

Versuche zum Tragverhalten von ultra hochfestem Beton

Teil 2 – Bauteilversuche

Institut de structures – Construction en béton

Dipl. Ing. Jörg Jungwirth
Prof. Dr. Aurelio Muttoni

Projekt 00.02, Bericht 00.02.R4 März 2004



INHALTSVERZEICHNIS

1	ZUSAMMENFASSUNG	5
2	ZIELSETZUNG UND KONZEPT.....	9
2.1	VERSUCHSERIEN	9
2.2	VERSUCHSSERIE BAUTEILE.....	11
3	VERSUCHSKÖRPER.....	12
3.1	BETONZUSAMMENSETZUNG.....	12
3.2	GEOMETRIE UND BEWEHRUNG	12
3.3	PROBENHERSTELLUNG.....	13
3.4	VORGESPANNTE VERSUCHSKÖRPER	14
4	ZUGVERSUCH	17
4.1	VERSUCHSPARAMETER	17
4.2	VERSUCHSAUFBAU	18
4.3	MESSEINRICHTUNG.....	20
4.4	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG.....	20
4.5	VERSUCHSERGEBNISSE	21
4.5.1	<i>Versuchskörper G17</i>	23
4.5.2	<i>Versuchskörper G18</i>	26
4.5.3	<i>Versuchskörper G19</i>	28
4.5.4	<i>Versuchskörper G20</i>	32
4.5.5	<i>Versuchskörper G30</i>	34
4.6	WEITERFÜHRENDE UNTERSUCHUNGEN	36
4.6.1	<i>Verdrehung des Probekörpers</i>	36
4.6.2	<i>Rissbildung im Knick zur Übergangszone</i>	38
4.6.3	<i>Mehrfachrissbildung</i>	40
4.6.4	<i>Anteil des UHFB an der Lastabtragung</i>	42
4.6.5	<i>Vorgespannte Probe</i>	43
4.6.6	<i>Vergleich der Versuchsergebnisse untereinander</i>	44
4.7	ZUSAMMENFASSUNG DER ERKENNTNISSE	47
5	(BIEGE-) DRUCKVERSUCH.....	49
5.1	EINLEITUNG	49
5.2	VERSUCHSPARAMETER	52
5.3	VERSUCHSAUFBAU	53
5.4	MESSEINRICHTUNG.....	54
5.5	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG.....	55
5.6	GEOMETRIE, KINEMATIK UND KRÄFTE AM VERSUCHSSTAND	57
5.7	VERSUCHSERGEBNISSE	60
5.7.1	<i>Versuchskörper G22 unbewehrt $N = 1.5 \text{ KN}$</i>	64
5.7.2	<i>Versuchskörper G23 $4 \text{ } \varnothing 20 \text{ N} = 1.5 \text{ KN}$</i>	66
5.7.3	<i>Versuchskörper G29 $4 \text{ } \varnothing 15.7 \text{ N} = 1.5 \text{ KN}$</i>	68
5.7.4	<i>Versuchskörper G21 unbewehrt $N = 2.5 \text{ KN}$</i>	70
5.7.5	<i>Versuchskörper G24 $4 \text{ } \varnothing 20 \text{ N} = 2.5 \text{ KN}$</i>	72
5.7.6	<i>Versuchskörper G27 $4 \text{ } \varnothing 15.7 \text{ N} = 2.5 \text{ KN}$</i>	74
5.7.7	<i>Versuchskörper G26 unbewehrt $N = 3.5 \text{ KN}$</i>	76
5.7.8	<i>Versuchskörper G25 $4 \text{ } \varnothing 20 \text{ N} = 3.5 \text{ KN}$</i>	78
5.7.9	<i>Versuchskörper G28 $4 \text{ } \varnothing 15.7 \text{ N} = 3.5 \text{ KN}$</i>	80

5.8	WEITERFÜHRENDE UNTERSUCHUNGEN	82
5.8.1	<i>Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Probekörper</i>	82
5.8.2	<i>Steifigkeitsentwicklung</i>	87
5.8.3	<i>Nachrechnung der Versuche mit vereinfachten Modellen</i>	90
5.9	ZUSAMMENFASSUNG DER ERKENNTNISSE	96

LITERATUR	98
------------------------	-----------

DANKSAGUNG	98
-------------------------	-----------

1 ZUSAMMENFASSUNG

Motivation

Ultra hochfester Beton bla bla...

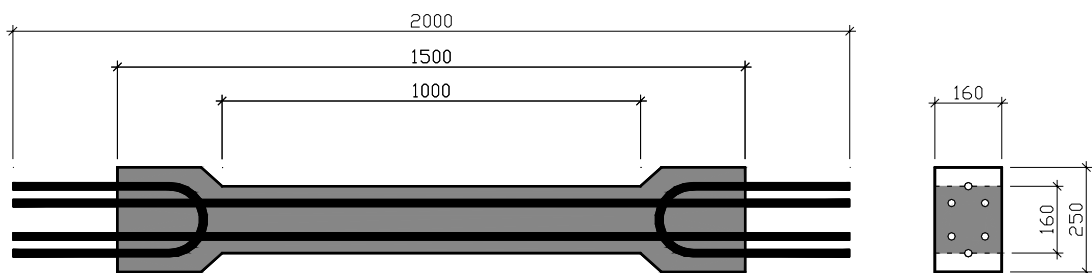
Alg Versuche

Es werden **Versuche an Zug- und Druckelementen** aus UHFB durchgeführt um deren Tragverhalten zu analysieren und die mechanischen Vorgänge zu verstehen. Hierbei werden Druck- und Zugelemente untersucht, welche unbewehrt, mit Stabstahl bewehrt oder vorgespannt ausgeführt sind.

Basierend auf das im ersten Teil des Versuchsberichts untersuchte Materialverhalten wird im zweiten Teil das Tragverhalten von Bauteilen aus UHFB untersucht. Neben der grösseren Dimension der Prüfkörper und dem hieraus folgenden Einfluss auf das Tragverhalten, bedeutet dies auch die Berücksichtigung des Einsatzes von Bewehrungselementen.

Mit den Versuchen wird das Tragverhalten vornehmlich axialer belasteter Bauteile untersucht. Es werden zentrisch belastete Zugelemente getestet, wobei eine unbewehrte Probe, drei Proben mit unterschiedlichen Bewehrungsgraden und eine vorgespannte Probe geprüft werden. Bei druckbelasteten Bauteilen spielt die Exzentrizität der Belastung eine wesentliche Rolle, weshalb Versuchskörper mit einer kombinierten Druck – Biegebelastung getestet werden. Die je drei Elemente einer Serie sind unbewehrt, bewehrt bzw. vorgespannt und werden jeweils auf drei verschiedene Lastniveaus vorbelastet.

Für die Versuche an Bauteilen aus UHFB werden für die Zug- und Druckversuche Versuchskörper mit jeweils den gleichen Bauteilabmessungen benutzt. Die **Versuchskörper** sind im Lasteinleitungsbereich erweitert, um eine gute Krafterleitung an den beiden Enden sicherzustellen. Der Messbereich in der Mitte der Probe besitzt einen konstanten Querschnitt. Die Proben haben eine Gesamtlänge von 1500 mm mit einem Messbereich von 1000 mm. Der Querschnitt beträgt 160 x 160 mm mit einer Erweiterung auf 160 x 250 mm im Lasteinleitungsbereich. Die Querschnittsfläche im Bereich der Messstrecke beträgt $A = 25600 \text{ mm}^2$. Der Querschnitt ist so ausgelegt, dass bis zu 4 Bewehrungselemente eingefügt werden können.



