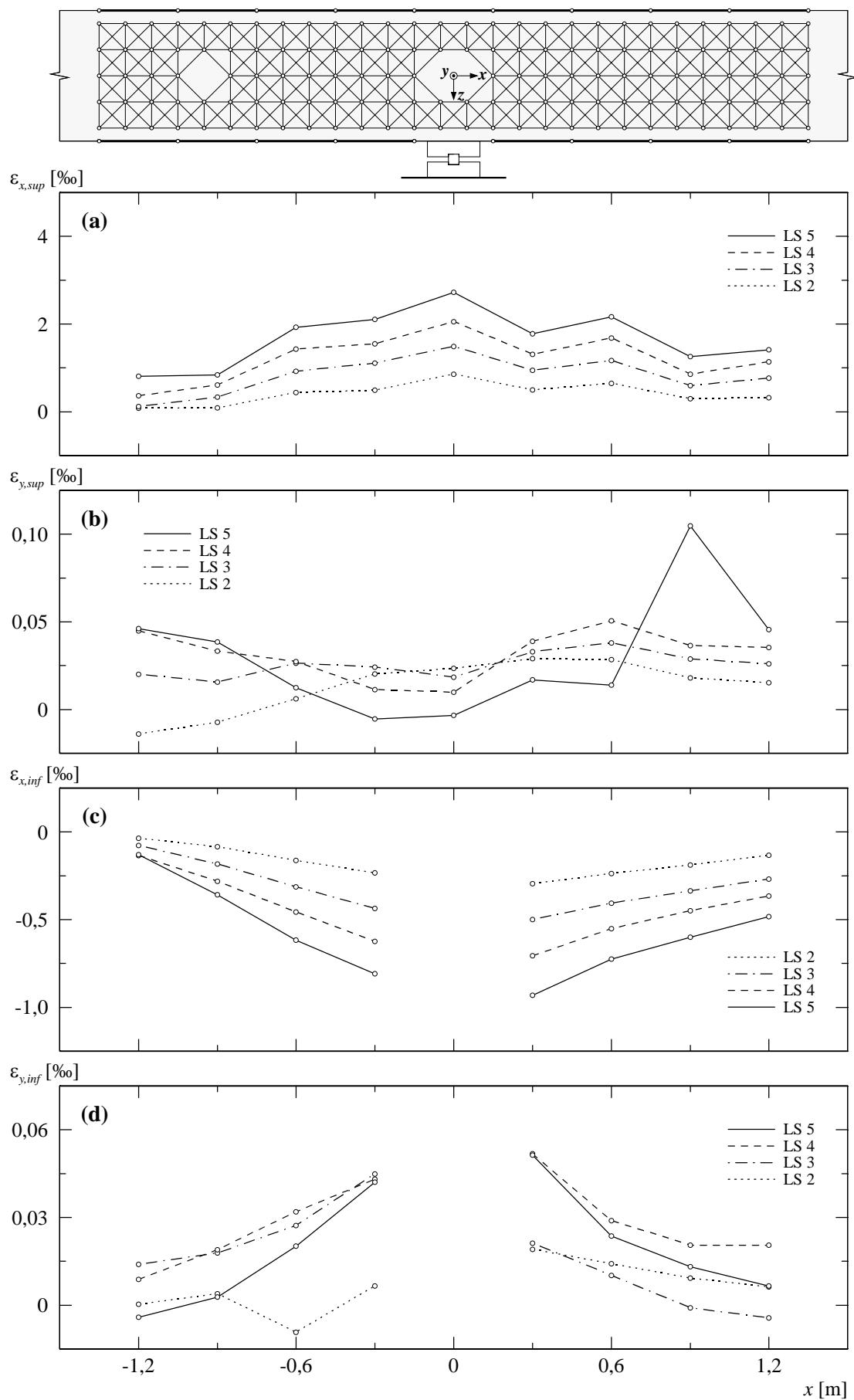


Bild 5.83: B5V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben; (c) mittlere Längsdehnungen unten; (d) mittlere Querdehnungen unten.

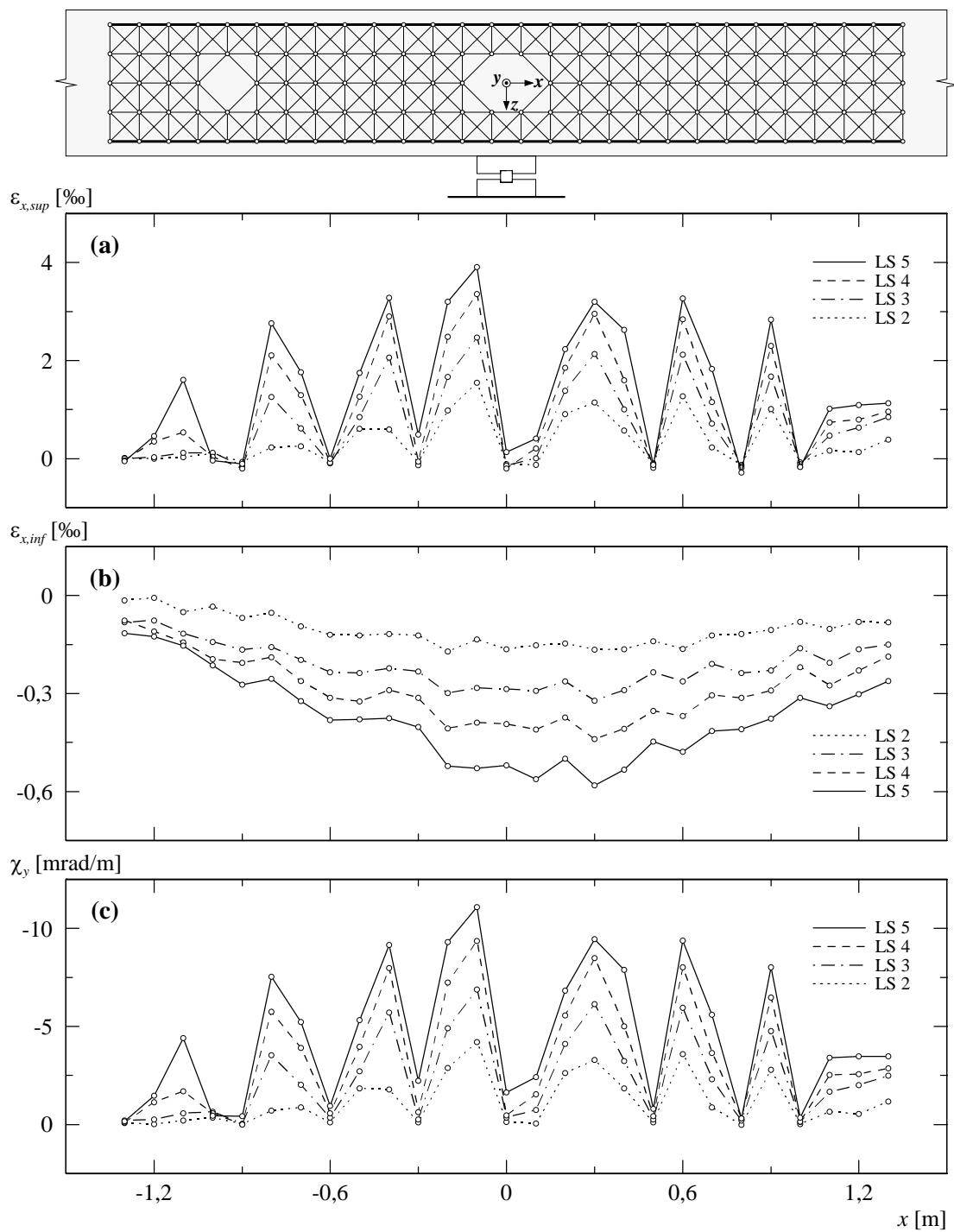


Bild 5.84: B5V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

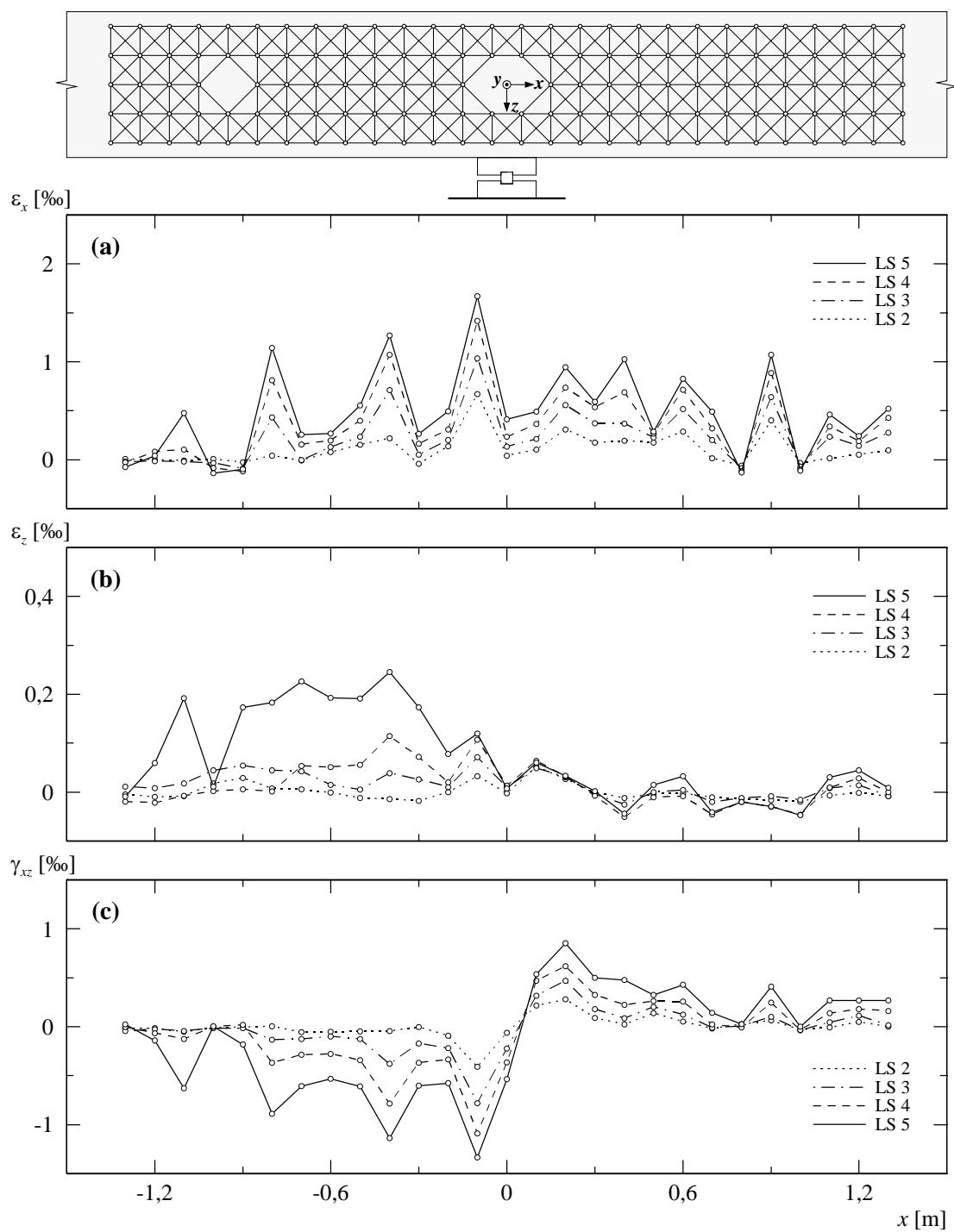
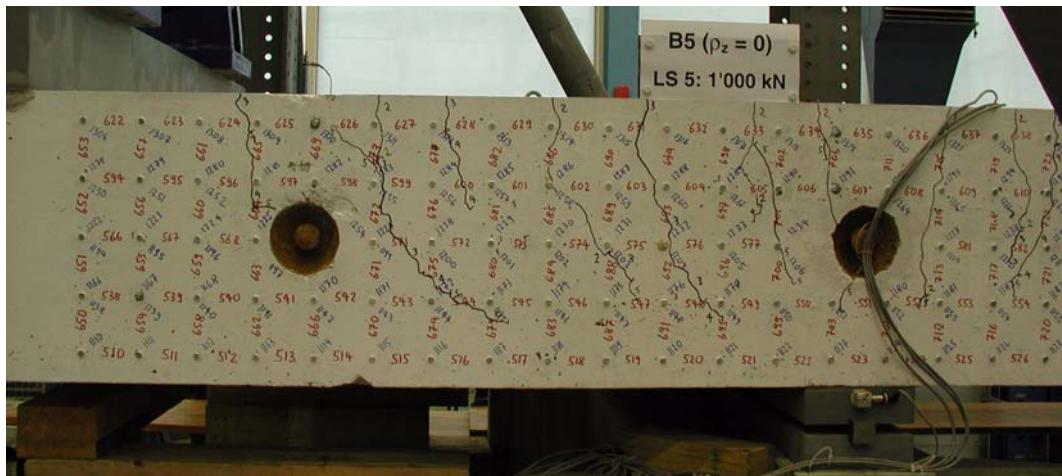
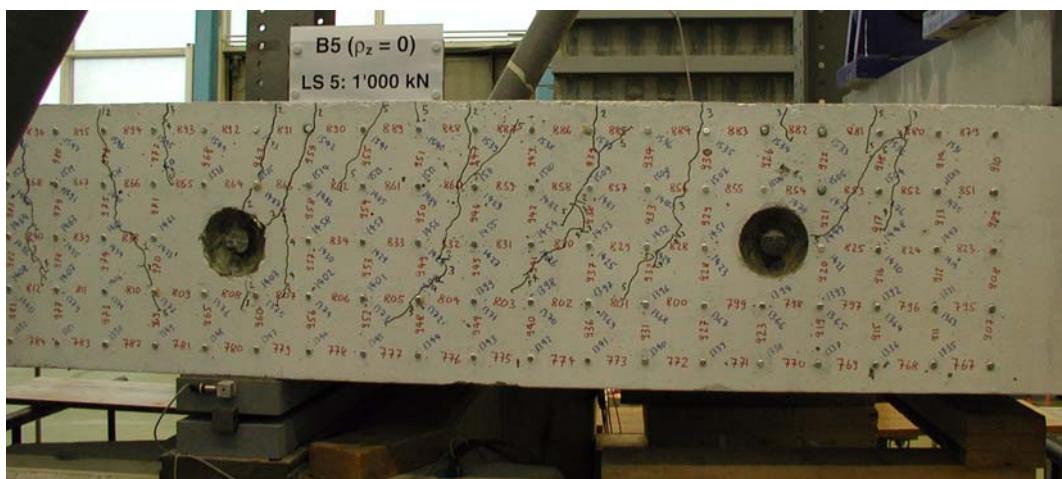


Bild 5.85: B5V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

(a)



(b)



(c)

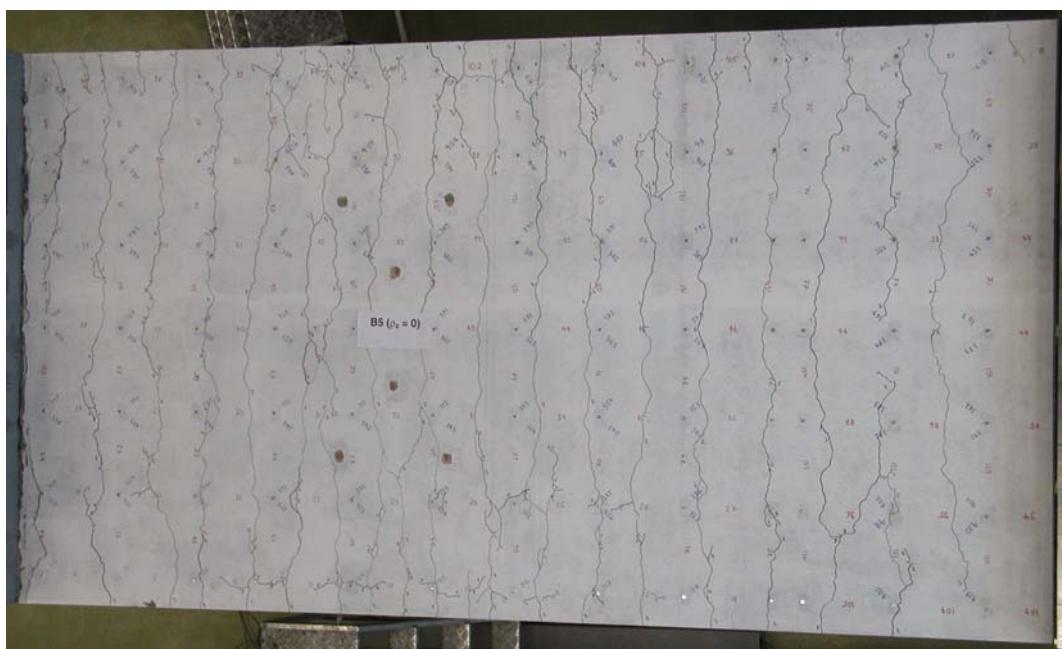
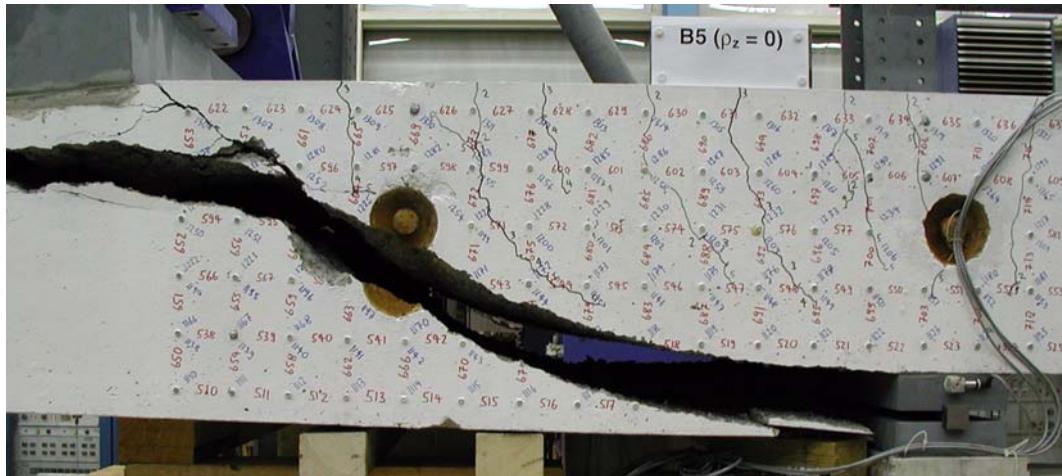
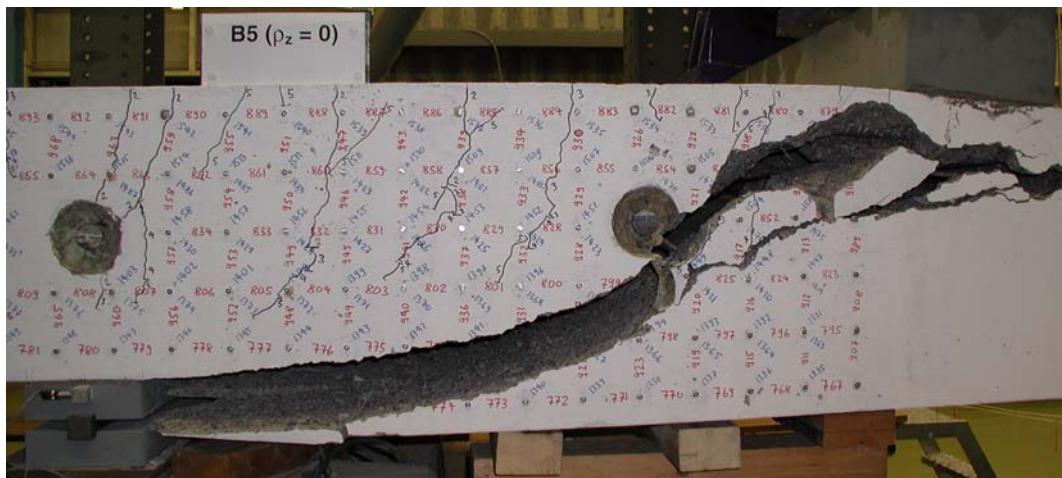


Bild 5.86: B5V1 – Rissbild bei Laststufe LS 5: (a) Vorderseite Kragarm; (b) Hinterseite Kragarm; (c) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.

(a)



(b)



(c)



Bild 5.87: B5V1 – Schubbruch im Kragarm K2: (a) Vorderseite; (b) Hinterseite; (c) Ansicht der Bruchfläche.

bar beim Bruch, wobei auf der Hinterseite der oberste, steil verlaufende Teil der s-förmig gekrümmten Bruchfläche über eine Länge von ungefähr 150 mm einem vorhandenen Schrägriss folgte. Die Steifigkeit der Versuchsanlage genügte nicht, um ein schlagartiges Abtrennen des unteren Betonkeils zu verhindern.

Nach Versuchsende wurde der untere Betonkeil entfernt. Die abschliessende Untersuchung zeigte eine rauhe Beschaffenheit der Bruchfläche und einen gleichmässigen Oberflächenverlauf über die Versuchskörperbreite. Der mittlere, steil verlaufende Teil wies eine Neigung von ungefähr 30 bis 40° gegenüber der x -Achse auf. Im unteren Teil verlief die Bruchfläche über eine Länge von etwa 550 mm bis zum Auflager sehr flach, wobei die Dicke der Abplatzungen in der Biegendruckzone beim Auflagerbereich nur wenige Millimeter betrug.

5.6.2 Versuch B5V2

Mit dem Versuch B5V2 wurde der Kragarm K1 ($\rho_z = 0,154\%$) geprüft. Dabei betrug der Abstand zwischen dem festen und beweglichen Lager 2,36 m (Abstand b). Am ersten Versuchstag wurden die beiden Nullmessungen durchgeführt. Die Laststufen LS 2 und LS 3 folgten am zweiten, die Laststufen LS 4 und LS 5 am dritten und die Laststufe LS 6 am vierten Versuchstag. Die erste Belastung erfolgte am zweiten Versuchstag, wobei zwischen der zweiten Nullmessung und der Laststufe LS 2 ein Wochenende lag. Über Nacht wurde der Versuchsträger jeweils entlastet.

Bei einer Kraft von $F_A \approx 400$ kN wurde die erste Laststufe LS 2 durchgeführt. Der gerissene Bereich erstreckte sich über die inneren 60 % des Kragarms und das gesamte Mittelfeld. Die Risse auf der Oberseite wiesen mittlere Rissabstände von 200 bis 250 mm auf, und die Rissbreiten lagen bei maximal 0,05 bis 0,1 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite des Versuchskörpers hatten sich ungefähr vertikal verlaufende Risse gebildet. In der ersten Hälfte des Kragarms und des Mittelfelds reichten diese über die obere Hälfte und im Bereich des festen Lagers ($x \approx -450 \div 450$ mm) über die oberen 60 bis 65 % der Versuchskörperhöhe. Für die folgenden Laststufen wurde zwischen den Laststufen LS 2 und LS 3 ein Belastungsintervall von $\Delta F_A \approx 400$ kN gewählt. Anschliessend wurde bis zum Erreichen der Höchstlast das Belastungsintervall auf $\Delta F_A \approx 200$ kN reduziert.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 3 ($F_A \approx 800$ kN) bildeten sich vorwiegend in den äusseren Bereichen des Kragarms sowie über dem festen Lager weitere Risse. Neben der Bildung vereinzelter Verästelungsrisse und in x -Richtung verlaufender Verbundrisse über dem festen Lager (Stelle C) sowie von zwei neuen Rissen beim Kragarmende wurde auf der Oberseite eine Vergrösserung der Rissbreiten festgestellt. Die Rissbreiten betrugen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 200 bis 250 mm im Kragarm 0,05 bis 0,15 mm, im Mittelfeld 0,1 bis 0,25 mm und über dem festen Lager 0,05 bis 0,3 mm. Im Kragarm entstanden auf der Vorderseite zwei und auf der Hinterseite drei neue Risse, während sich die bereits vorhandenen Risse fortpflanzten. Die Risse verliefen in den oberen Bereichen des Kragarms und Mittelfelds vertikal, setzten sich dann aber im unteren Bereich des Kragarms mit einer leichten Neigung gegen das feste Auflager fort. Im unteren Bereich wiesen die schrägen Risse im Kragarm Neigungen von 45 bis 60° gegenüber der x -Achse auf, während sich die Risse beim festen Lager und im Mittelfeld bei gleichbleibender

Laststufe (LS)	F_A [kN]	F_B [kN]	F_{C1} [kN]	F_{C2} [kN]	$-V_{C1}$ [kN]	$-M_C$ [kNm]	w_1 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	$\alpha(F_A)$ [°]	Bemerkungen
1	0	-82	108	0	71	84	0	0	0	0	Nullmessung
2	403 376	191 173	785 740	0,0 0,3	475 448	729 686	4,4 4,5	0,31 0,29	-0,01 -0,04	0,00 0,05	Belastungsende Messende
3	801 782	464 450	1454 1421	2,2 1,4	872 853	1371 1338	11,7 11,9	0,74 0,80	-0,04 0,01	0,16 0,11	Belastungsende Messende
Entlastung 3a	0 0	-82 -82	108 108	0 0	71 71	84 84	3,3 3,3	0,24 0,19	0,00 -0,05	-0,06 0,03	Entlastungsende Belastungsbeginn
4	998 951	599 567	1787 1708	3,3 3,2	1069 1023	1690 1615	15,6 15,7	1,01 1,01	0,00 -0,00	0,19 0,19	Belastungsende Messende
5	1205 1147	742 703	2137 2039	5,8 5,5	1276 1218	2029 1935	20,6 21,0	1,34 1,36	-0,01 -0,01	0,28 0,28	Belastungsende Messende
Entlastung 5a	0 0	-82 -82	108 108	0 0	71 71	84 84	4,7 4,6	0,31 0,31	-0,01 -0,01	-0,05 -0,05	Entlastungsende Belastungsbeginn
6	1364 1247	863 781	2417 2218	15,4 13,9	1435 1318	2313 2121	43,7 43,8	5,57 5,64	-0,01 -0,02	0,65 0,64	Belastungsende Messende
HL	1399	897	2486	23,5	1470	2394	65,9	9,00	0,01	0,96	Höchstlast
Entlastung	917	613	1719	57,4	987	1724	249,4	13,48	0,16	3,59	Entlastungsbeginn

Tabelle 5.20: B5V2 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 5.3).

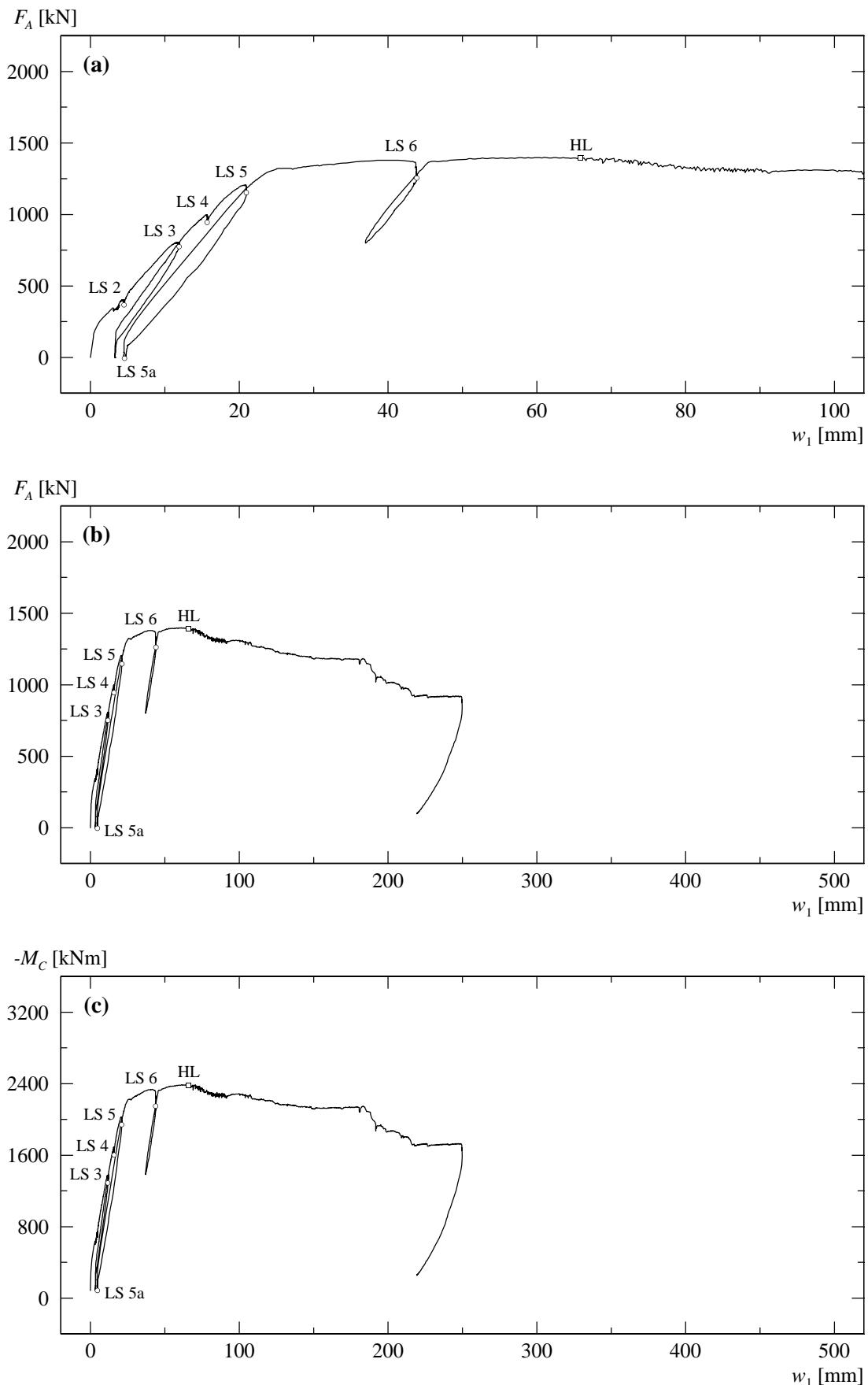


Bild 5.88: B5V2 – (a) und (b) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K1; (c) berechnetes Momenten-Durchbiegungsdiagramm.

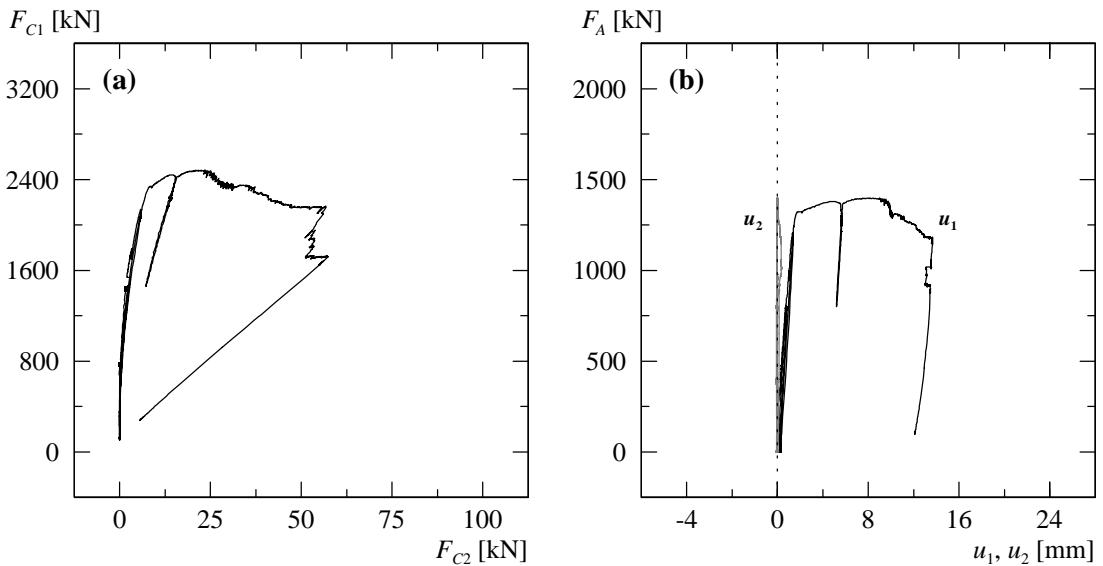


Bild 5.89: B5V2 – (a) Berechnete Lagerreaktionen beim Auflager C; (b) Verformungen der Zugzone über Auflager C.

Rissneigung verlängerten. Die Risse erstreckten sich über die oberen 55 bis 75 % der Versuchskörperhöhe. Auf der Höhe der obersten Deformatormessreihe (≈ 50 mm unterhalb der Oberkante) wurden im Bereich des festen Lagers Rissbreiten von 0,1 bis 0,25 mm gemessen, während im Kragarm die Rissbreiten zwischen 0,05 und 0,2 mm lagen. Auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) betrugen die maximalen Breiten beim festen Lager 0,1 mm und im Kragarm 0,05 mm.

Bis zur Laststufe LS 5 ($F_A \approx 1200$ kN) entstanden auf der Oberseite mehrere in x -Richtung verlaufende Verbundrisse. Neben der Vergrösserung der Rissbreiten wurde bei den bestehenden Rissen eine weitere Verästelung beobachtet. In den äusseren Drittelsbereichen der Versuchskörperbreite wiesen die Verästelungsrisse über dem festen Lager einen mittleren Rissabstand von ungefähr 100 mm auf, während die übrigen Rissabstände bei 200 bis 250 mm lagen. Über dem festen Lager und im Mittelfeld wurden Rissbreiten zwischen 0,05 und 0,4 mm gemessen. Die Rissbreiten im Kragarm vergrösserten sich auf maximal 0,3 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite konnte die Verlängerung sowie vereinzelte Verästelungen der bestehenden Risse festgestellt werden. Dabei erstreckten sich die Risse im Kragarm über die oberen 75 bis 85 % und im Mittelfeld über die oberen 70 bis 75 % der Versuchskörperhöhe. Bei den anfänglich relativ steil verlaufenden Rissen im Bereich des Kragarms wurde im unteren Bereich eine deutliche Abflachung der Risse beobachtet. Auf halber Versuchskörperhöhe wurden Rissneigungen von ungefähr 45 bis 55° gegenüber der x -Achse gemessen, die sich im unteren Bereich schliesslich auf 10 bis 25° verringerten. Die Risse im Mittelfeld und in unmittelbarer Nähe des festen Lagers verliefen im oberen Bereich ungefähr vertikal, setzten sich aber im unteren Bereich mit einer leichten Neigung gegen das feste Lager fort. Die Neigung der Risse lag auf halber Versuchskörperhöhe zwischen 45 und 65° gegenüber der x -Achse. Auf der Höhe der obersten Deformatormessreihe betrugen die Rissbreiten im Bereich des festen Lagers 0,15 bis maximal 0,4 mm und im Kragarm 0,15 bis 0,3 mm. Auf halber Versuchskörperhöhe lagen die Rissbreiten sowohl über dem festen Lager als auch im Kragarm zwischen 0,05 und 0,15 mm.

Ab einer Kraft von $F_A \approx 1330$ kN und einer dazugehörenden Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 25$ mm konnte der Fliessbeginn der Biegebewehrung festgestellt werden. Im weiteren Versuchsfortschritt wurde die Durchbiegung des Kragarms K1 vergrössert. Die letzte Laststufe LS 6 wurde bei einer Kraft von $F_A \approx 1350$ kN und einer Durchbiegung von $w_1 \approx 43,7$ mm durchgeführt. Neben der Verlängerung und Verästelung der bestehenden Risse wurde bis zur Laststufe LS 6 keine grosse Veränderung des Rissbildes beobachtet. Dabei konzentrierte sich das Rissbreitewachstum der bestehenden Risse vorwiegend auf die Bereiche beim festen Lager. Auf der Oberseite entstand über dem festen Lager ein neuer Riss, und es bildeten sich weitere in x -Richtung

Laststufe	Oberseite			Vorderseite – Kragarm		Vorderseite – Festes Lager	
	Kragarm w_{cr} [mm]	Festes Lager w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 2	0,05...0,10	0,05...0,10	0,05...0,10	HR...0,05	–	HR...0,15	HR...0,05
LS 3	0,05...0,15	0,05...0,30	0,10...0,25	0,05...0,20	HR...0,05	0,10...0,25	HR...0,10
LS 4	0,10...0,25	0,10...0,40	0,05...0,35	0,10...0,25	0,05...0,10	0,10...0,30	0,05...0,15
LS 5	0,10...0,30	0,10...0,40	0,05...0,40	0,10...0,30	0,05...0,15	0,15...0,45	0,05...0,15
LS 6	0,10...0,60	0,20...2,50	0,10...0,60	0,15...0,35	0,10...0,30	0,30...2,50	0,25...0,80

Tabelle 5.21: B5V2 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

verlaufende Verbundrisse sowie vereinzelte Verästelungsrisse, wobei die Rissabstände zwischen 50 und 200 mm lagen. Beim festen Lager wurde ein Riss mit einer Breite von 2,5 mm gemessen. Die übrigen Risse über dem festen Lager wiesen Breiten von 0,2 bis 1,8 mm auf, während die Rissbreiten sowohl im Kragarm als auch im Mittelfeld zwischen 0,1 und maximal 0,6 mm lagen. Auf der Vorder- und Hinterseite wurde neben der Verlängerung der bestehenden Risse die Bildung weiterer Verästelungsrisse festgestellt. Im Bereich des Kragarms entstanden ausgeprägte Verästelungsrisse, welche eine Rissneigung von ungefähr 40 bis 45° gegenüber der x -Achse aufwiesen und sich von der Biegendruckzone bis zur Oberseite erstreckten. Die übrigen schräg verlaufenden Risse im Kragarm setzten sich nun im untersten Bereich mit sehr flacher Neigung gegen das feste Lager fort, während sich die Risse über dem festen Lager und im Mittelfeld bei ungefähr gleichbleibender Rissneigung verlängerten. Im Kragarm erstreckten sich die Risse über die oberen 80 bis 90 % und im Mittelfeld über die oberen 75 % der Versuchskörperhöhe. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe wies ein Riss über dem festen Lager eine Rissbreite von 2,5 mm auf. Die übrigen Rissbreiten lagen im Bereich des festen Lagers zwischen 0,3 und 1,2 mm und im Kragarm zwischen 0,15 und 0,35 mm. Auf halber Versuchskörperhöhe wurden über dem festen Lager noch Rissbreiten von 0,25 bis maximal 0,8 mm gemessen, während die Rissbreiten im Kragarm 0,1 bis 0,3 mm betrugen.

Mit zunehmender Kragarmdurchbiegung wurde bei einer Durchbiegung von $w_1 = 65,9$ mm beim Kragarm K1 die Höchstlast erreicht. Die entsprechende Kraft betrug $F_A = 1399$ kN. Kurz darauf bildeten sich auf der Mittelfeldseite die ersten Betonstauchungsrisse in der Biegendruckzone beim festen Lager.

Anschliessend wurde die Durchbiegung des Kragarms K1 vergrössert. Bei einer Durchbiegung von $w_1 \approx 70$ mm platzten auf der Mittelfeldseite beim festen Lager erste Teile des Überdeckungsbetons an der Unterseite ab, wobei sich mit zunehmender Kragarmdurchbiegung wiederholt grössere Teile des Überdeckungsbetons ablösten. Bis zu einer Durchbiegung von $w_1 \approx 180$ mm war ein gleichmässiger Kraftabfall feststellbar. Im weiteren Versuchsfortschritt konnte bei Kragarmdurchbiegungen von $w_1 \approx 180$ bis 215 mm das Zerreissen von Querkraftbewehrungsstäben akustisch wahrgenommen sowie grössere Kraftabfälle beobachtet werden. Bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 249$ mm wurde der Versuch abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt noch ungefähr 66 % der Höchstlast. Bis zum Belastungsstop war an der Unterseite der Überdeckungsbeton der Biegendruckzone in einem Bereich von ungefähr 350 mm rechts vom festen Lager (im Mittelfeld) abgeplatzt. Im äusseren Bereich ($x \approx 450 \div 1300$ mm) hatte sich ein klaffender, horizontal verlaufender Trennriss unterhalb der Ankerplatten der Querkraftbewehrungsstäbe gebildet, wobei im Bereich der vorderen 80 % der Versuchskörperbreite eine ungefähr 40 mm dicke Betonplatte mit einer Abmessung von 850 mm \times 1800 mm abgelöst wurde. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden. Während der Entlastungsphase wurde schliesslich die abgelöste Betonplatte vollständig abgetrennt.

Bei der abschliessenden Untersuchung des Versuchskörpers konnte auf der Mittelfeldseite beim festen Lager eine ausgeprägte Rissfläche festgestellt werden. Diese erstreckte sich mit einer Neigung von 45° gegenüber der x -Achse vom rechten Lagerrand bis zur Oberseite. An der Unterseite war der Überdeckungsbeton der Biegendruckzone in einem Bereich von maximal 1200 mm

rechts vom festen Lager (im Mittelfeld) abgeplatzt. Die Bruchzone erstreckte sich im Bereich der vorderen 80 % der Versuchskörperbreite ($y \approx -800 \div 1000 \text{ mm}$) auf eine Länge von ungefähr 1200 mm ($x \approx 100 \div 1300 \text{ mm}$), während sich die Abplatzungen im Bereich der hinteren 20 % der Versuchskörperbreite ($y \approx -1000 \div -800 \text{ mm}$) auf eine Länge von ungefähr 750 mm ($x \approx 100 \div 850 \text{ mm}$) beschränkten. In unmittelbarer Auflagernähe, in einem Abstand von 100 mm vom rechten Lagerplattenrand ($x \approx 200 \text{ mm}$), wiesen die Abplatzungen eine maximale Dicke von ungefähr 100 mm auf. Mit zunehmendem Abstand zum Lager verringerten sich diese stark, und die Dicke betrug in einer Entfernung von 500 mm ($x \approx 600 \text{ mm}$) noch ungefähr 50 mm. Im äusseren Bereich ($x \approx 600 \div 1200 \text{ mm}$) wurde eine Dicke von ungefähr 30 bis 40 mm gemessen, wobei die abgeplatzte Betonschicht unterhalb der Ankerplatten der Querkraftbewehrungsstäbe lag. Die unter 45° geneigte Rissfläche zeigte im unteren, oberhalb der Betonüberdeckung liegenden Bereich ($z \approx 150 \div 190 \text{ mm}$) ausgeprägte Spuren einer Zerstörung der Rissverzahnung beziehungsweise eines gegenseitigen Abgleitens der Rissufer. Auf der Vorder- und Hinterseite wurde eine vertikale Relativverschiebung der rechten Versuchskörperhälfte (Mittelfeldseite) von ungefähr 15 bis 20 mm gemessen. Ausser den beiden äussersten Querkraftbewehrungsstäben waren in der ersten Reihe neben dem Auflager alle Stäbe in der Rissfläche zerrissen. Dabei zeigten alle abgetrennten Querkraftbewehrungsstäbe eine Bruchfläche, die unter einem Winkel von ungefähr 45° gegenüber der Stabachse verlief.