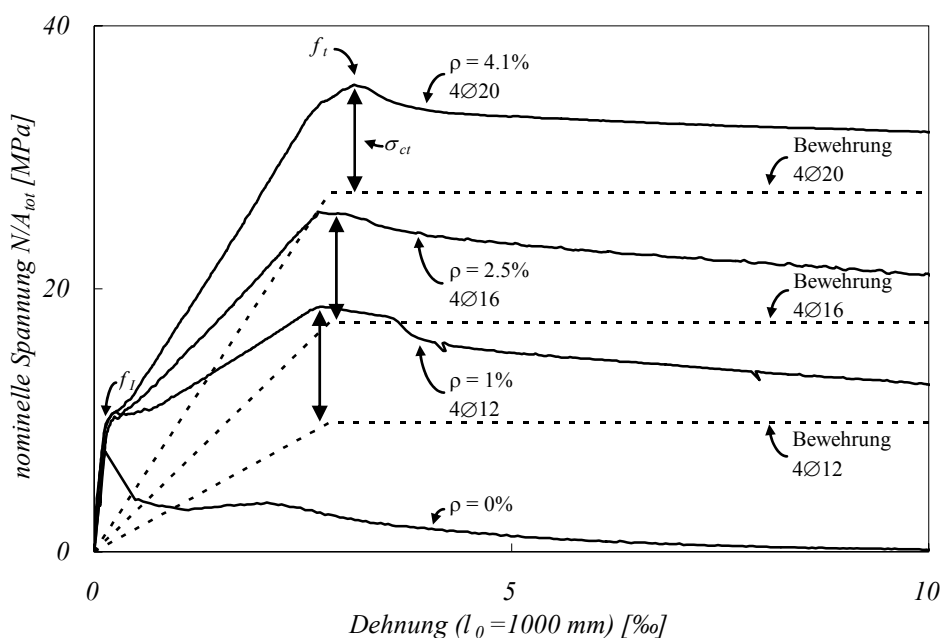
Zug

Es werden **Zugversuche** an Bauteilen aus UHFB durchgeführt. Hierbei wird untersucht, wie sich Zugelemente aus UHFB innerhalb eines Tragwerkes verhalten. Es werden die Festigkeit, die Verformungseigenschaften und die Rissbildung untersucht.

Durch die Belastung kommt es zu einer komplexen **Multirissbildung**. Hierbei ist zwischen den visuell einfach zu erkennenden Hauptrissen und den sehr feinen Nebenrisen zu unterscheiden. Erstere entstehen durch die vom klassischen Stahlbeton bekannten Mechanismen der Rissbildung mit einem Rissabstand von 40 - 100 mm, der sich aus der Verbundlänge mit der jeweils eingesetzten Bewehrung ergibt. Die feineren Nebenrisse bilden sich aufgrund der rissverteilenden Wirkung der Fasern im Zwischenbereich mit einem Rissabstand von rund 10 - 15 mm aus.

Die **Vorspannung** hat einen sehr positiven Einfluss auf Zuelemente aus UHFB. Durch das Überdrücken des Querschnittes kann sich der UHFB sehr effizient an der Abtragung der Belastung beteiligen.

Es zeigt sich, dass das **Tragverhalten** eines bewehrten Zuelementes aus UHFB und die erzielten **Festigkeiten** aus der Überlagerung des Verhaltens des Verbundwerkstoffes UHFB mit dem Verhalten der Stahlbewehrung ergeben. Im Bereich vor Erreichen der Bauteilfestigkeit kann diese Überlagerung direkt erfolgen, im entfestigenden Bereich der Rissöffnung sind für die Superposition noch weitere, die differenzierte Rissbildung berücksichtigende, Betrachtungen anzustellen.



Druck

Es werden **Biegedruckversuche** an Bauteilen aus UHFB durchgeführt. Um eine baupraktisch relevante Analyse des Tragverhaltens zu erhalten, werden die Elemente mit einer kombinierten Druck – Biegebelastung beaufschlagt.

Es werden die Festigkeit, die Verformungseigenschaften und die Versagensarten untersucht. Hierbei werden die Momenten - Krümmungsbeziehungen für verschiedene konstante Normalkraftniveaus und verschiedene Bewehrungsgrade ermittelt.

In Tragwerken kommt es quasi niemals zur reinen axialen Druckbelastung eines Druckelementes. Durch Imperfektionen, zeitabhängige Verformungen, planmäßige geometrische Exzentrizitäten und Lastausmittungen wirkt auf die Druckstrebe jeweils eine Kombination von Druck- und Biegebelastung.

Neben Versuchen an nur faserbewehrten Proben werden auch zusätzlich Stabstahl bewehrte bzw. vorgespannte Proben untersucht.

Für jede Serie werden jeweils 3 Proben hergestellt, welche auf jeweils drei unterschiedlichen Belastungsniveaus getestet werden.

Bei konstanter Normalkraft wird mittels des Pressenpaars eine beidseitig symmetrische Rotation auf die Probe aufgebracht (Bild 53).

Tabelle 13 zeigt einen Überblick der Versuchsparameter der Versuchskörper geordnet nach den verschiedenen axialen Belastungsniveaus und nach den Bewehrungstypen. In selbiger Reihenfolge ist auch die anschließende Grundausswertung sortiert.

Belastung [MN]	Bewehrung	Versuchskörper
1.5	unbewehrt	G22
1.5	4 Ø20	G23
1.5	4 Ø15.7	G29
2.5	unbewehrt	G21
2.5	4 Ø20	G24
2.5	4 Ø15.7	G27
3.5	unbewehrt	G26
3.5	4 Ø20	G25
3.5	4 Ø15.7	G28

Tabelle 1: Übersicht der Versuchsparameter (Axialbelastung und Bewehrung) der einzelnen Versuchskörper

Bei den Versuchen hat sich bezüglich des **Bruchverhaltens** gezeigt, dass es bei Aufbringen der Zwangsverdrehung bei allen Proben zunächst zu schichtweisen linsenförmigen Abplatzungen auf der Druckseite kommt. Das *Versagen* des Druckelements erfolgt letztendlich entweder als ein Druckversagen des verbleibenden Nettoquerschnittes mit Bildung eines diagonalen Schubrisses (Proben mit hoher Normalkraft oder keiner zusätzlichen Bewehrung) oder es bildet sich eine plastische Zone aus, wobei sich die weitere Verdrehung der Probe auf dieses plastische Gelenk lokalisiert (Proben mit niedriger Normalkraft und Bewehrung).

Je höher die axiale Last desto *spröder* das Verhalten. Bei niedriger Normalkraft kommt es zu einem *duktilen* Versagen. Die Rissbildung entwickelt sich langsam vorschreitend mit der aufgezwungenen Verdrehung. Bei hoher Normalkraft kommt es zu einem schlagartigen bis explosionsartigen Versagen. Mit einer passiven Bewehrung ist das Verhalten auch bei höherer Last noch duktil.

Dieses Verhalten spiegelt sich auch im **Momenten – Krümmungsdiagramm** wieder. Das schnelle Abfallen des Momentes ist charakteristisch für ein schlagartiges sprödes Versagen des Querschnittes. Ein langsames Abfallen mit einer Stabilisierung oder erneuten Verfestigung zeichnet ein duktilen Verhalten aus. Ebenso weist ein abgerundeter Verlauf im Bereich des maximalen Momentes auf ein duktilen Verhalten hin.