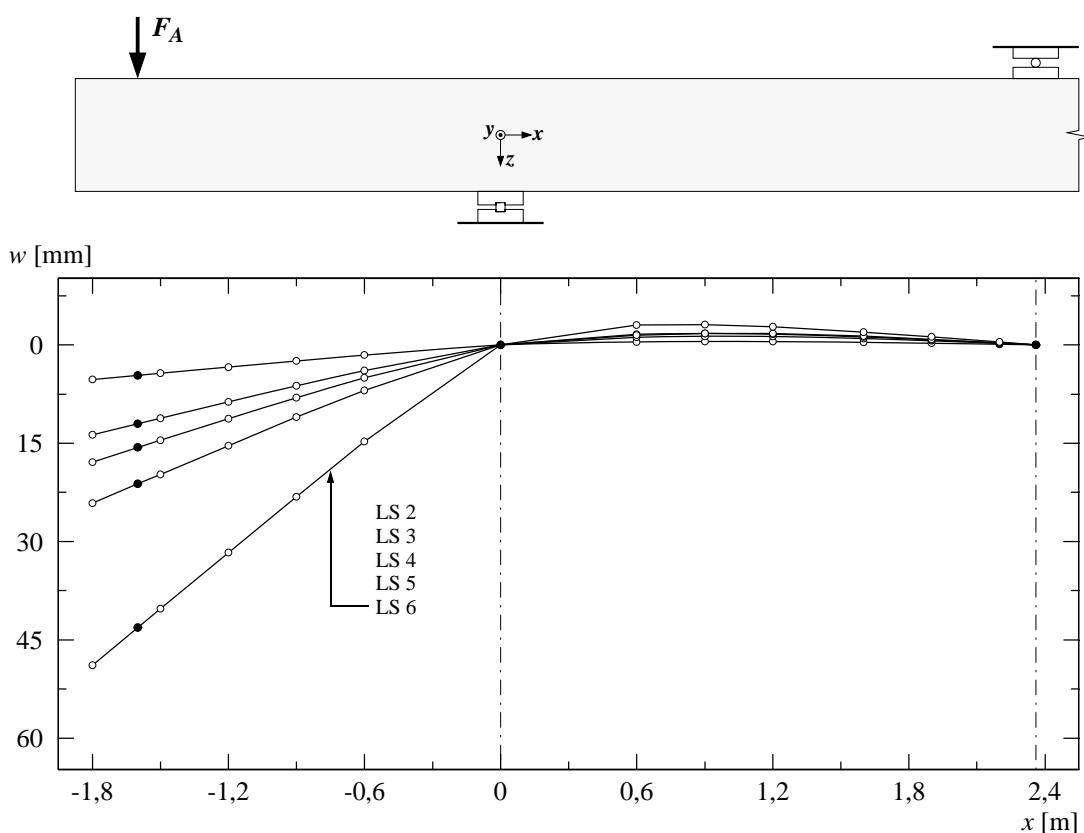


Bild 5.90: B5V2 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

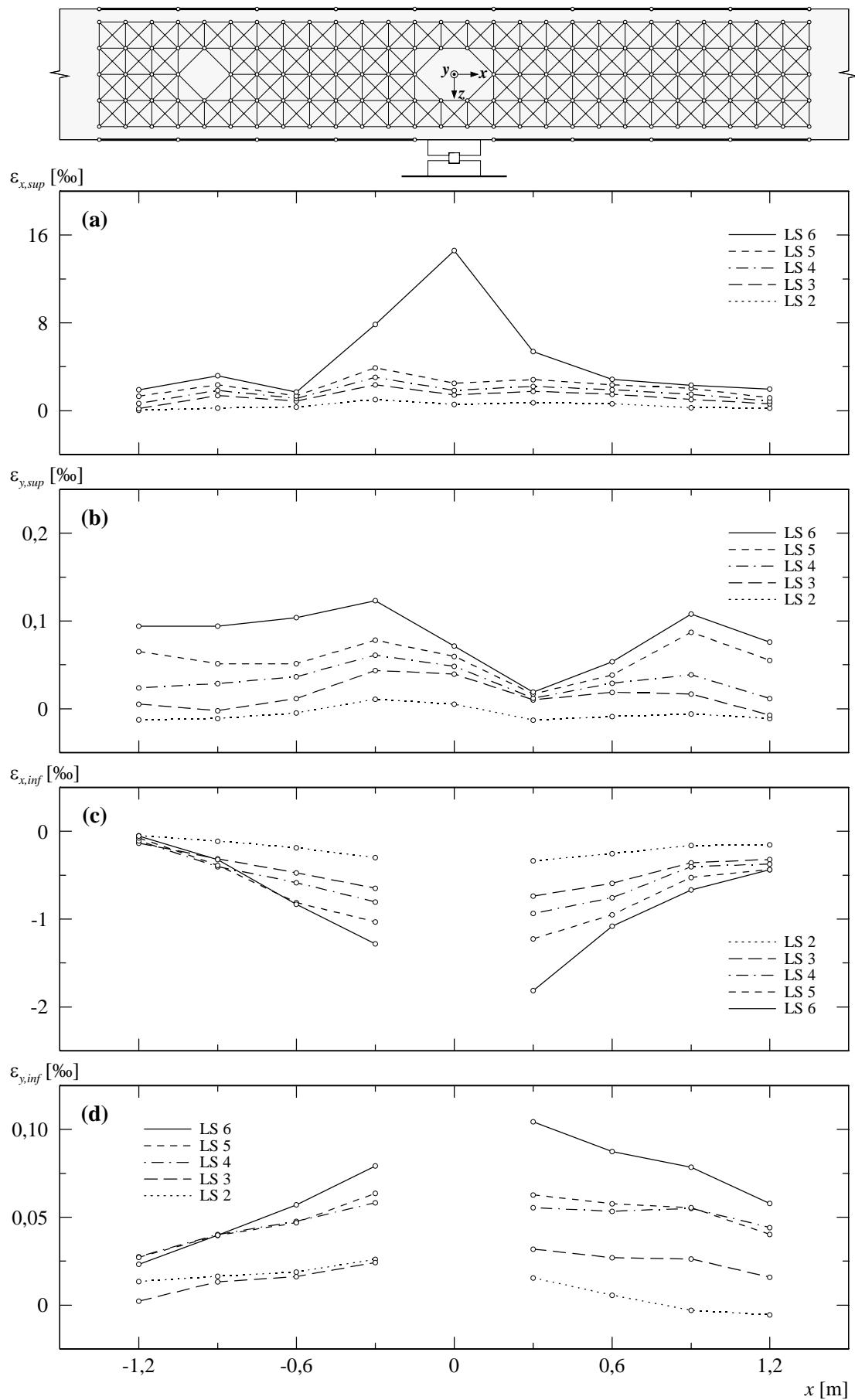


Bild 5.91: B5V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben; (c) mittlere Längsdehnungen unten; (d) mittlere Querdehnungen unten.

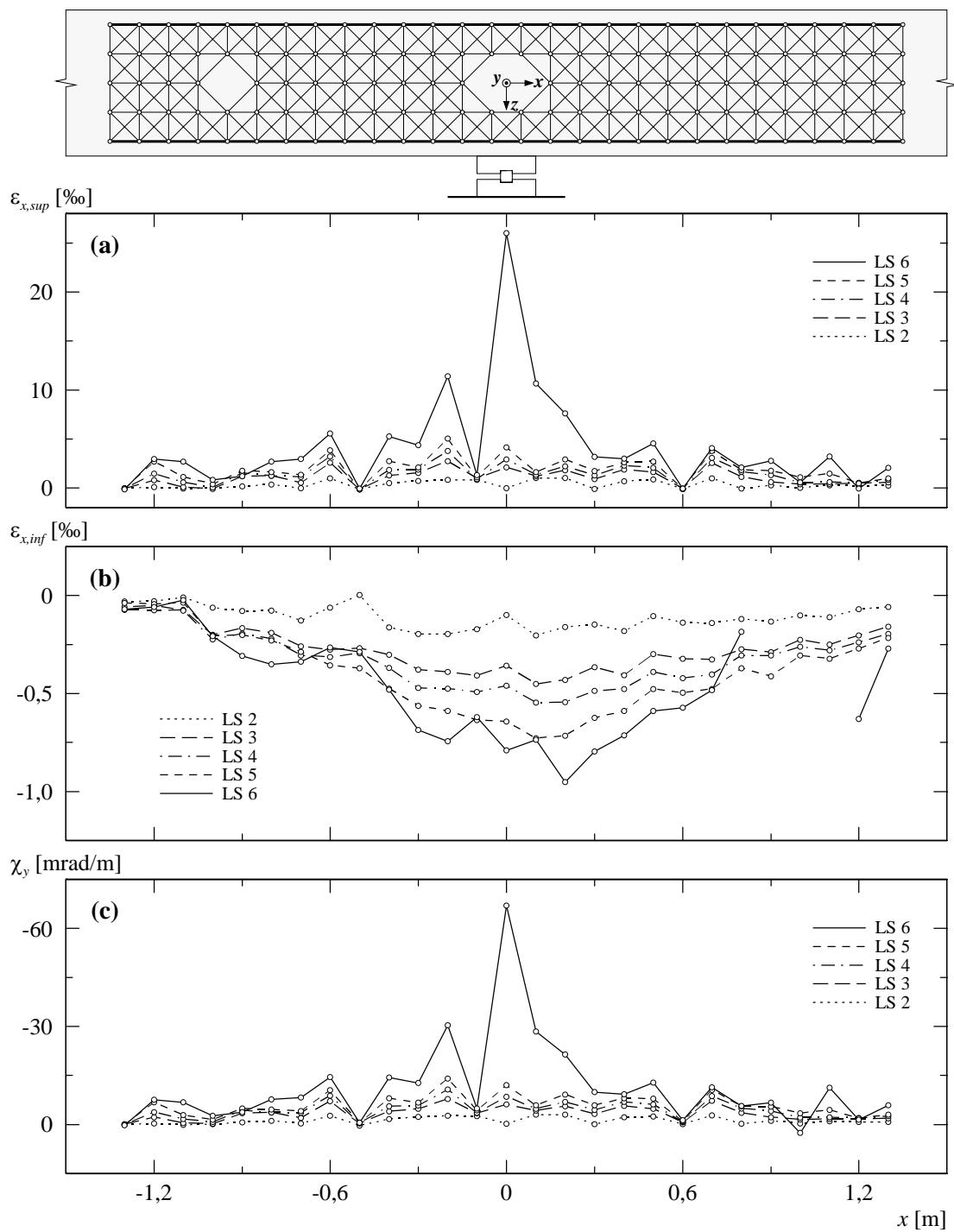


Bild 5.92: B5V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

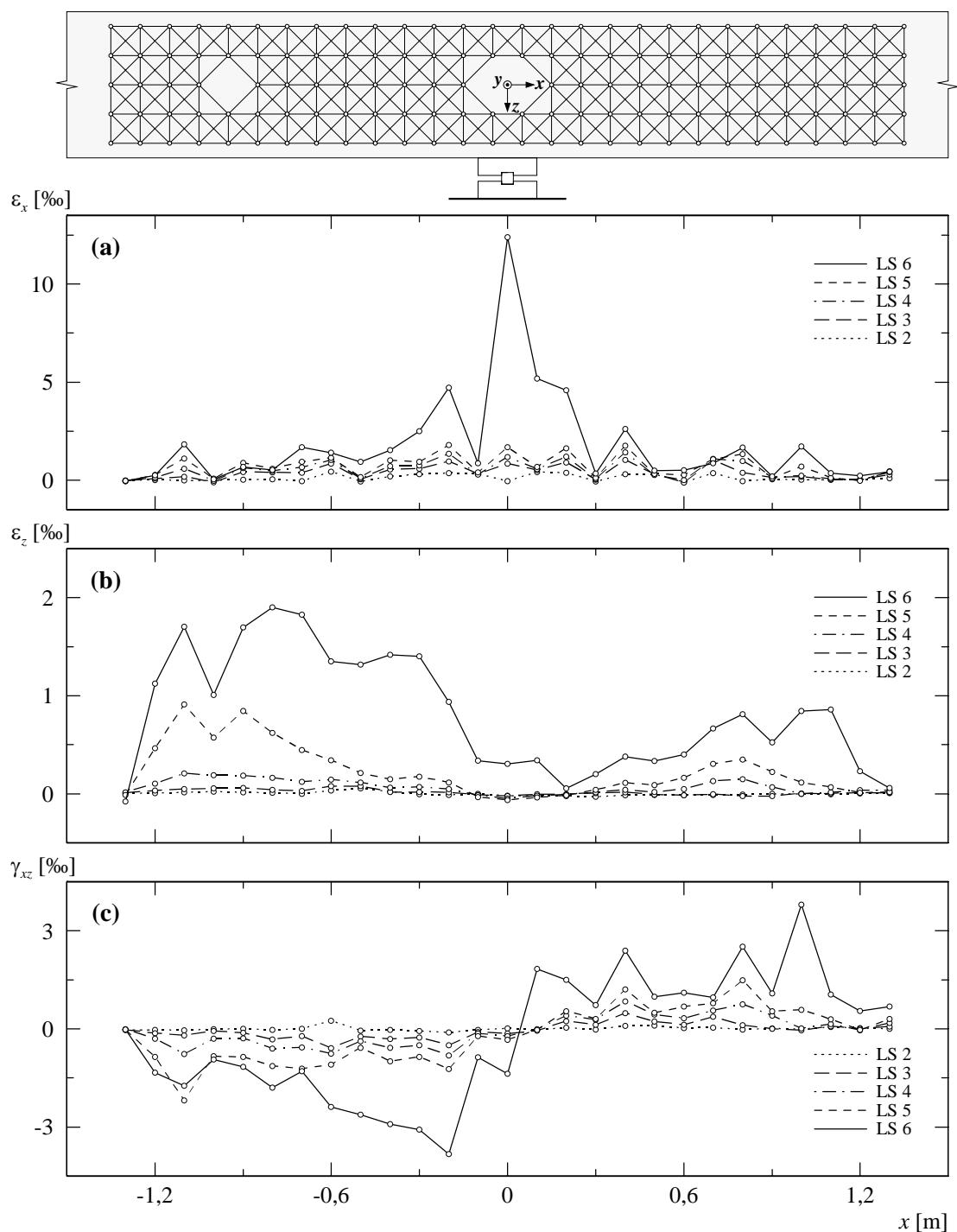
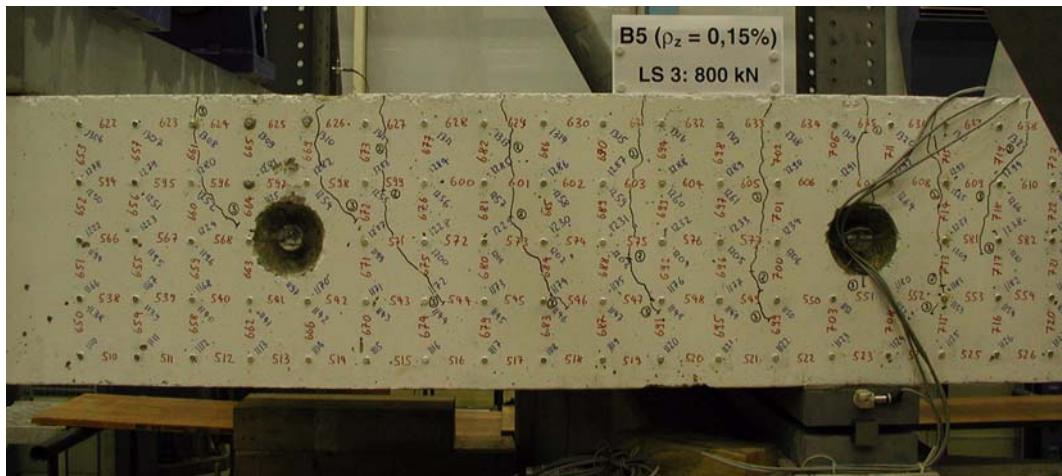


Bild 5.93: B5V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

(a)



(b)

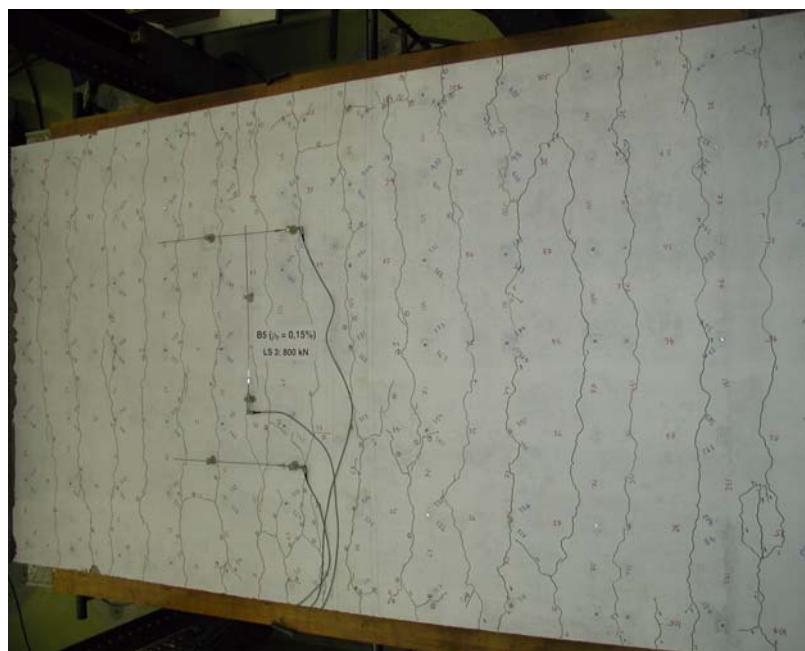


Bild 5.94: B5V2 – Rissbild bei Laststufe LS 3: (a) Vorderseite Kragarm; (b) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.

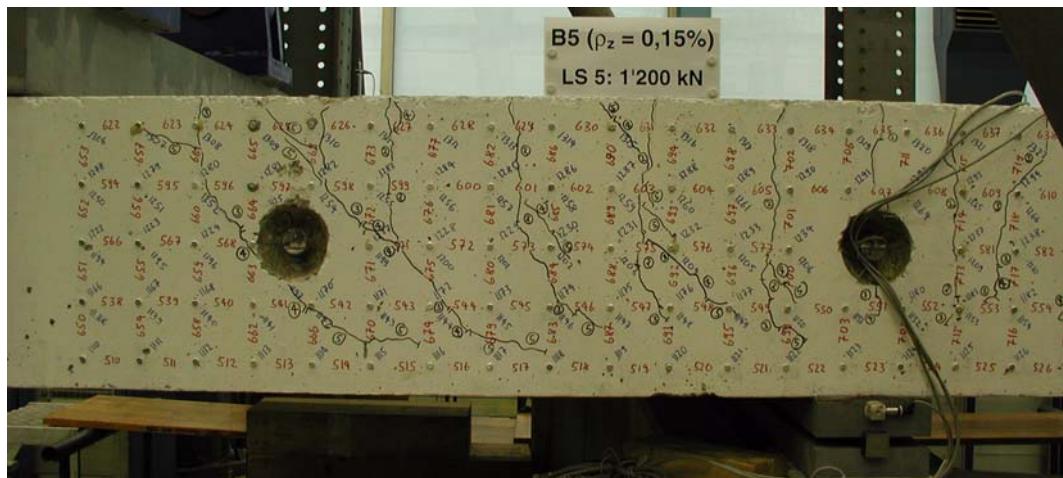


Bild 5.95: B5V2 – Rissbild bei Laststufe LS 5: Vorderseite Kragarm.

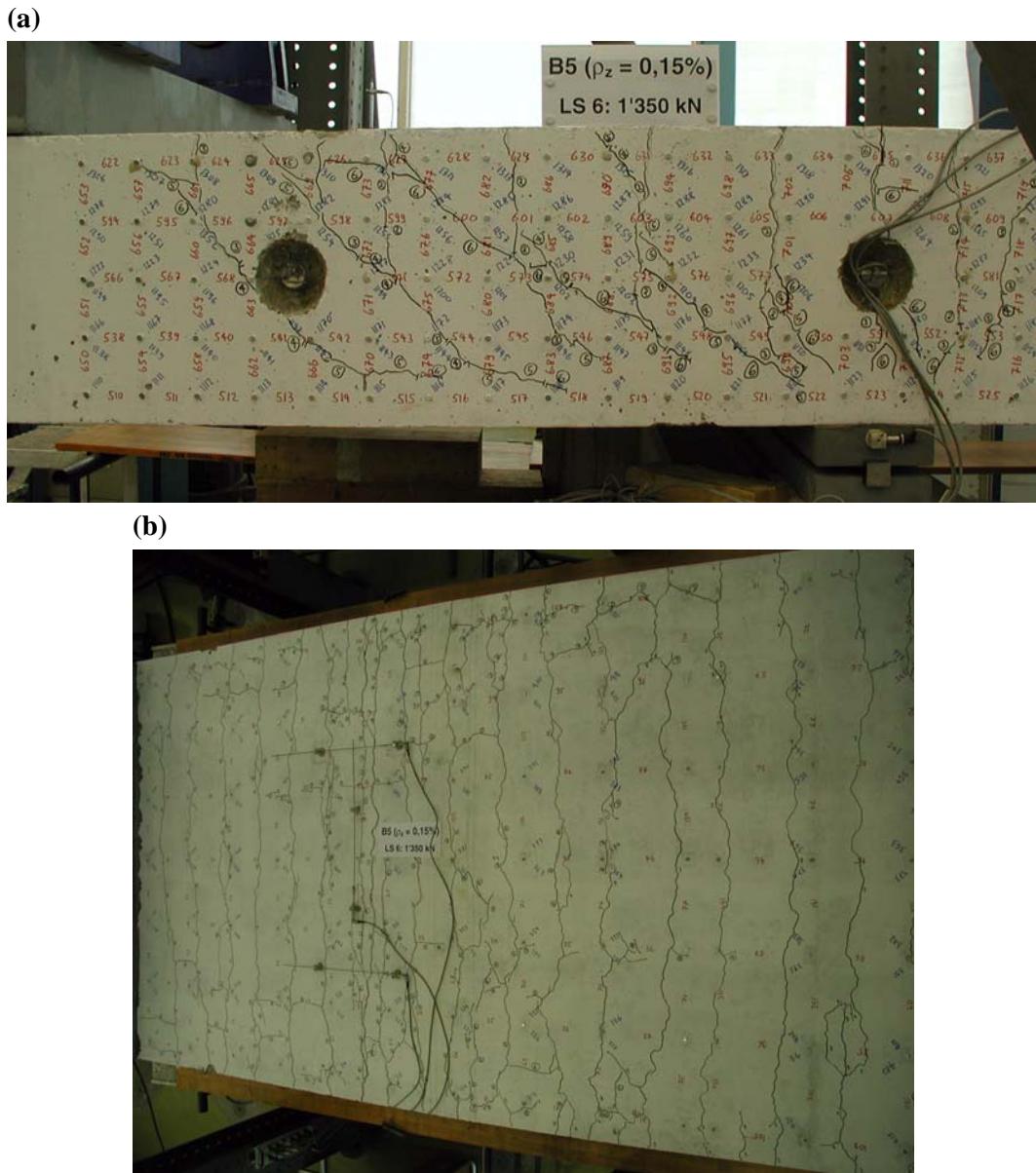


Bild 5.96: B5V2 – Rissbild bei Laststufe LS 6: (a) Vorderseite Kragarm; (b) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.



Bild 5.97: B5V2 – Bruchzone bei Versuchsende ($w_1 \approx 249$ mm): Vorderseite beim festen Lager.

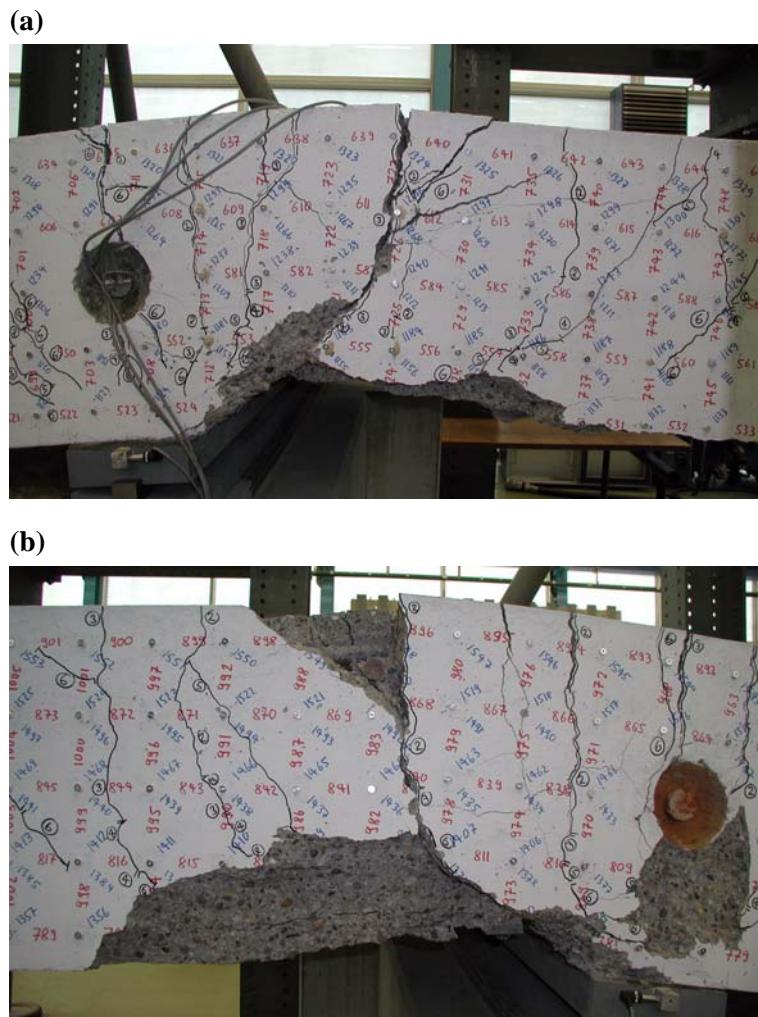


Bild 5.98: B5V2 – Bruchzone nach Versuchsende: (a) Vorderseite beim festen Lager; (b) Hinterseite beim festen Lager.



Bild 5.99: B5V2 – Abplatzungen der Biegedruckzone im Mittelfeld.

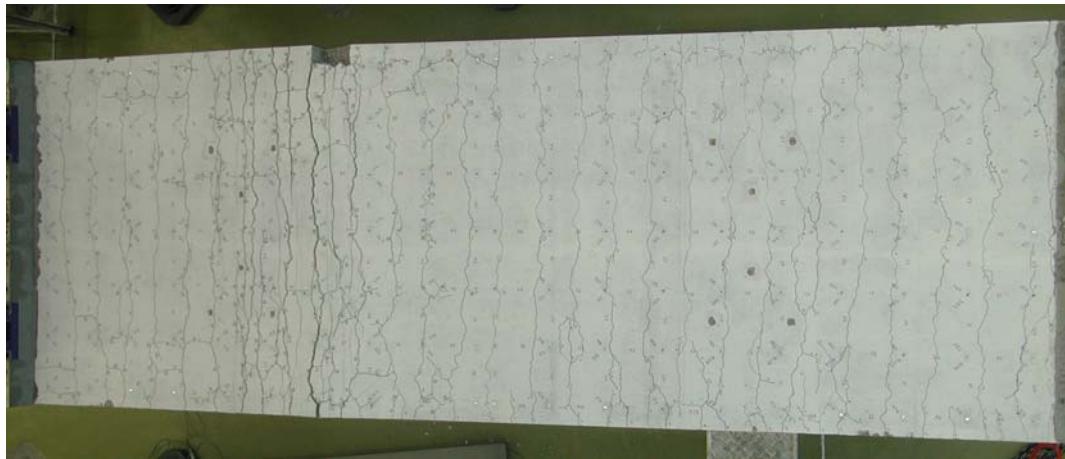


Bild 5.100: Versuchskörper B5 – Rissbild auf der Oberseite nach Versuchsende: Kragarm K1, Mittelfeld und Kragarm K2.

5.7 Versuchskörper B6

Der Biegebewehrungsgehalt des Versuchskörpers B6 war mit demjenigen des Versuchskörpers B4 identisch. Im Gegensatz zum Versuchskörper B4 wurde die Biegebewehrung in den Kragarmen abgestuft, wobei Spannungsfelder mit unterschiedlichen Druckfeldneigungen für die Bestimmung des resultierenden Längszugkraftverlaufs verwendet wurden. Die entsprechenden Druckfelder wiesen eine Neigung von 45° ($\cot \theta = 1$) im Kragarm K2 und $26,6^\circ$ ($\cot \theta = 2$) im Kragarm K1 auf. Der fiktive geometrische Bewehrungsgehalt in x -Richtung betrug $\rho_x = 0,952\%$, und für die Bewehrungsrichtung galt $\varphi_0 = 45^\circ$. In beiden Bewehrungsrichtungen (n - und t -Richtung) war eine Bewehrungslage mit Stäben Ø 30 mm und einem Stababstand von 150 mm angeordnet. Die beiden Kragarbereiche wiesen identische Querkraftbewehrungsgehalte von $\rho_z = 0,154\%$ auf.

5.7.1 Versuch B6V1

Mit dem Versuch B6V1 wurde der Kragarm K2 ($\theta = 45^\circ$) geprüft. Dabei betrug der Abstand zwischen dem festen und beweglichen Lager 2,36 m (Abstand b). Am ersten Versuchstag wurden die beiden Nullmessungen durchgeführt. Die Laststufen LS 2 und LS 3 folgten am zweiten, die Laststufe LS 4 am dritten und die Laststufe LS 5 am vierten Versuchstag. Über Nacht und über das Wochenende zwischen den Laststufen LS 4 und LS 5 wurde der Versuchsträger jeweils entlastet, wobei die erste Belastung am zweiten Versuchstag erfolgte.

Bei einer Kraft von $F_A \approx 400 wurde die erste Laststufe LS 2 durchgeführt. Der gerissene Bereich erstreckte sich über die inneren 60 % des Kragarms und Mittelfelds, und die Risse wiesen mittlere Rissabstände von 150 bis 300 mm auf. Im Kragarm und Mittelfeld lagen die Rissbreiten auf der Oberseite zwischen 0,05 und 0,2 mm, während über dem festen Auflager (Stelle C) Rissbreiten zwischen 0,05 und 0,25 mm gemessen wurden. Auf der Vorder- und Hinterseite des Versuchskörpers hatten sich ungefähr vertikal verlaufende Risse gebildet. In der ersten Hälfte des Kragarms und des Mittelfelds sowie im Bereich des festen Lagers ($x \approx -450 \div 450$ mm) reichten diese über die oberen 80 % der Versuchskörperhöhe. Für die folgenden Laststufen wurde zwischen den Laststufen LS 2 und LS 3 ein Belastungsintervall von $\Delta F_A \approx 400 gewählt. Anschliessend wurde bis zum Erreichen der Höchstlast das Belastungsintervall auf $\Delta F_A \approx 200 reduziert.$$$

Laststufe (LS)	F_A [kN]	F_B [kN]	F_{C1} [kN]	F_{C2} [kN]	$-V_{C1}$ [kNm]	$-M_C$ [kNm]	w_1 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	$\alpha(F_A)$ [°]	Bemerkungen
1	0	-83	108	0	72	84	0	0	0	0	Nullmessung
2	405 374	193 172	789 738	0,8 0,9	477 446	734 686	8,8 9,1	0,58 0,54	-0,06 -0,10	0,11 0,14	Belastungsende Messende
3	802 745	470 430	1462 1366	6,9 5,7	873 817	1388 1294	31,6 32,2	1,56 1,64	-0,17 -0,15	0,50 0,44	Belastungsende Messende
Entlastung 3a	0 0	-83 -83	108 108	0 0	72 72	84 84	8,1 7,5	0,37 0,35	-0,08 -0,07	-0,05 -0,04	Entlastungsende Belastungsbeginn
4	1002 929	612 561	1805 1680	12,1 10,8	1074 1000	1724 1602	48,2 48,2	2,61 2,61	-0,22 -0,24	0,69 0,67	Belastungsende Messende
Entlastung 4a	0 0	-83 -83	108 108	0 0	72 72	84 84	12,9 11,8	0,74 0,70	-0,13 -0,11	0,01 0,04	Entlastungsende Belastungsbeginn
HL	1099	686	1975	18,2	1170	1897	64,3	4,31	-0,30	0,95	Höchstlast
5	1089 1020	681 633	1960 1843	19,5 18,3	1160 1092	1885 1772	70,0 70,7	6,05 6,38	-0,23 -0,22	1,03 1,03	Belastungsende Messende
Entlastung	679	434	1302	44,0	749	1302	281,7	—	-0,15	3,71	Entlastungsbeginn

Tabelle 5.22: B6V1 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 5.2).

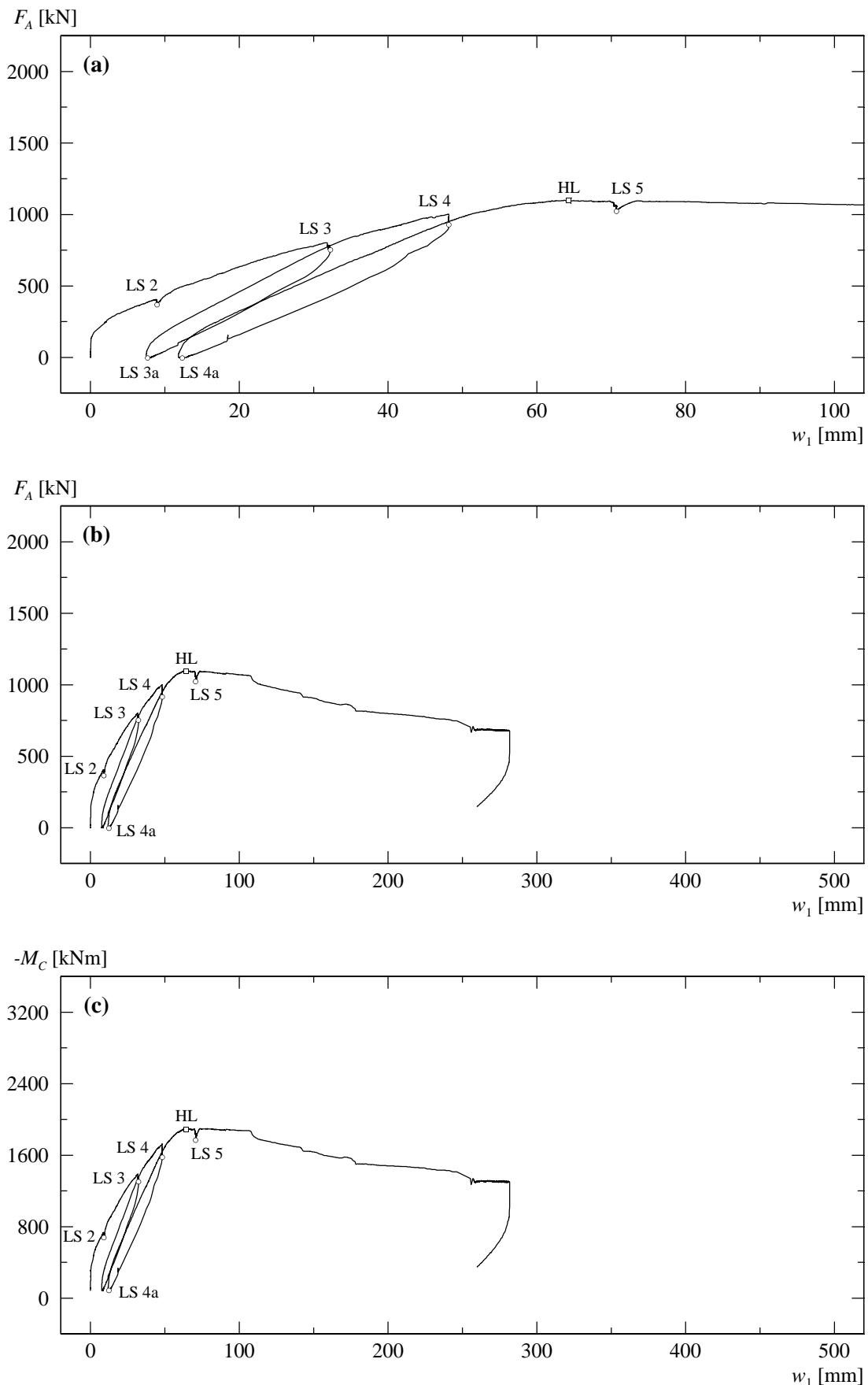


Bild 5.101: B6V1 – (a) und (b) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K2; (c) berechnetes Momenten-Durchbiegungsdiagramm.

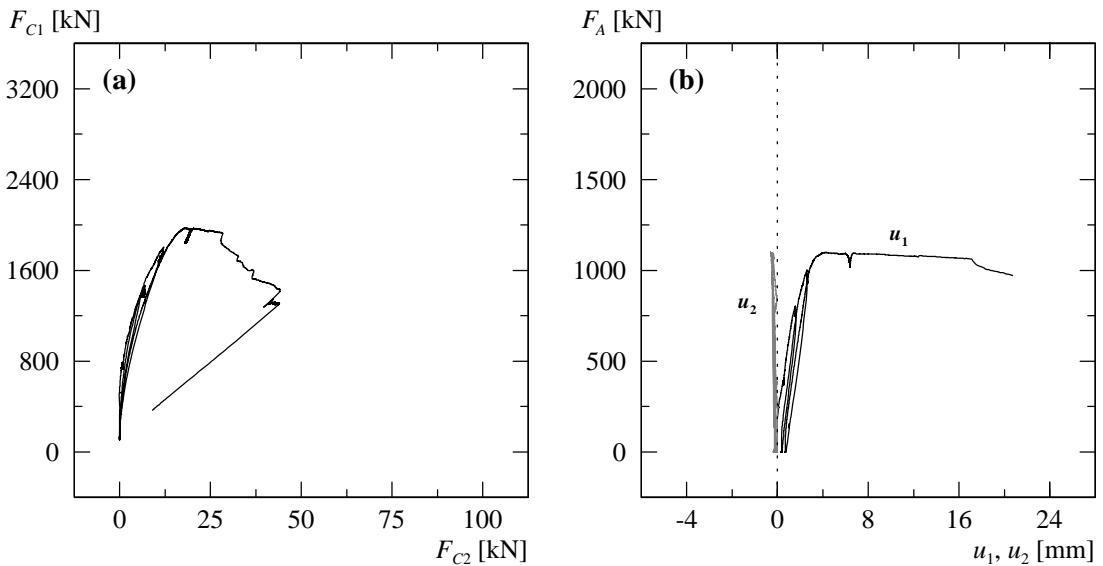


Bild 5.102: B6V1 – (a) Berechnete Lagerreaktionen beim Auflager C; (b) Verformungen der Zugzone über Auflager C.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 3 ($F_A \approx 800$ kN) bildeten sich sowohl auf der Oberseite wie auch auf der Vorder- und Hinterseite neue Risse. Neben der Bildung von neuen Rissen über dem festen Lager und in den äusseren Bereichen des Kragarms und Mittelfelds wurden auf der Oberseite eine Vergrösserung der Rissbreiten sowie vereinzelte Verlängerungen und Verästelungen der vorhandenen Risse beobachtet, wobei die Verästelungsrisse in den Verankerungsbereichen der Biegebewehrung endeten. Die mittleren Rissabstände lagen zwischen 100 und 200 mm. Über dem festen Lager wurden Rissbreiten zwischen 0,1 und 0,6 mm gemessen, während sich die Rissbreiten im Kragarm und Mittelfeld auf 0,2 bis 0,55 mm vergrösserten. Weiter konnte im Kragarm an der Stelle der inneren Bewehrungsabstufung ($x \approx -950$ mm) ein Riss mit einem vertikalen Versatz der beiden Rissufer festgestellt werden. Auf der Vorder- und Hinterseite bildeten sich im Kragarm und Mittelfeld je zwei neue Risse, während sich die bereits vorhandenen Risse verlängerten und verästelten. Die anfänglich steil verlaufenden Risse im Kragarm und Mittelfeld setzten sich im unteren Bereich mit einer flachen Neigung gegen das feste Auflager fort. Die Neigung der Risse betrug auf halber Versuchskörperhöhe ungefähr 50 bis 80° gegenüber der x -Achse. Im unteren Bereich verringerte sich die Rissneigung im Mittelfeld schliesslich auf 45 bis 55° und im Kragarm auf 20 bis 40°, wobei im untersten Bereich des Kragarms eine deutliche Abflachung der Risse beobachtet wurde. Die Risse erstreckten sich im Kragarm über die oberen 90 bis 95 % und im Mittelfeld über die oberen 80 bis 85 % der Versuchskörperhöhe. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe (≈ 50 mm unterhalb der Oberkante) wurden im Bereich des festen Lagers Rissbreiten von 0,1 bis 0,8 mm gemessen, während im Kragarm die Rissbreiten zwischen 0,1 und maximal 0,65 mm lagen. Unterhalb der Verankerungsbereiche der Biegebewehrung, auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$), betrugen die Rissbreiten über dem festen Lager zwischen 0,1 und 0,45 mm und im Kragarm 0,1 und 0,6 mm.

Während der Belastung zwischen den Laststufen LS 3 und LS 4 ($F_A \approx 800 \div 1000$ kN) bildete sich im Kragarm ein weiterer Versatzriss an der Stelle der zweitäußersten Reihe der Querkraftbewehrungsstäbe ($x \approx -1500$ mm), welcher bis in die Biegedruckzone reichte. Der Abstand der Risswurzel von der Unterseite lag auf der Vorderseite bei 75 mm und auf der Hinterseite bei 40 mm. Dabei betrug die Rissneigung ungefähr 35 bis 40° gegenüber der x -Achse, und in der Folge konnte auf der Oberseite ein vertikaler Versatz der beiden Rissufer von 1 bis 1,5 mm festgestellt werden.

Bis zur Laststufe LS 4 ($F_A \approx 1000$ kN) bildeten sich vorwiegend auf der Oberseite neue Risse, wobei eine weitere Verästelung der bestehenden Risse beobachtet wurde. Im Kragarm hatten sich

Laststufe	Oberseite			Vorderseite – Kragarm		Vorderseite – Festes Lager	
	Kragarm w_{cr} [mm]	Festes Lager w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 2	0,05...0,15	0,05...0,25	0,05...0,20	0,05...0,10	HR...0,05	0,20...0,45	0,10...0,15
LS 3	0,20...0,55	0,10...0,60	0,10...0,50	0,10...0,65	0,10...0,60	0,10...0,80	0,10...0,45
LS 4	0,20...1,20	0,20...1,00	0,10...0,60	0,15...2,50	0,50...0,80	0,10...1,40	0,10...0,60
LS 5	0,25...1,40	0,20...3,00	0,10...1,20	0,15...4,00	0,50...1,80	1,00...2,20	0,25...0,90

Tabelle 5.23: B6V1 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

die Versatzrisse bei der inneren Bewehrungsabstufung und der zweitäußersten Reihe der Querkraftbewehrungsstäbe auf der Oberseite 1,2 mm weit geöffnet. Bei beiden Rissen wurde ein vertikaler Versatz der Rissufer von ungefähr 1 bis 2 mm gemessen. Die übrigen Risse wiesen mittlere Rissabstände von ungefähr 75 bis 150 mm auf, und die Rissbreiten betragen im Kragarm 0,2 bis 0,7 mm und im Mittelfeld 0,1 bis 0,6 mm, während die Rissbreiten über dem festen Lager zwischen 0,2 bis maximal 1 mm lagen. Auf der Vorder- und Hinterseite wurde außer dem neuen Versatzriss beim Kragarmende die Bildung horizontal verlaufender Risse im Bereich der Biegebewehrungsverankerungen und eines neuen Risses im äusseren Bereich des Mittelfelds sowie die Verlängerung und Verästelung der bestehenden Risse festgestellt. Der äussere Versatzriss beim Kragarmende reichte bis in die Biegedruckzone, und die Rissbreite betrug im Bereich der Biegebewehrungslagen ($z \approx -200$ mm) ungefähr 2,5 mm, im unteren Bereich ($z \approx 100$ mm) ungefähr 0,6 mm. Die übrigen Risse im Kragarm erstreckten sich über die oberen 90 bis 95 % der Versuchskörperhöhe, wobei die Risse im untersten Bereich stark abdrehten und sich in horizontaler Richtung entlang der Biegedruckzone gegen das feste Lager fortwanden. Im Mittelfeld konnte im unteren Bereich eine leichte Abflachung der schrägen Risse beobachtet werden, welche sich mit Neigungen von 25 bis 45° gegenüber der x -Achse gegen das feste Lager fortsetzten. Dabei erstreckten sich die Risse über die oberen 80 bis 90 % der Versuchskörperhöhe. Im Bereich der Biegebewehrungslage wies der innere Versatzriss bei der Biegebewehrungsabstufung eine Rissbreite von 1,2 mm auf, während die übrigen Rissbreiten auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe im Kragarm 0,15 bis 0,7 mm und über dem festen Lager 0,1 bis 1,4 mm betragen. Unterhalb der Verankerungsbereiche der Biegebewehrung und auf halber Versuchskörperhöhe lagen die Rissbreiten über dem festen Lager zwischen 0,1 und 0,6 mm und im Kragarm zwischen 0,5 und 0,8 mm.

Im weiteren Versuchsfortschritt, zwischen den Laststufen LS 4 und LS 5, wurde bei einer Durchbiegung von $w_1 = 64,3$ mm beim Kragarm K2 die Höchstlast erreicht. Die entsprechende Kraft betrug $F_A = 1099$ kN. Gleichzeitig bildeten sich beim festen Lager leichte Betonstauchungen in dem zur y -Achse parallel verlaufenden Druckfeld auf der Oberseite (Biegezugzone).

Nach Erreichen der Höchstlast wurde die Durchbiegung des Kragarms K2 kontinuierlich vergrössert. Die letzte Laststufe LS 5 wurde bei einer Kraft von $F_A \approx 1050$ kN und einer Durchbiegung von $w_1 \approx 70,0$ mm durchgeführt. Bei dieser Laststufe konnten beim festen Lager erste Abplatzungen von Betonplättchen in dem zur y -Achse parallel verlaufenden Druckfeld auf der Oberseite festgestellt werden. Ausser der Verlängerung und Verästelung der bestehenden Risse wurde bis zur Laststufe LS 5 keine grosse Veränderung des Rissbildes beobachtet. Auf der Oberseite wurde beim festen Lager ein Riss mit einer Breite von 3 mm gemessen. Die übrigen Risse über dem festen Lager wiesen Breiten von 0,2 bis 1,8 mm auf. Im Kragarm lagen die Rissbreiten zwischen 0,25 und 1,4 mm, im Mittelfeld zwischen 0,1 und 1,2 mm. Neben der Bildung weiterer Verästelungsrisse und vereinzelter Risse im Bereich der Biegebewehrungsverankerungen setzten sich die schräg verlaufenden Risse auf der Vorder- und Hinterseite nur geringfügig fort, wobei die Verlängerungen ungefähr parallel zum unteren Versuchskörperrand verliefen. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe hatte sich der äussere Versatzriss 4 mm weit geöffnet. Die übrigen Rissbreiten lagen im Bereich des festen Lagers zwischen 1 und 2,2 mm und im Kragarm zwischen 0,15 und 1,2 mm. Unterhalb der Bereiche, in denen die Biegebewehrungsverankerungen lagen, verringerten sich die Rissbreiten über dem festen Lager stark, während im Kragarm keine

Abnahme der Rissbreiten feststellbar war. Auf halber Versuchskörperhöhe betragen sie beim festen Lager 0,25 bis 0,9 mm und im Kragarm 0,15 bis 1,2 mm, wobei der äussere Versatzriss noch eine Rissbreite von 1,8 mm aufwies.

Anschliessend wurde die Durchbiegung des Kragarms K2 vergrössert, wobei bis zu einer Durchbiegung von $w_1 \approx 110$ mm keine bedeutenden Kraftabfälle feststellbar waren. Bei einer Durchbiegung von $w_1 \approx 110$ mm versagte beim festen Lager der Beton im Verankerungsbereich von je drei Stabpaaren der Biegebewehrung auf der Vorder- und Hinterseite, wobei Teile des Überdeckungsbetons auf der Oberseite in y -Richtung stark gestaucht wurden. Die Bruchzone erstreckte sich in x -Richtung über eine Länge von 500 bis 600 mm. Die Zerstörung des Druckfeldes führte zu einem vertikalen Versatz der Ankerplatten und zu horizontalen Verschiebungen der Biegebewehrungsstäbe entlang ihrer Stabachse. Im weiteren Versuchsfortschritt wurden ab einer Durchbiegung von $w_1 \approx 150$ mm auf der Mittelfeldseite und über der Lagerplatte beim festen Lager die ersten Betonstauchungsrisse in der Biegedruckzone beobachtet. In der Folge platzten auf der Mittelfeldseite grössere Teile des Überdeckungsbetons an der Unterseite ab. Mit zunehmender Kragarmdurchbiegung konnte bei einer Durchbiegung von $w_1 \approx 250$ mm ein erneutes Versagen des Druckfeldes auf der Oberseite beobachtet werden. Die Bruchzone erstreckte sich in x -Richtung über eine Länge von 900 bis 1200 mm. Inzwischen waren die Verankerungsbereiche von je fünf Stabpaaren der Biegebewehrung auf der Vorder- und Hinterseite betroffen, wobei sich die Bruchzone auf der Vorderseite ins Mittelfeld ($x \approx -300 \div 900$ mm) und auf der Hinterseite in den Kragarm ($x \approx -900 \div 300$ mm) ausbreitete. Bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 281$ mm wurde der Versuch schliesslich abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt noch ungefähr 62 % der Höchstlast. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden.

Für die abschliessende Untersuchung des Versuchskörpers wurde auf der Oberseite der abgeplatzte Überdeckungsbeton der Biegezugzone entfernt. Die Bruchzone dehnte sich beim festen Lager über die ganze Versuchskörperbreite aus und erstreckte sich in den äusseren Viertelsberei-

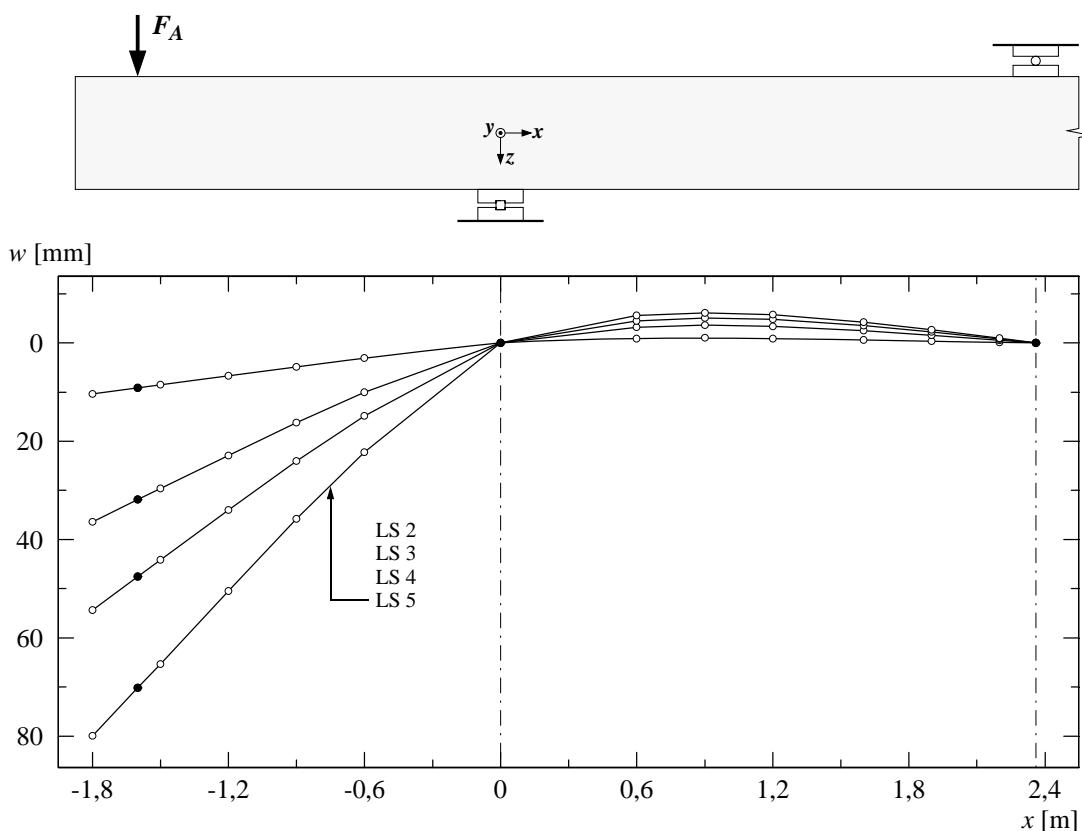


Bild 5.103: B6V1 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

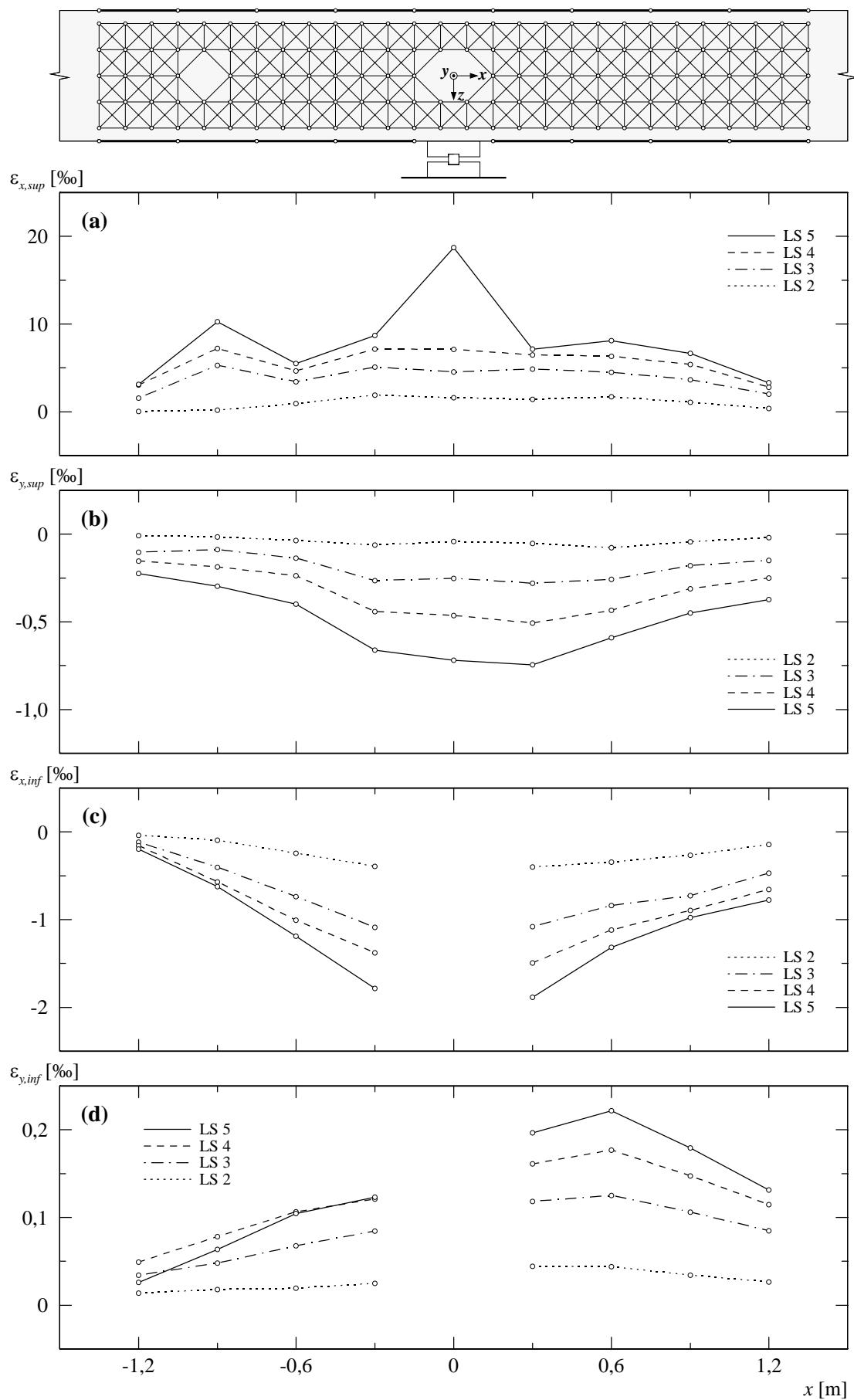


Bild 5.104: B6V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben; (c) mittlere Längsdehnungen unten; (d) mittlere Querdehnungen unten.

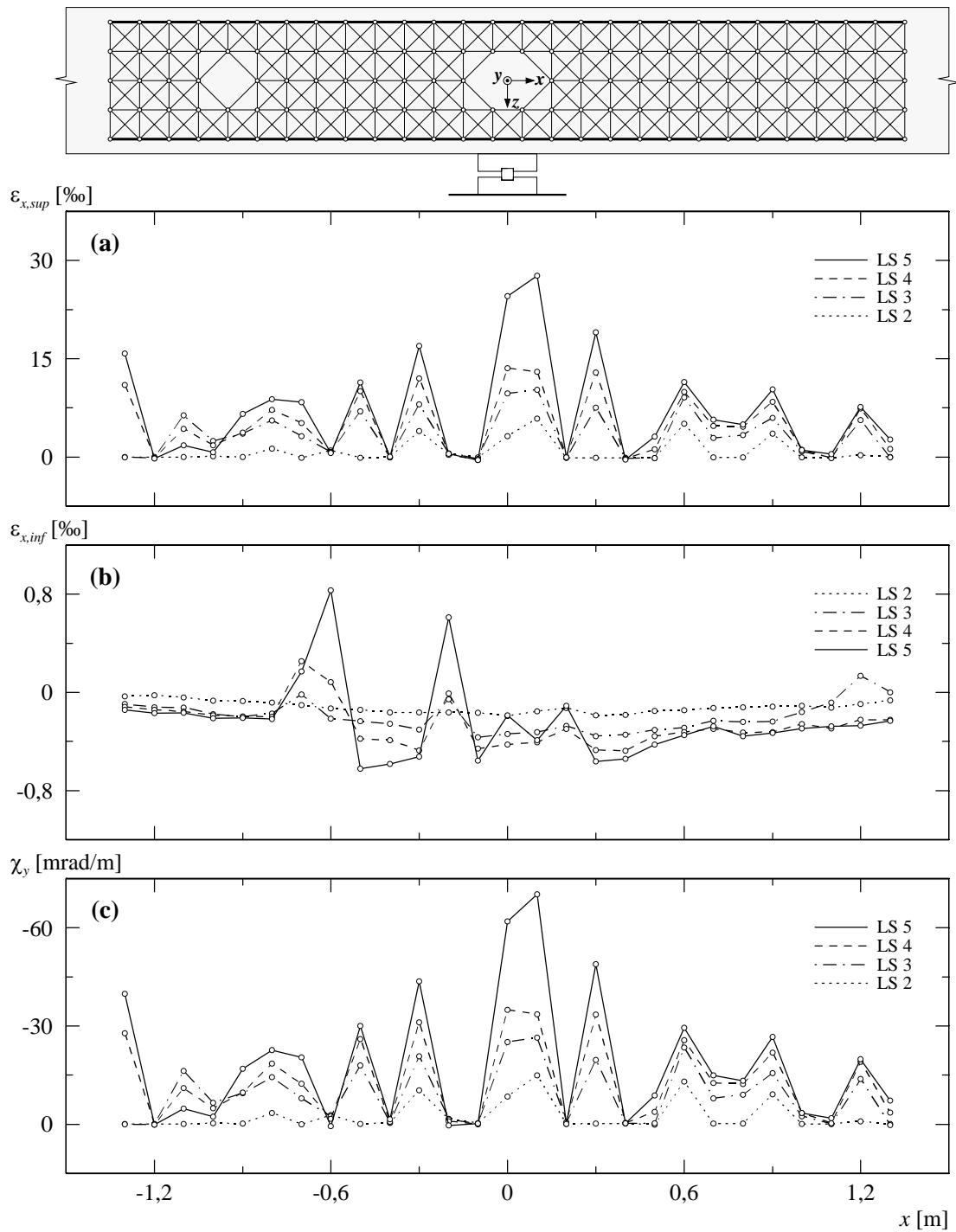


Bild 5.105: B6V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

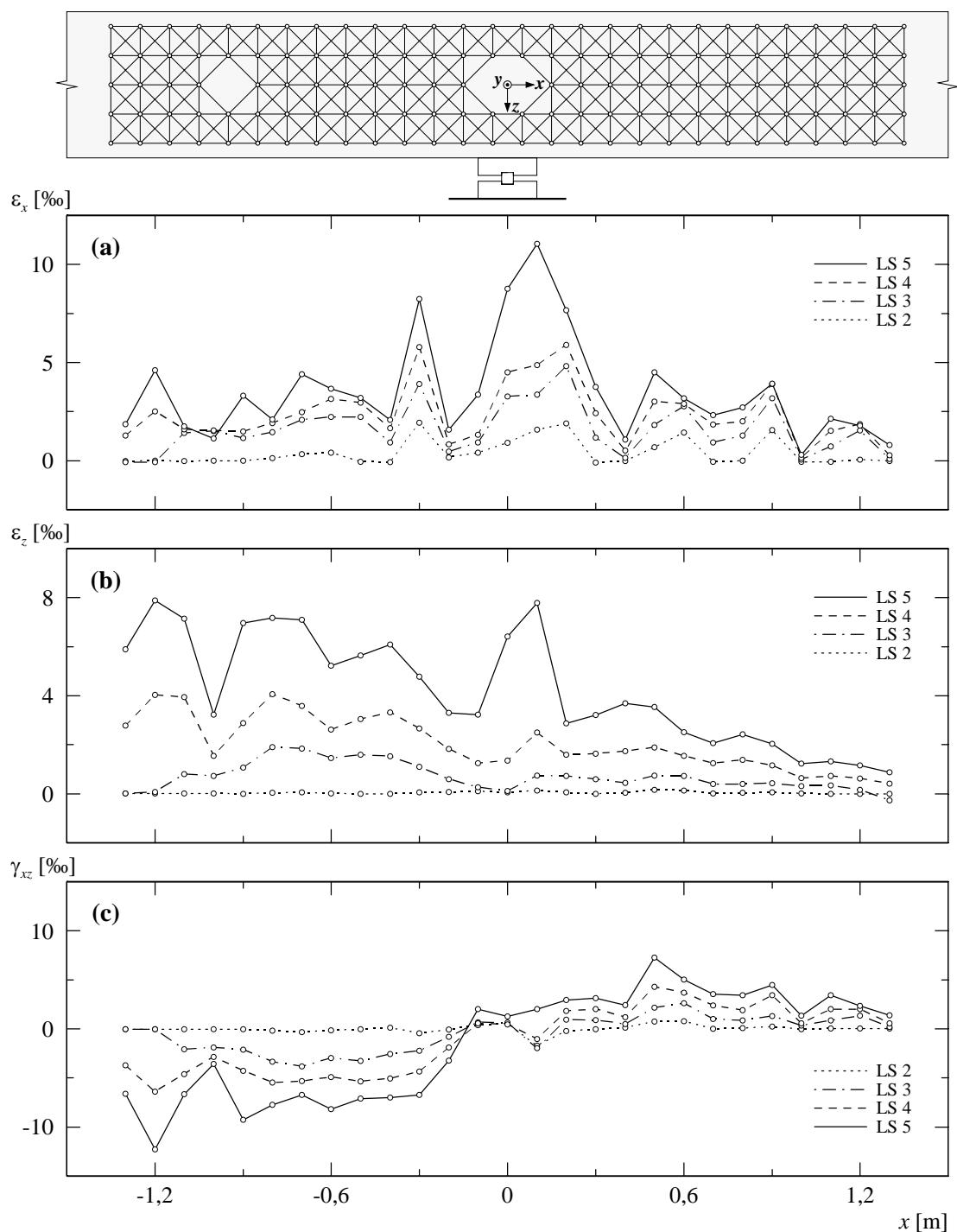


Bild 5.106: B6V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

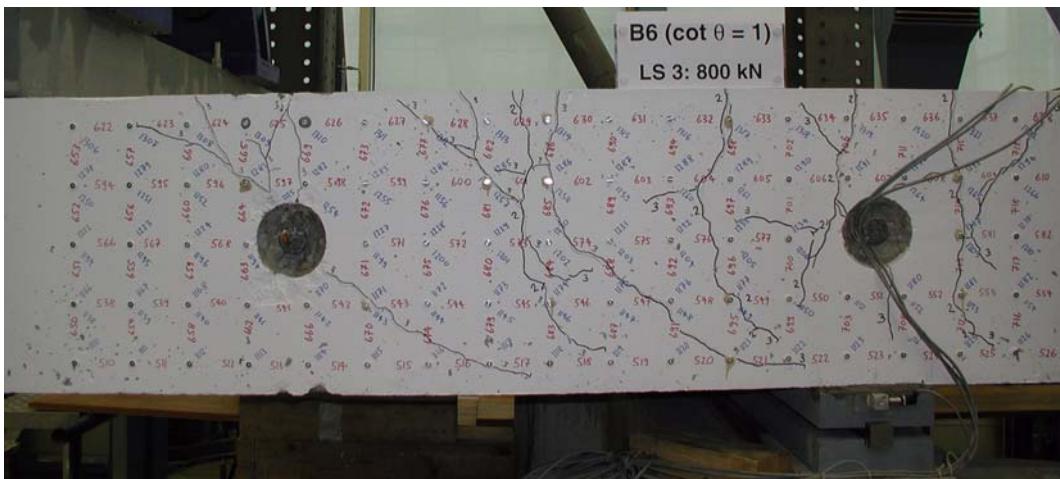
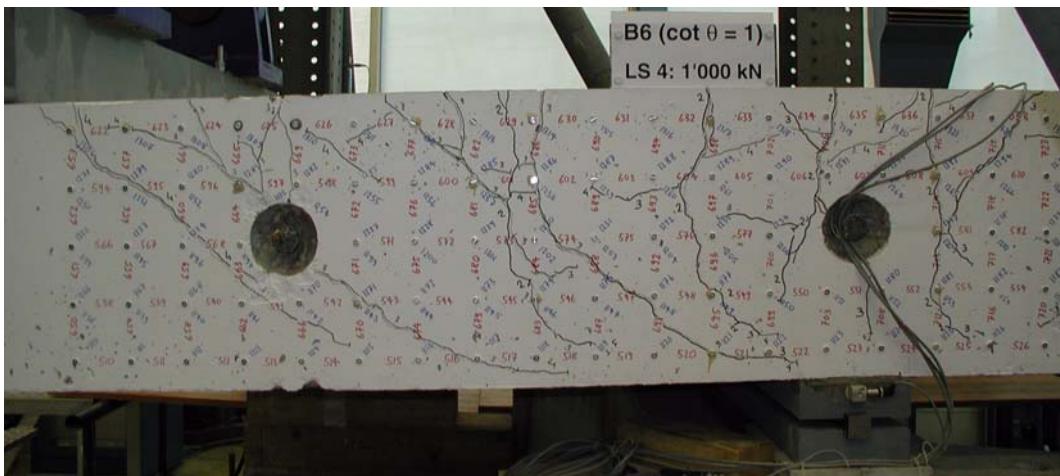


Bild 5.107: B6V1 – Rissbild bei Laststufe LS 3: Vorderseite Kragarm.

(a)



(b)

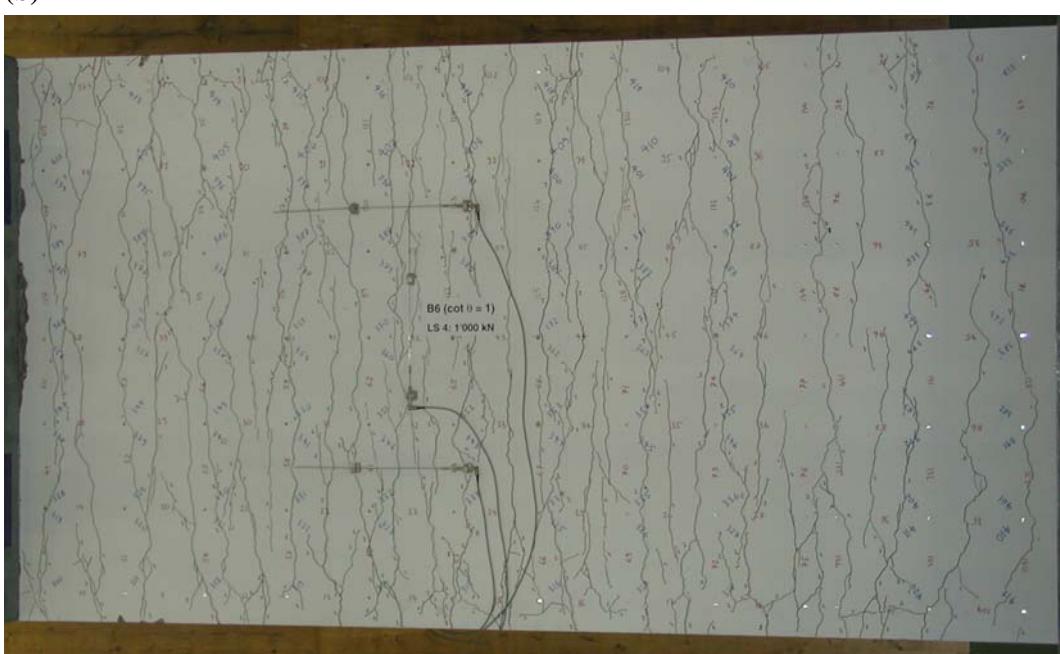
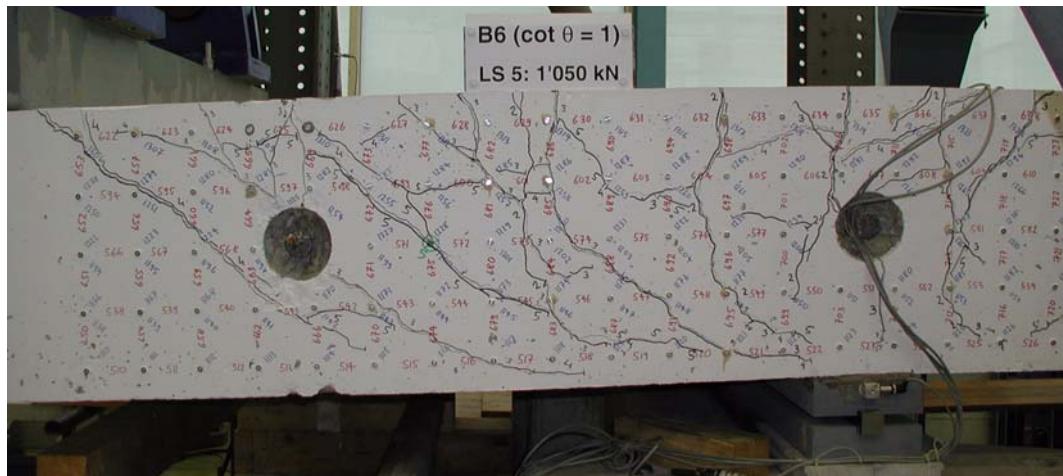
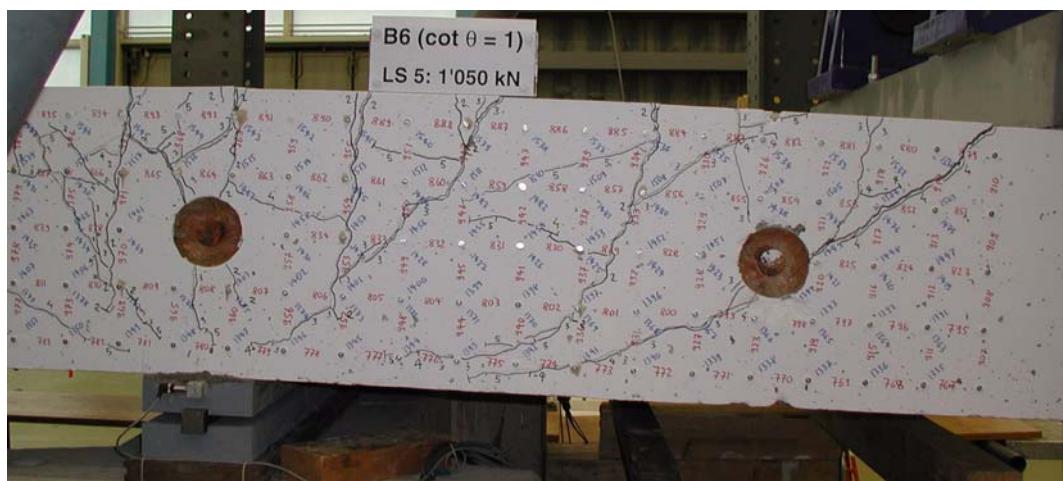


Bild 5.108: B6V1 – Rissbild bei Laststufe LS 4: (a) Vorderseite Kragarm; (b) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.

(a)



(b)



(c)

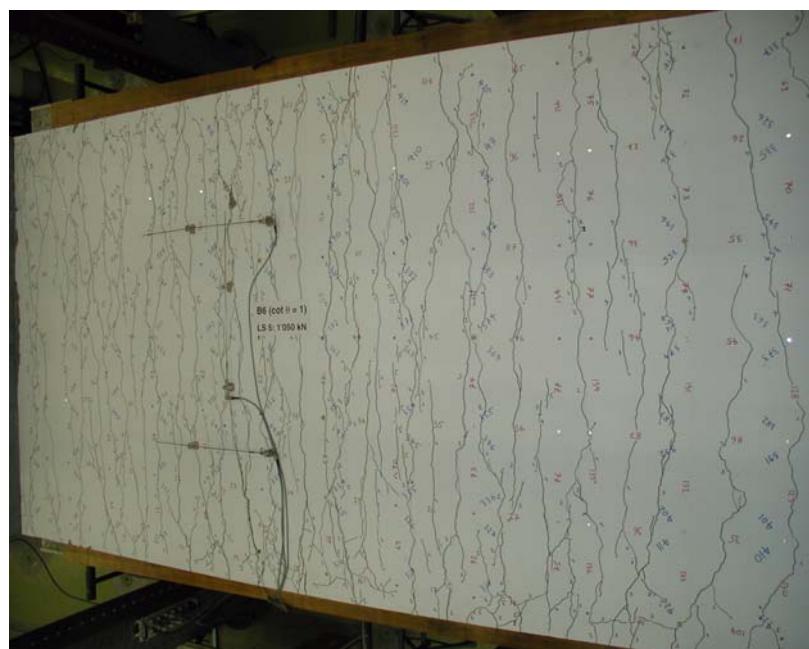


Bild 5.109: B6V1 – Rissbild bei Laststufe LS 5: (a) Vorderseite Kragarm; (b) Hinterseite Kragarm; (c) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.

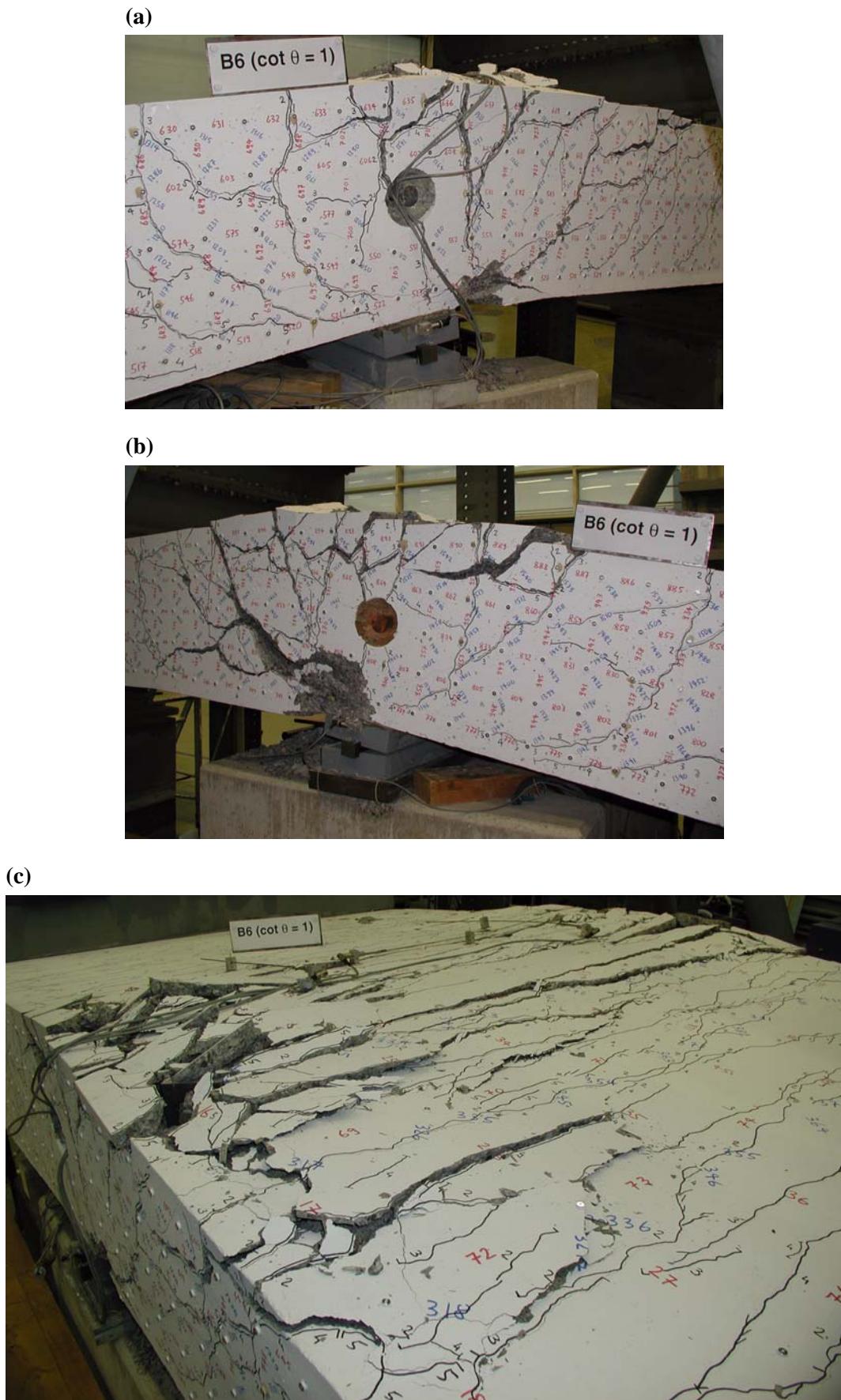


Bild 5.110: B6V1 – Bruchzone nach Versuchsende: (a) Vorderseite beim festen Lager; (b) Hinterseite beim festen Lager; (c) Oberseite beim festen Lager.

chen auf eine Länge von 900 bis 1200 mm und im mittleren Bereich auf ungefähr 600 mm. Im Verankerungsbereich von allen freigelegten Stabpaaren der Biegebewehrung konnten grössere vertikale und horizontale Relativverschiebungen der Ankerplatten festgestellt werden. Bei je zwei Stabpaaren auf der Vorder- und Hinterseite waren Querkraftbewehrungsstäbe angeordnet, wobei aber keine zerrissenen Querkraftbewehrungsstäbe entdeckt wurden. Auf der Mittelfeldseite konnte beim festen Lager eine ausgeprägte Rissfläche festgestellt werden. Diese erstreckte sich vom rechten Lagerrand mit einer Neigung von 45° gegenüber der x -Achse bis zur Versuchskörperhälfte und setzte sich dann mit einer steileren Neigung von 60° bis zur Oberseite fort. An der Unterseite war der Überdeckungsbeton der Biegedruckzone in einem Bereich von 300 bis 500 mm rechts vom festen Lager (im Mittelfeld) abgeplatzt. Die ausgeprägte Rissfläche zeigte im unteren, oberhalb der Betonüberdeckung liegenden Bereich ($z \approx 170 \div 210$ mm) leichte Spuren einer Zerstörung der Rissverzahnung beziehungsweise eines gegenseitigen Abgleitens der Rissufer. Auf der Vorder- und Hinterseite wurde eine vertikale Relativverschiebung der rechten Versuchskörperhälfte (Mittelfeldseite) von ungefähr 15 bis 20 mm gemessen.

5.7.2 Versuch B6V2

Mit dem Versuch B6V2 wurde der Kragarm K2 ($\theta = 26,6^\circ$) geprüft. Dabei betrug der Abstand zwischen dem festen und beweglichen Lager 2,20 m (Abstand b). Am ersten und zweiten Versuchstag wurde je eine Nullmessung durchgeführt. Die Laststufen LS 2 und LS 3 folgten am dritten, die Laststufen LS 4 und LS 5 am vierten Versuchstag. Am fünften Versuchstag wurde der Versuchskörper erneut belastet und der Versuch abgeschlossen. Die erste Belastung erfolgte am dritten Versuchstag, wobei zwischen der zweiten Nullmessung und der Laststufe LS 2 ein Wochenende lag. Über Nacht wurde der Versuchsträger jeweils entlastet.

Bei einer Kraft von $F_A \approx 400$ kN wurde die erste Laststufe LS 2 durchgeführt. Der gerissene Bereich erstreckte sich über die inneren drei Viertel des Kragarms und das gesamte Mittelfeld, und die Risse wiesen mittlere Rissabstände von 150 bis 300 mm auf. Auf der Oberseite lagen die Rissbreiten über dem festen Auflager (Stelle C) zwischen 0,1 und 0,4 mm, während im Kragarm maximale Rissbreiten von 0,15 mm und im Mittelfeld solche von 0,25 mm gemessen wurden. Auf der Vorder- und Hinterseite des Versuchskörpers hatten sich ungefähr vertikal verlaufende Risse gebildet, wobei die Risse im unteren Bereich des Kragarms sowie der inneren Mittelfeldhälfte abdrehten und dann mit einer leichten Neigung gegen das feste Lager verliefen. In der ersten Hälfte des Kragarms und des Mittelfelds sowie im Bereich des festen Lagers ($x \approx -450 \div 450$ mm) reichten diese über die oberen 70 bis 80 % der Versuchskörperhöhe. Für die folgenden Laststufen wurde zwischen den Laststufen LS 2 und LS 3 ein Belastungsintervall von $\Delta F_A \approx 400$ kN gewählt. Anschliessend wurde bis zum Erreichen der Höchstlast das Belastungsintervall auf $\Delta F_A \approx 200$ kN reduziert.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 3 ($F_A \approx 800$ kN) bildeten sich sowohl auf der Oberseite wie auch auf der Vorder- und Hinterseite neue Risse. Neben der Bildung von neuen Rissen im Kragarm, über dem festen Lager und in der inneren Hälfte des Mittelfelds wurden auf der Oberseite eine Vergrösserung der Rissbreiten sowie vereinzelte Verlängerungen und Verästelungen der vorhandenen Risse beobachtet, wobei die Verästelungsrisse in den Verankerungsbereichen der Biegebewehrung endeten. Die mittleren Rissabstände lagen zwischen 100 und 200 mm. Über dem festen Lager wurden maximale Rissbreiten von 0,7 mm gemessen. Die übrigen Rissbreiten vergrösserten sich im Kragarm auf 0,4 mm und im Mittelfeld auf maximal 0,65 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite wurde die Bildung vereinzelter horizontal verlaufender Risse in den Verankerungsbereichen der Biegebewehrung im Mittelfeld und über dem festen Lager sowie neuer Risse in den äusseren Bereichen des Kragarms und Mittelfelds festgestellt, während sich die

Laststufe (LS)	F_A [kN]	F_B [kN]	F_{C1} [kN]	F_{C2} [kN]	$-V_{C1}$ [kN]	$-M_C$ [kNm]	w_1 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	$\alpha(F_A)$ [°]	Bemerkungen
1	0	-89	102	0	72	84	0	0	0	0	Nullmessung
2	402 366	205 178	798 735	0,6 0,4	474 437	729 671	6,2 6,3	0,39 0,41	-0,03 -0,03	0,08 0,07	Belastungsende Messende
3	801 736	502 454	1494 1381	5,6 5,0	872 808	1382 1277	25,7 25,9	1,63 1,63	-0,11 -0,12	0,40 0,39	Belastungsende Messende
Entlastung 3a	0 0	-89 -89	102 102	0 0	72 72	84 84	6,4 6,2	0,37 0,36	-0,06 -0,06	-0,04 -0,01	Entlastungsende Belastungsbeginn
4	1000 937	654 607	1844 1735	11,0 10,5	1071 1008	1717 1615	39,6 40,1	2,36 2,37	-0,20 -0,22	0,63 0,64	Belastungsende Messende
HL	1145	770	2106	18,6	1217	1973	59,4	4,79	-0,70	0,93	Höchstlast
$(-M_C)_{max}$	1145	772	2107	19,9	1216	1976	63,9	6,25	-0,89	1,00	Maximalmoment
5	1138 1019	768 680	2097 1890	21,3 19,9	1209 1090	1969 1775	69,5 69,7	8,06 8,36	-1,21 -1,35	1,07 1,12	Belastungsende Messende
Entlastung 5a	0 0	-89 -89	102 102	0 0	72 72	84 84	28,0 26,9	5,22 5,14	-1,07 -1,07	0,25 0,25	Entlastungsende Belastungsbeginn
Entlastung	597	394	1181	35,6	667	1146	278,9	—	—	3,42	Entlastungsbeginn

Tabelle 5.24: B6V2 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 5.3).

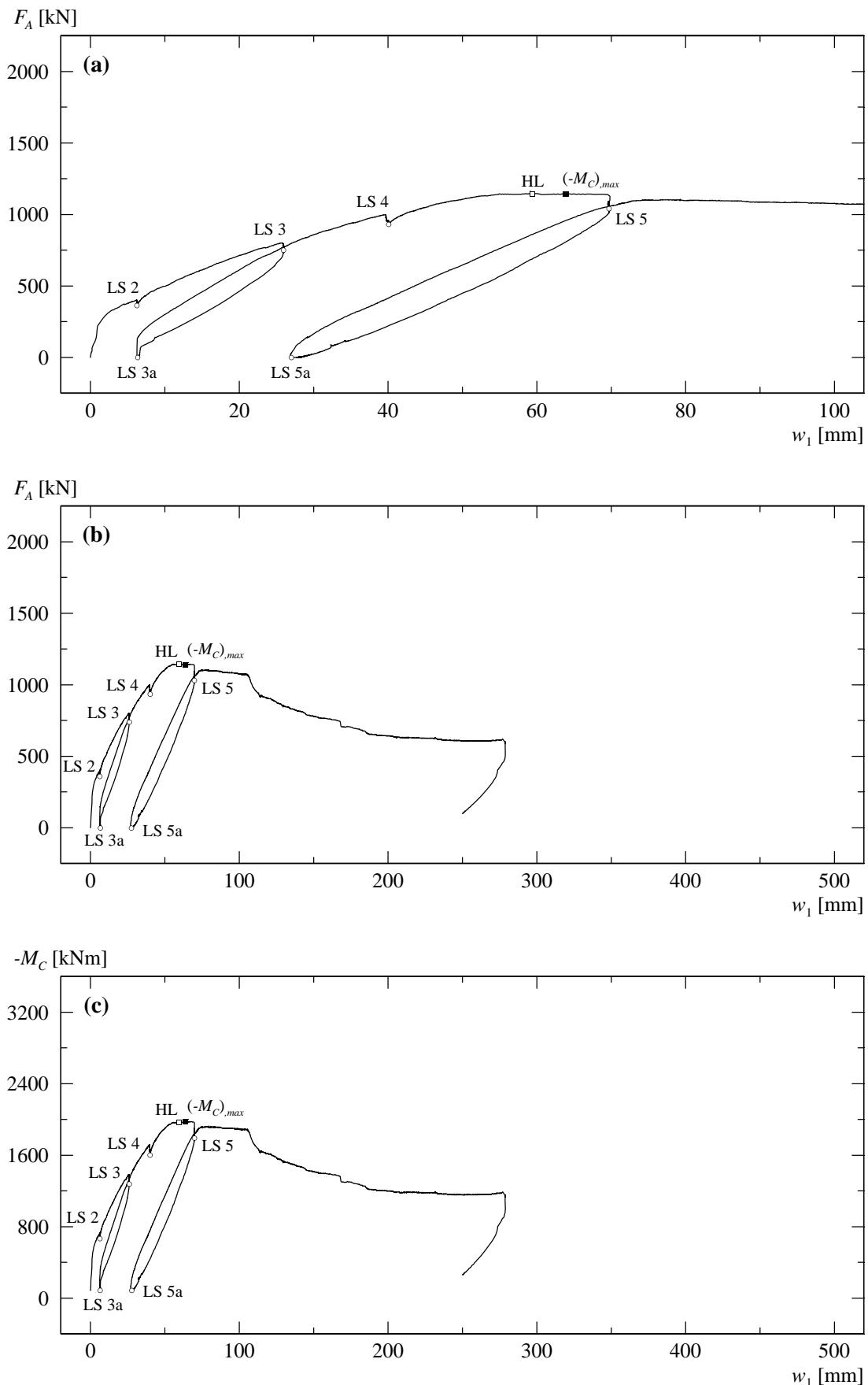


Bild 5.111: B6V2 – (a) und (b) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm Kx; (c) berechnetes Momenten-Durchbiegungsdiagramm.