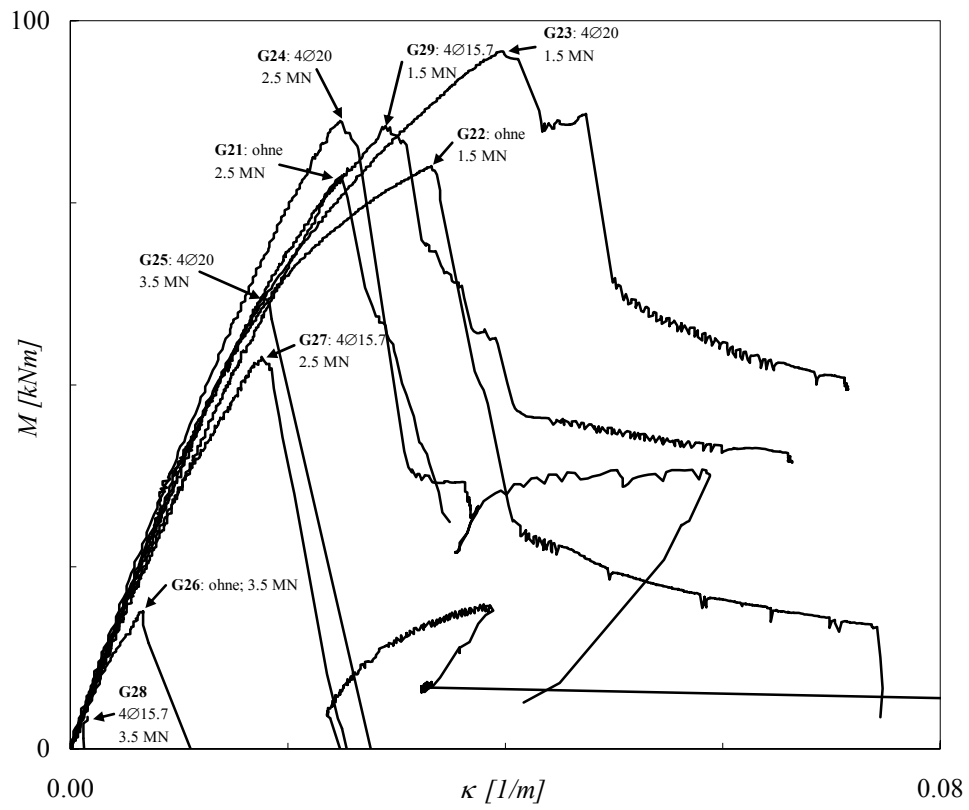


Bild 1: Momenten – Krümmungsverlauf aller Probekörper; dargestellt ist jeweils das Moment in der Mitte der Probe $M_{\text{Mitte,tot}}$ gegenüber der Krümmung κ ermittelt aus der Randverdrehung θ

2 ZIELSETZUNG UND KONZEPT

Zielsetzung der Versuchsserie ist es das Tragverhalten von Bauteilen aus ultrahochfestem Faserbeton zu untersuchen. Basierend auf den hier gewonnen Erkenntnissen, wird im Rahmen der Forschungsarbeit „unterspannte Träger aus UHFB“ ein Modell zur Beschreibung des Materialverhaltens von UHFB entwickelt.

2.1 VERSUCHSERIEN

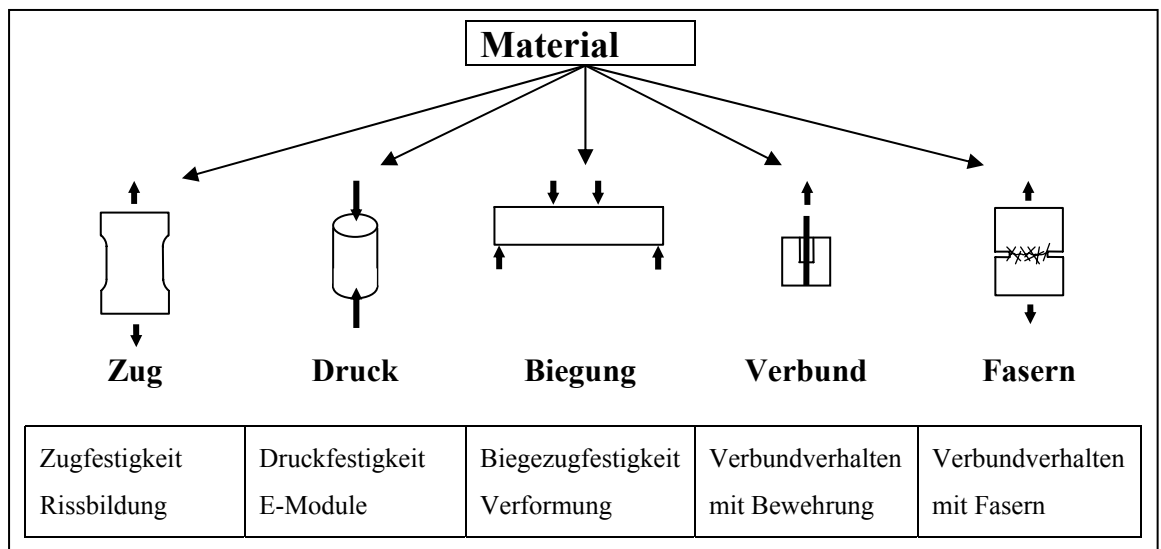
Die Versuche sind in mehrere Versuchsblöcke zusammengefasst. Der hier vorliegende Bericht befasst sich mit dem zweiten Block.

In den einzelnen Versuchsblöcken werden folgende Gesichtspunkte behandelt:

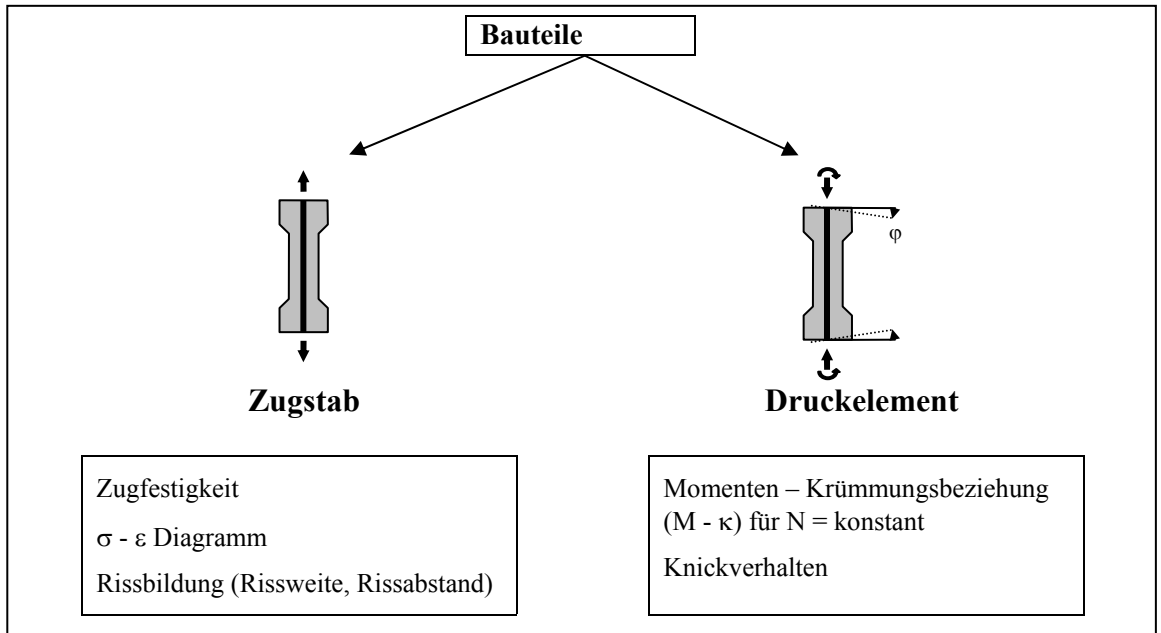
- In einem ersten Versuchsblock wird das Materialverhalten von UHFB untersucht und ergänzende Werkstoffversuche durchgeführt. Ziel ist es, das Materialverhalten zu verstehen, um es folgend modellieren zu können.
- Der zweite Versuchsblock beschäftigt sich mit Bauteilen aus UHFB. Hier werden Druck- und Zugelemente untersucht, welche unbewehrt, mit Stabstahl bewehrt oder vorgespannt ausgeführt sind.
- Weitere Versuche zum Tragverhalten und der konstruktiven Ausbildung von Details von unterspannten Tragwerken sind in Planung.