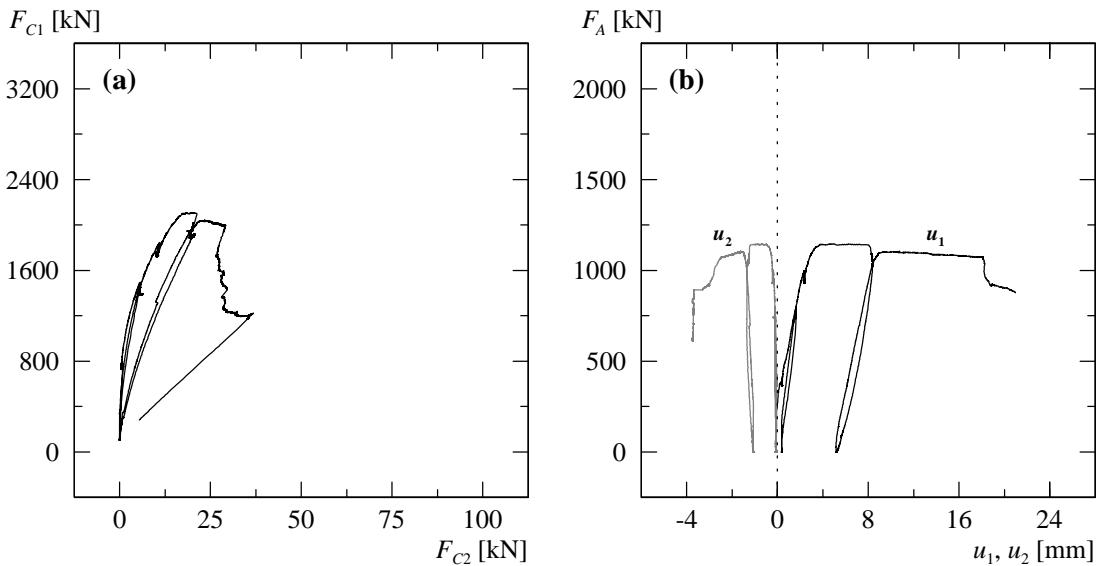


Bild 5.112: B6V2 – (a) Berechnete Lagerreaktionen beim Auflager C; (b) Verformungen der Zugzone über Auflager C.

bereits vorhandenen Risse fortpflanzten. Dabei erstreckten sich die Risse im Kragarm über die oberen 80 bis 90 % und im Mittelfeld über die oberen 80 % der Versuchskörperhöhe. Die schrägen Risse verliefen im oberen Bereich des Kragarms und der inneren Mittelfeldhälfte ungefähr vertikal, setzten sich dann aber im unteren Bereich mit einer flachen Neigung gegen das feste Auflager fort. Die Neigung der Risse betrug auf halber Versuchskörperhöhe ungefähr 50 bis 80° gegenüber der x -Achse. Im unteren Bereich verringerte sich die Rissneigung schliesslich auf 30 bis 45°. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe (≈ 50 mm unterhalb der Oberkante) wurden im Bereich des festen Lagers Rissbreiten von 0,1 bis maximal 0,8 mm gemessen, während im Kragarm die Rissbreiten zwischen 0,1 und 0,45 mm lagen. Unterhalb der Verankerungsbereiche der Biegebewehrung, auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$), betrugen die Rissbreiten über dem festen Lager 0,3 bis 0,85 mm und im Kragarm 0,1 bis 0,25 mm. Die horizontal verlaufenden Risse im Bereich der Biegebewehrungsverankerungen wiesen Rissbreiten von 0,05 bis 0,1 mm auf.

Ausser der Verlängerung und Verästelung der bestehenden Risse bildeten sich bis zur Laststufe LS 4 ($F_A \approx 1000$ kN) vorwiegend auf der Oberseite neue Risse. Die Risse wiesen auf der Oberseite mittlere Rissabstände von ungefähr 75 bis 150 mm auf, und die Rissbreiten betragen im Kragarm 0,05 bis 0,65 mm und im Mittelfeld 0,1 bis 0,7 mm, während die Rissbreiten über dem festen Lager zwischen 0,15 und maximal 0,8 mm lagen. Neben der Bildung weiterer Verästelungsrisse und vereinzelter Risse im Bereich der Biegebewehrungsverankerungen hatten sich die bestehenden Risse auf der Vorder- und Hinterseite verlängert. Die Risse im Kragarm erstreckten sich über die oberen 90 bis 95 % der Versuchskörperhöhe, wobei die Risse im untersten Bereich stark abdrehten und sich mit sehr flachen Neigungen von 10 bis 15° gegenüber der x -Achse entlang der Biegedruckzone gegen das feste Lager fortpflanzten. Im Mittelfeld erstreckten sich die Risse über die oberen 84 % der Versuchskörperhöhe. Dabei konnte im unteren Bereich eine leichte Abflachung der schrägen Risse beobachtet werden, welche sich mit Neigungen von 25 bis 45° gegen das feste Lager fortsetzten. Die Rissbreiten betragen auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe im Kragarm 0,15 bis 0,9 mm und über dem festen Lager 0,1 bis 1,2 mm. Unterhalb der Verankerungsbereiche der Biegebewehrung und auf halber Versuchskörperhöhe lagen die Rissbreiten über dem festen Lager zwischen 0,3 und 1,4 mm und im Kragarm zwischen 0,15 und 0,6 mm.

Im weiteren Versuchsfortschritt, zwischen den Laststufen LS 4 und LS 5, wurde bei einer Durchbiegung von $w_1 = 59,1$ mm beim Kragarm K1 die Höchstlast erreicht. Die entsprechende Kraft betrug $F_A = 1145$ kN. Gleichzeitig bildeten sich beim festen Lager ab einer Kragarmdurch-

Laststufe	Oberseite			Vorderseite – Kragarm		Vorderseite – Festes Lager	
	Kragarm w_{cr} [mm]	Festes Lager w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 2	0,05...0,15	0,10...0,40	0,10...0,25	0,05...0,10	HR...0,05	0,05...0,45	0,10...0,25
LS 3	0,05...0,40	0,15...0,70	0,10...0,65	0,10...0,45	0,10...0,25	0,10...0,80	0,30...0,85
LS 4	0,05...0,65	0,15...0,80	0,10...0,70	0,15...0,90	0,15...0,60	0,10...1,20	0,30...1,40
LS 5	0,10...0,90	0,20...2,50	0,15...1,40	0,30...1,20	0,75...1,10	0,15...3,00	0,30...2,50

Tabelle 5.25: B6V2 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

biegung von $w_1 \approx 60$ mm die ersten Betonstauchungen in dem zur y -Achse parallel verlaufenden Druckfeld auf der Oberseite (Biegezugzone) sowie die ersten Betonstauchungsrisse in der Biegedruckzone über der Lagerplatte des festen Lagers. Mit zunehmender Kragarmdurchbiegung wurde anschliessend bei einer Durchbiegung von $w_1 = 63,9$ mm eine maximale Biegemomentbeanspruchung beim festen Auflager von $(-M_C)_{max} = 1976$ kNm erreicht.

Nach Erreichen der Höchstlast und der maximalen Biegemomentbeanspruchung wurde die Durchbiegung des Kragarms K1 kontinuierlich vergrössert. Die letzte Laststufe LS 5 wurde bei einer Kraft von $F_A \approx 1150$ kN und einer Durchbiegung von $w_1 \approx 69,5$ mm durchgeführt, wobei bis zum Belastungsstopp keine bedeutenden Kraftabfälle feststellbar waren. Bei dieser Laststufe konnten über dem festen Lager die Bildung eines Versatzrisses und erste Abplatzungen von Betonplättchen in dem zur y -Achse parallel verlaufenden Druckfeld auf der Oberseite festgestellt werden. Ausser der Bildung des Versatzrisses sowie der Verlängerung und Verästelung der bestehenden Risse wurde bis zur Laststufe LS 5 keine grosse Veränderung des Rissbildes beobachtet. Auf der Oberseite hatte sich der Versatzriss beim festen Lager 2,5 mm weit geöffnet. Im Verankerungsbereich der beiden Stabpaare der Biegebewehrung, welche auf der Vorder- und Hinterseite direkt über der Lagerplatte angeordnet waren, wurde in y -Richtung eine horizontale Relativverschiebung der Ankerplattenbereiche von 2 bis 4 mm festgestellt. Der Versatzriss verlief auf der vorderen Plattenhälfte im Bereich des rechten Lagerplattenrandes ($x \approx 100 \div 150$ mm), während dieser in der hinteren Plattenhälfte ungefähr entlang der Lagerachse ($x \approx 0 \div 50$ mm) verlief. Dabei wurde auf der Vorderseite ein vertikaler Versatz der beiden Rissufer von 6 bis 7 mm über eine Länge von ungefähr 750 mm und auf der Hinterseite ein solcher von 4 bis 5 mm über eine Länge von 250 bis 300 mm festgestellt, während im mittleren Bereich noch ein vertikaler Absatz von 2 bis 3 mm gemessen wurde. Die übrigen Rissbreiten über dem festen Lager betrugen 0,2 bis 2 mm. Im Kragarm lagen die Rissbreiten zwischen 0,1 und 0,9 mm, im Mittelfeld zwischen 0,15 und 1,4 mm. Neben der Bildung von BetonstauchungsrisSEN in der Biegedruckzone beim festen Lager sowie weiterer Verästelungsrisse und vereinzelter Risse im Bereich der Biegebewehrungsverankerungen setzten sich die schräg verlaufenden Risse auf der Vorder- und Hinterseite nur geringfügig fort, wobei die Verlängerungen ungefähr parallel zum unteren Versuchskörperrand verliefen. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe lagen die Rissbreiten im Bereich des festen Lagers zwischen 0,15 und maximal 3 mm und im Kragarm zwischen 0,3 und 1,2 mm. Unterhalb der Bereiche, in denen die Biegebewehrungsverankerungen lagen, verringerten sich die Rissbreiten nur geringfügig. Auf halber Versuchskörperhöhe betrugen sie beim festen Lager 0,3 bis 2,5 mm und im Kragarm 0,75 bis 1,1 mm.

Nach der Durchführung der Laststufe LS 5 wurde der Versuchskörper entlastet. Im weiteren Versuchsfortschritt konnte mit einer Kraft von $F_A \approx 1100$ kN das alte Belastungsniveau bei der Wiederbelastung wieder knapp erreicht werden. Anschliessend wurde die Durchbiegung des Kragarms K1 vergrössert, wobei bis zu einer Durchbiegung von $w_1 \approx 107$ mm keine bedeutenden Kraftabfälle feststellbar waren. Bei einer Durchbiegung von $w_1 \approx 107$ mm versagte beim festen Lager der Beton im Verankerungsbereich von je drei Stabpaaren der Biegebewehrung auf der Vorder- und Hinterseite, wobei Teile des Überdeckungsbetons auf der Oberseite in y -Richtung stark gestaucht wurden. Die Bruchzone erstreckte sich in x -Richtung über eine Länge von 500 bis 600 mm. Die Zerstörung des Druckfeldes führte zu einem vertikalen Versatz der Ankerplatten und zu horizontalen Verschiebungen der Biegebewehrungsstäbe entlang ihrer Stabachse. Im weiteren

Versuchsfortschritt wurden ab einer Durchbiegung von $w_1 \approx 128$ mm auf der Mittelfeldseite beim festen Lager die ersten Betonstauchungsrisse an der Unterseite beobachtet. In der Folge konnten ab einer Durchbiegung von $w_1 \approx 145$ mm erste Abplatzungen von Betonplättchen auf der Mittelfeldseite festgestellt werden. Kurz darauf platzten bei einer Durchbiegung von $w_1 \approx 152$ mm grössere Teile des Überdeckungsbetons an der Unterseite ab. Mit zunehmender Kragarmdurchbiegung konnte bei einer Durchbiegung von $w_1 \approx 170$ mm ein erneutes Versagen des Druckfeldes auf der Oberseite beobachtet werden. Inzwischen waren die Verankerungsbereiche von je fünf Stabpaaren der Biegebewehrung auf der Vorder- und Hinterseite betroffen, und die Bruchzone erstreckte sich in x -Richtung über eine Länge von 900 bis 1200 mm. Gleichzeitig konnte das Zerreissen eines Querkraftbewehrungsstabs akustisch wahrgenommen werden. Im weiteren Versuchsfortschritt, bei einer Durchbiegung von $w_1 \approx 195$ mm, lösten sich an der Unterseite erneut grössere Teile des Überdeckungsbetons auf der Mittelfeldseite beim festen Lager ab, wobei die Abplatzungen vorwiegend auf der Plattenhinterseite lagen. Mit zunehmender Steigerung der Kragarmdurchbiegung konnte bei Durchbiegungen von $w_1 \approx 230$ bis 260 mm das Zerreissen von weiteren Querkraftbewehrungsstäben akustisch wahrgenommen werden. Bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 279$ mm wurde der Versuch schliesslich abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt noch ungefähr 52 % der Höchstlast. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden.

Für die abschliessende Untersuchung des Versuchskörpers wurde auf der Oberseite der abgeplatzte Überdeckungsbeton der Biegezugzone entfernt. Die Bruchzone erstreckte sich auf einer Länge von 900 bis 1200 mm beim festen Lager über die ganze Versuchskörperbreite. Im Verankerungsbereich von allen freigelegten Stabpaaren der Biegebewehrung konnten grössere vertikale und horizontale Relativverschiebungen der Ankerplatten festgestellt werden. Bei je zwei Stabpaaren auf der Vorder- und Hinterseite waren Querkraftbewehrungsstäbe angeordnet, wobei auf der Hinterseite, links beim festen Lager (Kragarmseite), ein zerrissener Querkraftbewehrungsstab entdeckt wurde. Im Bereich des festen Lagers konnte eine ausgeprägte Rissfläche festgestellt werden, welche vom Lagerrand mit einer Neigung von 45 bis 55° gegenüber der x -Achse bis zur

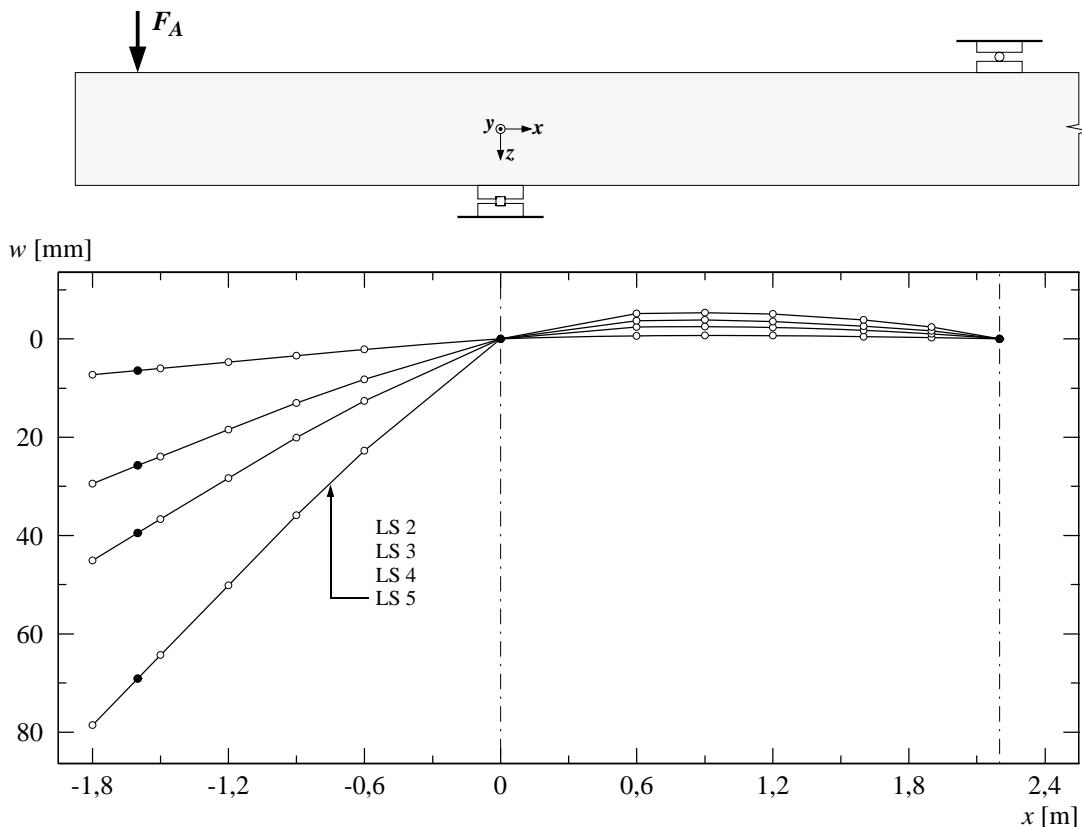


Bild 5.113: B6V2 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

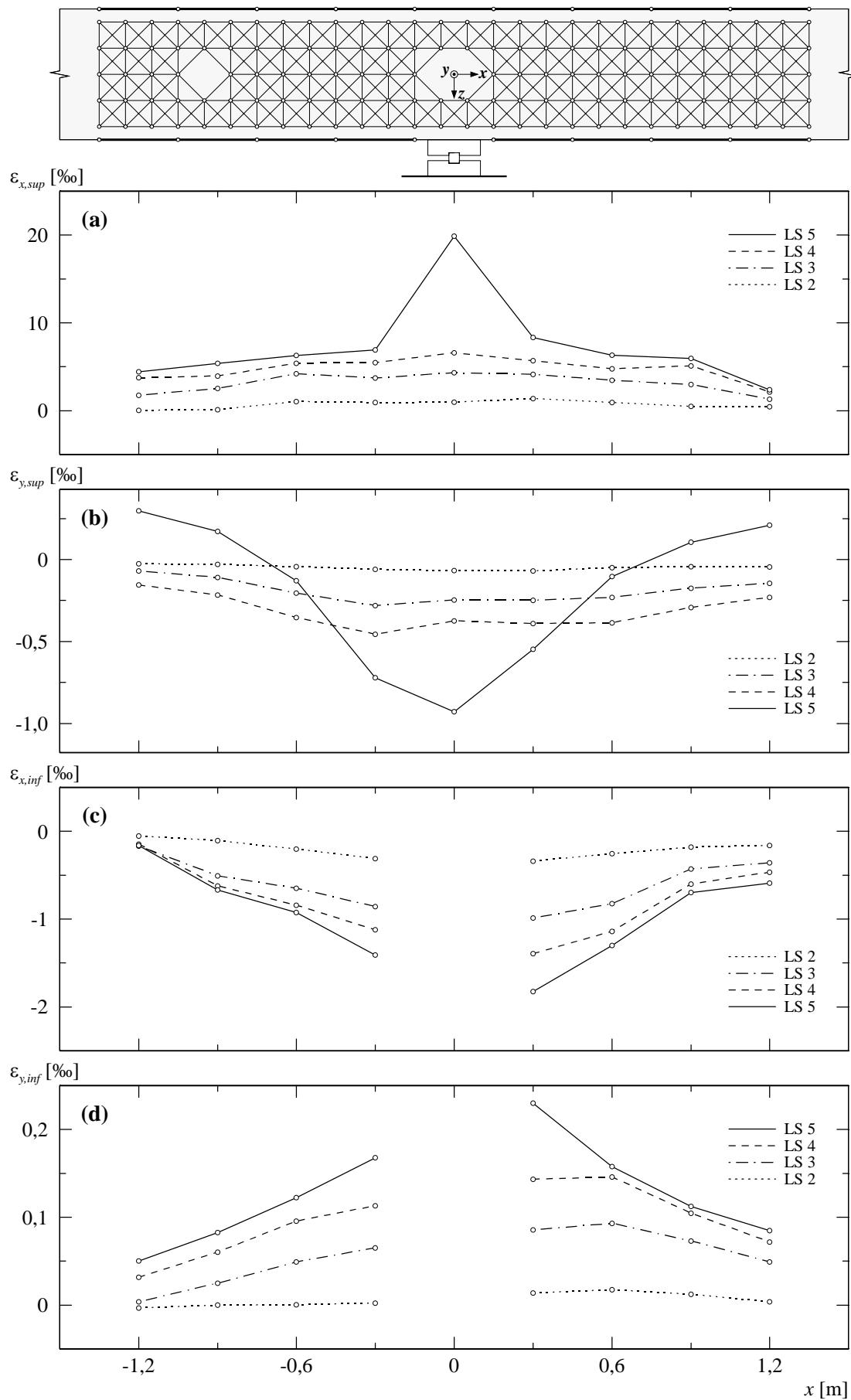


Bild 5.114: B6V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben; (c) mittlere Längsdehnungen unten; (d) mittlere Querdehnungen unten.

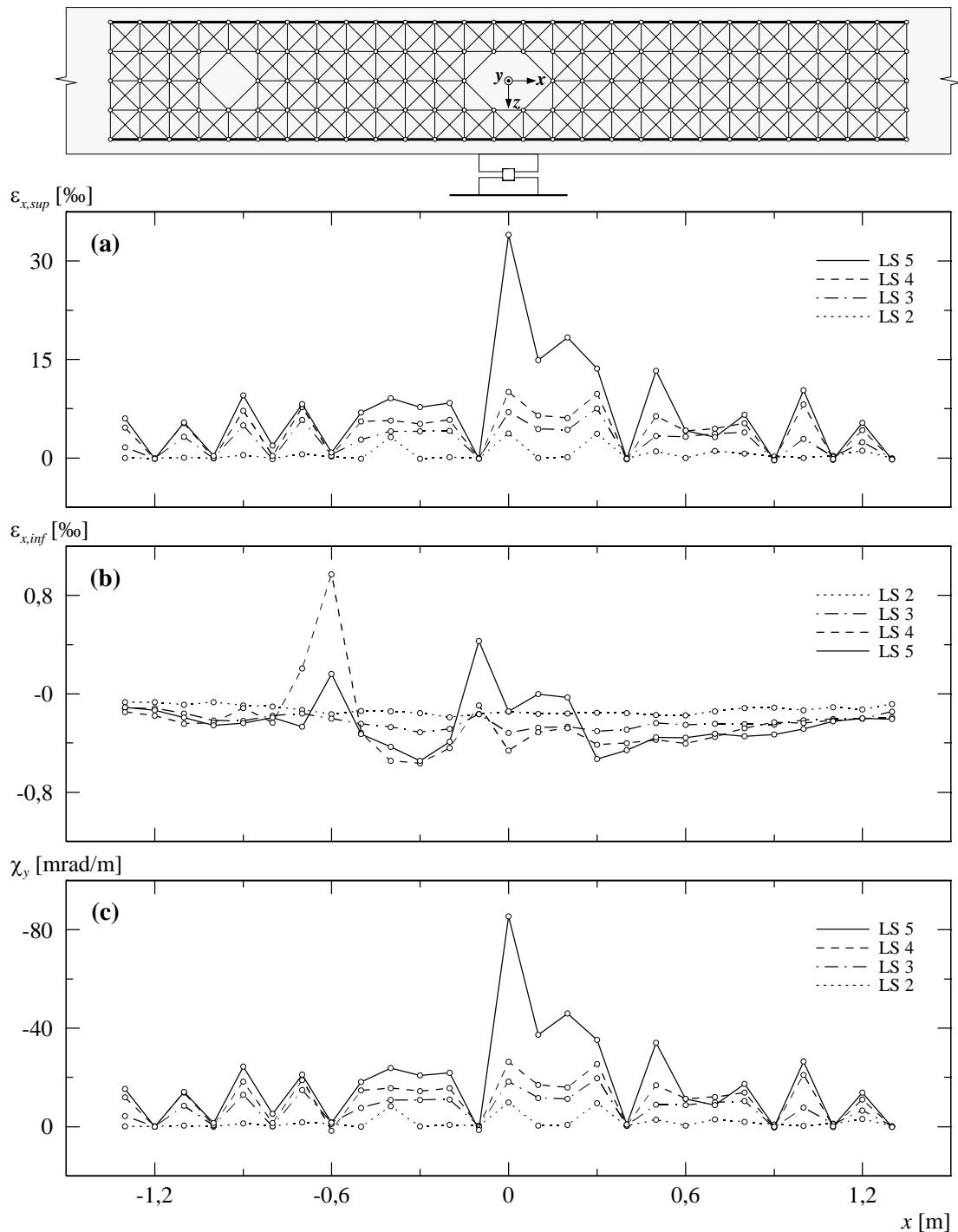


Bild 5.115: B6V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

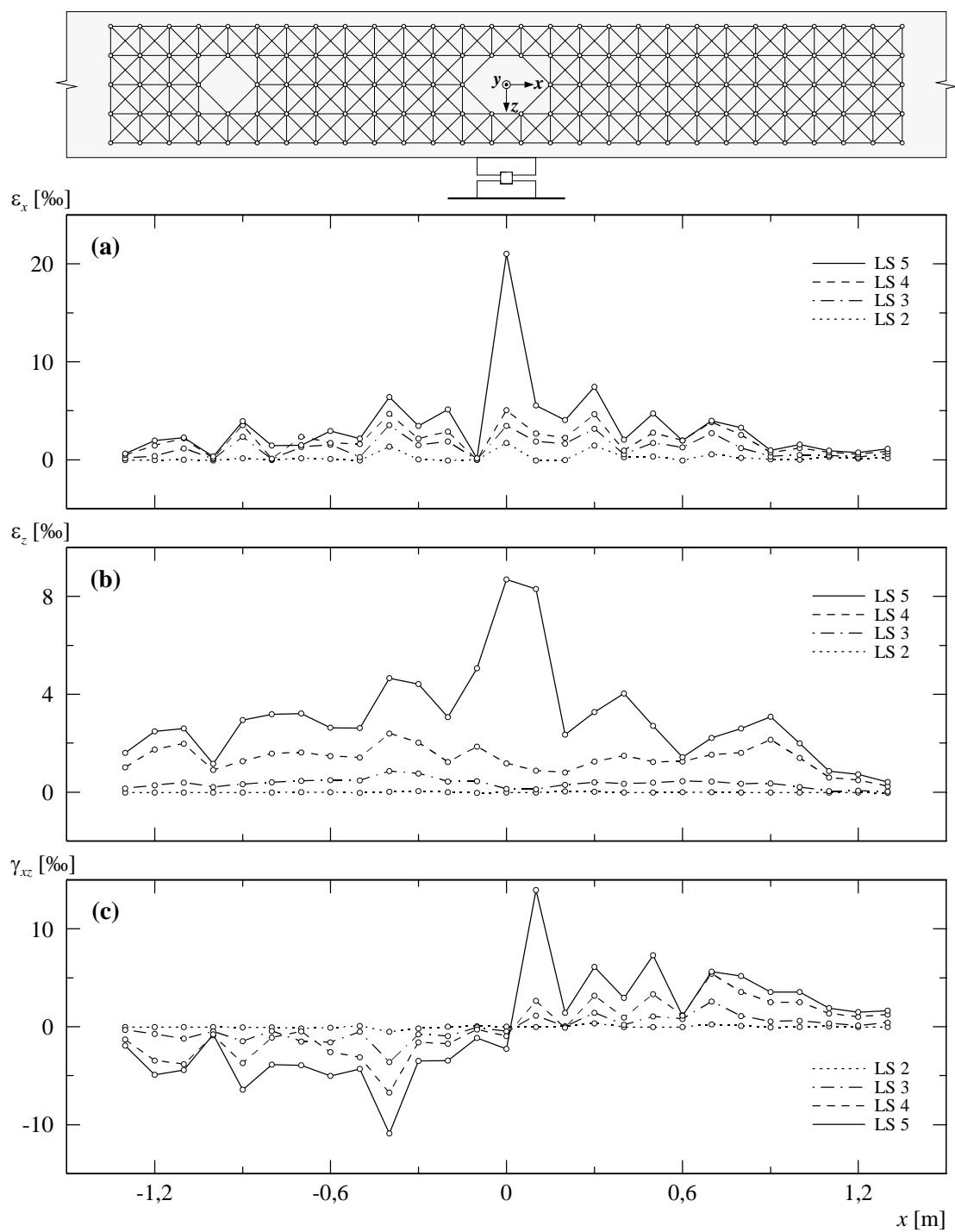
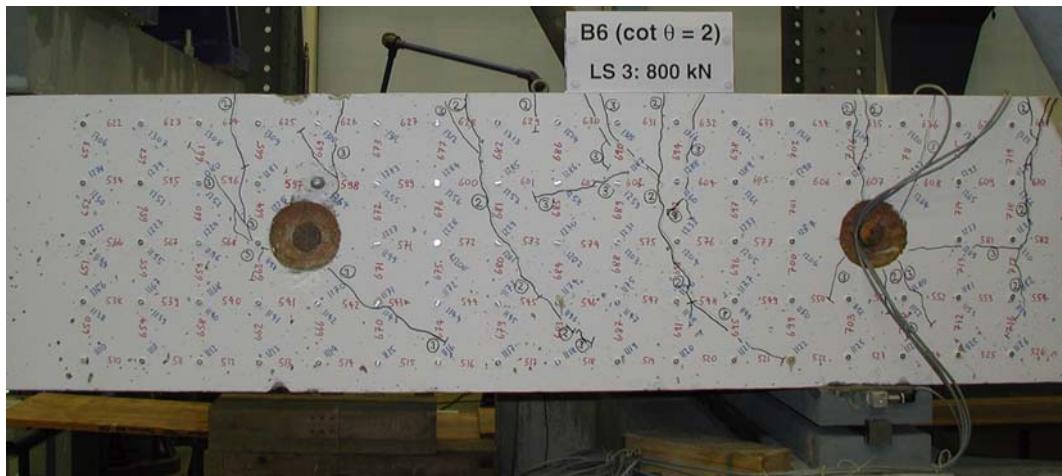


Bild 5.116: B6V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

(a)



(b)

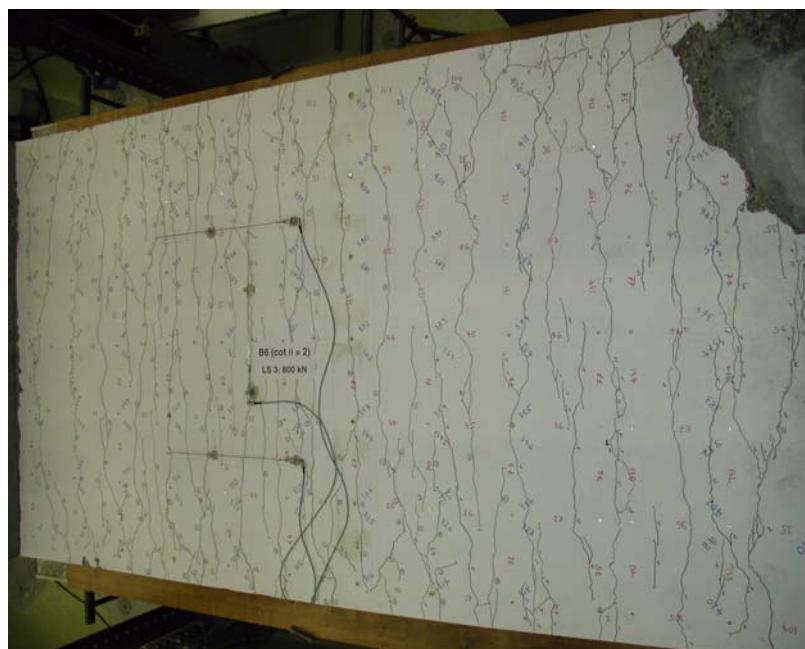


Bild 5.117: B6V2 – Rissbild bei Laststufe LS 3: (a) Vorderseite Kragarm; (b) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.

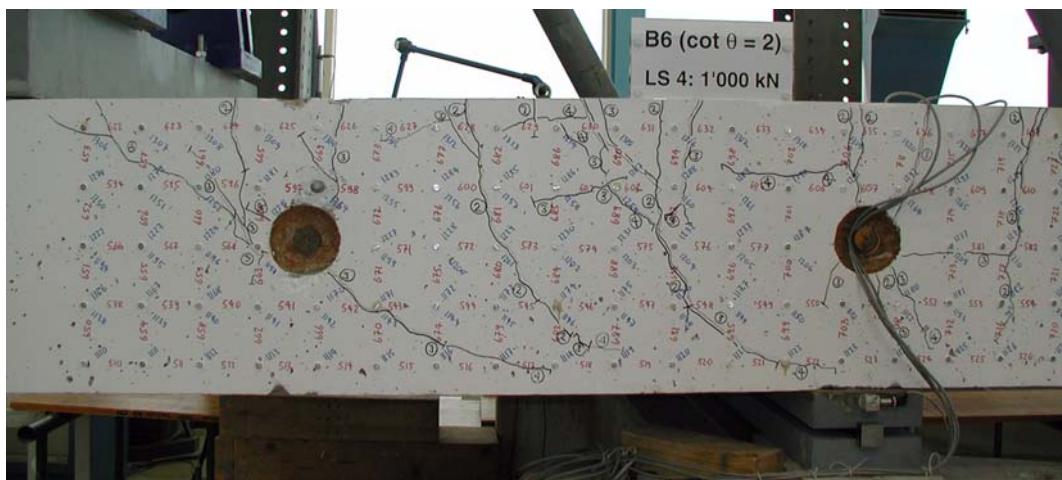
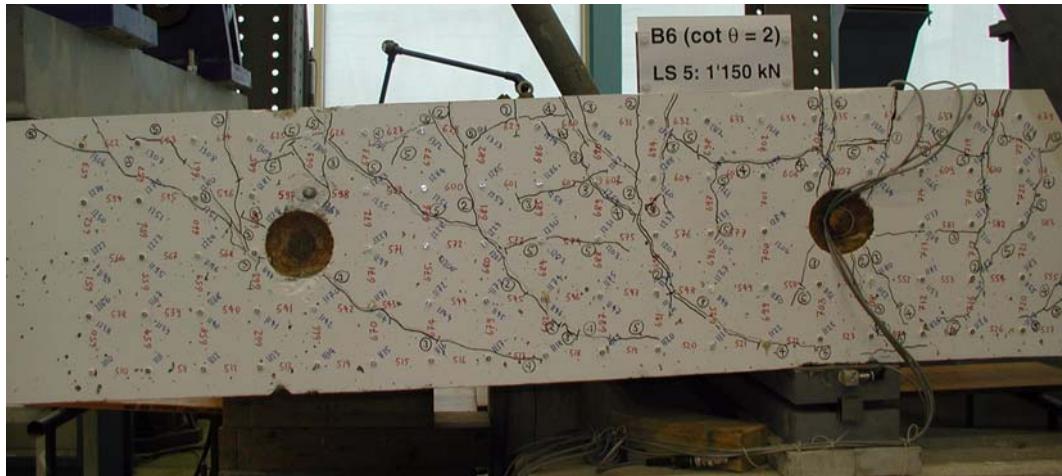
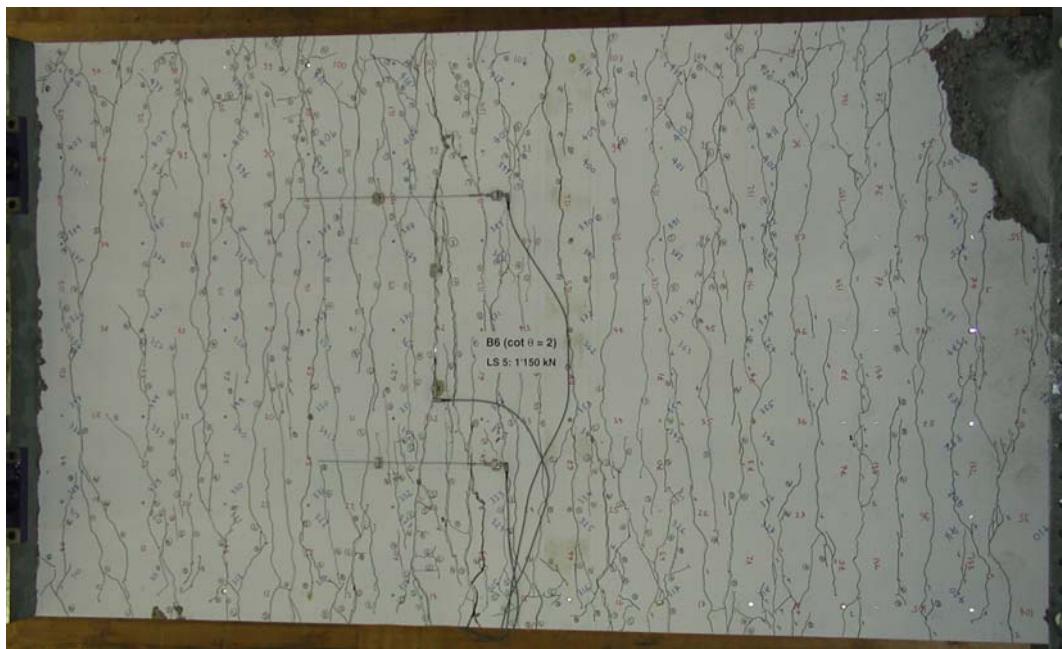


Bild 5.118: B6V2 – Rissbild bei Laststufe LS 4: Vorderseite Kragarm.

(a)



(b)



(c)

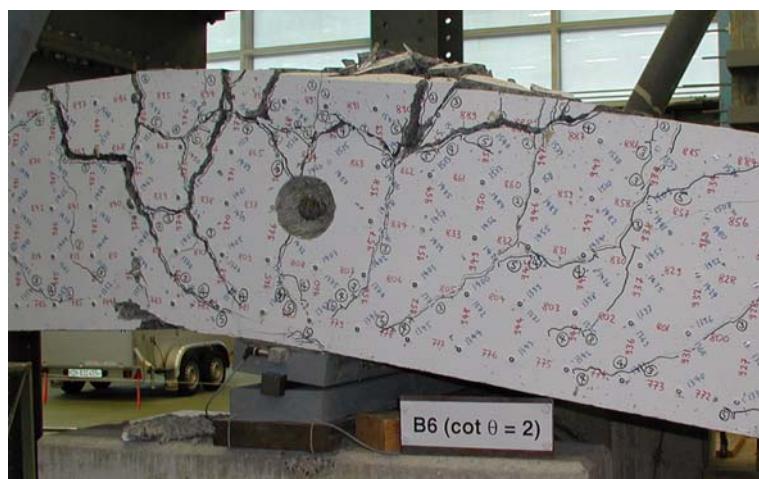


Bild 5.119: B6V2 – Rissbild bei Laststufe LS 5: (a) Vorderseite Kragarm; (b) Oberseite Kragarm und Mittelfeld; (c) Versatzriss über dem festen Lager.

(a)



(b)

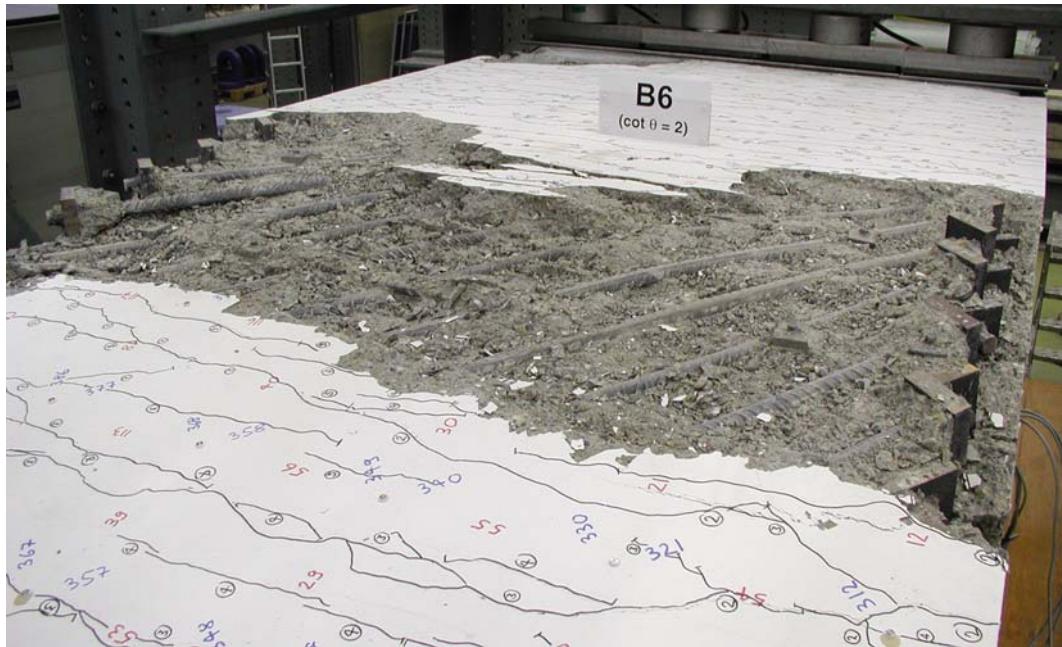


(c)



Bild 5.120: B6V2 – Bruchzone nach Versuchsende: (a) Vorderseite beim festen Lager; (b) Hinterseite beim festen Lager; (c) Oberseite beim festen Lager.

(a)



5.8 Versuchskörper B7

Der Versuchskörper B7 war als Vergleichsversuch zum Versuchskörper B6 konzipiert, und der Biegebewehrungsgehalt war mit demjenigen des Versuchskörpers B5 identisch. Im Gegensatz zum Versuchskörper B5 wurde die Biegebewehrung in den Kragarmen abgestuft, wobei Spannungsfelder mit unterschiedlichen Druckfeldneigungen für die Bestimmung des resultierenden Längszugkraftverlaufs verwendet wurden. Die entsprechenden Druckfelder wiesen eine Neigung von 45° ($\cot \theta = 1$) im Kragarm K2 und $26,6^\circ$ ($\cot \theta = 2$) im Kragarm K1 auf. Der geometrische Bewehrungsgehalt in x -Richtung betrug $\rho_x = 1,056\%$, und für die Bewehrungsrichtung galt $\phi_0 = 0^\circ$. In der Hauptbewehrungsrichtung (x -Richtung) und Querrichtung (y -Richtung) war je eine Bewehrungslage mit Stäben Ø 30 mm angeordnet, wobei die Hauptbewehrung einen Stababstand von 150 mm und die Querbewehrung einen solchen von 200 mm aufwies. Die beiden Kragarmbereiche wiesen identische Querkraftbewehrungsgehalte von $\rho_z = 0,154\%$ auf.

5.8.1 Versuch B7V1

Mit dem Versuch B7V1 wurde der Kragarm K2 ($\theta = 45^\circ$) geprüft. Dabei betrug der Abstand zwischen dem festen und beweglichen Lager 2,36 m (Abstand b). Am ersten Versuchstag wurden die beiden Nullmessungen und die Laststufe LS 2 durchgeführt. Die Laststufen LS 3 und LS 4 folgten am zweiten Versuchstag. Am dritten Versuchstag wurde der Versuchskörper erneut belastet und der Versuch abgeschlossen. Über Nacht und über das Wochenende zwischen dem zweiten und dritten Versuchstag wurde der Versuchsträger jeweils entlastet.

Bei einer Kraft von $F_A \approx 400$ kN wurde die erste Laststufe LS 2 durchgeführt. Der gerissene Bereich erstreckte sich über die inneren 70 % des Kragarms und Mittelfelds. Die Risse auf der Oberseite wiesen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 170 bis 250 mm maximale Breiten von 0,05 bis 0,1 mm auf. Auf der Vorder- und Hinterseite des Versuchskörpers hatten sich ungefähr vertikal verlaufende Risse gebildet. Im Bereich des festen Lagers ($x \approx -450 \div 450$ mm) reichten diese über die oberen 65 % der Versuchskörperhöhe, während sich diejenigen in der ersten Hälfte des Kragarms und des Mittelfelds über die obere Hälfte erstreckten. Für die folgenden Laststufen wurde zwischen den Laststufen LS 2 und LS 3 ein Belastungsintervall von $\Delta F_A \approx 400$ kN gewählt. Anschliessend wurde bis zum Erreichen der Höchstlast das Belastungsintervall auf $\Delta F_A \approx 200$ kN reduziert.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 3 ($F_A \approx 800$ kN) bildeten sich vorwiegend in den äusseren Bereichen des Kragarms und des Mittelfelds weitere Risse. Nachdem die Kragarm-

Laststufe (LS)	F_A [kN]	F_B [kN]	F_{C1} [kN]	F_{C2} [kN]	$-V_{C1}$ [kN]	$-M_C$ [kNm]	w_1 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	$\alpha(F_A)$ [°]	Bemerkungen
1	0	-82	108	0	71	83	0	0	0	0	Nullmessung
2	399 359	189 161	779 711	0,7 0,3	471 431	724 659	4,1 4,1	0,27 0,28	0,01 0,03	0,10 0,04	Belastungsende Messende
Entlastung 2a	0 0	-82 -82	108 108	0 0	71 71	83 83	1,7 1,8	0,14 0,17	0,04 0,07	-0,05 -0,09	Entlastungsende Belastungsbeginn
3	799 731	462 416	1452 1337	2,2 2,2	871 802	1369 1259	11,8 12,1	0,79 0,76	0,11 0,11	0,15 0,17	Belastungsende Messende
4	999 936	600 557	1789 1684	4,1 3,8	1070 1008	1694 1593	16,9 17,0	1,03 1,01	0,13 0,12	0,23 0,23	Belastungsende Messende
Entlastung 4a	0 0	-82 -82	108 108	0 0	71 71	83 83	4,5 4,2	0,27 0,26	0,11 0,11	-0,11 0,02	Entlastungsende Belastungsbeginn
HL	1132	695	2018	8,1	1203	1919	22,0	1,21	0,15	0,41	Höchstlast
Entlastung	248	92	530	4,7	319	494	89,9	0,40	0,12	1,09	Entlastungsbeginn

Tabelle 5.26: B7V1 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 5.2).

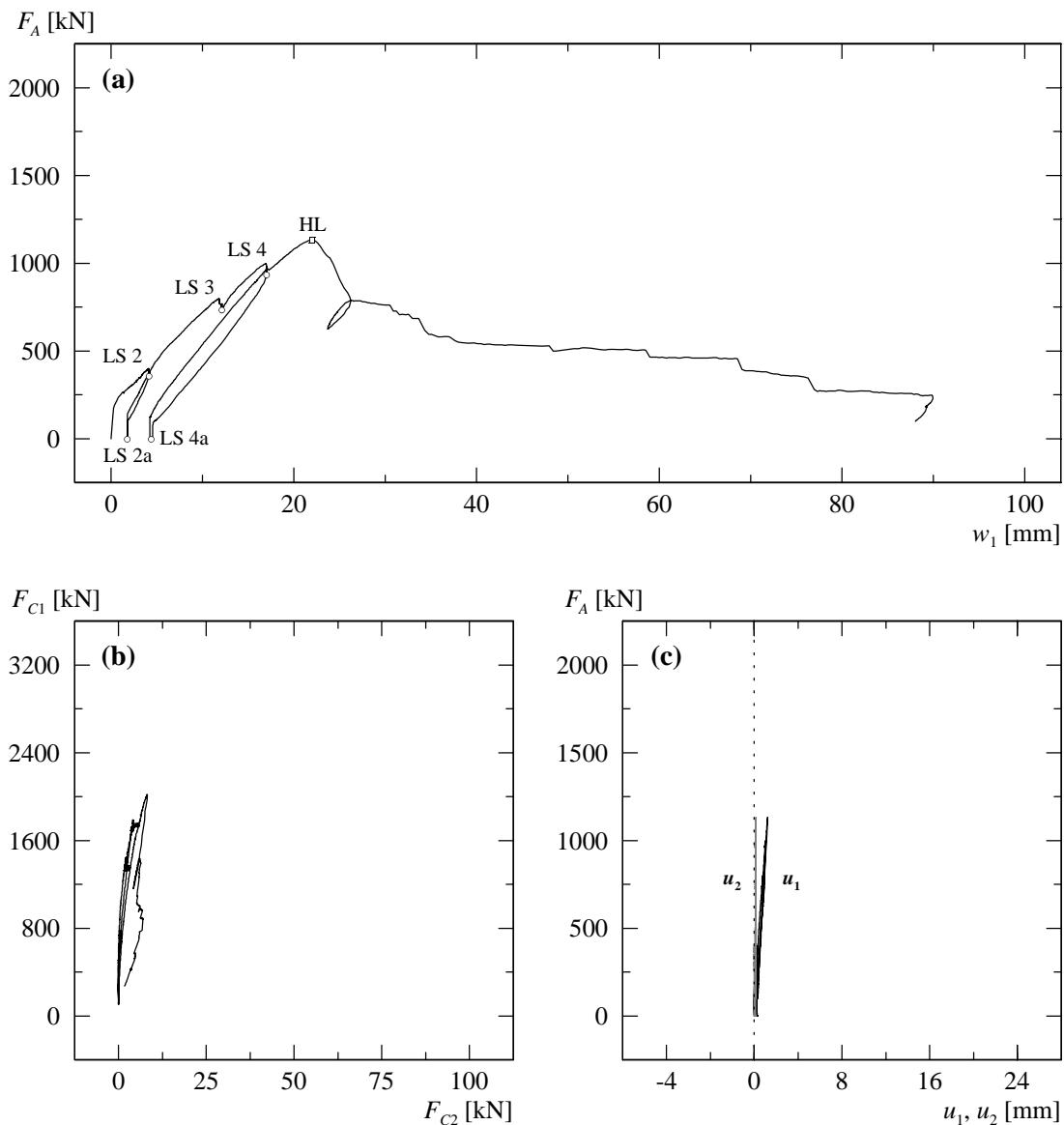


Bild 5.122: B7V1 – (a) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K2; (b) berechnete Lagerreaktionen beim Auflager C; (c) Verformungen der Zugzone über Auflager C.

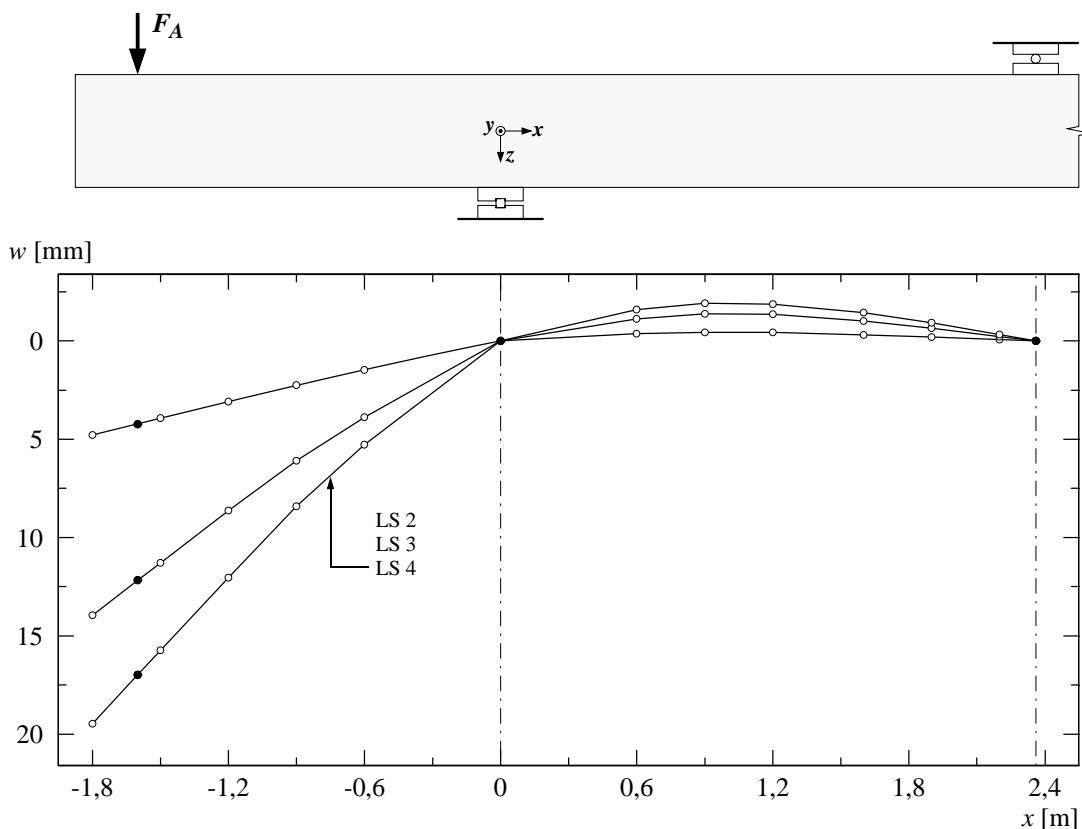
durchbiegung während zehn Minuten konstant gehalten werden konnte, bildete sich im Kragarm schlagartig ein neuer Riss an der Stelle der Bewehrungsabstufung ($x \approx -1300$ mm). Dabei vergrößerte sich die Kragarmdurchbiegung, und die Kraft fiel leicht ab. In der Folge konnte auf der Oberseite ein vertikaler Versatz der beiden Rissufer von ungefähr 0,2 mm sowie eine unterschiedliche Rissentwicklung auf der Vorder- und Hinterseite festgestellt werden. Auf der Vorderseite reichte der Versatzriss bis in die Biegedruckzone, wobei sich dieser im unteren Bereich, 150 mm oberhalb der Unterkante, mit einem bis zur Laststufe LS 3 neu entstandenen Riss vereinigte. Der Abstand der Risswurzel von der Unterseite lag bei 60 mm und die Rissneigung betrug 45 bis 55° gegenüber der x -Achse. Auf der Hinterseite verlief der Versatzriss im oberen Bereich ungefähr vertikal und setzte sich dann im unteren Bereich mit einer leichten Neigung gegen das feste Lager fort, wobei sich dieser aber nur über die oberen 70 % der Versuchskörperhöhe ausdehnte. Neben dem Versatzriss bei der Bewehrungsabstufung wurde auf der Oberseite die Bildung von neuen Rissen beim Kragarmende und im äusseren Bereich des Mittelfelds sowie vereinzelter Verästelungsrisse und in x -Richtung verlaufender Verbundrisse über dem festen Lager (Stelle C) festgestellt. Der gerissene Bereich erstreckte sich über die ganze Oberseite, wobei sich die Rissbreiten der vorhandenen Risse bei mittleren Rissabständen von ungefähr 170 bis 250 mm geringfügig vergrösserten. Der Versatzriss wies eine Breite von 0,25 mm auf. Die übrigen Rissbreiten betru-

Laststufe	Oberseite			Vorderseite – Kragarm		Vorderseite – Festes Lager	
	Kragarm w_{cr} [mm]	Festes Lager w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 2	HR...0,05	0,05...0,10	0,05...0,10	HR...0,05	HR	0,05...0,10	HR
LS 3	0,05...0,25	0,05...0,25	0,10...0,20	0,10...0,25	0,05...0,15	0,15...0,30	HR...0,10
LS 4	0,10...0,80	0,10...0,40	0,10...0,30	0,10...0,55	0,05...0,50	0,20...0,35	0,05...0,10

Tabelle 5.27: B7V1 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

gen im Kragarm 0,05 bis 0,15 mm, während im Mittelfeld Rissbreiten von 0,1 bis 0,2 mm und über dem festen Lager von 0,05 bis 0,25 mm gemessen wurden. Ausser dem Versatzriss beim Kragarmende bildeten sich auf der Vorder- und Hinterseite sowohl im Kragarm als auch im Mittelfeld neue Risse, während sich die bereits vorhandenen Risse fortpflanzten und teilweise verästelten. Die Risse verliefen in den oberen Bereichen des Kragarms und Mittelfelds vertikal, setzten sich dann aber im unteren Bereich des Kragarms mit einer leichten Neigung gegen das feste Auflager fort. Im unteren Bereich wiesen die schrägen Risse im Kragarm Neigungen von 45 bis 75° gegenüber der x -Achse auf, während sich die Risse beim festen Lager und im Mittelfeld bei gleichbleibender Rissneigung verlängerten. Die Risse erstreckten sich über die oberen 70 bis 75 % der Versuchskörperhöhe. Auf der Höhe der obersten Deformatormessreihe (≈ 50 mm unterhalb der Oberkante) wurden im Bereich des festen Lagers Rissbreiten von 0,15 bis 0,3 mm gemessen, während im Kragarm die Rissbreiten bei 0,1 bis 0,25 mm lagen. Auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) betragen sie beim festen Lager maximal 0,1 mm und im Kragarm maximal 0,15 mm.

Die letzte Laststufe LS 4 wurde bei einer Kraft von $F_A \approx 1000$ kN durchgeführt. Gegenüber der Laststufe LS 3 hatte sich das Rissbild nur geringfügig verändert. Neben der Bildung vereinzelter Verästelungsrisse und in x -Richtung verlaufender Verbundrisse wurde auf der Oberseite eine Vergrösserung der Rissbreiten festgestellt. Der Versatzriss im Kragarm hatte sich auf der Oberseite 0,8 mm weit geöffnet, wobei am vorderen Plattenrand ein vertikaler Versatz der beiden Rissufer

**Bild 5.123:** B7V1 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

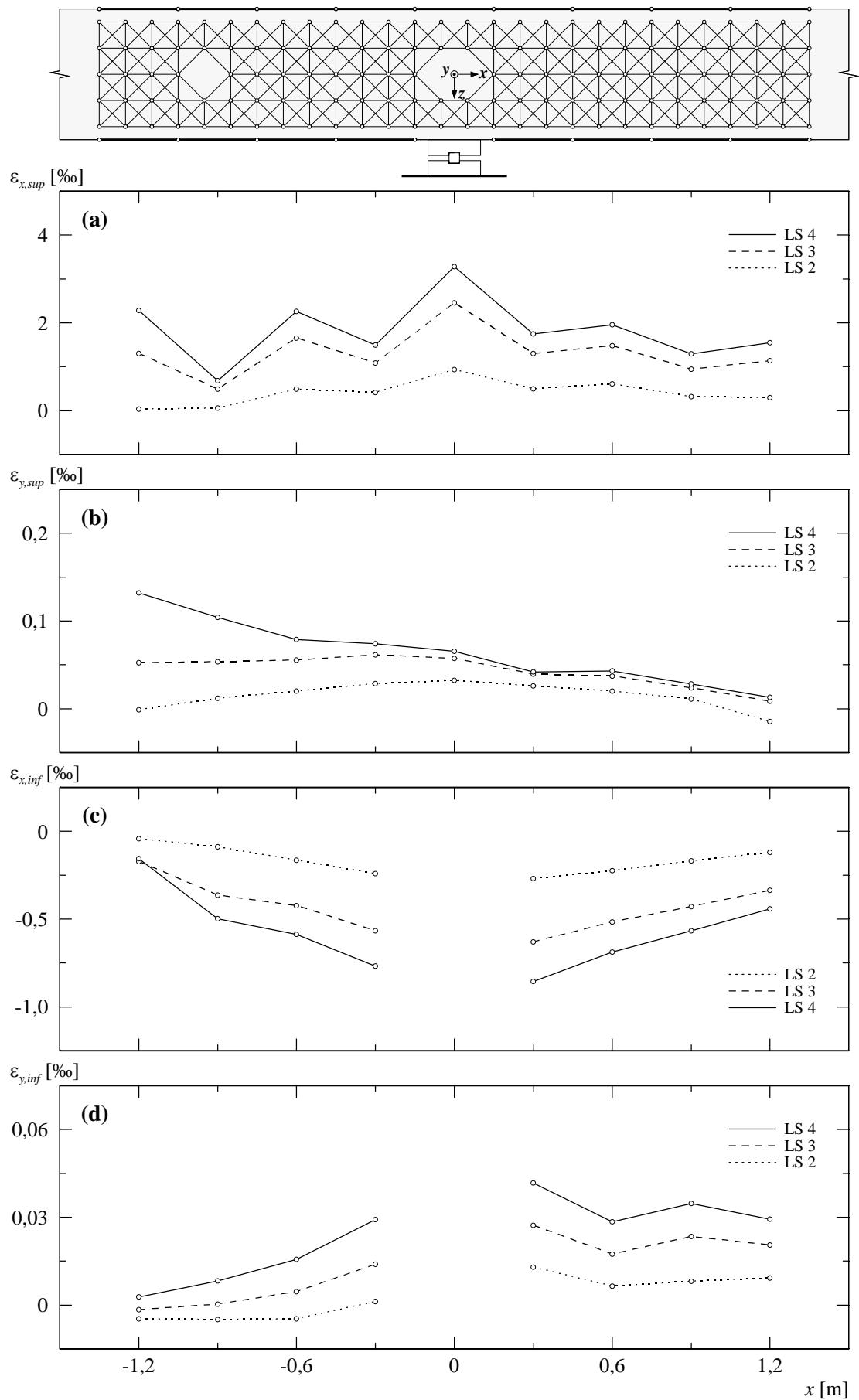


Bild 5.124: B7V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben; (c) mittlere Längsdehnungen unten; (d) mittlere Querdehnungen unten.

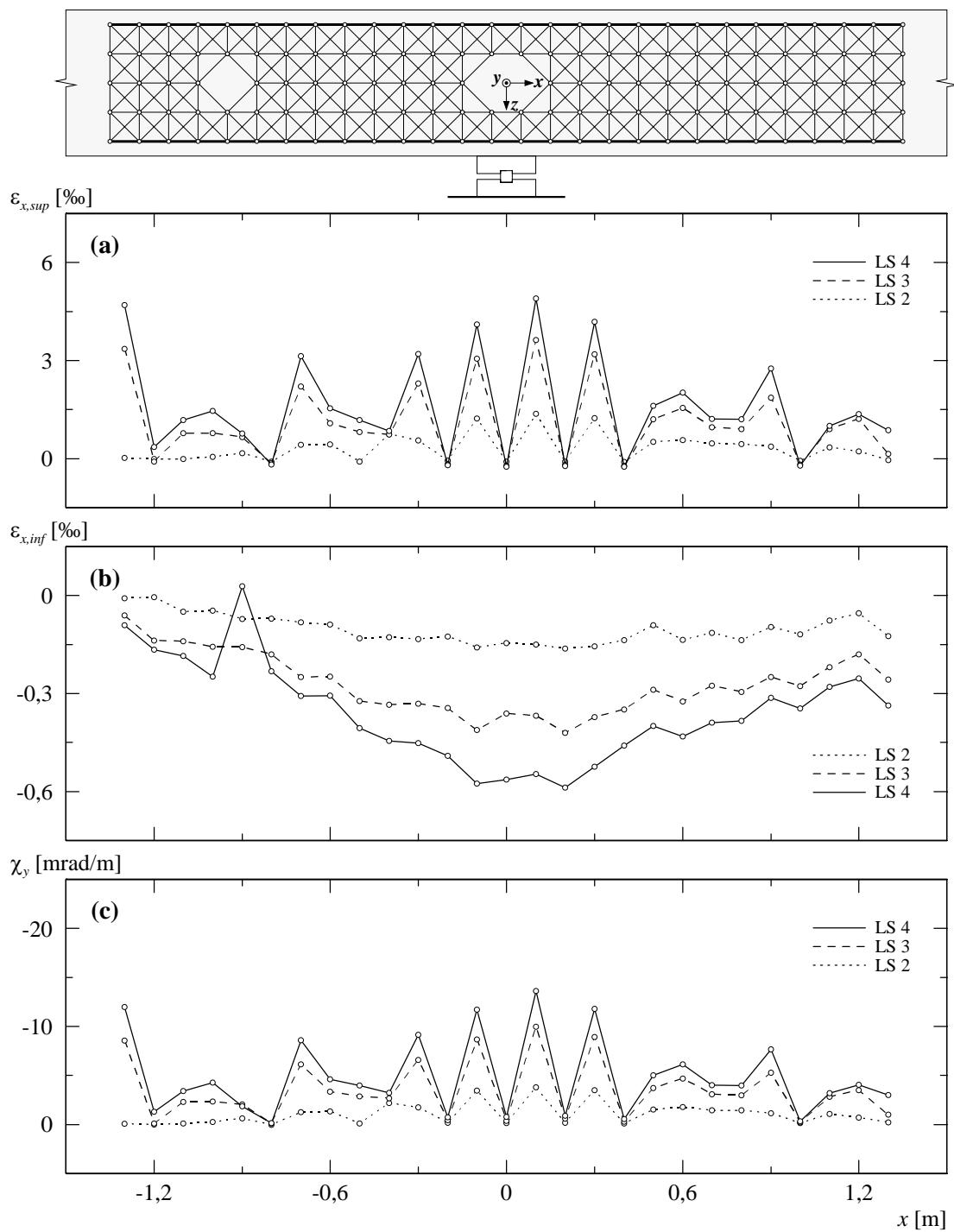


Bild 5.125: B7V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

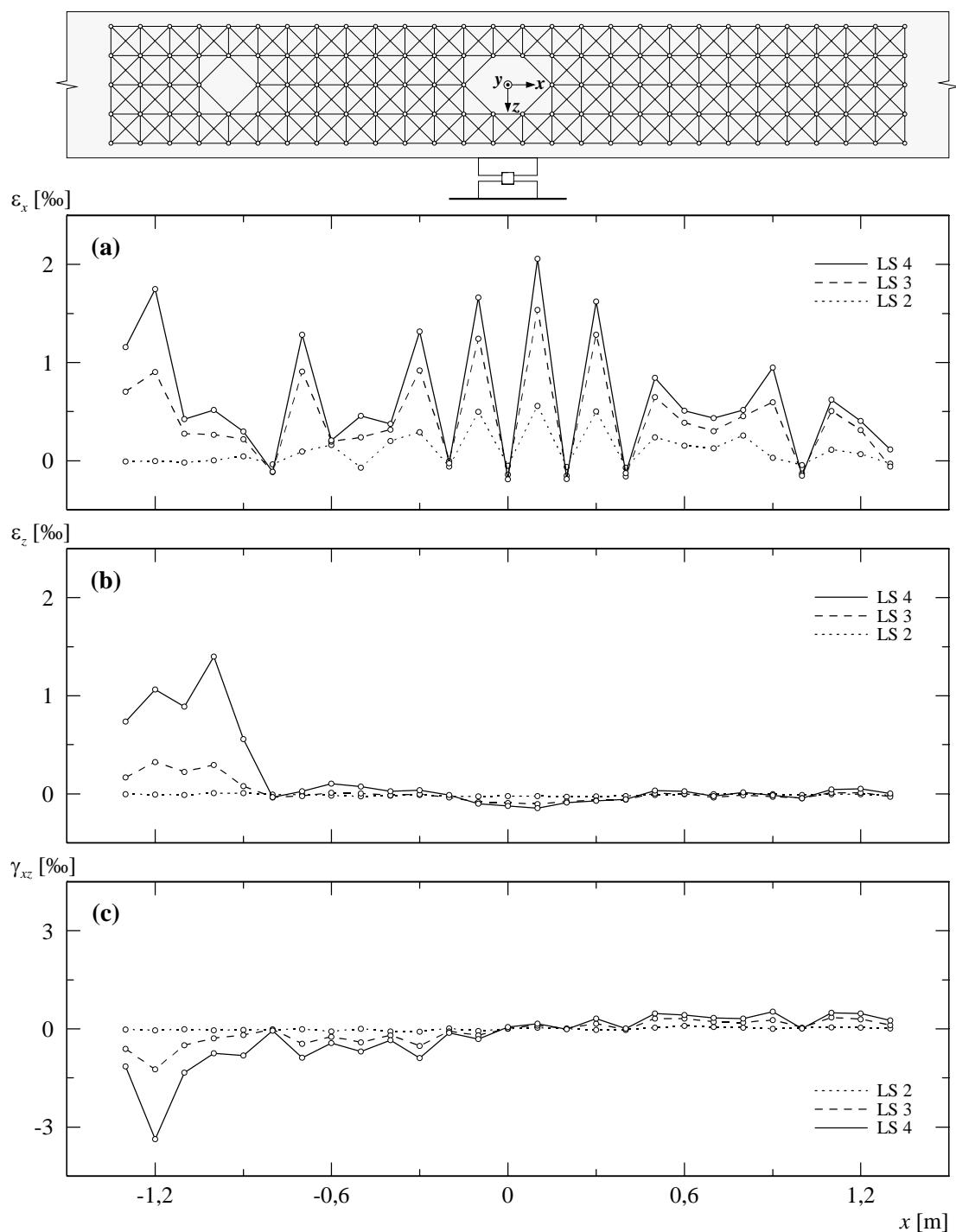


Bild 5.126: B7V1 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

von ungefähr 1,2 mm und am hinteren Plattenrand ein solcher von ungefähr 0,2 mm gemessen wurde. Die übrigen Risse im Kragarm wiesen Rissbreiten zwischen 0,1 und 0,25 mm auf, während die Rissbreiten im Mittelfeld bei 0,1 bis 0,3 mm und über dem festen Lager bei 0,1 bis 0,4 mm lagen. Die mittleren Rissabstände betrugen nach wie vor 170 bis 250 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite konnten die Verlängerung sowie vereinzelte Verästelungen der bestehenden Risse festgestellt werden. Der Versatzriss im Kragarm pflanzte sich auf der Vorderseite mit einer sehr flachen Neigung von ungefähr 10° gegenüber der x -Achse fort. Die Risswurzel lag dabei ungefähr 30 mm oberhalb der Unterseite des Versuchskörpers. Die Rissbreite betrug im Bereich der Biegebewehrungslagen ($z \approx -200$ mm) 0,55 mm und auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) 0,5 mm, im untersten Bereich ($z \approx 200$ mm) ungefähr 0,25 mm. Auf der Hinterseite verlängerte sich der Versatzriss mit einer Neigung von 45° gegenüber der x -Achse und reichte bis 70 mm oberhalb der Unterseite des Versuchskörpers. Auf der Höhe der Bewehrungslagen wurde eine Rissbreite von 0,35 mm gemessen, welche im unteren Bereich stark abnahm und im untersten Bereich noch 0,05 mm betrug. Die übrigen Risse erstreckten sich im Kragarm über die oberen 70 bis 75 % der Versuchskörperhöhe, wobei die Risse im untersten Bereich leicht abdrehten und sich mit Rissneigungen von 45 bis 60° gegenüber der x -Achse gegen das feste Lager fortpflanzten. Im Mittelfeld und in unmittelbarer Nähe des festen Lagers verliefen die Risse im oberen Bereich ungefähr vertikal, setzten sich dann aber im unteren Bereich mit einer leichten Neigung gegen das feste Lager fort und erstreckten sich dabei über die oberen 70 % der Versuchskörperhöhe. Die Neigung der Risse lag auf halber Versuchskörperhöhe zwischen 60 und 80° gegenüber der x -Achse. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe betragen die Rissbreiten im Bereich des festen Lagers 0,2 bis maximal 0,35 mm und im Kragarm 0,1 bis 0,2 mm. Auf halber Versuchskörperhöhe lagen die Rissbreiten sowohl über dem festen Lager als auch im Kragarm zwischen 0,05 und 0,1 mm.

Nach der Durchführung der Laststufe LS 4 wurde der Versuchskörper entlastet. Bei der Wiederbelastung konnte beim alten Belastungsniveau, welches einer Kraft von $F_A \approx 1000$ kN entsprach, ein Knistern wahrgenommen werden. Dabei wurde ein Kraftabfall sowie eine plötzliche Vergrößerung der Kragarmdurchbiegung festgestellt. Auf der Oberfläche des Versuchskörpers konnten jedoch keine neuen Rissbildungen beobachtet werden.

Im weiteren Versuchsfortschritt wurde bei einer Durchbiegung von $w_1 = 22,0$ mm beim Kragarm K2 die Höchstlast erreicht. Die entsprechende Kraft betrug $F_A = 1132$ kN. Unmittelbar nach Überschreiten der Höchstlast erfolgte schlagartig und ohne Vorankündigung ein Biegeschubbruch des Kragarms K2. In der Folge fiel die Kraft stark ab, wobei gleichzeitig auf der Vorderseite eine grössere Zunahme der Kragarmdurchbiegung als auf der Hinterseite feststellbar war. Bei einer Kraft von $F_A \approx 800$ kN und einer dazugehörenden Durchbiegung von $w_1 \approx 26$ mm konnte der Versuchskörper stabilisiert werden. Zu diesem Zeitpunkt konnte die Bruchfläche nur auf der Vorderseite beobachtet werden. Die leicht s-förmig gekrümmte Bruchfläche folgte in ihrem mittleren, steil verlaufenden Teil dem vorhandenen Versatzriss bei der Bewehrungsabstufung. Der untere, flache Teil bis zum Auflager entstand unmittelbar beim Bruch. Die bis zum Kragarmende verlaufende Biegebewehrung wurde dabei an der Stelle der Bewehrungsabstufung abgequetscht, und grössere Teile des Überdeckungsbetons in der Biegendruckzone wurden auf einer Länge von ungefähr 850 mm links vom festen Lager (im Kragarm) abgetrennt. Anschliessend wurde der Versuchskörper bis zu einer Kraft von $F_A \approx 600$ kN entlastet und wiederbelastet. Bei der Wiederbelastung konnte mit einer Kraft von $F_A \approx 800$ kN das alte Belastungsniveau wieder erreicht werden. Im weiteren Versuchsfortschritt wurde die Durchbiegung des Kragarms K2 kontinuierlich vergrössert, wobei bis zu einer Durchbiegung von $w_1 \approx 30$ mm keine grösseren Kraftabfälle feststellbar waren. Mit zunehmender Kragarmdurchbiegung dehnte sich die Bruchfläche allmählich über die gesamte Versuchskörperbreite aus. Während dieser Phase platzen auf der Kragarmseite beim festen Lager erste Teile des Überdeckungsbetons an der Unterseite ab. Die unterschiedliche Entwicklung der Durchbiegungen auf der Vorder- und Hinterseite des Kragarms führte zu einer leichten Verwindung des Kragarms. Auf der Hinterseite platze in der Folge im unteren Bereich der seitliche Überdeckungsbeton in der inneren Hälfte des Kragarms in x -Richtung über eine Länge von ungefähr 1100 mm ($x \approx 50 \div -1050$ mm) ab. Die Dicke der abgeplatzten Betonschicht betrug

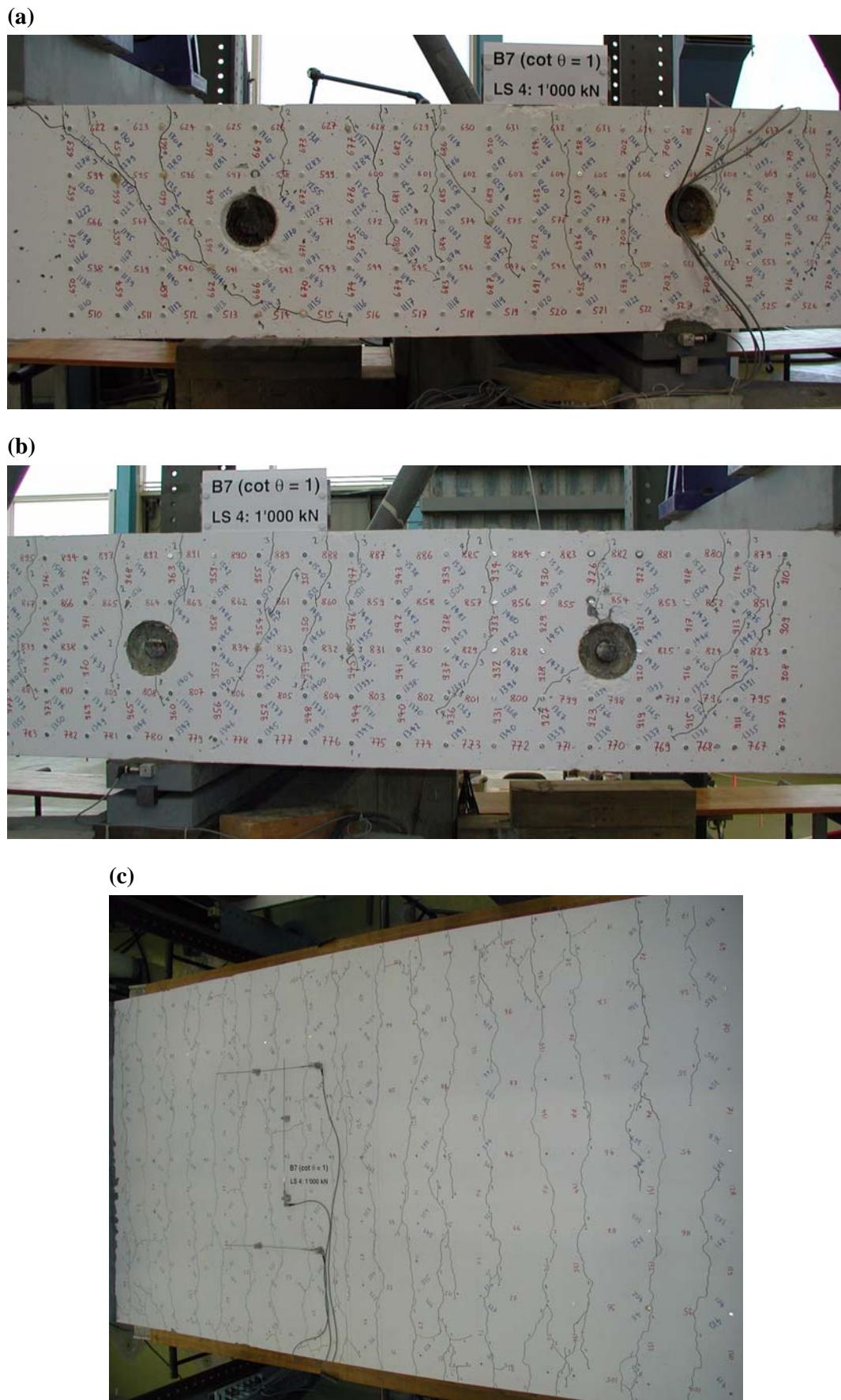
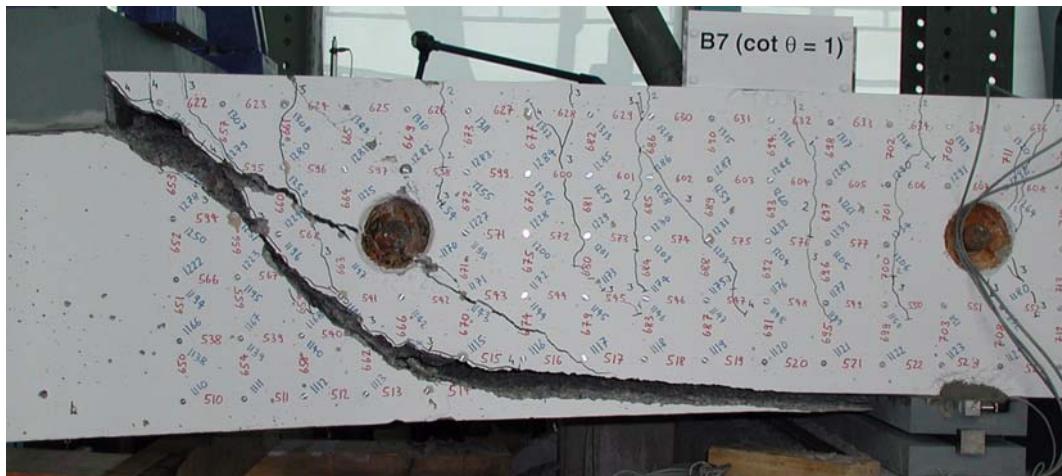
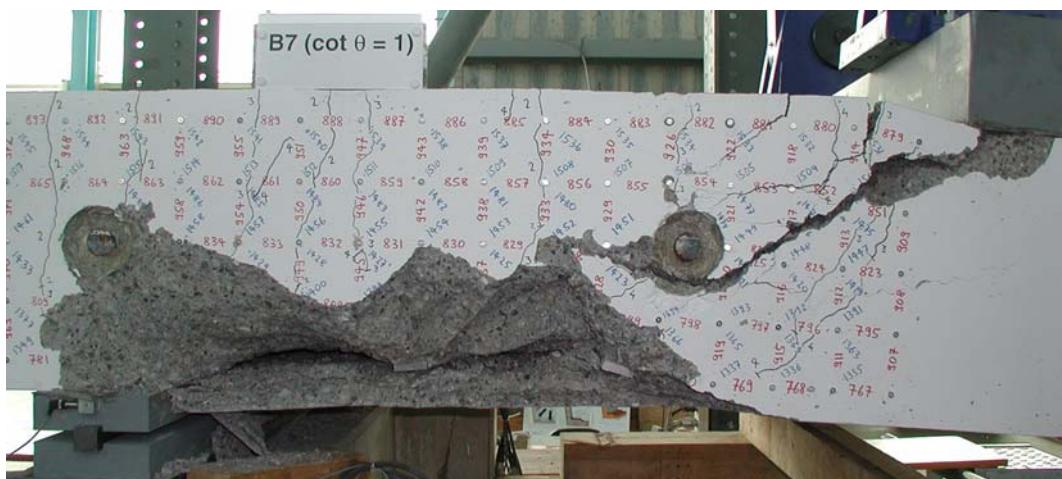


Bild 5.127: B7V1 – Rissbild bei Laststufe LS 4: (a) Vorderseite Kragarm; (b) Hinterseite Kragarm; (c) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.

(a)



(b)



(c)



Bild 5.128: B7V1 – Biegeschubbruch im Kragarm K2: (a) Vorderseite bei Versuchsende; (b) Hinterseite bei Versuchsende; (c) Abplatzungen der Biegedruckzone.

im Mittel ca. 100 mm. Weiter konnten ab einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 30$ mm sukzessive das Zerreissen von mehreren Querkraftbewehrungsstäben akustisch wahrgenommen sowie grössere Kraftabfälle beobachtet werden. Bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 90$ mm wurde der Versuch abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt noch ungefähr 22 % der Höchstlast. An der Unterseite hatte sich bis zum Belastungsstopp in einem Bereich von ungefähr 750 mm links vom festen Lager ($x \approx -100 \div -850$ mm) ein klaffender, horizontal verlaufender Trennriss unterhalb der Ankerplatten der Querkraftbewehrungsstäbe gebildet. Die abgelöste Betonplatte mit einer Abmessung von 850 mm × 2000 mm wies auf der Vorderseite eine Dicke von wenigen Millimetern bis maximal 50 mm auf, während auf der Hinterseite eine mittlere Dicke von 50 bis 60 mm gemessen wurde. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden. Während der Entlastungsphase wurde schliesslich die abgelöste Betonplatte vollständig abgetrennt.

Bei der abschliessenden Untersuchung des Versuchskörpers wurden im Bereich der Bewehrungsabstufung vereinzelte Querkraftbewehrungsstäbe entdeckt, welche unterhalb der Biegebewehrungslagen zerrissen waren. Der Versatzriss verlief mit einer Neigung von 45 bis 50° gegenüber der x -Achse zwischen der zweitäußersten und drittäußersten Reihe der Querkraftbewehrungsstäbe. An der Unterseite war der Überdeckungsbeton der Biegendruckzone in einem Bereich von ungefähr 850 mm links vom festen Lager (im Kragarm) über die gesamte Versuchskörperbreite abgeplatzt. Die abgeplatzte Betonschicht lag unterhalb der Ankerplatten der Querkraftbewehrungsstäbe und wies in der hinteren Versuchskörperhälfte eine mittlere Dicke von ungefähr 50 mm auf, welche sich auf der Vorderseite in unmittelbarer Auflagernähe bis auf wenige Millimeter verringerte. Sowohl der Versatzriss als auch die Bruchfläche der Abplatzungen zeigten eine rauhe Beschaffenheit der Oberfläche. Auf der Vorderseite wurde bei der Bewehrungsabstufung beziehungweise beim Versatzriss eine mittlere vertikale Relativverschiebung der linken Versuchskörperhälfte (Kragarmseite) von ungefähr 50 mm gemessen, während diejenige auf der Hinterseite zwischen 20 und 25 mm lag. Die unterschiedlichen Relativverschiebungen führten zu einer Verwindung der beiden Versuchskörperhälften und zu unterschiedlichen Abplatzungen auf der Vorder- und Hinterseite.

Der untere Betonkeil, welcher durch den Versatzriss im Kragarm begrenzt ist, erfuhr während des Versuchs eine Rotationsbewegung sowie eine vertikale Translation. Das Rotationszentrum lag dabei bei der drittäußersten Reihe der Querkraftbewehrungsstäbe im Bereich des Überdeckungsbetons in der Biegendruckzone beziehungsweise in der unterhalb der Ankerplatten der Querkraftbewehrungsstäbe abgelösten Betonschicht. Die Abstützung des unteren Betonkeils in der Überdeckungszone führte in der Folge zur Bildung des unterhalb der Ankerplatten der Querkraftbewehrungsstäbe liegenden Trennrisses sowie zu einer vertikalen Translation der abgelösten Betonschicht beziehungsweise des Rotationszentrums. Dabei stabilisierten sowohl die abgequetschten Biegebewehrungsstäbe bei der Bewehrungsabstufung als auch vereinzelte in der internen Versuchskörperhälfte angeordnete Querkraftbewehrungsstäbe der zweitäußersten Reihe den unteren Betonkeil.

5.8.2 Versuch B7V2

Mit dem Versuch B7V2 wurde der Kragarm K2 ($\theta = 26,6^\circ$) geprüft. Dabei betrug der Abstand zwischen dem festen und beweglichen Lager 2,36 m (Abstand b). Am ersten Versuchstag wurden die beiden Nullmessungen durchgeführt. Die Laststufen LS 2 bis LS 4 folgten am zweiten, die Laststufen LS 5 und LS 6 am dritten Versuchstag. Die erste Belastung erfolgte am zweiten Versuchstag, wobei zwischen der zweiten Nullmessung und der Laststufe LS 2 ein Wochenende lag. Über Nacht wurde der Versuchsträger entlastet.

Bei einer Kraft von $F_A \approx 400$ kN wurde die erste Laststufe LS 2 durchgeführt. Während der Deformettermessungen wurde ein grosser Kraftverlust festgestellt, der auf eine undichte Kupplung im Ölkreislauf der Flachpressen beim horizontal beweglichen Lager (Stelle B) zurückzuführen war. Nach der Durchführung der Hälfte aller Deformettermessungen mussten die Hubweiten der Flachpressen leicht korrigiert werden, damit ein Aufsetzen der Pressengehäuse verhindert werden konnte. Der gerissene Bereich erstreckte sich über die inneren 60 % des Kragarms und das gesamte Mittelfeld. Die Risse auf der Oberseite wiesen mittlere Rissabstände von 200 bis 250 mm auf und die Rissbreiten lagen bei maximal 0,05 bis 0,1 mm. Auf der Vorder- und Hinterseite des Versuchskörpers hatten sich ungefähr vertikal verlaufende Risse gebildet. In der ersten Hälfte des Kragarms und des Mittelfelds reichten diese über die obere Hälfte und im Bereich des festen Lagers ($x \approx -450 \div 450$ mm) über die oberen 50 bis 70 % der Versuchskörperhöhe. Nach der Durchführung der Laststufe LS 2 konnte der Ölverlust durch Anziehen der Kupplung behoben werden, ohne dass der Versuchskörper vollständig entlastet werden musste. Im Anschluss wurde der Versuchskörper bis zu einer Kraft von $F_A \approx 125$ kN entlastet und wiederbelastet. Der Entlastungs-Wiederbelastungszyklus diente zur Regulierung und Korrektur der Flachpressen. Dabei wurden die Flachpressen ausgefahren, so dass während der weiteren Versuchsdurchführung ein Aufsetzen der Pressengehäuse auszuschliessen war. Für die folgenden Laststufen wurde zwischen den Laststufen LS 2 und LS 3 ein Belastungsintervall von $\Delta F_A \approx 400$ kN gewählt. Anschliessend wurde bis zum Erreichen der Höchstlast das Belastungsintervall auf $\Delta F_A \approx 200$ kN reduziert.