Folgend sind die einzelnen Versuchsblöcke schematisch dargestellt:

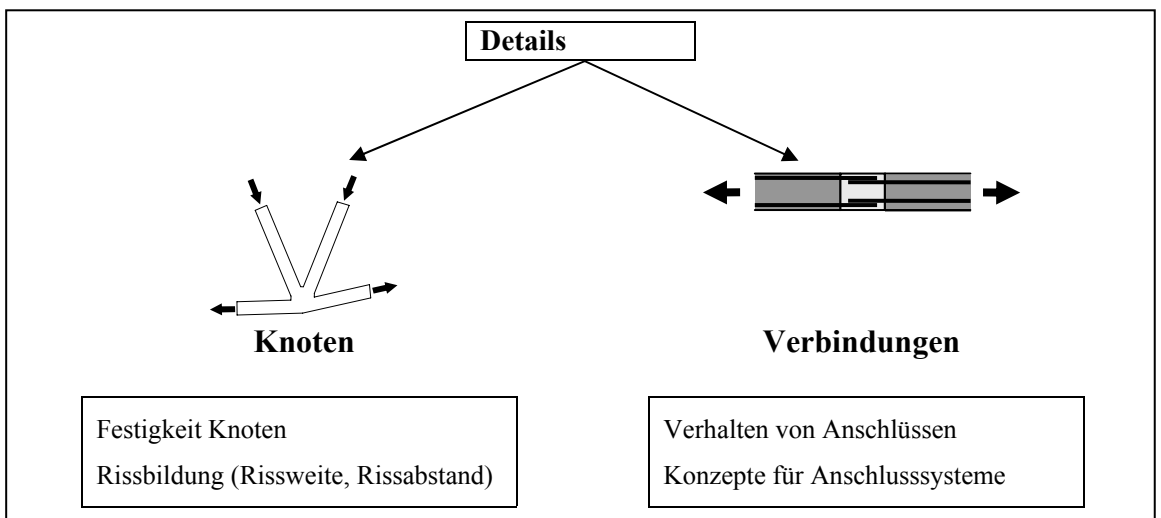
VERSUCHSBLOCK: MATERIAL => VERSUCHSBERICHT TEIL 1



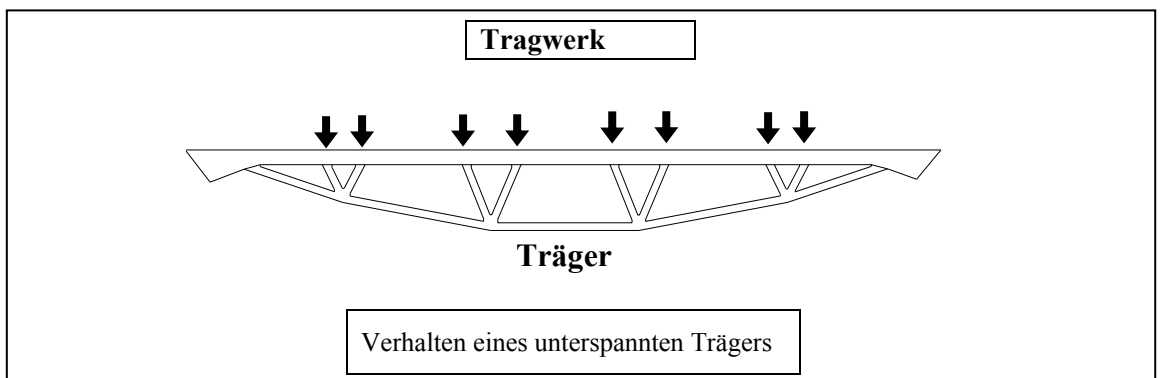
VERSUCHSBLOCK: BAUTEILE => VERSUCHSBERICHT TEIL 2



VERSUCHSBLOCK: DETAILS => (BISHER NUR PROJEKTIDEE !)



VERSUCHSBLOCK: TRAGWERK => (BISHER NUR PROJEKTIDEE !)

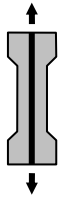
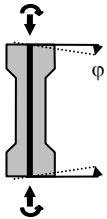


2.2 VERSUCHSSERIE BAUTEILE

Basierend auf das im ersten Teil des Versuchsberichts untersuchte Materialverhalten wird im zweiten Teil das Tragverhalten von Bauteilen aus UHFB untersucht. Neben der grösseren Dimension der Prüfkörper und dem hieraus folgenden Einfluss auf das Tragverhalten, bedeutet dies auch die Berücksichtigung des Einsatzes von Bewehrungselementen.

Mit den Versuchen wird das Tragverhalten vornehmlich axialer belasteter Bauteile untersucht. Es werden zentrisch belastete Zugelemente getestet, wobei eine unbewehrte Probe, drei Proben mit unterschiedlichen Bewehrungsgraden und eine vorgespannte Probe geprüft werden. Bei druckbelasteten Bauteilen spielt die Exzentrizität der Belastung eine wesentliche Rolle, weshalb Versuchskörper mit einer kombinierten Druck – Biegebelastet getestet werden. Die je drei Elemente einer Serie sind unbewehrt, bewehrt bzw. vorgespannt und werden jeweils auf drei verschiedene Lastniveaus vorbelastet.

Ziel der Versuchsserie ist es das Tragverhalten von axial belasteten Bauteilen zu verstehen, um im Rahmen der Dissertation ein vereinfachtes Ingenieur Modell zur Beschreibung des Tragverhaltens zu entwickeln. Dieses stützt sich auf das Materialmodell und Berücksicht zusätzlich die Bewehrung und die Effekte schlanker Bauteile.

	Schema	Typ	Parameter	Anzahl	Zielsetzung	
Versuchsblock Bauteile	Zugversuche		bewehrte bzw. vorgespannte Zugelement 160 x 160 x 1500mm knochenförmig	Bewehrung: 0 4Ø12 4Ø16 4Ø20 4 T15	5	Zugfestigkeit $\sigma - \epsilon$ Diagramm Rissbildung (Rissweite, Rissabstand)
	Druckversuche		bewehrte bzw. vorgespannte Druckelement 160 x 160 x 1500mm knochenförmig	Bewehrung: 0 4Ø20 4 T15 Last N: 0.3, 0.5 und 0.7 F_c	3 x 3 = 9	Momenten – Krümmungsbeziehung (M- κ) für N = konstant Knickverhalten

3 VERSUCHSKÖRPER

3.1 BETONZUSAMMENSETZUNG

Die Versuchsserie wird mit dem ultrahochfesten Beton BSI®/CERACEM (Spezifizierung BFM – Millau) durchgeführt. Der UHFB wird als fertig konfektionierter Premix von den Firmen SIKA und EIFFAGE geliefert.

Der ultrahochfeste Beton BSI®/CERACEM (Spezifizierung BFM – Millau) ist wie folgt zusammengesetzt (Tabelle 2):

Bestandteile	Menge	Einheit
Premix: Zement CEM 1, Mikrosilica, gebrochener Zuschlag aus gebranntem Bauxit 0 - 7 mm	2355	kg/m ³
Stahlfasern: $l_f = 20$ mm, $\varnothing = 0.3$ mm, $\rho = 2.5$ vol. %, $f_s > 1250$ MPa	195	kg/m ³
Fliessmittel: Polycarboxylat, Marke Sikacret	44.6	kg/m ³
Wasser	195	kg/m ³

Tabelle 2: Zusammensetzung des ultrahochfesten Beton BSI®/CERACEM

Bei den eingesetzten Stahlfasern handelt es sich um glatte, aus einem hochfesten Stahldraht geschnittene Fasern ohne Endhacken. Der gebrochene Zuschlag aus Bauxit besitzt eine hohe Festigkeit und ein grosses E – Modul. Das Fliessmittel ist ein eigens für den ultrahochfesten Beton optimiertes Produkt der Firma SIKA.

Mit seinen grossen Zuschlägen von bis zu 7 mm und den dicken Stahlfasern weist der CERACEM im Vergleich mit anderen UHFB eine sehr grosskörnige und grobe Struktur auf.

Die 3 Komponenten des Premixes werden unter Zugabe von Wasser entsprechend der Beschreibung im Kapitel 3.3 Probenherstellung zusammengemischt. Der Faseranteil beträgt 2.5 Volumenprozent (Vol.-%). Der Wasser / Zementwert liegt bei 0.22 und der Wasser / Bindemittelwert bei 0.19.

3.2 GEOMETRIE UND BEWEHRUNG

Für die Versuche an Bauteilen aus UHFB werden für die Zug- und Druckversuche Versuchskörper mit jeweils den gleichen Bauteilabmessungen benutzt (Bild 2). Die Versuchskörper sind im Lasteinleitungsbereich erweitert, um eine gute Krafteinleitung an den beiden Enden sicherzustellen. Der Messbereich in der Mitte der Probe besitzt einen konstanten Querschnitt. Die Proben haben eine Gesamtlänge von 1500 mm mit einem Messbereich von 1000 mm. Der Querschnitt beträgt 160 x 160 mm mit einer Erweiterung auf 160 x 250 mm im Lasteinleitungsbereich. Die Querschnittsfläche im Bereich der Messstrecke beträgt $A = 25600$ mm². Der Querschnitt ist so ausgelegt, dass bis zu 4 Bewehrungselemente eingefügt werden können. Die Krafteinleitungsbereiche sind mit jeweils einem Bewehrungsbügel $\varnothing 20$ verstärkt. Die Proben werden auf der breiten Seite des Verstärkungsbereiches liegend betoniert.

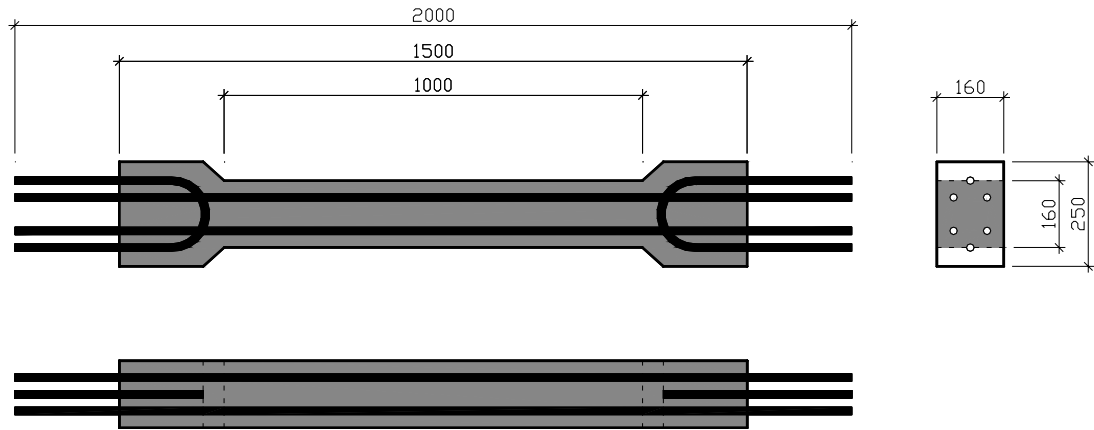


Bild 2: Probekörper der Druck- und Zugversuche an Bauteilen aus UHFB; Abmessungen in mm

3.3 PROBENHERSTELLUNG

Um gleich bleibende Materialeigenschaften zu erhalten, muss eine strickte Mischprozedur befolgt werden. Die einzelnen Bestandteile (Premix, Stahlfaser, Anmachwasser, Fließmittel) werden vor dem Mischen auf Raumtemperatur gebracht. Sie werden entsprechend des oben aufgeführten Betonrezeptes abgewogen (Tabelle 2).

Für die verschiedenen Herstellungsserien des Premixes ist bis zu ± 10 l Wasser pro 1 m^3 Beton hinzu zu dosieren, um das angestrebte Ausbreitmass genau einzustellen.

Der Mischprozess erfolgt gemäss des folgendem Schemas in dem leistungsfähigen Gleichlauf - Zwangsmischer mit vertikaler Achse Typ Zyklus ZZ 75. Die Bestandteile werden in der dargestellten Reihenfolge hinzugefügt und jeweils mit der angegebenen Dauer gemischt.

Bestandteil	Mischdauer
Premix	1 min
Wasser	3 min
Fließmittel	5 min
Stahlfasern	3 min

Tabelle 3: Mischprozess des Premixes

Der UHFB ist selbstverdichtend und wird entsprechend ohne Vibrieren oder anderweitiges Verdichten in die Schalung eingebracht. Zur Nachbehandlung werden die Probekörper direkt nach dem Betonieren mit einer Plastikfolie abgedeckt um das Austrocknen zu verhindern. Nach 3 Tagen werden sie ausgeschalt und anschliessend bis zur Versuchsdurchführung in einem Wasserbecken bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ gelagert. Die Versuche werden nach 28 Tagen durchgeführt.

Als Schalung kommt eine mehrfach verwendbare Holzschalung zum Einsatz (Bild 3). Um ein einfaches Ausschalen sicherzustellen wird ein Schalöl als Trennmittel eingesetzt. Die Bewehrungselemente werden durch in der Schalhaut vorgesehene Löcher eingefügt und in ihrer Position gehalten. Die Löcher in der Schalhaut werden mit einem Kitt abgedichtet um ein Ausfliessen des sehr flüssigen UHFB zu verhindern.

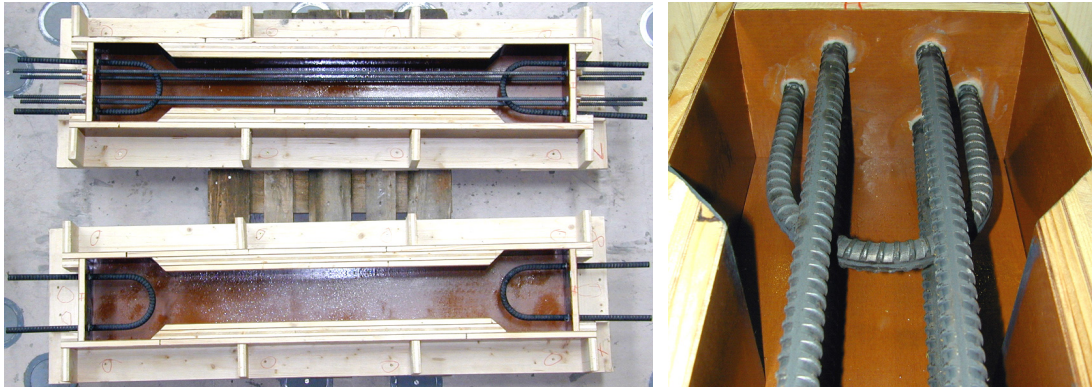


Bild 3: Schalung für die Probekörper der Druck- und Zugversuche

Zur Kontrolle gleich bleibender Eigenschaften der einzelnen Mischerchargen, kommt ein Qualitätssicherungssystem zum Einsatz. Für jede einzelne Charge werden die Parameter der Mischung, die Messwerte der Betonprüfung und die hergestellten Proben in einem Formular verzeichnet. So ist eine Nachvollziehbarkeit jeder einzelnen hergestellten Mischung und jedes Prüfkörpers möglich.

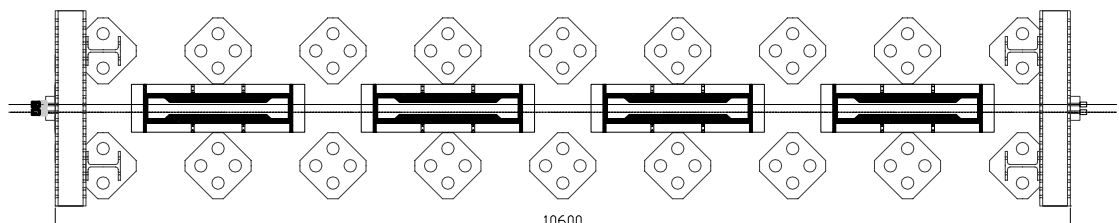
Das detaillierte Vorgehen bei der Frisch- und Festbetonprüfung ist im Teil 1 des Versuchsberichts dargestellt. Folgend werden in Tabelle 4 nur mehr die für die Bauteilversuche relevanten Prüfergebnisse wiedergegeben.