Bei der Steigerung der Kraft bis zur Laststufe LS 3 ($F_A \approx 800$ kN) bildeten sich vorwiegend in den äusseren Bereichen des Kragarms weitere Risse. Neben der Bildung vereinzelter Verästelungsrisse sowie von neuen Rissen beim Kragarmende und über dem festen Lager (Stelle C)

Laststufe (LS)	F_A [kN]	F_B [kN]	F_{C1} [kN]	F_{C2} [kN]	$-V_{C1}$ [kN]	$-M_C$ [kNm]	w_1 [mm]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	$\alpha(F_A)$ [°]	Bemerkungen
1	0	-82	108	0	71	83	0	0	0	0	Nullmessung
2	400 232	190 75	780 498	0,4 0,2	472 304	725 456	4,2 2,9	0,29 0,23	0,07 0,07	0,05 0,05	Belastungsende Messende
3	800 733	462 416	1452 1340	1,3 0,9	872 805	1368 1260	11,3 11,2	0,71 0,70	0,12 0,12	0,09 0,07	Belastungsende Messende
4	1000 955	599 568	1790 1714	2,7 2,5	1071 1027	1692 1620	15,6 15,6	0,94 0,93	0,13 0,13	0,16 0,15	Belastungsende Messende
Entlastung 4a	0 0	-82 -82	108 108	0 0	71 71	83 83	3,9 3,9	0,26 0,23	0,10 0,08	-0,11 -0,05	Entlastungsende Belastungsbeginn
5	1201 1109	740 676	2131 1975	6,0 4,6	1273 1180	2024 1872	20,8 20,6	1,16 1,17	0,12 0,15	0,29 0,24	Belastungsende Messende
6	1402 1288	885 804	2478 2283	13,4 10,6	1473 1359	2368 2176	35,8 35,8	3,62 3,79	0,11 0,16	0,55 0,47	Belastungsende Messende
HL	1439	922	2550	22,3	1510	2454	63,5	8,47	0,08	0,89	Höchstlast
$(-M_C)_{max}$	1429	928	2547	32,4	1500	2469	91,0	10,96	-0,02	1,30	Maximalmoment
Entlastung	919	619	1726	61,1	988	1738	276,0	15,03	0,71	3,81	Entlastungsbeginn

Tabelle 5.28: B7V2 – Versuchsablauf (Bezeichnungen gemäss Bild 5.3).

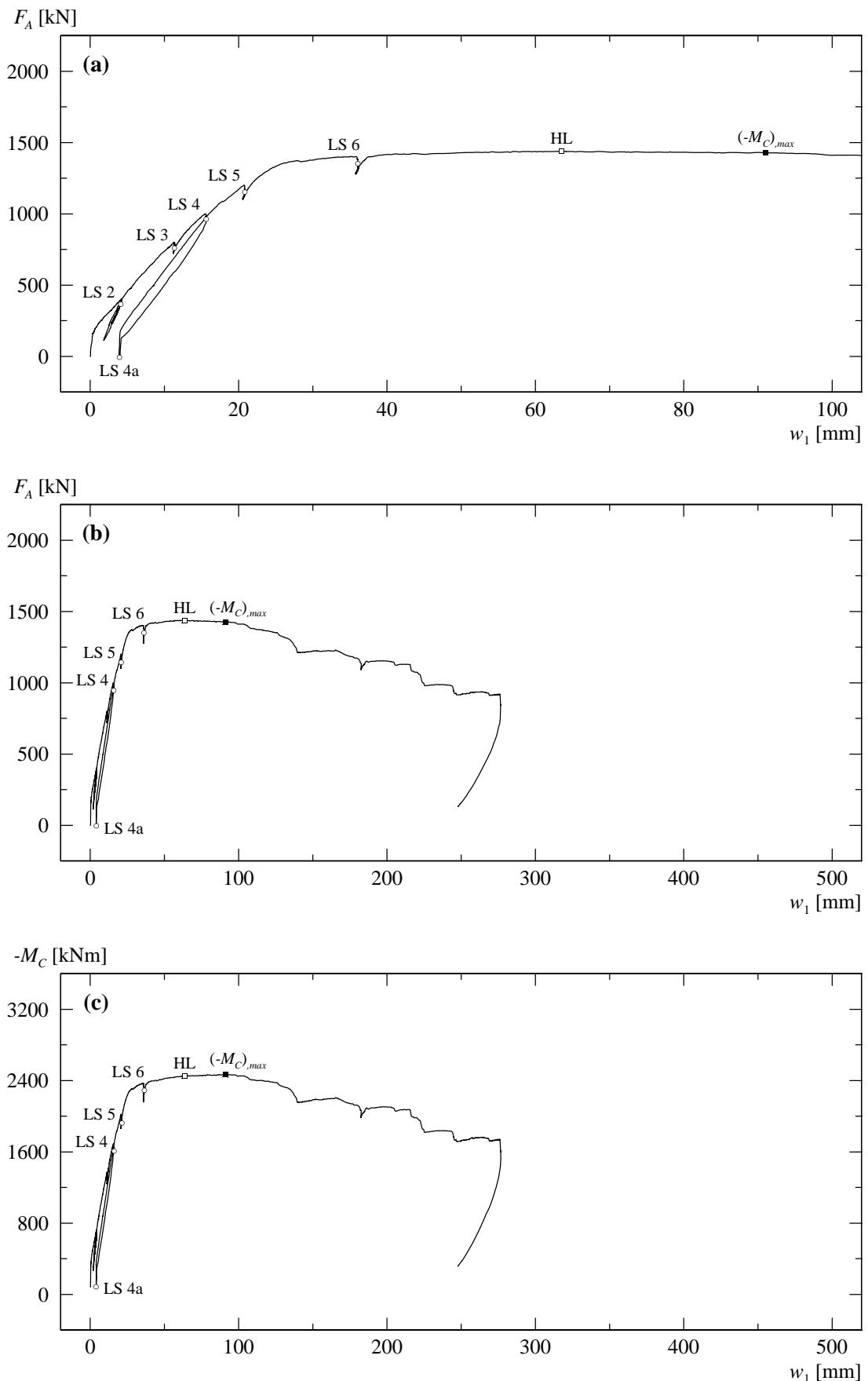


Bild 5.129: B7V2 – (a) und (b) Last-Durchbiegungsdiagramm Kragarm K1; (c) berechnetes Momenten-Durchbiegungsdiagramm.

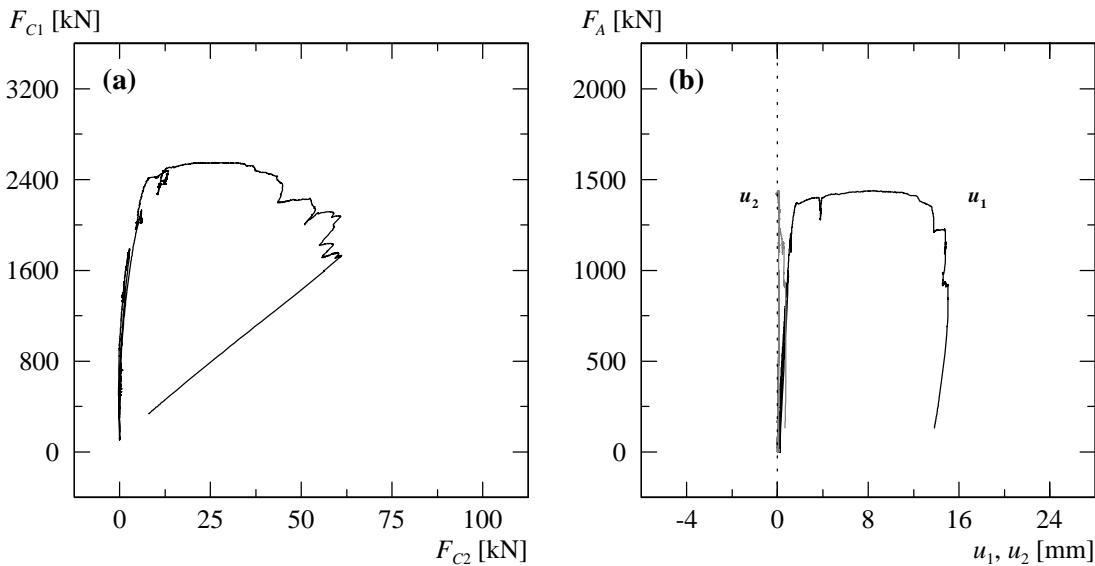


Bild 5.130: B7V2 – (a) Berechnete Lagerreaktionen beim Auflager C; (b) Verformungen der Zugzone über Auflager C.

wurde auf der Oberseite eine Vergrösserung der Rissbreiten festgestellt. Die Rissbreiten betragen bei mittleren Rissabständen von ungefähr 150 bis 250 mm im Kragarm 0,05 bis 0,1 mm, im Mittelfeld 0,05 bis 0,25 mm und über dem festen Lager 0,05 bis 0,3 mm. Im Kragarm entstanden auf der Vorder- und Hinterseite je zwei neue Risse, während sich die bereits vorhandenen Risse fort-pflanzten. Die Risse verliefen in den oberen Bereichen des Kragarms und Mittelfelds vertikal, setzten sich dann aber im unteren Bereich mit einer leichten Neigung von 75 bis 85° gegenüber der x -Achse gegen das feste Auflager fort, wobei vereinzelte Risse im untersten Bereich stark abdrehten. Im untersten Bereich wiesen diese Risse eine Rissneigung von ungefähr 45° auf. Beim festen Lager verlängerten sich die Risse hingegen bei gleichbleibender, ungefähr vertikal verlaufender Rissneigung. Die Risse erstreckten sich über die oberen 70 bis 75 % der Versuchskörperhöhe. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe (≈ 50 mm unterhalb der Oberkante) wurden im Bereich des festen Lagers Rissbreiten von 0,15 bis 0,3 mm gemessen, während im Kragarm die Rissbreiten bei maximal 0,15 mm lagen. Auf halber Versuchskörperhöhe ($z \approx 0$) betrugen die maximalen Rissbreiten beim festen Lager 0,15 mm und im Kragarm 0,1 mm.

Bis zur Laststufe LS 5 ($F_A \approx 1200$ kN) entstanden auf der Oberseite mehrere in x -Richtung verlaufende Verbundrisse. Neben der Vergrösserung der Rissbreiten wurde bei den bestehenden Rissen eine weitere Verästelung beobachtet, wobei sich die Verästelungen vorwiegend in den äusseren Drittelsbereichen der Versuchskörperbreite bildeten. Die Rissabstände lagen zwischen 100 und 250 mm. Über dem festen Lager wurden Rissbreiten zwischen 0,1 und 0,5 mm gemessen, während sich die Rissbreiten im Kragarm auf maximal 0,35 mm und im Mittelfeld auf maximal 0,4 mm vergrösserten. Auf der Vorder- und Hinterseite konnten die Verlängerung sowie vereinzelte Verästelungen der bestehenden Risse festgestellt werden. Dabei erstreckten sich die Risse im Kragarm über die oberen 80 bis 90 % und im Mittelfeld über die oberen 70 bis 80 % der Versuchskörperhöhe. Bei den anfänglich relativ steil verlaufenden Rissen im Bereich des Kragarms wurde im unteren Bereich eine deutliche Abflachung der Risse beobachtet. Auf halber Versuchskörperhöhe wurden Rissneigungen von ungefähr 45 bis 65° gegenüber der x -Achse gemessen, die sich im unteren Bereich schliesslich auf 10 bis 25° verringerten, wobei sich der äusserste Schrägriss im untersten Bereich mit einer sehr flachen Neigung entlag der Biegedruckzone fort-pflanzte. Die Risse im Mittelfeld und in umittelbarer Nähe des festen Lagers verliefen im oberen Bereich ungefähr vertikal, setzten sich aber im unteren Bereich mit einer leichten Neigung gegen das feste Lager fort. Die Neigung der Risse lag in der unteren Versuchskörperhälfte zwischen 45 und 75° gegenüber der x -Achse. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe

Laststufe	Oberseite			Vorderseite – Kragarm		Vorderseite – Festes Lager	
	Kragarm w_{cr} [mm]	Festes Lager w_{cr} [mm]	Mittelfeld w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx -200$ mm w_{cr} [mm]	$z \approx 0$ mm w_{cr} [mm]
LS 2	HR...0,05	0,05...0,10	0,05...0,10	HR...0,05	HR	0,05...0,10	HR
LS 3	0,05...0,10	0,05...0,30	0,05...0,25	HR...0,15	HR...0,10	0,15...0,30	0,05...0,15
LS 4	0,05...0,25	0,05...0,35	0,05...0,35	0,10...0,20	0,05...0,10	0,25...0,35	0,05...0,15
LS 5	0,05...0,35	0,10...0,50	0,05...0,40	0,10...0,30	0,10...0,40	0,15...0,55	0,05...0,15
LS 6	0,05...0,55	0,20...3,00	0,05...0,45	0,10...0,60	0,10...0,50	0,30...3,00	0,05...0,90

Tabelle 5.29: B7V2 – Rissbreiten für ausgewählte Laststufen (HR = Haarriss).

betrugen die Rissbreiten im Bereich des festen Lagers 0,15 bis maximal 0,55 mm und im Kragarm 0,1 bis 0,3 mm. Auf halber Versuchskörperhöhe wurde beim äussersten Riss im Kragarm eine Rissbreite von 0,4 mm gemessen. Die übrigen Rissbreiten lagen im Kragarm zwischen 0,05 und 0,2 mm und über dem festen Lager zwischen 0,05 und 0,15 mm.

Ab einer Kraft von $F_A \approx 1350$ kN und einer dazugehörenden Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 26$ mm konnte der Fliessbeginn der Biegebewehrung festgestellt werden. Im weiteren Versuchsfortschritt wurde die Durchbiegung des Kragarms K1 vergrössert. Die letzte Laststufe LS 6 wurde bei einer Kraft von $F_A \approx 1400$ kN und einer Durchbiegung von $w_1 \approx 35,8$ mm durchgeführt. Neben der Verlängerung und Verästelung der bestehenden Risse wurde bis zur Laststufe LS 6 keine grosse Veränderung des Rissbildes beobachtet. Dabei konzentrierte sich das Rissbreitenwachstum der bestehenden Risse vorwiegend auf die Bereiche beim festen Lager. Auf der Oberseite bildeten sich weitere in x -Richtung verlaufende Verbundrisse sowie vereinzelte Verästelungsrisse, wobei die Rissabstände zwischen 100 und 250 mm lagen. Beim festen Lager wurde ein Riss mit einer Breite von 3 mm gemessen. Die übrigen Risse über dem festen Lager wiesen Breiten von 0,2 bis 0,8 mm auf, während die Rissbreiten im Kragarm zwischen 0,05 und maximal 0,55 mm und im Mittelfeld zwischen 0,05 und maximal 0,45 mm lagen. Auf der Vorder- und Hinterseite wurde neben der Verlängerung der bestehenden Risse die Bildung weiterer Verästelungsrisse festgestellt. Im Bereich des Kragarms entstanden ausgeprägte Verästelungsrisse, welche eine Rissneigung von ungefähr 30° gegenüber der x -Achse aufwiesen und sich von der Biegedruckzone bis zur Oberseite erstreckten. Die übrigen schräg verlaufenden Risse im Kragarm pflanzten sich nur geringfügig fort, während sich die Risse über dem festen Lager und im Mittelfeld bei ungefähr gleichbleibender Rissneigung verlängerten, wobei vereinzelte Risse im untersten Bereich stark abdrehten und sich mit sehr flachen Neigungen gegen das feste Lager fortsetzten. Diese wiesen im untersten Bereich eine Rissneigung von ungefähr 20 bis 45° gegenüber der x -Achse auf. Im Kragarm erstreckten sich die Risse über die oberen 80 bis 90 % und im Mittelfeld über die oberen 70 bis 80 % der Versuchskörperhöhe. Auf der Höhe der obersten Deformettermessreihe wies ein Riss über dem festen Lager eine Rissbreite von 3 mm auf. Die übrigen Rissbreiten lagen im Bereich des festen Lagers zwischen 0,3 und 0,65 mm und im Kragarm zwischen 0,1 und 0,6 mm. Auf halber Versuchskörperhöhe wurden über dem festen Lager noch Rissbreiten von 0,05 bis maximal 0,9 mm gemessen, während die Rissbreiten im Kragarm 0,1 bis 0,5 mm betrugen.

Ab einer Durchbiegung von $w_1 \approx 55$ mm bildeten sich auf der Mittelfeldseite die ersten Betonstauchungsrisse in der Biegedruckzone beim festen Lager. Kurz darauf wurden auch auf der Kragarmseite feine Betonstauchungsrisse an der Unterseite festgestellt. Im weiteren Versuchsfortschritt wurde bei einer Durchbiegung von $w_1 = 63,5$ mm beim Kragarm K1 die Höchstlast erreicht. Die entsprechende Kraft betrug $F_A = 1439$ kN. Bei einer Durchbiegung von $w_1 \approx 75$ mm konnten auf der Mittelfeldseite beim festen Lager erste Abplatzungen von Betonplättchen an der Unterseite festgestellt werden. In der Folge platzten bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 90$ mm ebenfalls auf der Kragarmseite beim festen Lager vereinzelte Betonplättchen an der Unterseite ab. Anschliessend wurde bei einer Durchbiegung von $w_1 = 91,0$ mm eine maximale Biegemomentbeanspruchung beim festen Auflager von $(-M_{C,max}) = 2469$ kNm erreicht.

Nach Erreichen der Höchstlast und der maximalen Biegemomentenbeanspruchung wurde die Durchbiegung des Kragarms K1 kontinuierlich vergrössert, wobei bis zu einer Durchbiegung von $w_1 \approx 105$ mm keine bedeutenden Kraftabfälle feststellbar waren. An der Unterseite platzten die ersten Teile des Überdeckungsbetons ab einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 105$ mm auf der Mittelfeldseite beim festen Lager ab, wobei sich mit zunehmender Kragarmdurchbiegung wiederholt grössere Teile des Überdeckungsbetons ablösten. Im weiteren Versuchsfortschritt konnten bei Kragarmdurchbiegungen von $w_1 \approx 215$ bis 245 mm das Zerreissen von Querkraftbewehrungsstäben akustisch wahrgenommen sowie grössere Kraftabfälle beobachtet werden. Bis zu einer Durchbiegung von $w_1 \approx 250$ mm war der Überdeckungsbeton der Biegedruckzone in einem Bereich von 300 bis 400 mm rechts vom festen Lager (im Mittelfeld) an der Unterseite abgeplatzt. Während der letzten Versuchsphase, ab einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 250$ mm bis zum Belastungsstopp, dehnten sich die Abplatzungen auf der Mittelfeldseite beim festen Lager auf eine Länge von ungefähr 1300 mm aus. Dabei platzte der Überdeckungsbeton an der Unterseite im äusseren Bereich ($x \approx 450 \div 1400$ mm) unterhalb der Ankerplatten der Querkraftbewehrungsstäbe vollständig ab. Bei einer Kragarmdurchbiegung von $w_1 \approx 276$ mm wurde der Versuch abgebrochen. Die aufgebrachte Kraft betrug zu diesem Zeitpunkt noch ungefähr 64% der Höchstlast. Anschliessend konnte der Versuchskörper kontrolliert entlastet werden.

Bei der abschliessenden Untersuchung des Versuchskörpers konnte auf der Mittelfeldseite beim festen Lager eine ausgeprägte Rissfläche festgestellt werden. Diese erstreckte sich mit einer Neigung von 35 bis 45° gegenüber der x -Achse vom rechten Lagerrand bis zur Oberseite. An der Unterseite war der Überdeckungsbeton der Biegedruckzone in einem Bereich von ungefähr 1300 mm rechts vom festen Lager (im Mittelfeld) über die gesamte Versuchskörperbreite abgeplatzt. In unmittelbarer Auflagernähe, in einem Abstand von ungefähr 120 mm vom rechten Lagerplattenrand ($x \approx 220$ mm), wiesen die Abplatzungen eine maximale Dicke von 100 bis 120 mm auf. Mit zunehmendem Abstand vom Lager verringerten sich diese stark, und die Dicke betrug in einer Entfernung von 500 mm ($x \approx 600$ mm) noch ungefähr 50 mm. Im äusseren Bereich

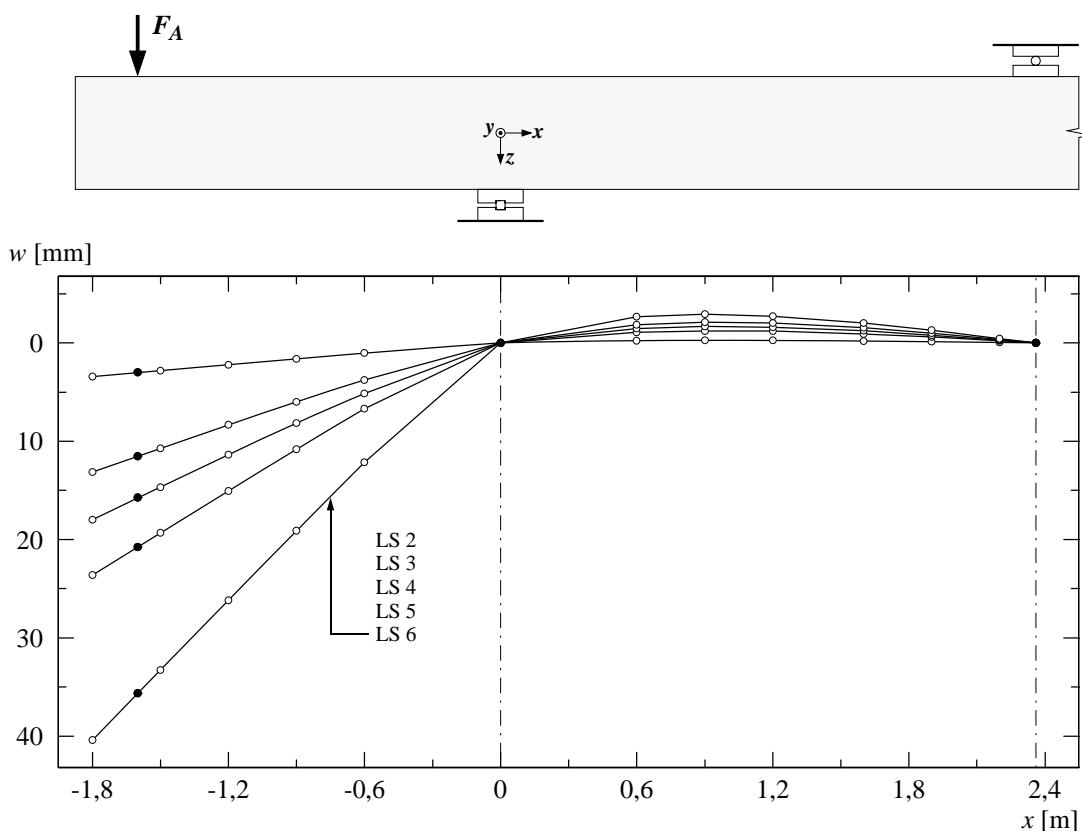


Bild 5.131: B7V2 – Durchbiegungen für ausgewählte Laststufen.

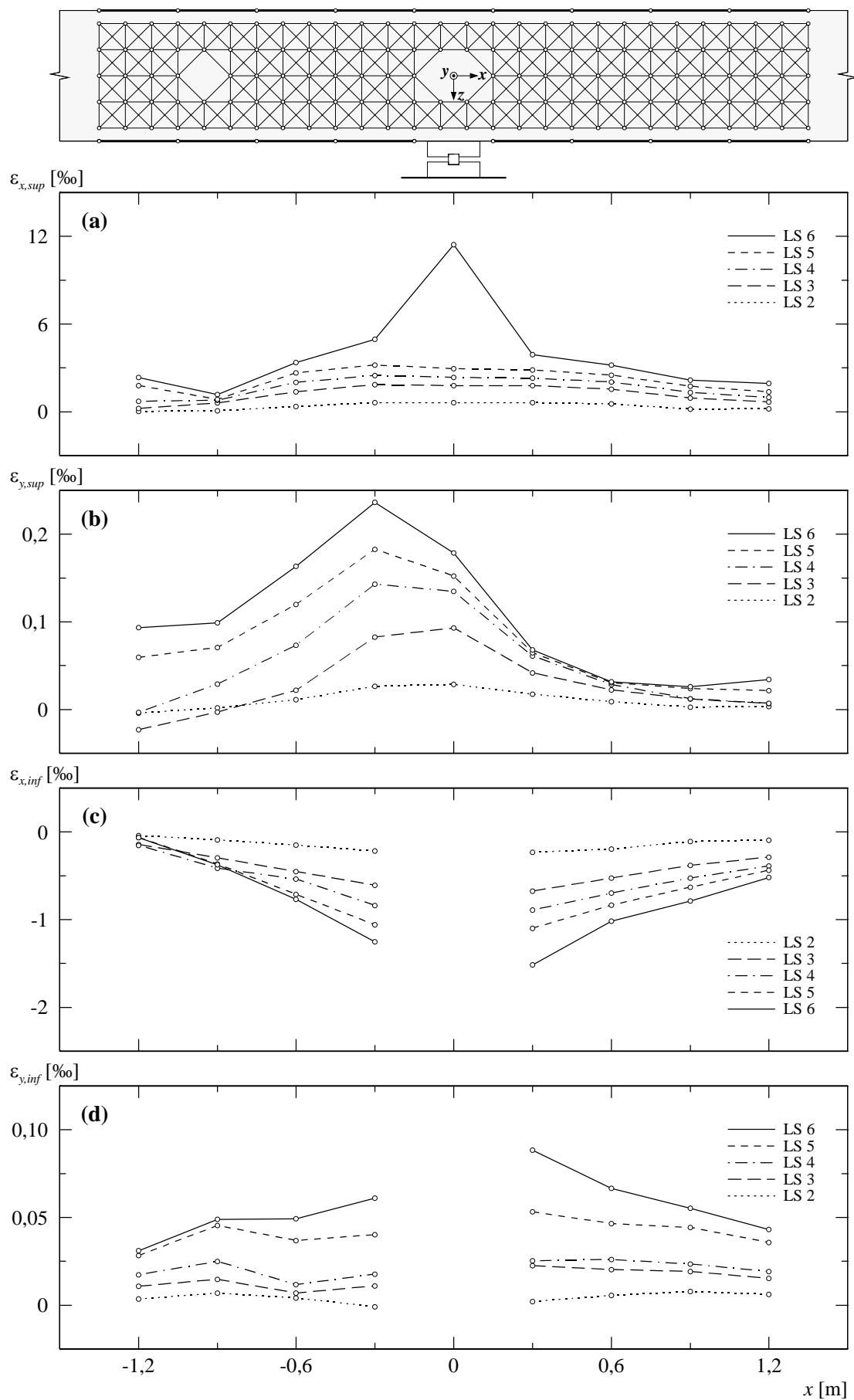


Bild 5.132: B7V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen oben; (b) mittlere Querdehnungen oben; (c) mittlere Längsdehnungen unten; (d) mittlere Querdehnungen unten.

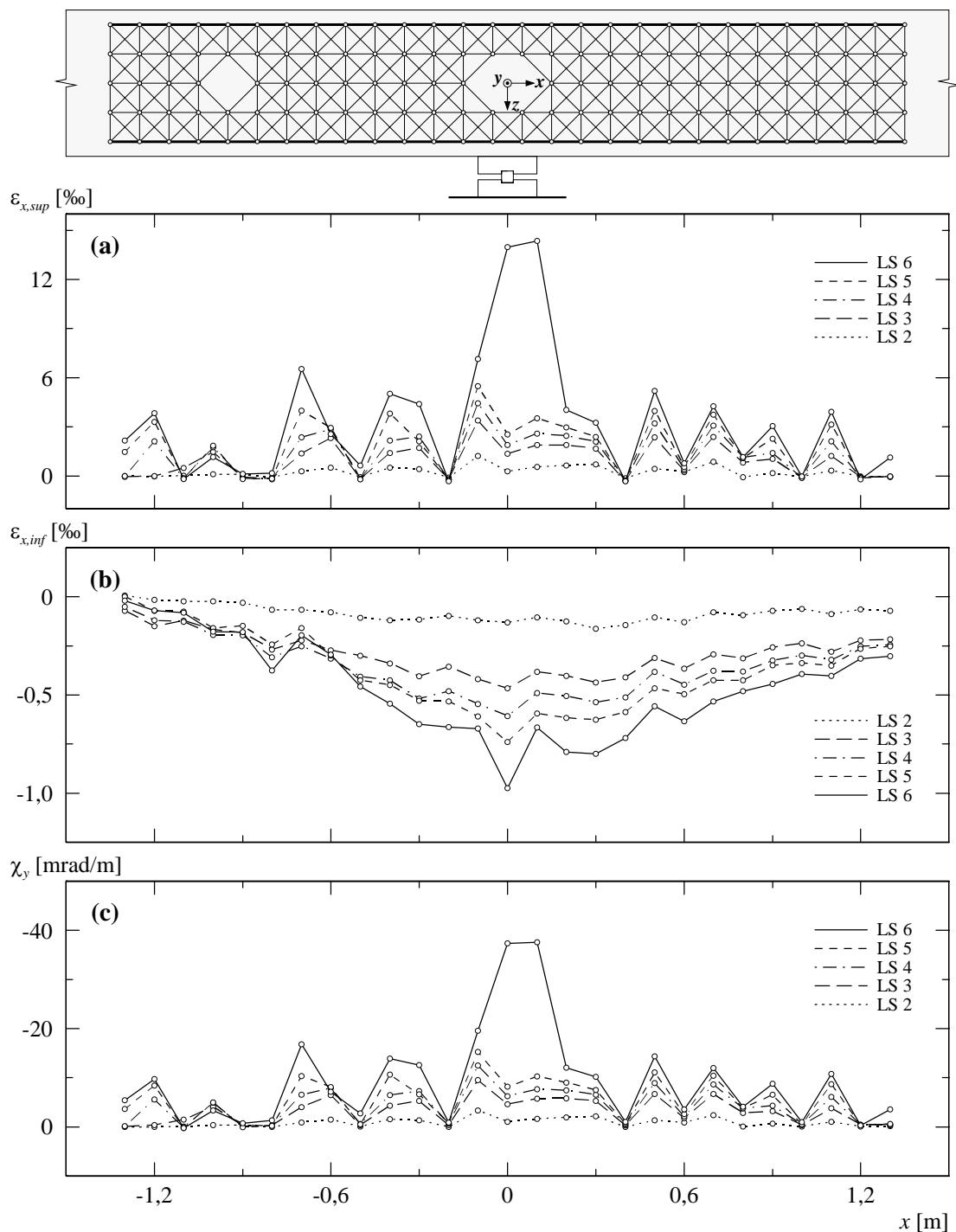


Bild 5.133: B7V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich oben; (b) mittlere Längsdehnungen seitlich unten; (c) berechnete Krümmungen.

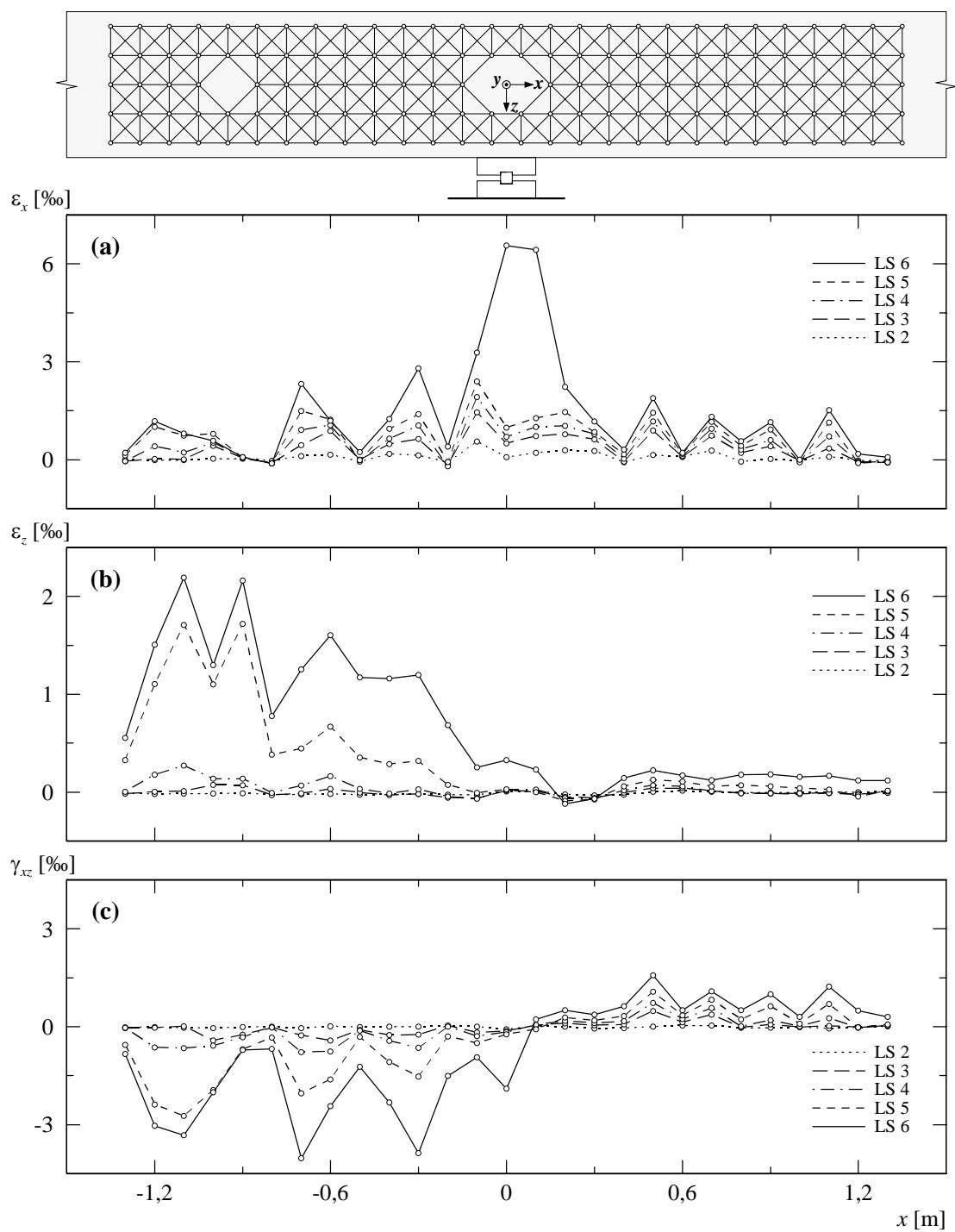


Bild 5.134: B7V2 – (a) Mittlere Längsdehnungen seitlich; (b) mittlere Vertikaldehnungen seitlich; (c) mittlere Schiebungen seitlich.

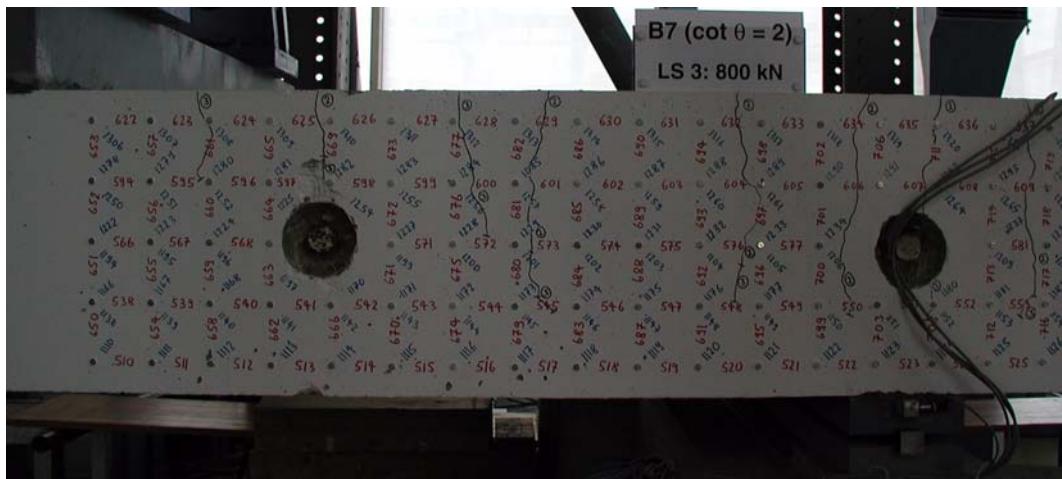
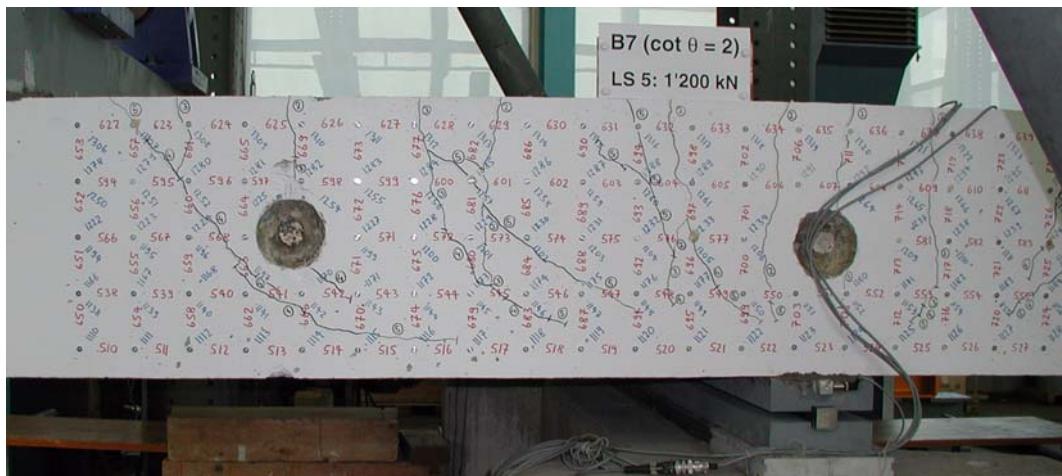


Bild 5.135: B7V2 – Rissbild bei Laststufe LS 3: Vorderseite Kragarm.

(a)



(b)

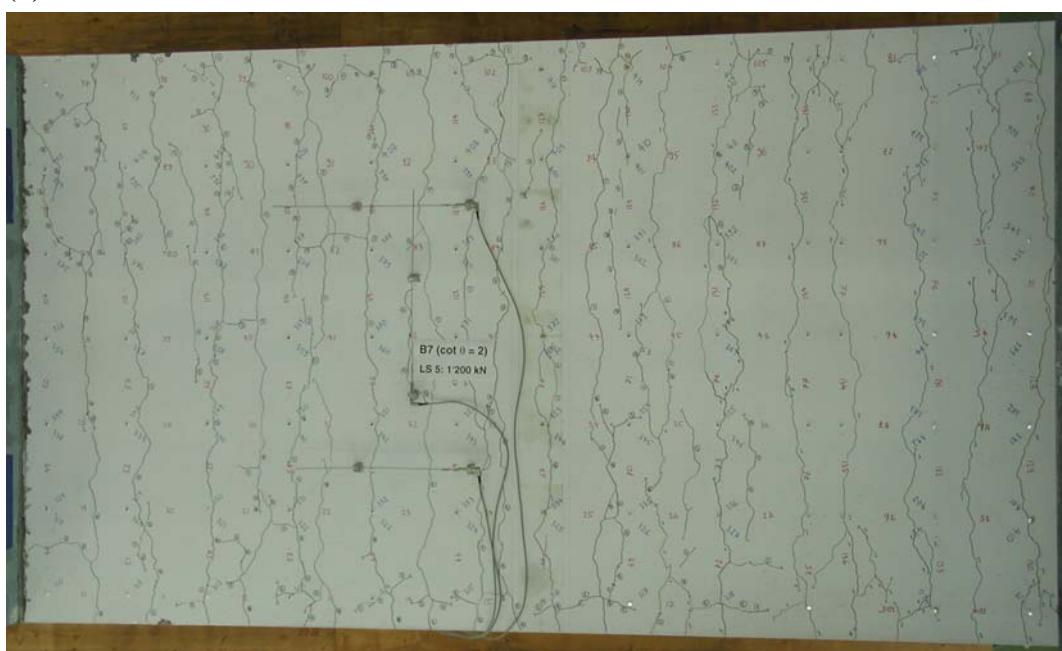
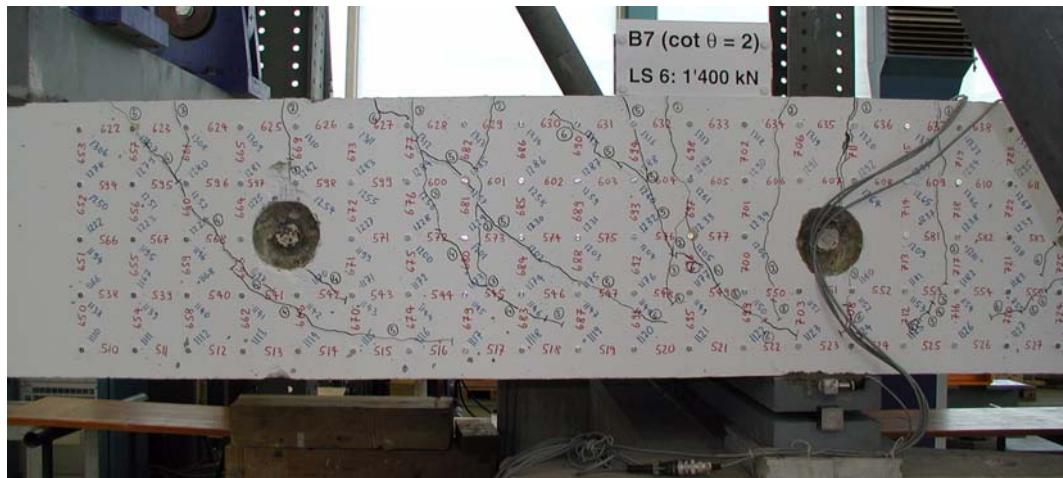
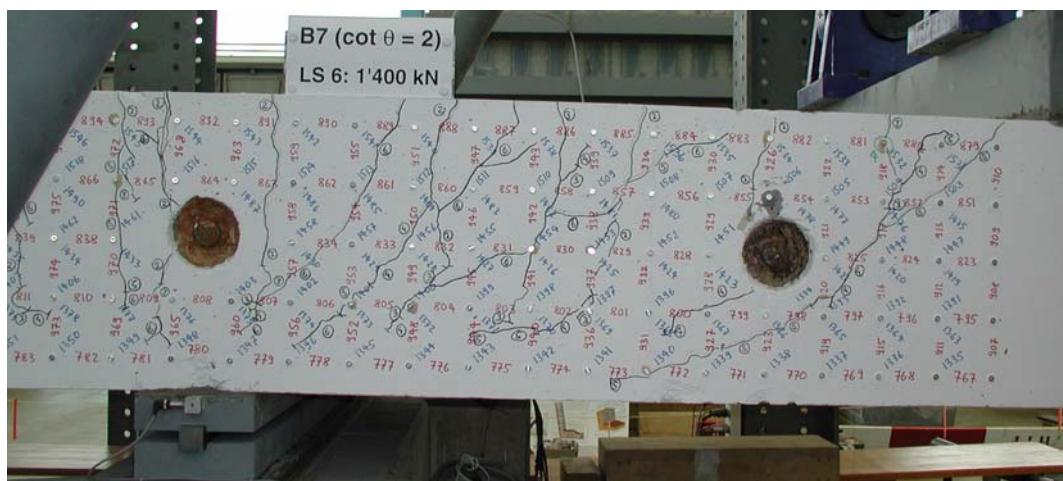


Bild 5.136: B7V2 – Rissbild bei Laststufe LS 5: (a) Vorderseite Kragarm; (b) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.