Charge	Versuch	Bewehrung	Frischbetonprüf.		Festbetonprüfung										
			Temp	Ø DIN	3 - Punkt Biegung			\bar{x}	s	Stempeldruckversuch			\bar{x}	s	
			[°C]	[cm]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]		
G17	17	Zug	4 Ø 16	30.8	59	44.4	36.1	43.3	41.3	4.51	243	252	247	247	4.4
G18	18	Zug	4 Ø 20	30.9	68	35.4	42.9	-	39.2	5.33	222	244	214	227	15.3
G19	19	Zug	4 Ø 12	30	64	39.3	32.8	38.3	36.8	3.49	235	236	234	235	1.0
G20	20	Zug	-	31	65	34.3	32.3	42.2	36.3	5.24	226	244	254	242	14.3
G21	21	Druck	-	29	66	30.7	38.0	43.2	37.3	6.26	256	251	233	247	11.9
G22	22	Druck	-	33	70	37.1	41.7	52.8	43.9	8.04	267	221	253	247	23.3
G23	23	Druck	4 Ø 20	34	68	38.2	46.0	40.9	41.7	3.97	218	262	209	230	28.4
G24	24	Druck	4 Ø 20	32	65	35.6	44.7	42.8	41.0	4.82	264	262	265	264	1.7
G25	25	Druck	4 Ø 20	30	67	41.6	43.5	46.7	43.9	2.59	261	269	239	256	15.2
G26	26	Druck	-	33.7	67	46.1	51.6	35.4	44.4	8.27	258	258	254	257	2.3
G27	27	Druck	4 Ø 15.7	35.3	56	38.9	52.2	36.6	42.6	8.41	257	261	241	253	10.6
G28	28	Druck	4 Ø 15.7	35.8	56	51.0	39.6	49.1	46.5	6.11	246	258	256	254	6.4
G29	29	Druck	4 Ø 15.7	33.5	70	36.0	38.1	47.8	40.6	6.32	254	252	252	252	1.3
G30	30	Zug	4 Ø 15.7	33	65	47.9	57.0	57.5	54.1	5.40	266	270	248	261	11.7

Tabelle 4: Ergebnisse der Betonprüfung für die Bauteilversuche

3.4 VORGESPANNTE VERSUCHSKÖRPER

Die vorgespannten Proben werden im Spannbett in Vorspannung mit sofortigem Verbund hergestellt. Hierzu wird auf dem Aufspannboden ein Spannbett montiert, in dem vier Proben gleichzeitig vorgespannt werden können (Bild 4). Es ergibt sich eine Spannkabellänge von 10.60 m.



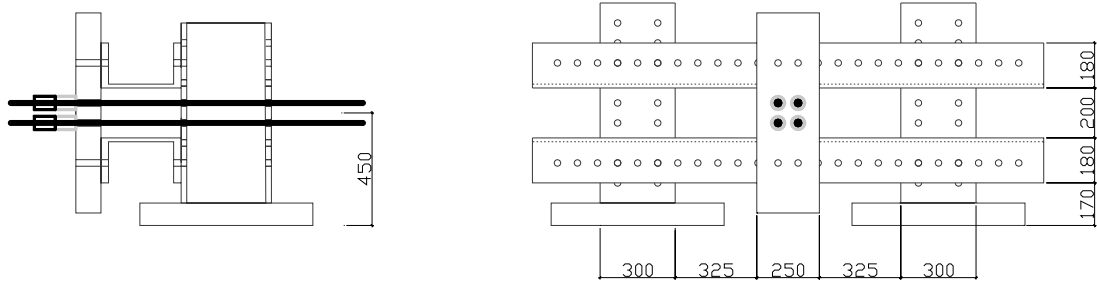


Bild 4a-c: Schema des Spannbett zur Herstellung der Versuchskörper; Abmessungen in mm

Die Versuchskörper werden mit vier Litzen ($f_{tk} = 1770$ MPa) mit einem Durchmesser von 15.7 mm bewehrt. Es ergeben sich hieraus folgende Parameter für den Querschnitt (Tabelle 5).

A_c	\varnothing gewählt	A_p	$A_p \cdot f_{tk}$	$P_0 = 0.7 \cdot f_{tk} \cdot A_c$	$\rho_c = \frac{A_p}{A_c - A_p}$
[mm ²]	[mm]	[mm ²]	[kN]	[kN]	[%]
25600	4 \varnothing 15.7	600	1062	732	2.4

Tabelle 5: Querschnittsparameter der vorgespannten Versuchskörper

Die Litzen werden in mehreren Spann- und Verkeilzyklen bis $0.75 f_{tk}$ überspannt. Der Spannvorgang wird mit je einer Kraftmessdose pro Litze überwacht. Nach Abzug des Keilschlupfs von 6mm ergibt sich bei 10600 mm Litzenlänge rechnerisch eine Vorspannung der Litzen im Spannrahmen von:

$$P_o = P_i - \Delta P = 0.75 \cdot f_{tk} \cdot A_p - E_p \cdot \frac{\Delta l_K}{L_p} \cdot A_p = \quad (1)$$

$$(0.75 \cdot 1770 \text{ MPa} - 195 \text{ GPa} \cdot \frac{6 \text{ mm}}{10600 \text{ mm}}) \cdot 4 \cdot 150 \text{ mm}^2 = 732 \text{ kN}$$

Dies entspricht der gewünschten Vorspannung von $0.7 f_{tk}$. Die Kontrollmessung mit den Kraftmessdosen zeigen nach Abschluss des Spannprozesses eine Spannkraft von 733.4 kN.

Die Versuchskörper werden nun gemäss der oben dargestellten Methodik (3.3 Probenherstellung) betoniert und nachbehandelt. Nach 7 Tagen werden die Litzen im Zwischenraum zwischen den Versuchskörpern durchtrennt und somit die Kraft auf die Proben übertragen. Durch die Belastung verkürzt sich der Beton und die Kraft in den Kabeln reduziert sich. Die Verkürzung der Probe lässt sich aus dem Kräftegleichgewicht und der Annahme des Ebenbleibens der Querschnitte ermitteln (gleiche Dehnung in Spannkabel und Beton). Der Randschlupf wird hierbei nicht berücksichtigt.

$$P_{tl} = A_p \cdot E_p \cdot \varepsilon_p = P_o - \varepsilon_c \cdot A_p \cdot E_p$$

$$F_c = A_c \cdot E_c \cdot \varepsilon_c$$

$$P_{tl} = F_c \Rightarrow \varepsilon_c = \frac{P_o}{A_c \cdot E_c + A_p \cdot E_p} = \quad (2)$$

$$= \frac{732 \text{ kN}}{25000 \text{ mm}^2 \cdot 60 \text{ GPa} + 600 \text{ mm}^2 \cdot 195 \text{ GPa}} = 0.45 \text{ ‰}$$

Mit: E_c aus Versuchsbericht Teil 1

Der Probekörper verkürzt sich somit um

$$\Delta l = \varepsilon_c \cdot l = 0.45\% \cdot 1500 \text{ mm} = 0.675 \text{ mm} \quad (3)$$

Die Verbleibende Vorspannkraft beträgt:

$$\begin{aligned} P_{tl} &= P_o - \varepsilon_c \cdot A_p \cdot E_p = \\ &= 732 \text{ kN} - 0.45\% \cdot 600 \text{ mm}^2 \cdot 195 \text{ GPa} = 679 \text{ KN} \end{aligned} \quad (4)$$

Es ergibt sich für die Versuchskörper folgende Relation zwischen Vorspannung und Festigkeit des Querschnittes. Dieses Verhältnis kann als „Vorspanngrad“ bezüglich der Normalkraft bezeichnet werden:

$$\begin{aligned} N_R &= f_c \cdot A_c = 191 \text{ MPa} \cdot 25000 \text{ mm}^2 = 4775 \text{ KN} \\ \text{Vorspanngrad} &= \frac{679 \text{ KN}}{4775 \text{ KN}} = 1.42\% \end{aligned} \quad (5)$$

4 ZUGVERSUCH

Es werden Zugversuche an Bauteilen aus UHFB durchgeführt. Hierbei wird untersucht, wie sich Zuelemente aus UHFB innerhalb eines Tragwerkes verhalten. Es werden die Festigkeit, die Verformungseigenschaften und die Rissbildung untersucht.

Basierend auf den hierbei gewonnenen Erkenntnissen wird im Rahmen der Dissertation ein Model des Bauteilverhaltens von unbewehrten, bewehrten und vorgespannten Zuelementen entwickelt.

4.1 VERSUCHSPARAMETER

Als Parameter der Versuche wird der Bewehrungsgrad der Versuchskörper variiert. Es wird eine unbewehrte Probe ($F_s = 0$), eine unterbewehrt ($F_s \approx F_c$), eine ausreichend bewehrte ($F_s > F_c$) und eine hoch bewehrte Probe ($F_s \gg F_c$) betrachtet. Des Weiteren wird eine vorgespannte Probe untersucht.

Die unbewehrte Probe kann aufgrund der Fasern folgende Zugkraft aufnehmen:

$$F_c = f_{ct} \cdot A_c = 9.7 \text{ MPa} \cdot 25000 \text{ mm}^2 = 243 \text{ kN} \quad (6)$$

Mit f_{ct} aus Versuchsbericht Teil 1

Das Kriterium $F_s = F_c$ ist erfüllt für einen Stahlquerschnitt von:

$$A_{s,Grenz} = \frac{F_c}{f_s} = \frac{243 \text{ kN}}{556 \text{ MPa}} = 437 \text{ mm}^2 \quad (7)$$

Mit f_s aus Versuchsbericht Teil 1

Für die benötigte Bewehrung A_s ergibt sich entsprechend der oben dargestellten Kriterien $A_{s,Grenz}$ folgende Menge:

	Kriterium	$A_{s,Grenz}$	gewählt	A_s	$F_s = A_s \cdot f_s$	$\rho = \frac{A_s}{A_c - A_s}$	ρ_{bez}	$F_s + F_c$
			[mm ²]	[mm ²]	[kN]	[%]	[%]	[kN]
G20	$F_s = 0$	-	-	-	-	-	-	243
G19	$F_s \approx F_c$	$\approx 437 \text{ mm}^2$	4Ø12	452	251	1.0%	0.18%	494
G17	$F_s > F_c$	$> 437 \text{ mm}^2$	4Ø16	804	447	2.5%	0.45%	690
G18	$F_s \gg F_c$	$\gg 437 \text{ mm}^2$	4Ø20	1256	698	4.1%	0.74%	941
G30	F_p		4Ø15.7	600	957	-	-	1200

Tabelle 6: Bewehrung für die Zugversuchskörper

Anmerkung: Der bezogene Bewehrungsgrad (8) wird definiert, um eine Relation zu bekannten Bewehrungsgraden herstellen zu können. Er ergibt sich durch Multiplikation der Nettobetonfläche mit dem Quotienten der Druckfestigkeiten von UHFB und der Druckfestigkeit eines typischen Normalbetons (C 35/45). Hierbei wird ein Wert von $f_{ck}(UHFB) = 191 \text{ N/mm}^2$ und $f_c(B 35/45) = 35 \text{ N/mm}^2$ verwendet.

$$\rho_{bez} = \frac{A_S}{(A_C - A_S) \cdot \frac{f_{ck}(UHFB)}{f_{ck}(B\ 35/45)}} \quad (8)$$

4.2 VERSUCHSAUFBAU

Der Versuch wird als beidseitig eingespannter Zugversuch durchgeführt (Bild 5). Die Einspannung wird mittels der verstärkten Krafteinleitungszone realisiert. Die herausstehenden Bewehrungsstäbe der durchgehenden Bewehrung und des Verstärkungsbügels sind als schraubbare Bewehrung (System GEWI) ausgeführt. Sie werden in einer massiven Stahlplatte mit Hilfe von Muttern verankert (Bild 6). Durch diese Reguliermöglichkeit ist eine weitgehend zwangsfreie Fixierung der Versuchskörper in der Prüfmaschine möglich. Die Kabel der vorgespannten Probe werden entsprechend mit Klemmkeilen in Verankerungsbüchsen befestigt. Die Zugkraft der Prüfmaschine wird mit Hilfe von Gewindestäben und Stahlprofilen als Abstandhaltern in die massive Metallplatte eingeleitet. Als Prüfmaschine wird eine 10 MN Trebel der Firma Schenk eingesetzt.