(a)



(b)



(c)

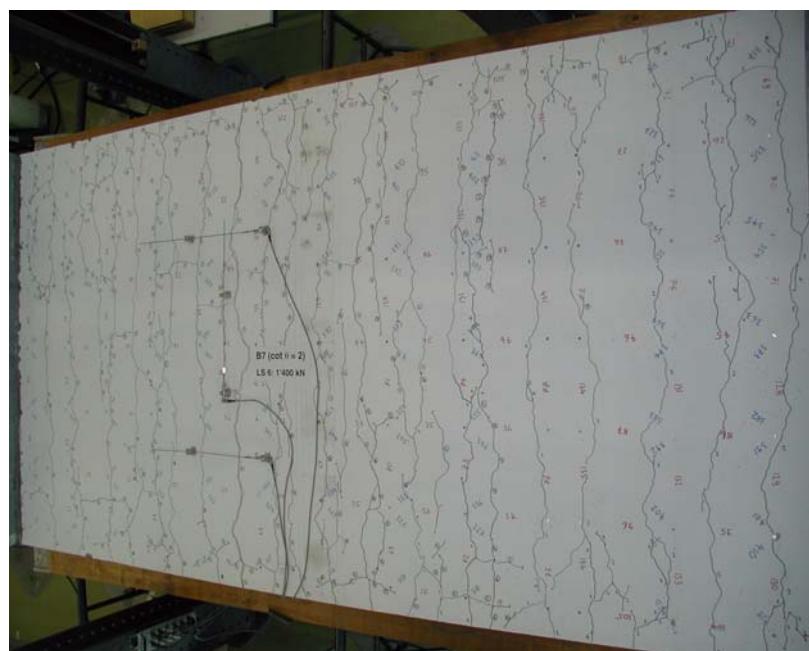


Bild 5.137: B7V2 – Rissbild bei Laststufe LS 6: (a) Vorderseite Kragarm; (b) Hinterseite Kragarm; (c) Oberseite Kragarm und Mittelfeld.

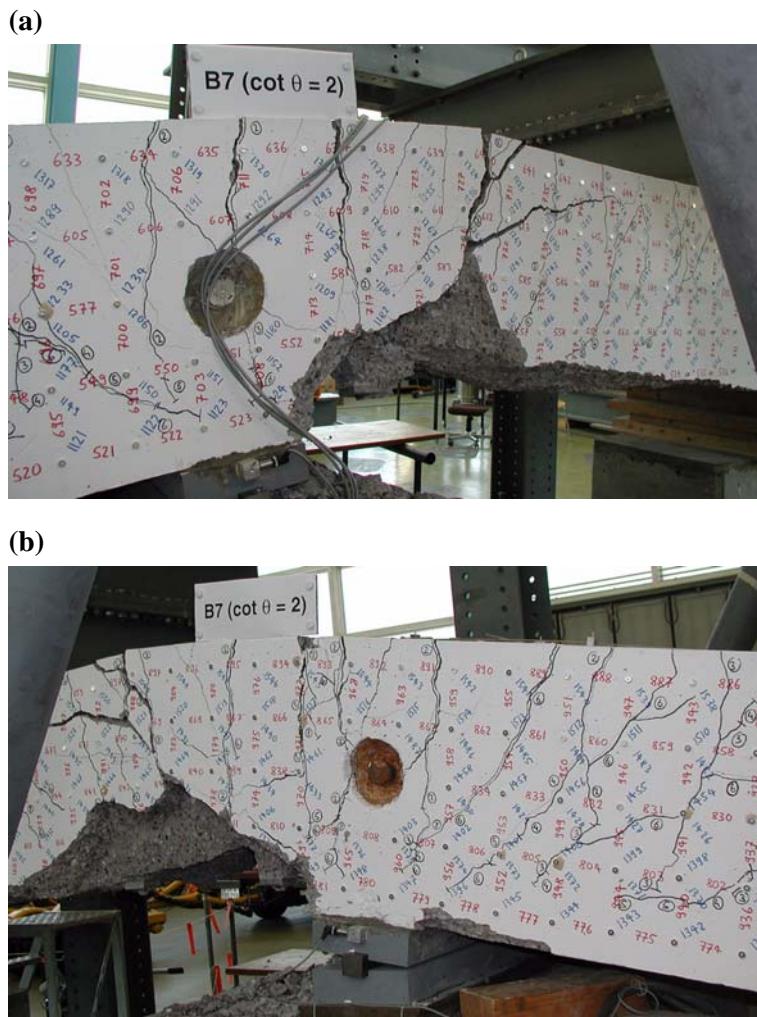


Bild 5.138: B7V2 – Bruchzone nach Versuchsende: (a) Vorderseite beim festen Lager; (b) Hinterseite beim festen Lager.



Bild 5.139: B7V2 – Abplatzungen der Biegedruckzone im Mittelfeld.

($x \approx 600 \div 1200$ mm) wurde eine Dicke von ungefähr 40 mm gemessen, wobei die abgeplatzte Betonschicht unterhalb der Ankerplatten der Querkraftbewehrungsstäbe lag. Die unter 35 bis 45° geneigte Rissfläche zeigte im unteren, oberhalb der Betonüberdeckung liegenden Bereich ($z \approx 130 \div 190$ mm) ausgeprägte Spuren einer Zerstörung der Rissverzahnung beziehungsweise eines gegenseitigen Abgleitens der Rissufer. Auf der Vorderseite betrug die Relativverschiebung der rechten Versuchskörperhälfte (Mittelfeldseite) 15 bis 20 mm, während auf der Hinterseite eine solche von ungefähr 30 mm gemessen wurde. Ausser den zwei äussersten Querkraftbewehrungsstäben auf der Vorder- und Hinterseite waren in der ersten Reihe neben dem Auflager alle Stäbe in der Rissfläche zerrissen. Dabei zeigten alle abgetrennten Querkraftbewehrungsstäbe eine Bruchfläche, die unter einem Winkel von ungefähr 45° gegenüber der Stabachse verlief.

6 Zusammenfassung - Summary

6.1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts “Verformungsvermögen von Massivbauwerken” wurden am Institut für Baustatik und Konstruktion der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich 28 Bruchversuche an 14 Stahlbetonplatten, nämlich 14 Versuche an 7 Platten mit einer Dicke h von 200 mm (Serie A) und 14 Versuche an 7 Platten mit einer Dicke h von 500 mm (Serie B), durchgeführt. Die Plattenbreite b betrug bei allen Versuchskörpern $4h$. Die Versuchskörper wurden für die Durchführung von je zwei Versuchen konzipiert, wozu die beiden Enden der Platten unterschiedlich bewehrt wurden. Entsprechend der Bewehrungsauslegung waren die Versuchskörper in die Bereiche Kragarm K1 und Kragarm K2 unterteilt, welche eine Schubspannweite a von $3,2h$ aufwiesen.

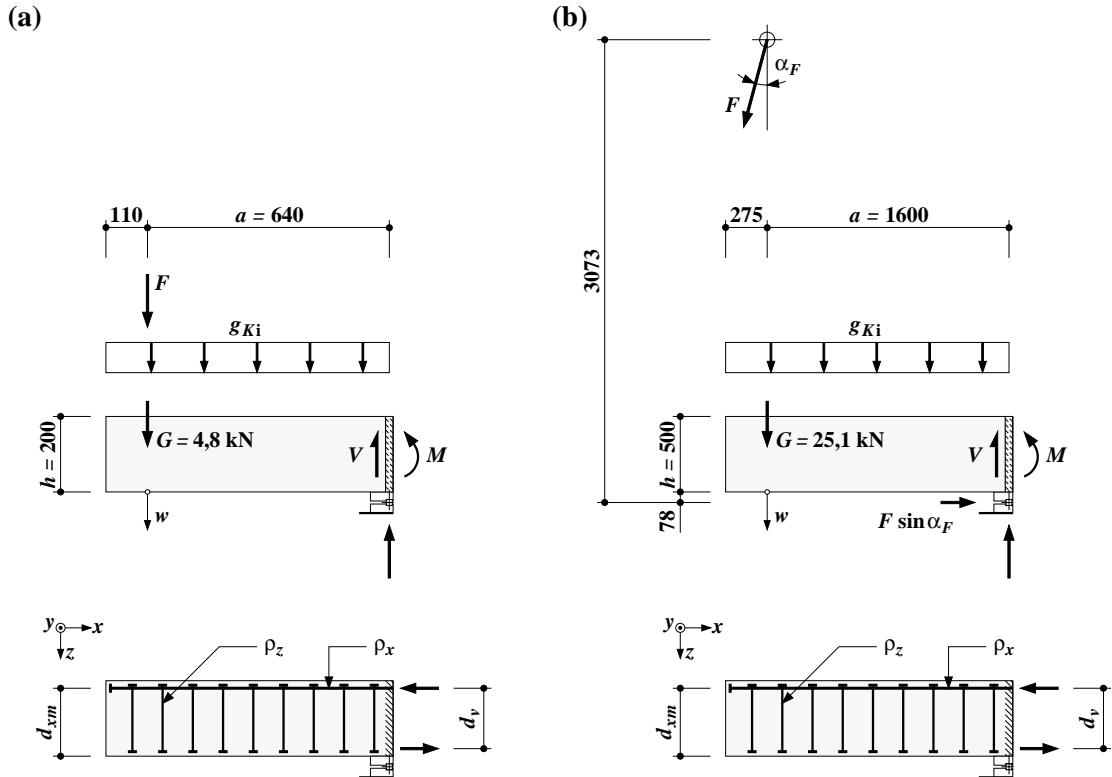


Bild 6.1: Bezeichnungen: (a) Serie A; (b) Serie B. Abmessungen in mm.

Fig. 6.1: Notation: (a) Series A; (b) Series B. Dimensions in mm.

Versuchskörper Specimen		Abmessungen Dimensions							Materialkennwerte Material properties			
		h [mm]	b [mm]	d_{xm} [mm]	φ_0 [°]	ρ_x [%]	ρ_z [%]	$\cot \theta$ [-]	f_{cc} [N/mm ²]	f_{cts} [N/mm ²]	$f_{sux,dyn}$ [N/mm ²]	$f_{suz,dyn}$ [N/mm ²]
A1	K1	200	800	156	45	1,538	0,611	-	52,4	4,56	605,6	620,0
	K2						0					
A2	K1	200	800	156	45	1,538	0,302	-	48,8	4,11	678,9	623,2
	K2						0,156					
A3	K1	200	800	162	0	1,745	0,309	-	58,8	4,16	678,9	623,2
	K2						0					
A4	K1	200	800	168	45	0,952	0,156	-	46,8	3,62	678,9	623,2
	K2						0					
A5	K1	200	800	174	0	1,056	0,155	-	56,7	4,00	678,9	623,2
	K2						0					
A6	K1	200	800	168	45	0,952	0,156	2	51,5	3,72	678,9	623,2
	K2						0	1				
A7	K1	200	800	174	0	1,056	0,155	2	52,3	3,91	678,9	623,2
	K2						0	1				
B1	K1	500	2000	390	45	1,538	0,611	-	52,4	4,29	656,6	612,5
	K2						0					
B2	K1	500	2000	390	45	1,538	0,327	-	49,5	3,64	656,6	617,6
	K2						0,163					
B3	K1	500	2000	405	0	1,745	0,308	-	53,7	3,90	656,6	617,6
	K2						0					
B4	K1	500	2000	420	45	0,952	0,154	-	54,2	3,75	656,6	617,6
	K2						0					
B5	K1	500	2000	435	0	1,056	0,154	-	51,8	4,14	656,6	617,6
	K2						0					
B6	K1	500	2000	420	45	0,952	0,154	2	47,4	3,79	656,6	617,6
	K2						0	1				
B7	K1	500	2000	435	0	1,056	0,154	2	49,2	4,12	656,6	617,6
	K2						0	1				

Tabelle 6.1: Zusammenfassung der Versuchsparameter.

Table 6.1: Summary of test parameters.

Die Versuchskörper der Serie A wurden beim ersten Versuch in einem Vierpunkt-Biegeversuch (Einfeldträger mit beidseitigen Auskragungen) bis zum Kollaps des schwächeren Kragarms K2 belastet. Anschliessend musste die Belastungseinrichtung für den zweiten Versuch umgebaut werden, bei welchem der stärkere Kragarm K1 in einem Dreipunkt-Biegeversuch (Einfeldträger mit einseitiger Auskragung) bis zum Kollaps weiterbelastet wurde.

Die beiden Kragarme der Versuchskörper der Serie B wurden beim ersten und zweiten Versuch in einem Dreipunkt-Biegeversuch (Einfeldträger mit einseitiger Auskragung) bis zum Kollaps belastet. Zwischen den beiden Versuchen wurden die Versuchskörper um 180° gedreht.

Ziel der Versuche war es, den Einfluss ausgewählter Parameter auf den Querkraftwiderstand und das Verformungsvermögen von Stahlbetonplatten zu untersuchen. Die untersuchten Parameter waren die Plattendicke h , der Biegebewehrungsgehalt ρ_x , die Biegebewehrungsrichtung φ_0 , der Querkraftbewehrungsgehalt ρ_z sowie die Biegebewehrungsabstufung (ausgedrückt durch die Druckfeldneigung θ im Platteninnern). Dabei standen die Einflüsse der Plattendicke, der Variation des Querkraftbewehrungsgehalts und der Abweichung der Hauptquerkraft- und Hauptmomentenrichtungen von den Bewehrungsrichtungen im Vordergrund. In der Tabelle 6.1 sind die

Versuchskörper Specimen		Versuchsergebnisse Test results					Berechnete Werte Calculated values					
		F [kN]	w [mm]	-V [kN]	-M [kNm]	Mode	d _v [mm]	τ _{dxm} [N/mm ²]	τ _{dxm} / f _{cts} [-]	τ _{dv} [N/mm ²]	τ _{dv} / f _{cts} [-]	σ _{dv} [N/mm ²]
A1	K1	245,9	49,1	253,9	161,7	B	136,8	2,03	0,446	2,32	0,509	615,8
	K2	161,3	24,2	169,2	107,5	S		1,36	0,297	1,55	0,339	409,4
A2	K1	245,1	41,8	253,1	161,1	B	133,4	2,03	0,493	2,37	0,577	629,2
	K2	220,5	40,3	228,4	145,3	B		1,83	0,445	2,14	0,521	567,6
A3	K1	331,2	35,4	339,0	216,2	B	138,5	2,62	0,628	3,06	0,735	690,0
	K2	257,8	15,4	265,6	169,2	S		2,05	0,492	2,40	0,576	540,0
A4	K1	188,9	35,8	196,7	125,1	B	152,5	1,46	0,404	1,61	0,445	641,0
	K2	132,7	22,6	140,5	89,1	S		1,05	0,289	1,15	0,318	456,8
A5	K1	238,3	59,9	246,0	156,7	B	158,4	1,77	0,442	1,94	0,486	672,9
	K2	214,4	42,6	222,1	141,4	S		1,60	0,399	1,75	0,438	607,1
A6	K1	187,4	44,7	195,2	124,1	B	153,5	1,45	0,390	1,59	0,427	632,0
	K2	173,2	38,2	181,0	115,1	B		1,35	0,362	1,47	0,396	585,9
A7	K1	243,2	50,3	251,0	159,8	B	157,5	1,80	0,461	1,99	0,510	690,3
	K2	216,0	25,9	223,8	142,4	BS		1,61	0,411	1,78	0,454	615,1
B1	K1	1405	72,1	1480	2421	B	337,9	1,90	0,442	2,19	0,510	597,3
	K2	779	26,4	852	1344	S		1,09	0,255	1,26	0,294	331,6
B2	K1	1391	75,1	1465	2410	B	335,9	1,88	0,515	2,18	0,598	598,0
	K2	1396	78,9	1470	2409	B		1,89	0,517	2,19	0,601	597,8
B3	K1	1912	46,1	1984	3218	B	344,6	2,45	0,628	2,88	0,738	660,6
	K2	1211	16,4	1282	2042	S		1,58	0,406	1,86	0,477	419,2
B4	K1	1121	59,1	1193	1934	B	386,1	1,42	0,379	1,55	0,412	626,3
	K2	732	28,3	804	1274	S		0,96	0,255	1,04	0,278	412,7
B5	K1	1399	65,9	1470	2394	B	394,8	1,69	0,408	1,86	0,450	659,8
	K2	1099	18,6	1170	1863	S		1,35	0,325	1,48	0,358	513,5
B6	K1	1145	59,4	1217	1976	B	382,9	1,45	0,382	1,59	0,419	645,4
	K2	1099	64,3	1170	1897	B		1,39	0,368	1,53	0,403	619,6
B7	K1	1439	63,5	1510	2469	B	393,4	1,74	0,421	1,92	0,466	683,0
	K2	1132	22,0	1203	1919	BS		1,38	0,336	1,53	0,371	531,0

Tabelle 6.2: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse (B: Biegebruch, BS: Biegeschubbruch, S: Schubbruch).

Table 6.2: Summary of test results (B: flexural failure, BS: collapse crack failure, S: shear failure).

entsprechenden Versuchsparameter, die mittlere statische Höhe d_{xm}, die Zylinderdruckfestigkeit f_{cc} und die Spaltzugfestigkeit f_{cts} des Betons sowie die dynamische Zugfestigkeit der Biegebewehrung f_{suz,dyn} und der Querkraftbewehrung f_{suz,dyn} zusammengestellt.

Das Trag- und Verformungsverhalten wurde bei allen Versuchen bis zum Kollaps der Versuchskörper untersucht. Dabei wurden die Versuche verformungsgesteuert belastet. Ausser den aufgebrachten Kräften und Verschiebungen wurden auch mittlere Dehnungen sowie Rissbreiten gemessen. Kräfte und Verschiebungen wurden kontinuierlich, mittlere Dehnungen und Rissbreiten periodisch gemessen und aufgezeichnet.

In der Tabelle 6.2 sind für alle Versuche die wichtigsten Resultate wie die maximale Pressenlast F mit der dazugehörigen Kragarmdurchbiegung w und die grösste Querkraftbeanspruchung V mit der dazugehörigen Momentbeanspruchung M zusammengestellt. Die entsprechenden Bezeichnungen sind im Bild 6.1 dargestellt. Zudem sind berechnete Werte für den Hebelarm der inneren Kräfte d_v, die maximalen nominellen Schubspannungen τ_{dxm} und τ_{dv}, das Verhältnis dieser Schubspannungen zur Spaltzugfestigkeit f_{cts} des Betons sowie die maximale

Stahlspannung σ_{dv} und deren Verhältnis zur dynamischen Zugfestigkeit $f_{sux,dyn}$ der Biegebewehrung angegeben. Dazu wurden die Beziehungen

$$f_c = 2,7 \cdot (f_{cc})^{2/3} \quad (f_c \text{ und } f_{cc} \text{ in N/mm}^2) \quad (6.1)$$

$$d_v = d_{xm} \cdot \left(1 - \frac{\rho_x \cdot f_{sux,dyn}}{2 \cdot f_c} \right) \quad (6.2)$$

$$\tau_{d_{xm}} = \frac{-V}{b \cdot d_{xm}} \quad (6.3)$$

$$\tau_{d_v} = \frac{-V}{b \cdot d_v} \quad (6.4)$$

$$\sigma_{d_v} = \frac{-M}{d_v \cdot \rho_x \cdot b \cdot d_{xm}} \quad (6.5)$$

verwendet, wobei f_c die effektive Betondruckfestigkeit bezeichnet.

Die berechneten Kraft-Durchbiegungsdiagramme in den Bildern 6.2 bis 6.5 erlauben für ausgewählte Versuchspараметer den Vergleich der Resultate innerhalb der beiden Versuchserien A und B bezüglich Querkraftwiderstand und Verformungsvermögen. In den Bildern 6.6 bis 6.15 sind normierte Kraft-Durchbiegungsdiagramme dargestellt, welche den Massstabseffekt zwischen der Versuchsserie A und B auf die nominelle Schubspannung sowie das Verformungsvermögen von ausgewählten Versuchen mit gleicher Bewehrungsauslegung zeigen.

Die Ergebnisse der Versuche lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Eine von den Biegebewehrungsrichtungen abweichende Hauptquerkraft- und Hauptmomentenrichtung φ_0 führte zu einem weicheren Verhalten und einer signifikanten Vergrösserung der Rissbreiten. Die Versuchskörper mit einer Biegebewehrungsrichtung $\varphi_0 = 0^\circ$ wiesen bis zum Erreichen der Höchstlast eine ungefähr doppelt so grosse Biegesteifigkeit wie diejenigen mit einer Biegebewehrungsrichtung $\varphi_0 = 45^\circ$ auf.
- Bei allen Versuchen ohne Querkraftbewehrung erfolgte ein spröder Schubbruch. Während die Abweichung der Biegebewehrungsrichtung von der Hauptquerkraft- und Hauptmomentenrichtung eine ausgeprägte Reduktion des Querkraftwiderstands bewirkte, nahm der Querkraftwiderstand mit zunehmendem Biegebewehrungsgehalt nur geringfügig zu.
- Ausser bei den Versuchen A7V1 und B7V1 konnte mit einer minimalen Querkraftbewehrung ein duktiles Biegeversagen erzwungen werden. Bei den Versuchskörpern mit gleichen Hauptmomenten- und Biegebewehrungsrichtungen erfolgte ein Versagen der Biegendruckzone in den Bereichen grösster Momentbeanspruchung, während bei den Versuchskörpern mit unterschiedlichen Hauptmomenten- und Biegebewehrungsrichtungen sowohl in der Biegendruckzone als auch in dem aus Gleichgewichtsgründen erforderlichen einachsialen Druckfeld in der Biegezugzone ein Versagen des Betons beobachtet wurde.
- Die Erhöhung des Querkraftbewehrungsgehalts führte zu einer wesentlichen Verbesserung des Verformungsvermögens. Mit zunehmendem Bewehrungsgehalt bewirkte die feinere Verteilung der Querkraftbewehrung eine gute Umschnürung des Betons im Plattenkern, sodass die Verformungen auch nach dem Abplatzen des Überdeckungsbetons ohne ausgeprägten Lastabfall noch beträchtlich gesteigert werden konnten.
- Im Gegensatz zu den Versuchskörpern mit gleichen Hauptmomenten- und Biegebewehrungsrichtungen wiesen die vergleichbaren Versuchskörper mit ungefähr übereinstimmendem Biegebewehrungsgehalt sowie unterschiedlichen Hauptmomenten- und Biegebewehrungsrichtungen eine bedeutend geringere Biegetraglast und ein besseres Verformungsvermögen auf. Die Verringerung des Biegetragvermögens resultierte aus den zur kleineren Biegesteifigkeit umgekehrt proportionalen Betonstauchungen in der Biegendruckzone. Dabei wirkte sich das wei-

chere Tragerhalten bei einer Abweichung der Biegebewehrungsrichtung von der Hauptmomentenrichtung positiv auf das Verformungsvermögen aus.

- Mit Ausnahme der Versuche A7V1 und B7V1 zeigte die Abstufung der Biegebewehrung keine Auswirkung auf den Querkraftwiderstand und das Verformungsvermögen. Aufgrund der zu kurz abgestuften Biegebewehrung erfolgte bei den Versuchen A7V1 und B7V1 an der Stelle der Biegebewehrungsabstufung ein spröder Biegeschubbruch.
- Bei den Versuchen ohne Querkraftbewehrung bewirkte die Zunahme der Plattendicke eine Reduktion der nominellen Bruchschubspannungen, während die Variation der Plattendicke bei den Versuchen mit Querkraftbewehrung keinen bedeutenden Massstabseffekt verursachte.

Insgesamt wurde bei den Versuchen ohne Querkraftbewehrung ein spröder Schubbruch beobachtet, während mit einem minimalen Querkraftbewehrungsgehalt einerseits der Massstabseffekt eliminiert wurde und andererseits ein duktiles Biegeversagen sowie ein wesentlich verbessertes Verformungsvermögen erreicht werden konnte. Ferner führte eine Abweichung der Hauptquerkraft- und Hauptmomentenrichtung von den Biegebewehrungsrichtungen zu einer beträchtlichen Abnahme der Biegsteifigkeit.

6.2 Summary

Within the framework of the research project “Deformation Capacity of Reinforced Concrete Structures” 28 tests to failure on 14 reinforced concrete slab specimens were conducted at the Institute of Structural Engineering of the Swiss Federal Institute of Technology (ETH) in Zurich. The experiments included 14 tests on 7 specimens with an overall depth h of 200 mm (Series A) and 14 tests on 7 specimens with an overall depth h of 500 mm (Series B). The slab width b was equal to $4h$ for all specimens. The specimens were designed with different reinforcement layouts at their two ends, allowing two tests to be performed on each specimen. According to the reinforcement, the specimens were subdivided into the regions of Cantilevers K1 and K2. The shear span a was fixed to $3.2h$.

The specimens of Series A were first subjected to a four-point-bending test (single span with two cantilevers) up to the failure of the weaker cantilever K2. Afterwards the stronger cantilever K1 was subjected to a three-point-bending test (single span with one cantilever).

Both tests on the specimens of Series B were three-point-bending tests (single span with one cantilever). After the first test, the specimens were turned around and the second test was performed using the same test setup as for the first test.

The objective of the experiments was to investigate the influence of specific parameters on the shear strength and the deformation capacity of reinforced concrete slabs, including the overall slab depth, h , the in-plane reinforcement ratio, ρ_x , the direction of the in-plane reinforcement, φ_0 , the transverse reinforcement ratio, ρ_z , and the curtailment of the in-plane reinforcement (characterised by the inclination of the concrete compression field in the interior of the slab, θ). The influences of the slab thickness, the transverse reinforcement ratio and the deviations of the principal shear and moment directions from the direction of the in-plane reinforcement were of main interest. Table 6.1 summarises the associated test parameters as well as the effective depth, d_{xm} , the concrete cylinder compressive strength, f_{cc} , the concrete tensile strength, f_{cts} (determined from double-punch tests), and the dynamic tensile strength of the in-plane and transverse reinforcements, $f_{sux,dyn}$ and $f_{suz,dyn}$, respectively.

The load carrying and deformational behaviour of all specimens was investigated up to failure. The tests were deformation controlled. In addition to the continuous measurement of applied loads and deflections, average strains and crack widths were recorded at discrete load stages.

Table 6.2 summarises the main results of the experiments, including the maximum applied load, F , the associated cantilever deflection, w , the maximum shear force, V , and the maximum flexural moment, M . The corresponding notation is given in Fig. 6.1. In addition, Table 6.2 includes calculated values for the internal lever arm, d_v , the maximum nominal shear stresses, $\tau_{d_{xm}}$ and τ_{d_v} , the nominal shear stress to concrete tensile strength ratio, and the maximum steel stress, σ_{d_v} as well as the steel stress to ultimate tensile strength ratio. The relationships

$$f_c = 2.7 \cdot (f_{cc})^{2/3} \quad (f_c \text{ and } f_{cc} \text{ in N/mm}^2) \quad (6.1)$$

$$d_v = d_{xm} \cdot \left(1 - \frac{\rho_x \cdot f_{sux,dyn}}{2 \cdot f_c} \right) \quad (6.2)$$

$$\tau_{d_{xm}} = \frac{-V}{b \cdot d_{xm}} \quad (6.3)$$

$$\tau_{d_v} = \frac{-V}{b \cdot d_v} \quad (6.4)$$

$$\sigma_{d_v} = \frac{-M}{d_v \cdot \rho_x \cdot b \cdot d_{xm}} \quad (6.5)$$

were used for the calculations. Note that f_c denotes the effective concrete compressive strength.

The calculated load-deflection curves in Figs. 6.2 to 6.5 compare the results of Test Series A and B, considering the influence of selected parameters on the shear strength and deformation capacity. Figs. 6.6 to 6.15 depict normalised load-deflection curves which show the size effect on the ultimate nominal shear stress as well as the deformation capacity of specific tests with identical reinforcement layouts.

The results of the tests can be summarised as follows:

- A deviation of the principal shear and moment directions from the in-plane reinforcement directions, ϕ_0 , resulted in a softer response and significantly wider cracks. The specimens with an in-plane reinforcement direction of $\phi_0 = 0^\circ$ exhibited a flexural stiffness that was approximately twice that of those with an in-plane reinforcement direction of $\phi_0 = 45^\circ$.
- All specimens without transverse reinforcement underwent a brittle shear failure. While the deviation of the in-plane reinforcement directions from the principal shear and moment direction caused a strong reduction of the ultimate shear strength, an increase of the in-plane reinforcement ratio resulted in an insignificant increase of the ultimate shear strength.
- Except for Tests A7V1 and B7V1, a ductile flexural failure was enforced for the specimens containing a minimum transverse reinforcement. For the specimens with identical principal moment and in-plane reinforcement directions, failure occurred by crushing of the flexural compression zone, while for the specimens with different principal moment and in-plane reinforcement directions crushing of the concrete was observed in the flexural compression zone as well as in the compression field in the plane of the flexural reinforcement required for equilibrium.
- An increase of the transverse reinforcement ratio resulted in an improved deformation capacity. The narrow distribution of the transverse reinforcement corresponding to higher transverse reinforcement ratios caused a good confinement of the concrete core so that after the loss of the concrete cover the deformations could be increased considerably without a significant reduction of the load.
- Compared to the specimens with identical principal moment and in-plane reinforcement directions, the specimens with similar in-plane reinforcement ratios but different principal moment and in-plane reinforcement directions showed a lower flexural strength as well as a higher deformation capacity. The smaller flexural stiffness corresponded to larger concrete strains in the flexural compression zone, resulting in a decreased flexural strength. However, the softer behaviour had a positive influence on the deformation capacity.
- Except for Tests A7V1 and B7V1, the curtailing of the in-plane reinforcement had no effect on the shear strength and deformation capacity. For the experiments A7V1 and B7V1, the short curtailment of the reinforcement resulted in a brittle collapse crack failure in the region of the curtailment.
- For the specimens without transverse reinforcement, an increase of the overall slab depth resulted in a reduction of the peak nominal shear stress. No such size effect occurred for specimens with transverse reinforcement.

In summary, brittle shear failures occurred for all specimens without transverse reinforcement. The use of a minimum transverse reinforcement eliminated the size effect and a ductile flexural failure as well as a significant improvement of the deformation capacity were achieved. Deviations of the principal shear and moment directions from the in-plane reinforcement directions lead to a significant reduction of the flexural stiffness.

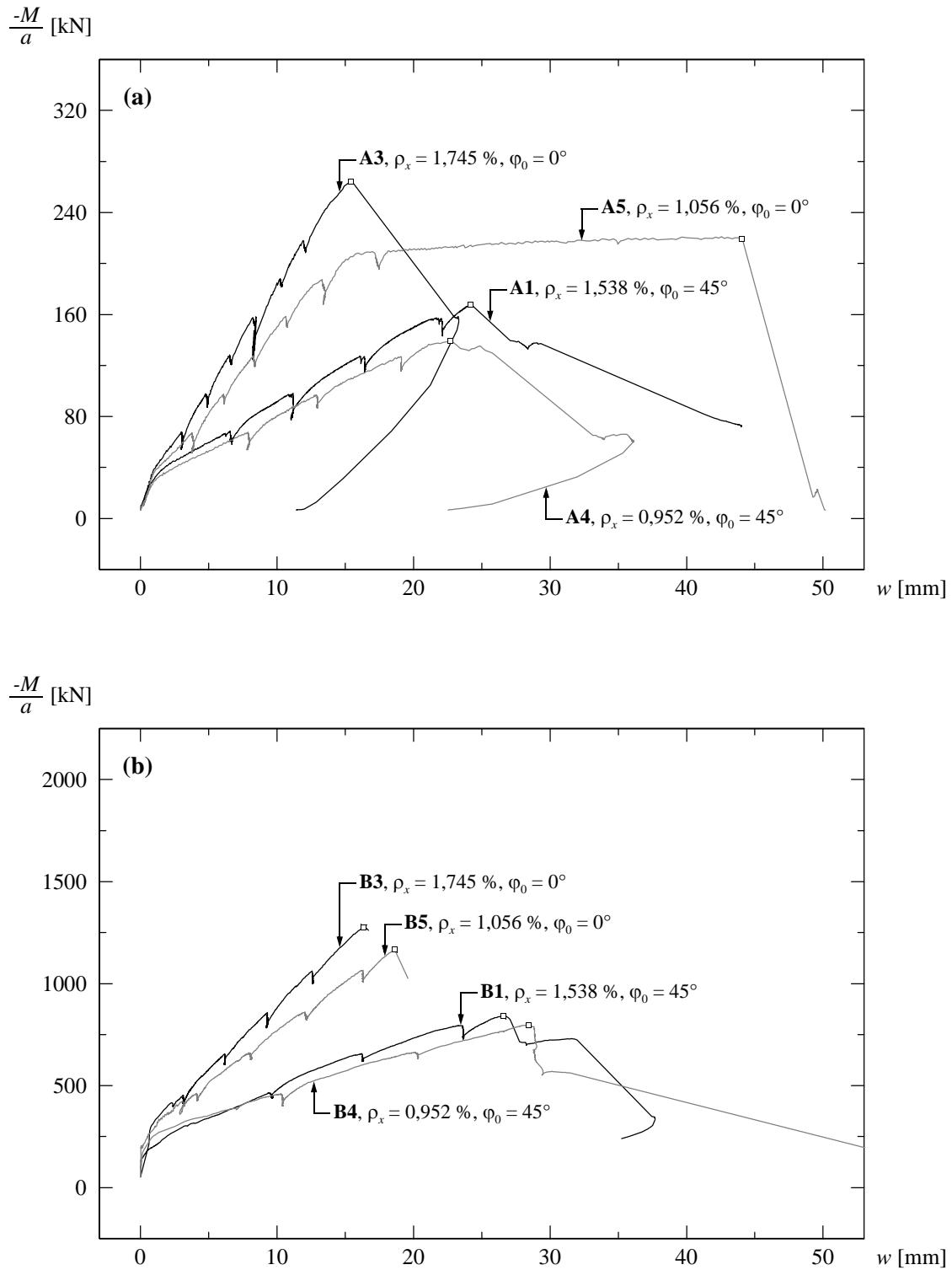


Bild 6.2: Querkraftwiderstand – Kraft-Durchbiegungsdiagramme der Versuche an den Kragarmen ohne Querkraftbewehrung ($\rho_z = 0 \text{ \%}$): (a) Versuchskörper A1, A3, A4 und A5 ($h = 200 \text{ mm}$); (b) Versuchskörper B1, B3, B4 und B5 ($h = 500 \text{ mm}$).

Fig. 6.2: Shear strength – load-deflection curves for tests on cantilevers without transverse reinforcement ($\rho_z = 0 \text{ \%}$): (a) Specimens A1, A3, A4 and A5 ($h = 200 \text{ mm}$); (b) Specimens B1, B3, B4 and B5 ($h = 500 \text{ mm}$).

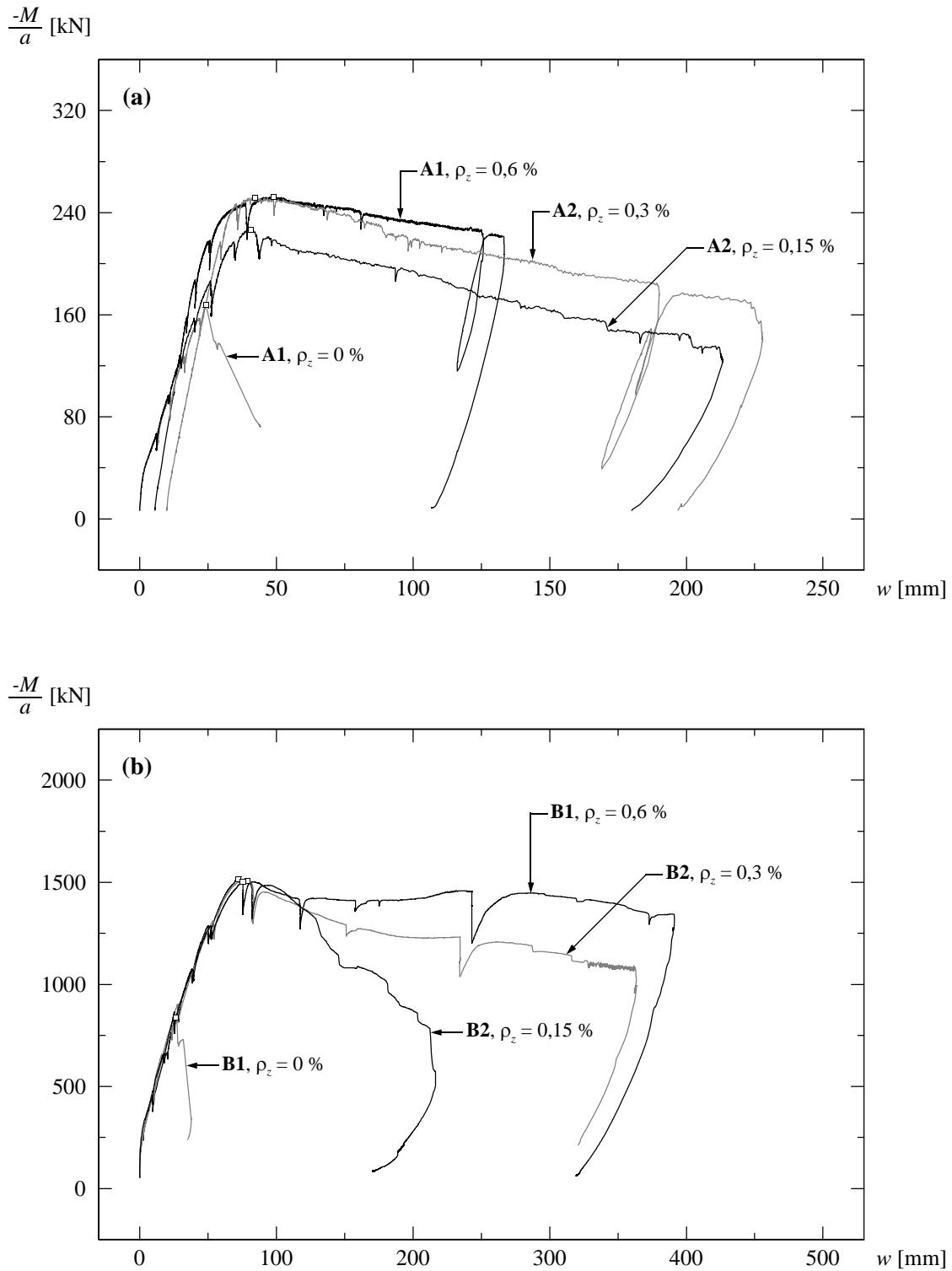


Bild 6.3: Verformungsvermögen – Kraft-Durchbiegungsdiagramme der Versuche an den Kragarmen mit einem Biegebewehrungsgehalt von $\rho_x = 1,538\%$ und einer Biegebewehrungsrichtung von $\varphi_0 = 45^\circ$: (a) Versuchskörper A1 und A2 ($h = 200$ mm); (b) Versuchskörper B1 und B2 ($h = 500$ mm).

Fig. 6.3: Deformation capacity – load-deflection curves for tests on cantilevers with an in-plane reinforcement ratio of $\rho_x = 1,538\%$ and a direction of the in-plane reinforcement of $\varphi_0 = 45^\circ$: (a) Specimens A1 and A2 ($h = 200$ mm); (b) Specimens B1 and B2 ($h = 500$ mm).

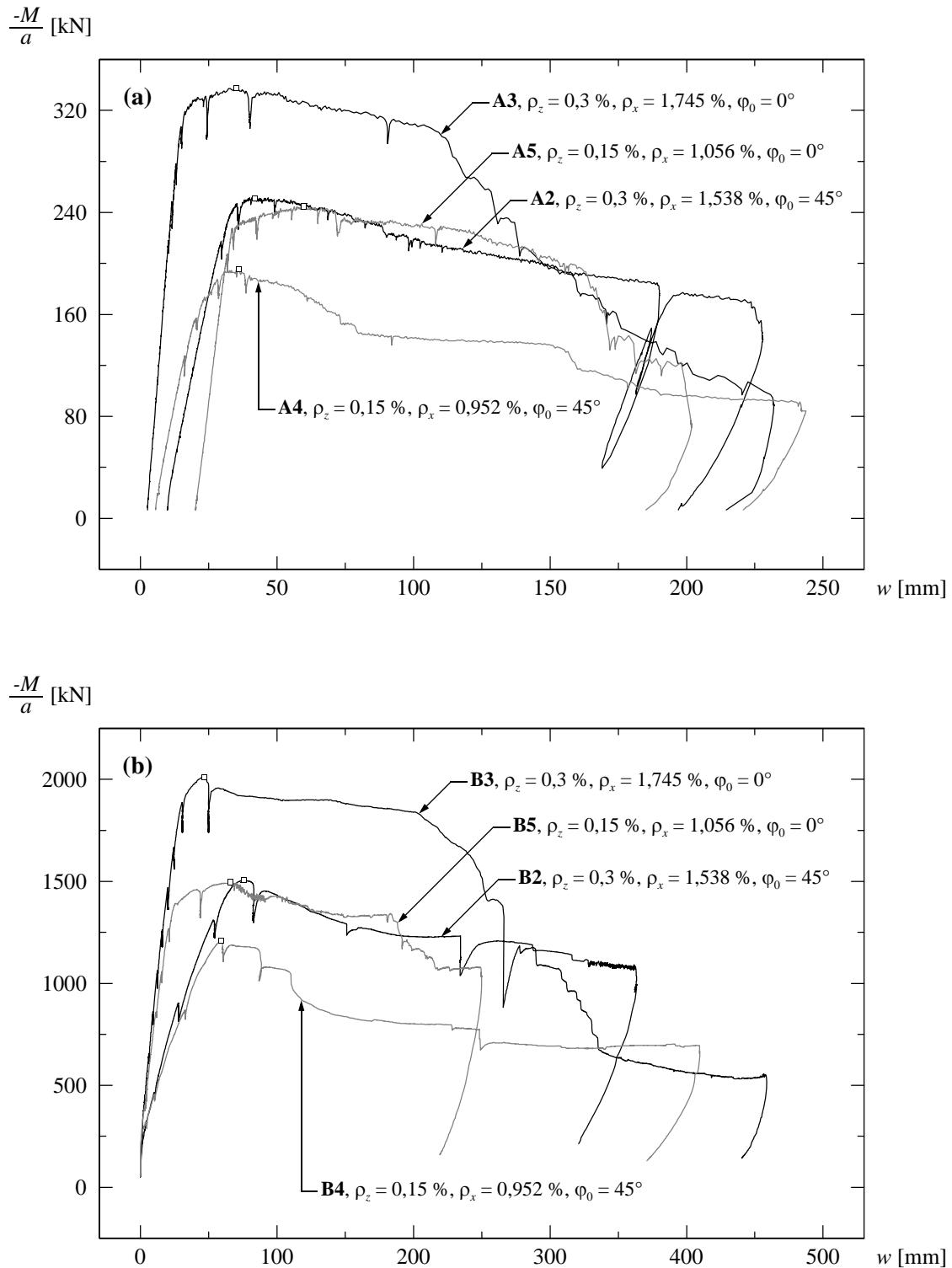


Bild 6.4: Verformungsvermögen und Duktilität – Kraft-Durchbiegungsdiagramme der Versuche an Kragarmen mit verschiedenen Biege- und Querkraftbewehrungsgehalten sowie verschiedenen Biegebewehrungsrichtungen: (a) Versuchskörper A2, A3, A4 und A5 ($h = 200$ mm); (b) Versuchskörper B2, B3, B4 und B5 ($h = 500$ mm).

Fig. 6.4: Deformation capacity and ductility – load-deflection curves for tests on cantilevers with different in-plane and transverse reinforcement ratios as well as different directions of the in-plane reinforcement: (a) Specimens A2, A3, A4 and A5 ($h = 200$ mm); (b) Specimens B2, B3, B4 and B5 ($h = 500$ mm).

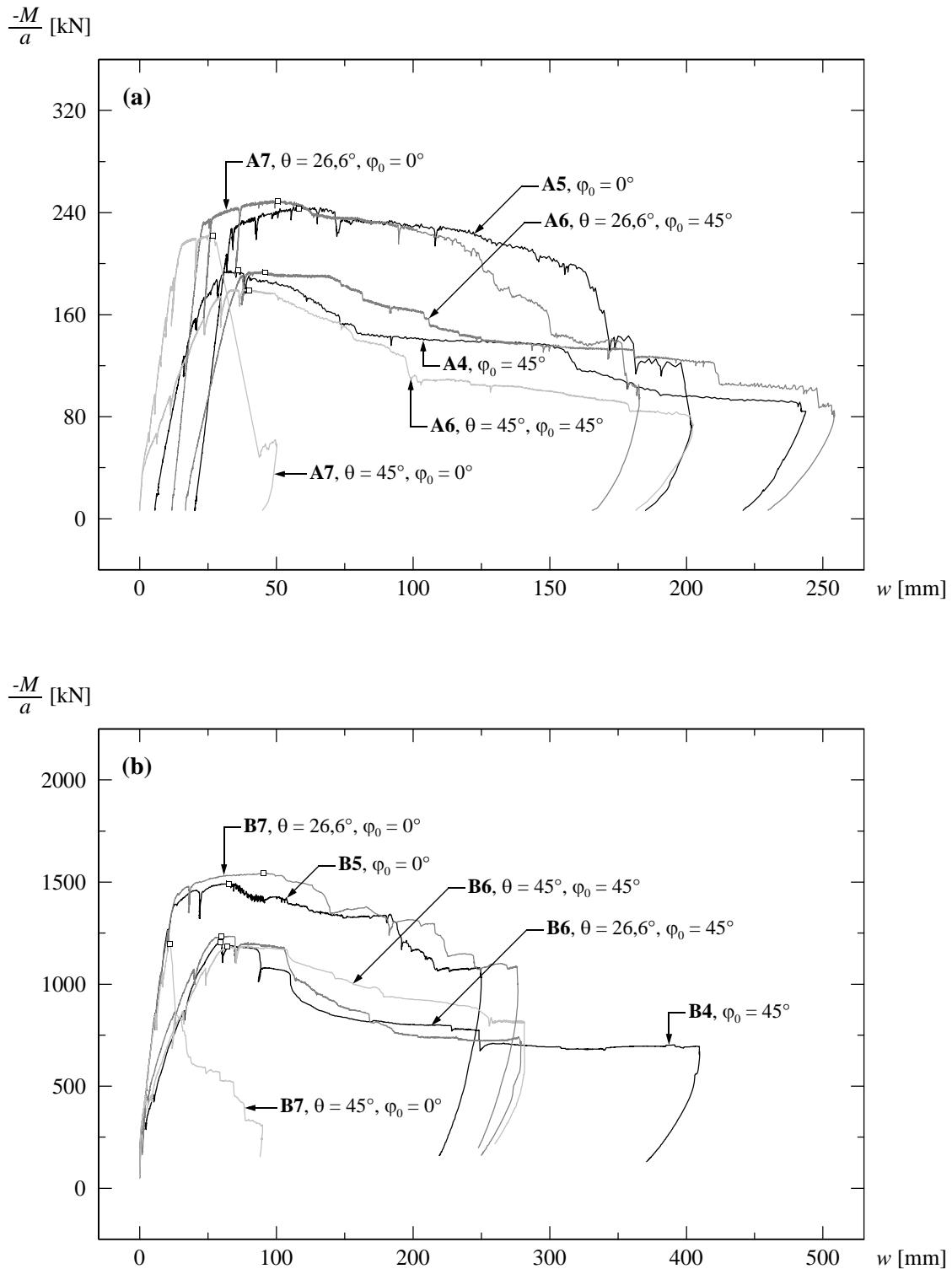


Bild 6.5: Abstufung der Biegebewehrung – Kraft-Durchbiegungsdiagramme der Versuche an den Kragarmen mit einem Querkraftbewehrungsgehalt von $\rho_z = 0,15\%$:
(a) Versuchskörper A4, A5, A6 und A7 ($h = 200$ mm); (b) Versuchskörper B4, B5, B6 und B7 ($h = 500$ mm).

Fig. 6.5: Curtailing of the in-plane reinforcement – load-deflection curves for tests on cantilevers with a transverse reinforcement ratio of $\rho_z = 0.15\%$: (a) Specimens A4, A5, A6 and A7 ($h = 200$ mm); (b) Specimens B4, B5, B6 and B7 ($h = 500$ mm).

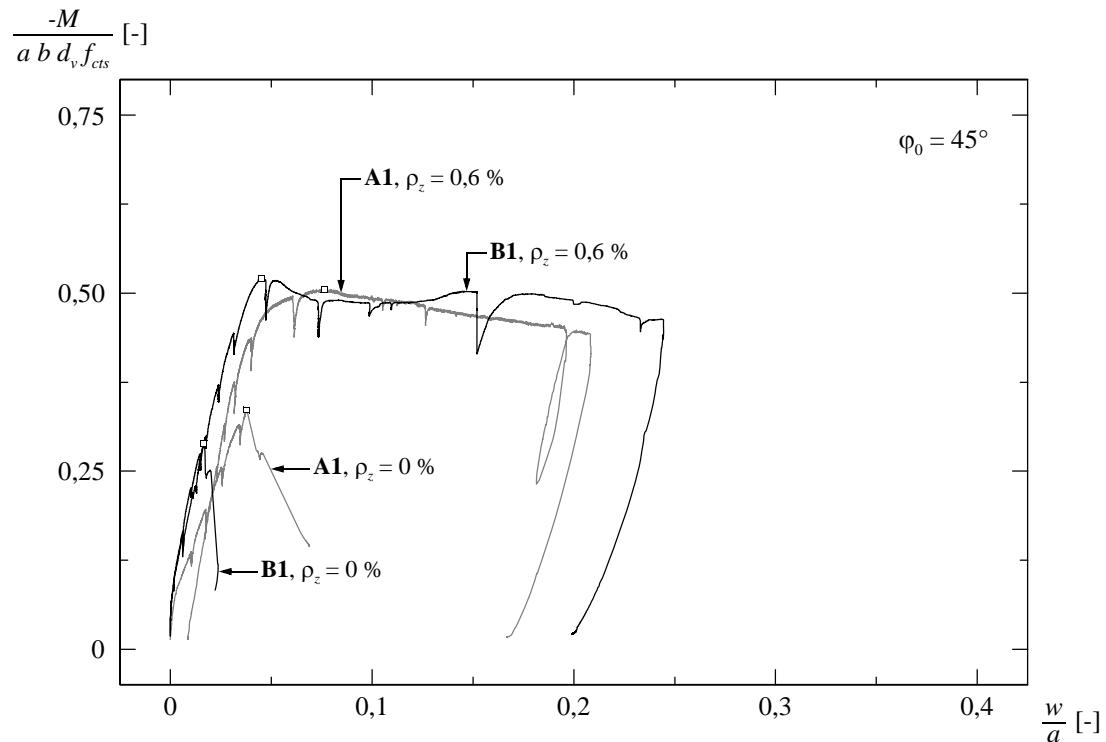


Bild 6.6: Massstabseffekt und Verformungsvermögen – normierte Kraft-Durchbiegungsdiagramme der Versuchskörpern A1 und B1.

Fig. 6.6: Size effect and deformation capacity – normalised load-deflection curves for the tests on Specimens A1 and B1.

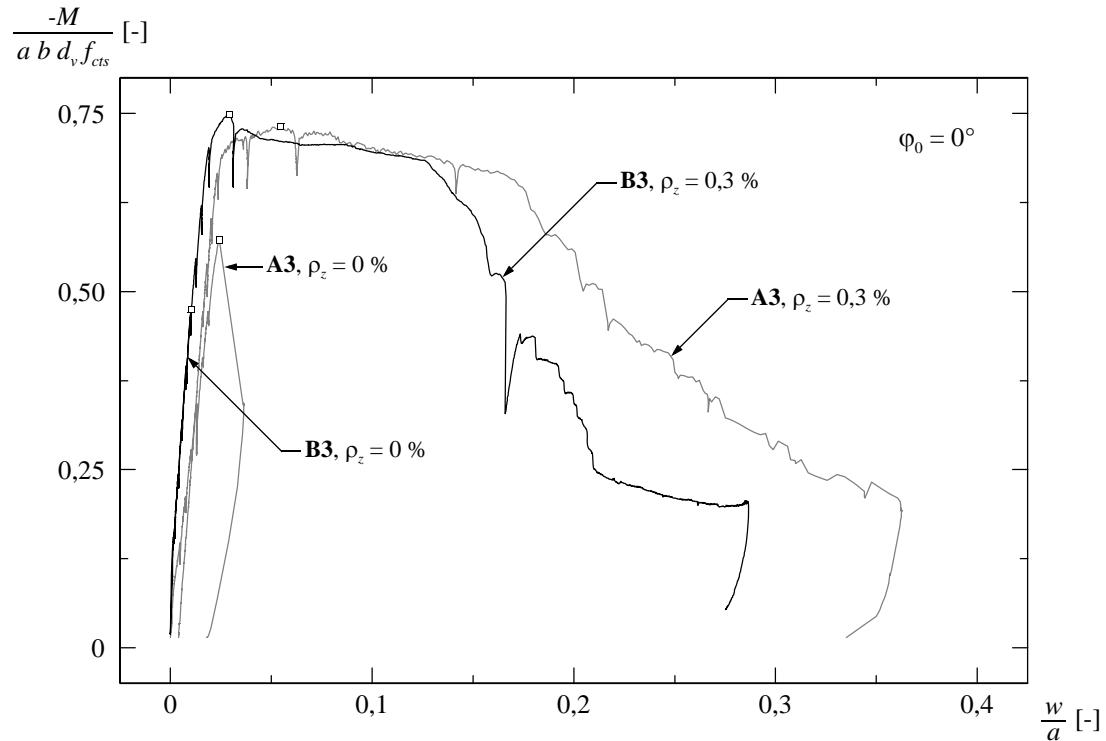


Bild 6.7: Massstabseffekt und Verformungsvermögen – normierte Kraft-Durchbiegungsdiagramme der Versuchskörpern A3 und B3.

Fig. 6.7: Size effect and deformation capacity – normalised load-deflection curves for the tests on Specimens A3 and B3.

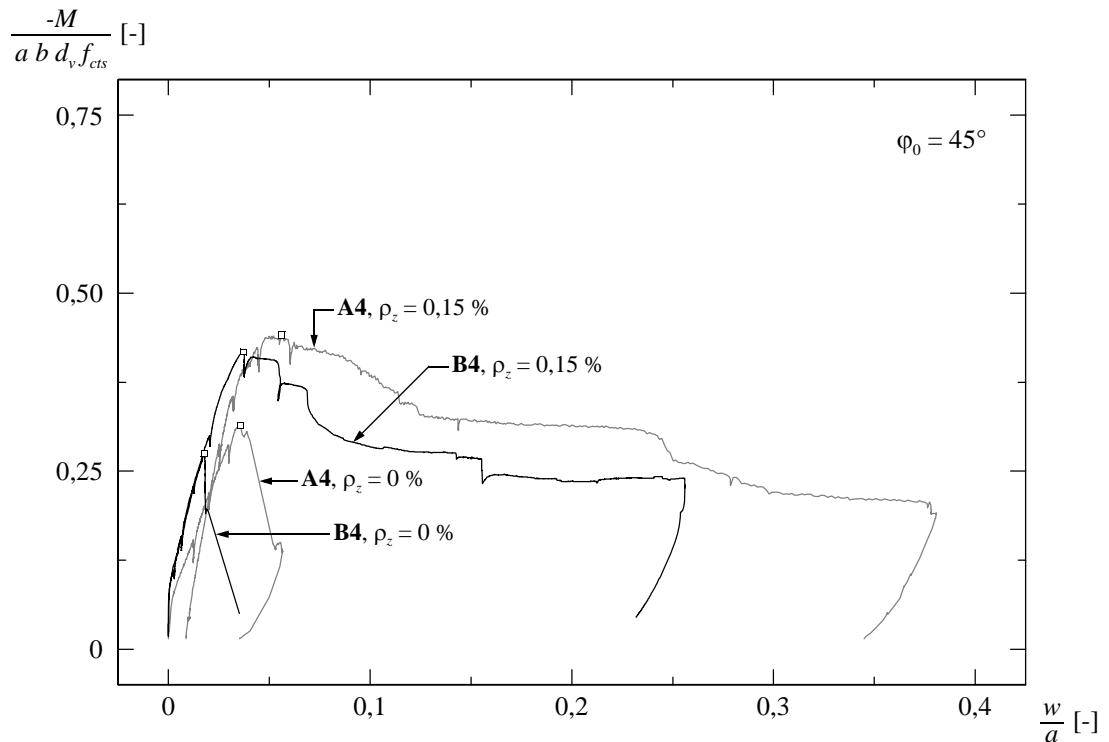


Bild 6.8: Massstabseffekt und Verformungsvermögen – normierte Kraft-Durchbiegungsdiagramme der Versuchskörpern A4 und B4.

Fig. 6.8: Size effect and deformation capacity – normalised load-deflection curves for the tests on Specimens A4 and B4.

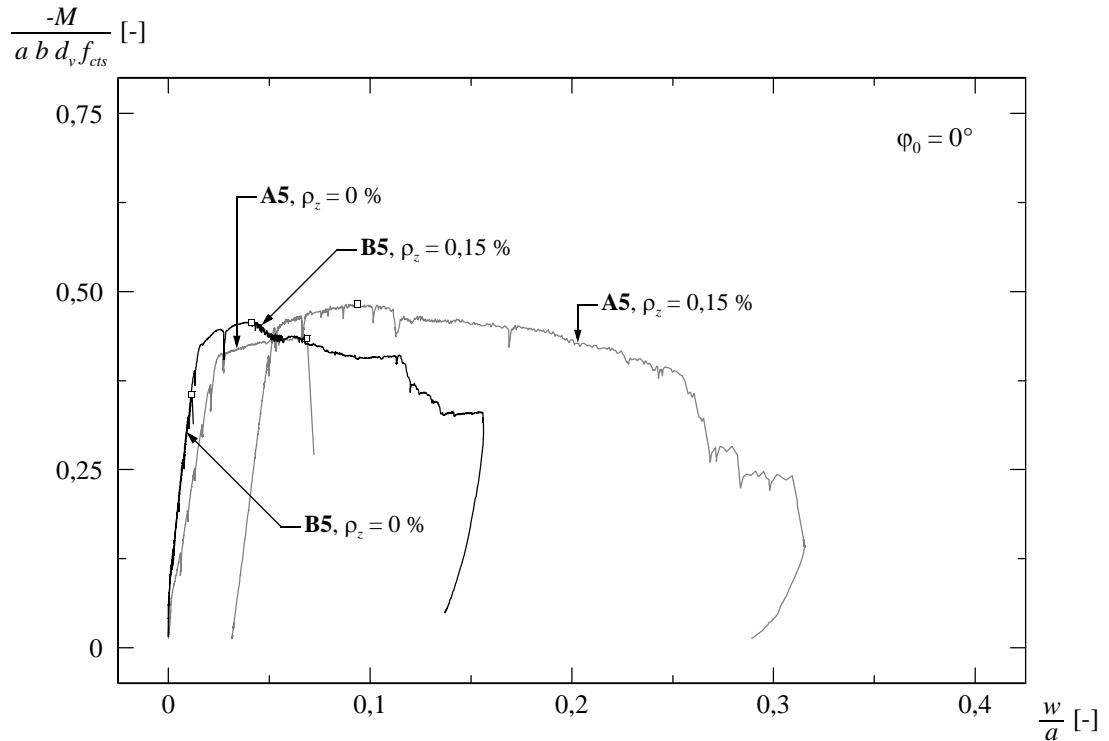


Bild 6.9: Massstabseffekt und Verformungsvermögen – normierte Kraft-Durchbiegungsdiagramme der Versuchskörpern A5 und B5.

Fig. 6.9: Size effect and deformation capacity – normalised load-deflection curves for the tests on Specimens A5 and B5.

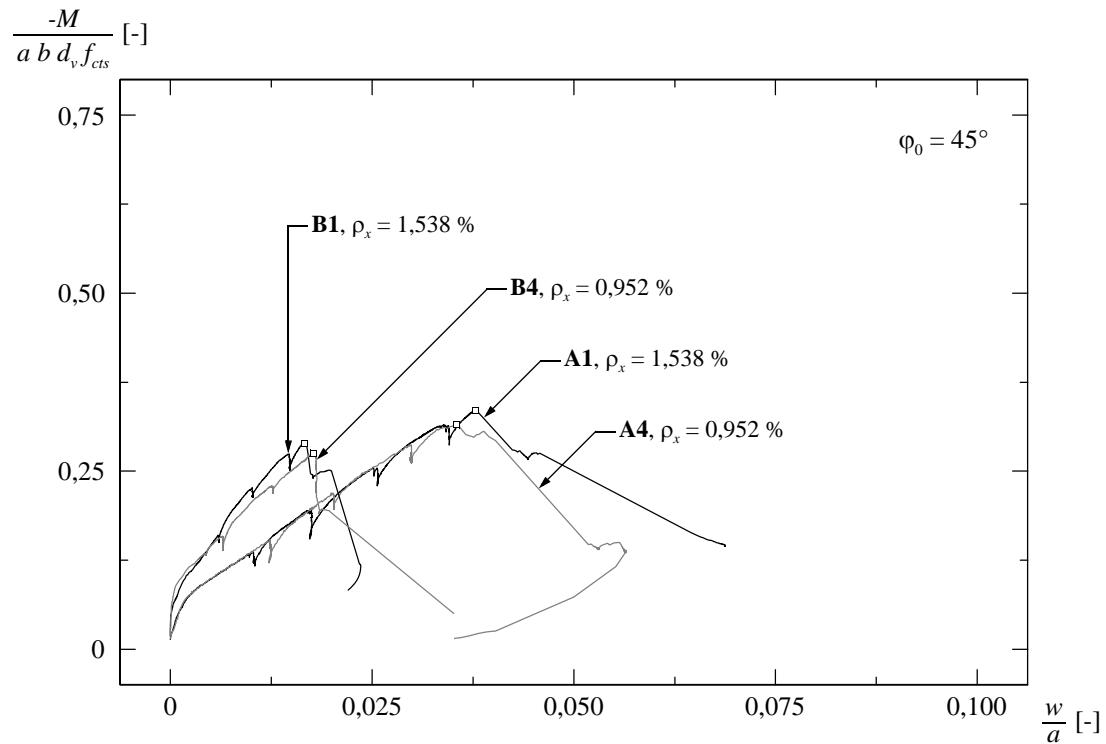


Bild 6.10: Massstabseffekt – normierte Kraft-Durchbiegungsdiagramme der Versuche an den Kragarmen ohne Querkraftbewehrung ($\rho_z = 0\%$): Versuchskörper A1, A4, B1, B4.

Fig. 6.10: Size effect – normalised load-deflection curves for the tests on cantilevers without transverse reinforcement ($\rho_z = 0\%$): Specimens A1, A4, B1 and B4.

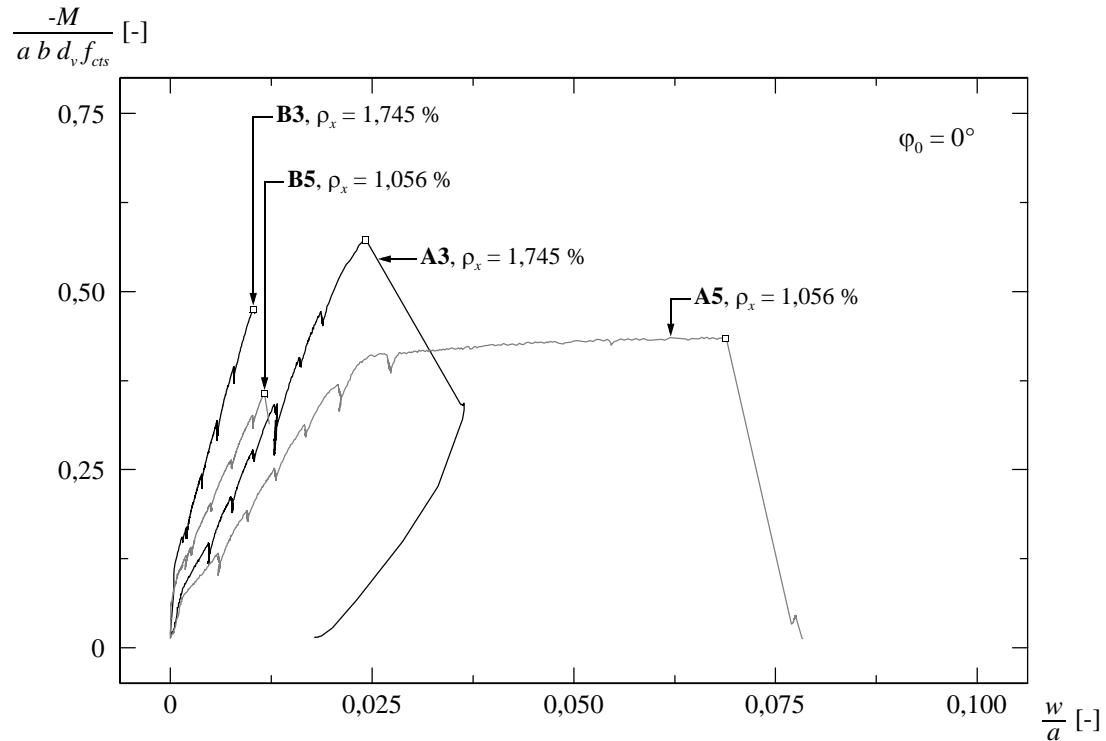


Bild 6.11: Massstabseffekt – normierte Kraft-Durchbiegungsdiagramme der Versuche an den Kragarmen ohne Querkraftbewehrung ($\rho_z = 0\%$): Versuchskörper A3, A5, B3, B5.

Fig. 6.11: Size effect – normalised load-deflection curves for the tests on cantilevers without transverse reinforcement ($\rho_z = 0\%$): Specimens A3, A5, B3 and B5.

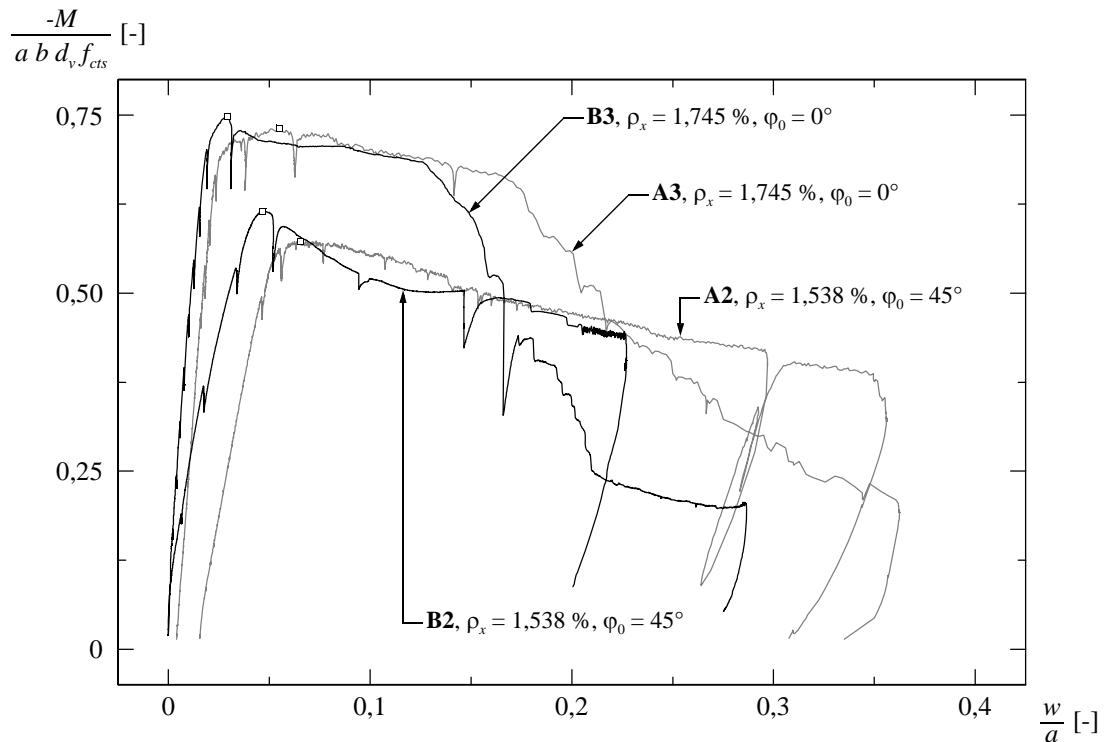


Bild 6.12: Verformungsvermögen – normierte Kraft-Durchbiegungsdiagramme der Versuchskörper A2, A3, B2 und B3 mit einem Querkraftbewehrungsgehalt von $\rho_z = 0,3 \%$.

Fig. 6.12: Deformation capacity – normalised load-deflection curves for Specimens A2, A3, B2 and B3 with a transverse reinforcement ratio of $\rho_z = 0.3 \%$.

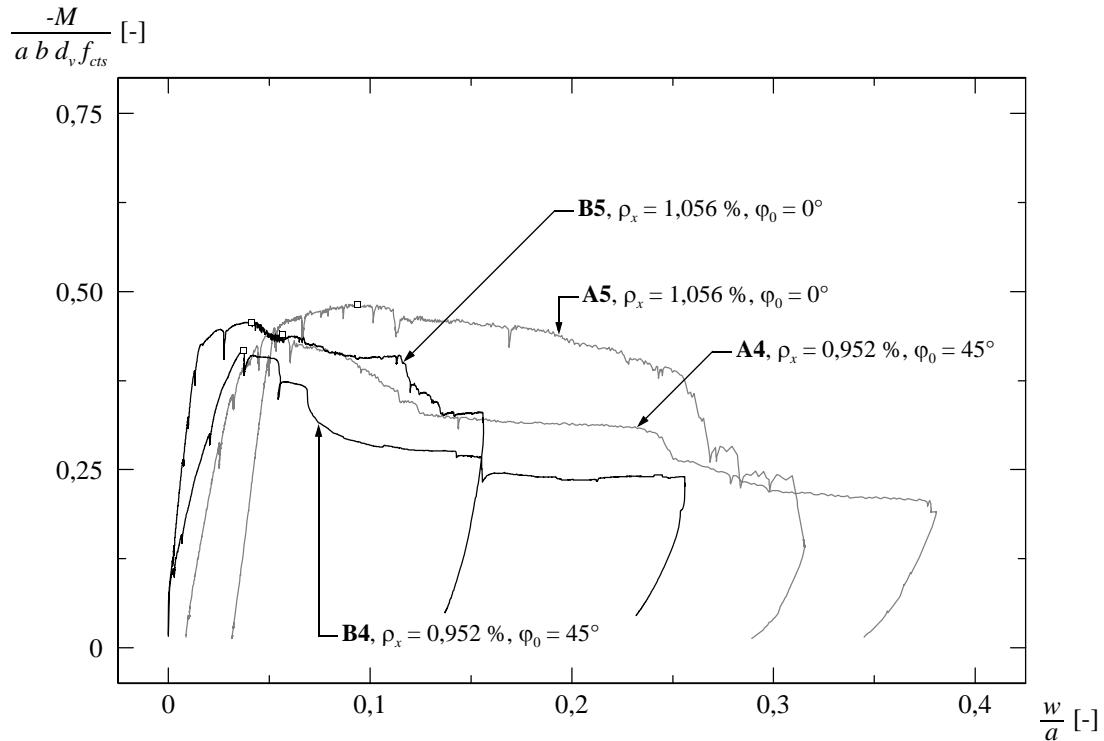


Bild 6.13: Verformungsvermögen – normierte Kraft-Durchbiegungsdiagramme der Versuchskörper A4, A5, B4 und B5 mit einem Querkraftbewehrungsgehalt von $\rho_z = 0,15 \%$.

Fig. 6.13: Deformation capacity – normalised load-deflection curves for Specimens A4, A5, B4 and B5 with a transverse reinforcement ratio of $\rho_z = 0.15 \%$.

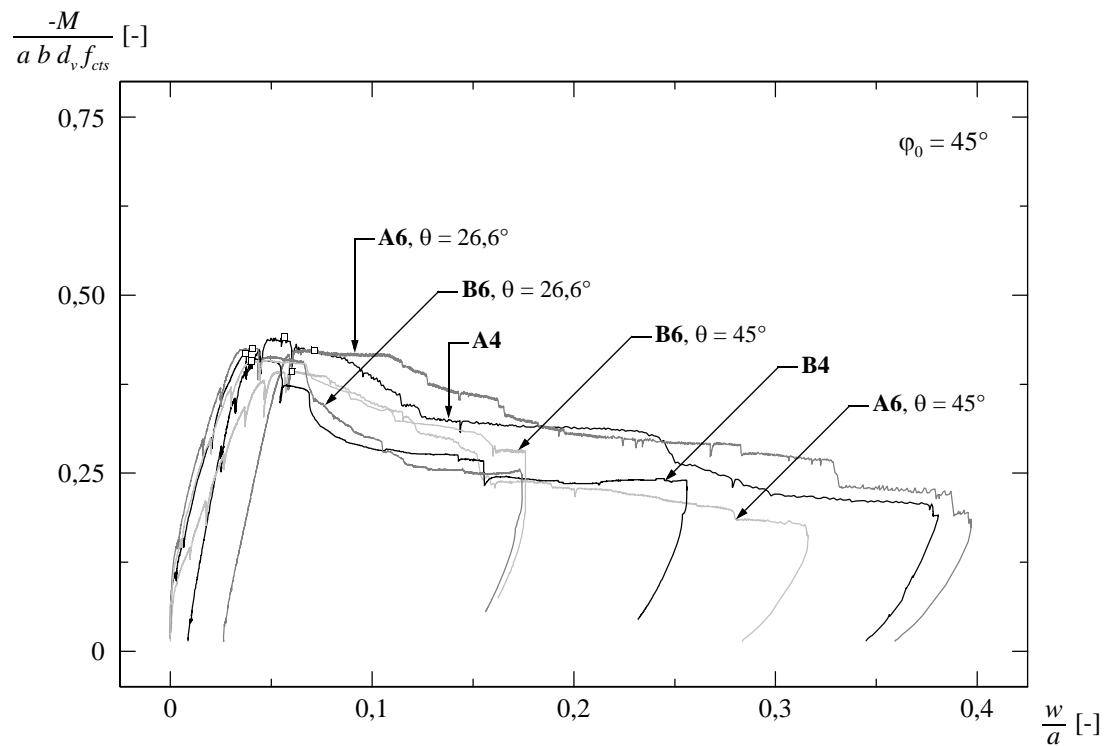


Bild 6.14: Abstufung der Biegebewehrung – normierte Kraft-Durchbiegungsdiagramme der Versuchskörper A4, A6, B4 und B6 mit Querkraftbewehrung ($\rho_z = 0,15\%$).

Fig. 6.14: Curtailing of the in-plane reinforcement – normalised load-deflection curves of Specimens A4, A6, B4 and B6 with transverse reinforcement ($\rho_z = 0.15\%$).

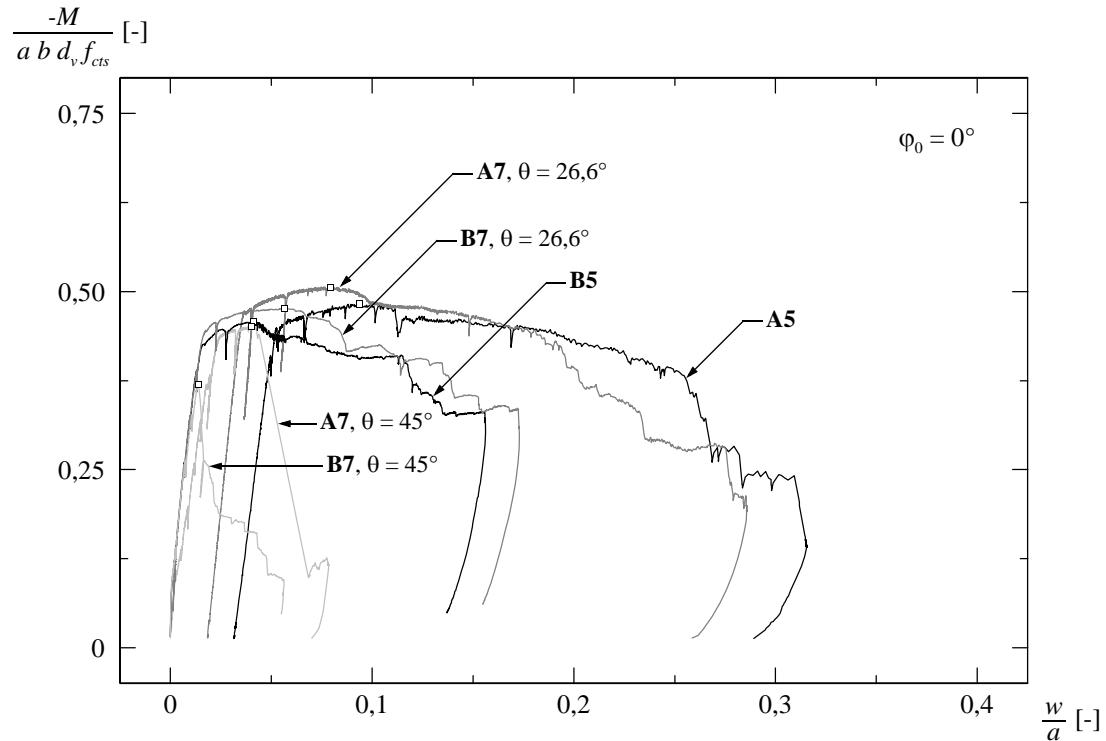


Bild 6.15: Abstufung der Biegebewehrung – normierte Kraft-Durchbiegungsdiagramme der Versuchskörper A5, A7, B5 und B7 mit Querkraftbewehrung ($\rho_z = 0,15\%$).

Fig. 6.15: Curtailing of the in-plane reinforcement – normalised load-deflection curves of Specimens A5, A7, B5 and B7 with transverse reinforcement ($\rho_z = 0.15\%$).

Verdankungen

Der vorliegende Versuchsbericht wurde im Rahmen des Forschungsprojekts “Verformungsvermögen von Massivbauwerken” am Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich ausgearbeitet. Für die finanzielle Unterstützung dieses Projekts möchten die Verfasser folgenden Institutionen aufrichtig danken:

- Stiftung für wissenschaftliche, systematische Forschung auf dem Gebiet des Beton- und Eisenbetonbaus des Verbands der Schweizerischen Zementindustrie (Cemsuisse), Bern.
- Eidgenössische Technische Hochschule (ETH), Zürich

Alle Versuchsträger wurden im Vorfabrikationswerk der Firma Rudolf Stüssi AG in Dällikon hergestellt. Den Betonstahl lieferte die Firma Acifer Regensdorf AG, Regensdorf. Die Schweissarbeiten der Endverankerungsplatten an den Biege- und Querkraftbewehrungsstäben wurden von der Firma Ankaba AG in Brüttisellen ausgeführt. Die Firma Schneider Stahlbau AG, Jona, fertigte den für die Versuchsserie B erforderlichen Lastverteilträger beim freien Kragarmende (Vollstahlprofil 300×200 mm). In der Werkstatt HIF der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich wurden die Stahlteile der zusätzlich notwendigen Kipplager mechanisch bearbeitet. Die Setzlehrer für die Messbolzen der Deformatiermessungen lieferte die Firma Josef Jäger AG, Vättis. Die reibungslose Zusammenarbeit mit den genannten Firmen hat wesentlich zum Gelingen der Versuche beigetragen.

Der Auf- und Abbau der Versuchsanlagen erfolgte unter tatkräftiger Mithilfe der Herren Markus Baumann, Christoph Gisler, Thomas Jaggi, Mario Monotti und Stefan Trümpi. Herr Christoph Gisler war für die mechanische Bearbeitung der Kipplager zuständig. Bei der Vorbereitung und Durchführung der Versuche haben die Herren Daniel Heinzmann, Erwin Pilch, Hans Seelhofer und Andreas Zenger mitgearbeitet. Herr Markus Baumann leistete wertvolle Unterstützung bei der Lösung der mess- und regeltechnischen Probleme. Während der Versuche halfen nebst den Genannten die Herren Uwe Teutsch, Karel Thoma, Roberto Siccardi sowie Frau Birgit Seelhofer mit. Die Durchführung der Versuche an den Versuchskörpern A6 und A7 erfolgte im Rahmen der Diplomarbeit von Herrn Hans Seelhofer. Die digitalen Fotografien wurden von Herrn Emil Honegger aufgearbeitet. Beim Korrekturlesen der Endfassung haben Frau Susanna Schenkel-Würmlí und Frau Nadine Vogel mitgeholfen. Für ihre Mitarbeit sei den Erwähnten herzlich gedankt.

Bezeichnungen

Lateinische Grossbuchstaben

A	Krafteinleitungsstelle; Querschnittsfläche
B	Krafteinleitungsstelle; längsverschiebliches Auflager
C	unverschiebliches Auflager
D	längsverschiebliches Auflager
E	Elastizitätsmodul
F	Kraft
G	Eigengewicht Belastungseinrichtung; Gelenk
K	Kragarm
M	Biegemoment
N	Normalkraft
V	Querkraft

Lateinische Kleinbuchstaben

a	Schubspannweite
b	Breite; Lagerabstand
d	Hebelarm der inneren Kräfte; statische Höhe
f	Materialfestigkeit
g	verteiltes Eigengewicht
h	Plattendicke
n	Biegebewehrungsrichtung
p	Öldruck
t	Biegebewehrungsrichtung
u	horizontale Verformung der Oberseite
w	Durchbiegung; Rissbreite
x	Koordinate
y	Koordinate
z	Koordinate

Griechische Buchstaben

α	Pressenverdrehung
γ	Schiebung
ε	Dehnung
θ	Druckfeldneigung
ρ	geometrischer Bewehrungsgehalt; Rohdichte
σ	Normalspannung
τ	Schubspannung
φ	Winkel
χ	Krümmung
ω	mechanischer Bewehrungsgehalt; Lagerplattenneigung

Weitere Zeichen

\emptyset	Durchmesser
-------------	-------------

Fusszeiger

A	Krafteinleitungsstelle A
B	Krafteinleitungsstelle B; längsverschiebliches Auflager B
C	unverschiebliches Auflager C
C1	in C, auf der Seite Kragarm; in C, vertikal
C2	in C, auf der Seite Mittelfeld; in C, horizontal
c	Beton; Zylinder
cr	Riss
D	längsverschiebliches Auflager D
D1	in D, auf der Seite Kragarm
D2	in D, auf der Seite Mittelfeld
dyn	dynamisch
g	Gleichmass
h	hinten
i	Index
inf	unten
K1	Kragarm K1
K2	Kragarm K2
M	Mittelfeld
m	Mittelwert
nom	nominell
s	Betonstahl; Spaltzug
stat	statisch
sup	oben
t	Zug
u	Bruch; maximal
v	Querkraft; Verfestigung; vorne
w	Würfel
x	Koordinate
y	Fliessen; Fliessgrenze; Koordinate
z	Koordinate
0	Biegebewehrungsrichtung
1...4	Nummerierung

Kopfzeiger

'	Vergleichsgrösse
-	Mittelwert der Messwerte vorne und hinten

Literatur

- [1] Bundesamt für Zivilschutz, “TWK 1994”, *Technische Weisungen für die Konstruktion und Bemessung von Schutzbauten*, Bern, 1994, 101 pp.
- [2] Chen, W.F., “Double-Punch Test for Tensile Strength of Concrete”, *ACI Journal*, Proceedings, Vol. 67, No. 12, December 1970, pp. 993-995.
- [3] Collins, M.P., Mitchell, D., Adebar, P., and Vecchio, F.J., “A General Shear Design Method”, *ACI Structural Journal*, Vol. 93, No. 1, January-February 1996, pp. 36-46.
- [4] Jaeger, T., “Shear Strength and Deformation Capacity of Reinforced Concrete Slabs”, *Sonderpublikation*, 4th International Ph.D. Symposium in Civil Engineering, Technische Universität München, Universität der Bundeswehr München, Springer VDI-Verlag, Düsseldorf, Vol. 1, September 19-21, 2002, pp. 280-286.
- [5] Kani, G.N.J., “The Riddle of Shear Failure and Its Solution”, *ACI Journal*, Proceedings, Vol. 61, No. 4, April 1964, pp. 441-467.
- [6] Kani, G.N.J., “Basic Facts Concerning Shear Failure”, *ACI Journal*, Proceedings, Vol. 63, No. 6, June 1966, pp. 675-692.
- [7] Kani, G.N.J., “How Safe are our Large Reinforced Concrete Beams?”, *ACI Journal*, Proceedings, Vol. 64, No. 3, March 1967, pp. 128-141.
- [8] Kaufmann, W., and Marti, P., “Structural Concrete: Cracked Membrane Model”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 12, December 1998, pp. 1467-1475.
- [9] Marti, P., *Zur plastischen Berechnung von Stahlbeton*, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, IBK Bericht Nr. 104 (Dissertation), Birkhäuser Verlag, Basel, Oktober 1980, 176 pp.
- [10] Marti, P., and Kong, K., “Response of Reinforced Concrete Slab Elements to Torsion”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 5, May 1987, pp. 976-993.
- [11] Marti, P., Leesti, P., and Khalifa, W.U., “Torsion Tests on Reinforced Concrete Slab Elements”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 5, May 1987, pp. 994-1010.
- [12] Marti, P., “Size Effect in Double-Punch Tests on Concrete Cylinders”, *ACI Materials Journal*, Vol. 86, No. 6, November-December 1989, pp. 597-601.
- [13] Marti, P., “Design of Concrete Slabs for Transverse Shear”, *ACI Structural Journal*, Vol. 87, No. 2, March-April 1990, pp. 180-190.
- [14] Marti, P., Alvarez, M., Kaufmann, W., und Sigrist, V., *Tragverhalten von Stahlbeton*, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, IBK Publikation SP-008, September 1999, 301 pp.
- [15] Morley, C.T., “On the Yield Criterion of an Orthogonally Reinforced Concrete Slab Element”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 14, 1966, pp. 33-47.

- [16] Muttoni, A., *Die Anwendbarkeit der Plastizitätstheorie in der Bemessung von Stahlbeton*, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, IBK Bericht Nr. 176 (Dissertation), Birkhäuser Verlag, Basel, Juni 1990, 158 pp.
- [17] Muttoni, A., “Schubfestigkeit und Durchstanzen von Platten ohne Querkraftbewehrung”, *Beton- und Stahlbetonbau*, Heft Nr. 2, Februar 2003, pp. 74-84.
- [18] SIA, “Norm SIA 162/1, Betonbauten Materialprüfung”, *Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein*, Zürich, 1989, 77 pp.
- [19] Vecchio, F.J., and Collins, M.P., “The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear”, *ACI Journal*, Proceedings, Vol. 83, No. 2, March-April 1986, pp. 219-231.