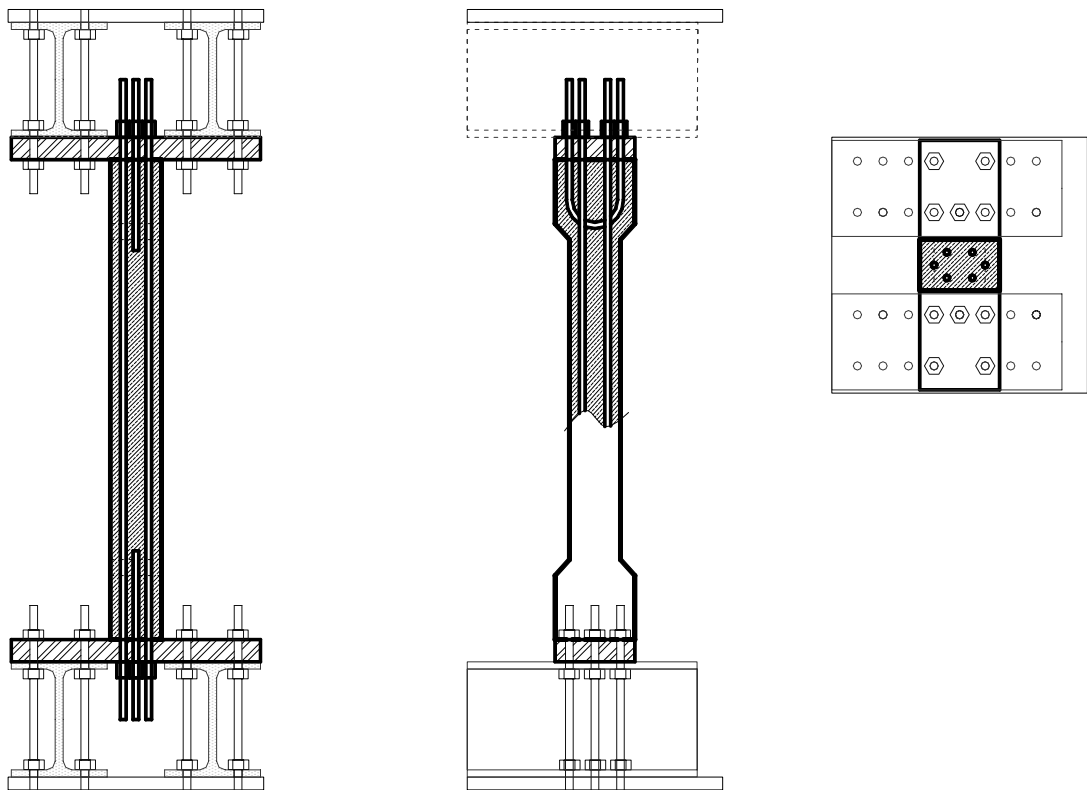


Bild 5: Schema des Versuchsaufbaus für die Zugversuche

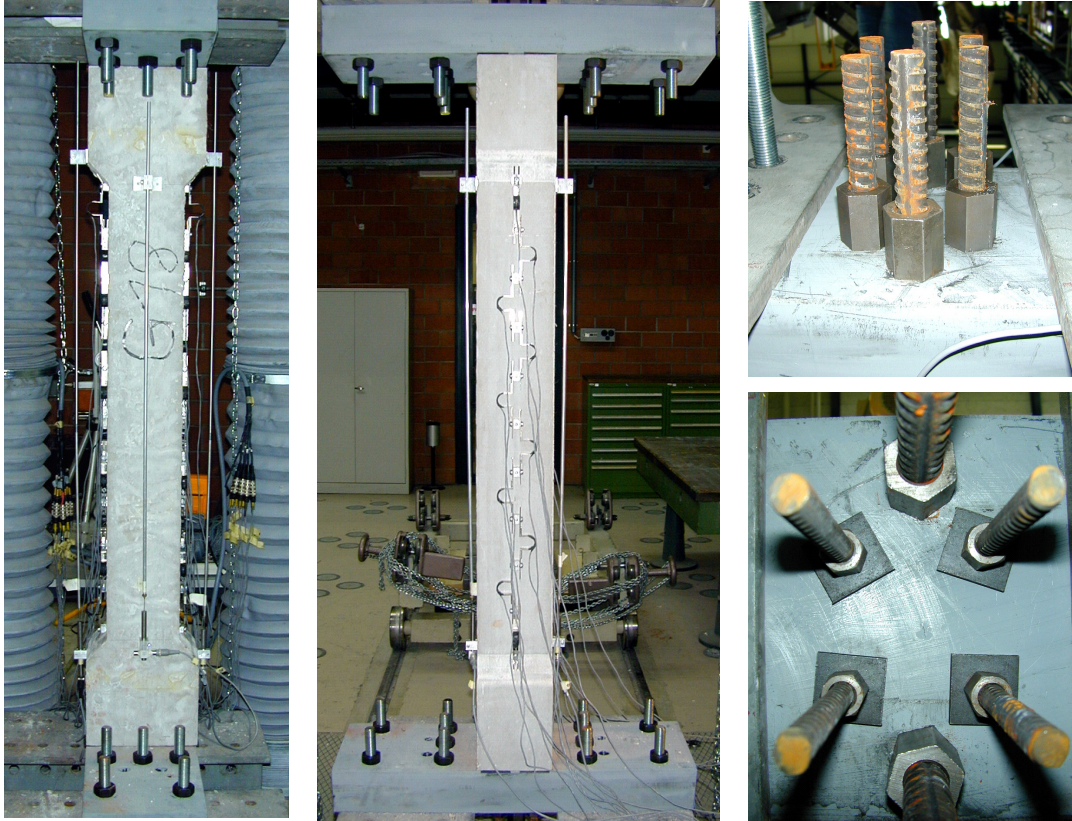


Bild 6: Foto des Versuchsaufbaus und der Verankerung der Versuchskörper

Für die Bemessung der Verstärkungsbügel im verstärkten Krafteinleitungsbereich wurden folgende Überlegungen angestellt:

Die Bügel müsse die Zugfestigkeit des Betons in die Verankerungsplatte übertragen können. Die durchgehende Bewehrung wird direkt verankert.

$$F_{ct} = A_c f_{ct} = 25000 \text{ mm}^2 \cdot 9.7 \text{ MPa} = 243 \text{ KN}$$

$$A_s = \frac{F_{ct}}{f_s} = \frac{243 \text{ kN}}{556 \text{ MPa}} = 437 \text{ mm}^2 \quad (9)$$

gewählt: 1 Bügel $\varnothing 20$; $A_s = 2 \cdot 314 \text{ mm}^2 = 628 \text{ mm}^2$

Für die Bemessung der Gewindestäbe werden folgende Kriterien berücksichtigt:

Die Gewindestäbe müssen die Zugfestigkeit des Materials und im massgebenden Fall, der Spannkabel aufnehmen:

$$N_R = \frac{(F_{ct} + F_p)}{n} = \frac{(1062 \text{ KN} + 243 \text{ KN})}{10} = 130 \text{ KN} \quad (10)$$

Gewählt: 10 Gewindestangen Festigkeitsklasse St 8.8 $\Rightarrow T_R = 169 \text{ KN}$

4.3 MESSEINRICHTUNG

Das Verformungsverhalten des bewehrten Zuggliedes wird mit einem Messsystem untersucht, welches sowohl die globale Verformung als auch lokale Effekte berücksichtigt (Bild 7 und Bild 8). Die mittlere Verformung der gesamten Messzonen wird mit 2 induktiven Wegaufnehmern (Ost und West) gemessen. Dies erfolgt auf 2 gegenüberliegenden Seiten, um eventuelle Rotationen feststellen zu können. Eine fein aufgedgliederte Messung in Abschnitten von 100 mm erfolgt mit Hilfe von 10 Omega - Dehnungsmessern. Hiermit kann die Rissbildung untersucht werden und es lassen sich lokale Effekte beim Versagen der Probe aufzeichnen.

Zusätzlich sind bei den Proben G18 und G30 zwei weitere Wegaufnehmer (Nord und Süd) montiert, welche die Messzone inklusive des Übergangsbereiches mit einer Länge von 1130 mm überspannen. Hiermit können auch Rissbildungen im Knick des Übergangsbereiches beobachtet werden.

Die Belastung wird mittels eines maschineninternen Kraftmessers aufgezeichnet.

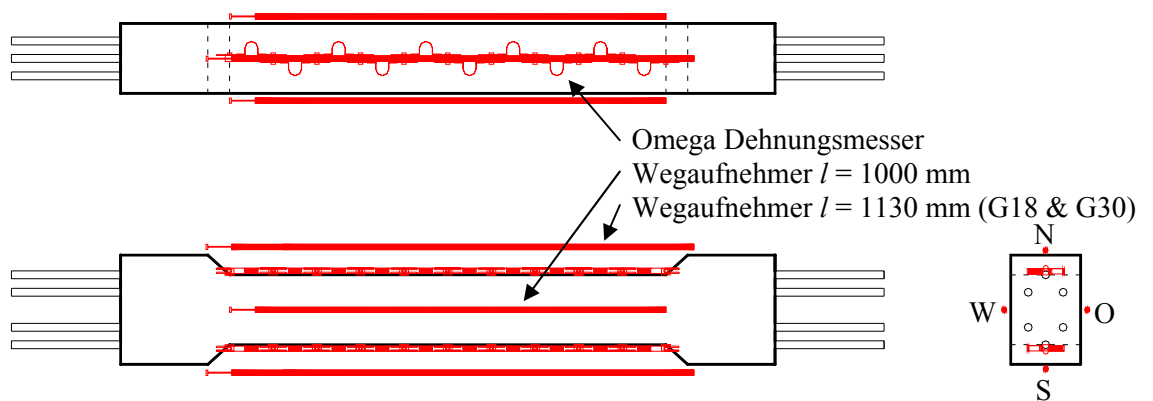


Bild 7: Messeinrichtung der Versuchskörper für die Bauteil Zugversuche

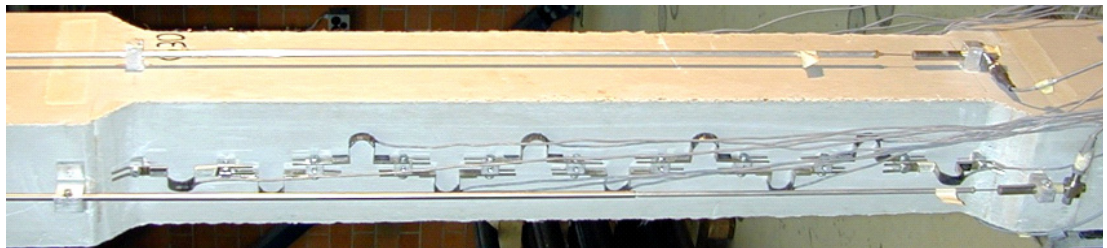


Bild 8: Foto der Messeinrichtung der Versuchskörper für die Bauteil Zugversuche

4.4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die Versuchskörper werden in die Prüfmaschine eingebaut, wobei die herausstehenden Bewehrungsstäbe vorsichtig in die Verankerungsplatte eingefädelt werden. Die komplette Messeinrichtung wird montiert und ein Nullabgleich durchgeführt. Mit Hilfe von Muttern bzw. Klemmbüchsen werden die schraubbaren Bewehrungsstäbe bzw. Litzen mit der Verankerungsplatte auf Zug kraftschlüssig verbunden.

Die Belastung erfolgt weggesteuert mit der Verformung des Kolbens der Prüfmaschine als Steuergröße. Die Proben werden mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 20 mm / h belastet. Die Verformung wird über die

Festigkeit der Probe hinaus bis zum Zerreißen der Bewehrung fortgeführt. Während der Belastung wird die Entwicklung der Risse (Rissweite, Rissabstand) beobachtet.

4.5 VERSUCHSERGEBNISSE

Die Auswertung der Versuche erfolgt zunächst für jeden Versuch getrennt, anschliessend werden die Resultate der verschiedenen Versuche verglichen und allgemeine Erkenntnisse dargestellt.

Die Messergebnisse werden in tabellarische Form gespeichert. Sie werden von Fehlmessungen bereinigt und zur Darstellung in Grafiken aufbereitet. Hierbei wird einerseits das globale Verhalten mit einem Last – Verformungsdiagramm der Messzone analysiert wie auch andererseits das lokale Verhalten der Rissbildung und der Rotation untersucht.

Da der Bruch teilweise ausserhalb der ursprünglich vorgesehenen Messzone auftrat und somit keine direkten Messungen des Nachbruchverhaltens vorliegen, muss die Verformung der Messzone nach der Rissbildung in diesen Fällen aus anderen Messgrössen zurückgerechnet werden. Hierzu sind die verschiedenen Messwerte zunächst auf das gemeinsame Referenzniveau, hier der Messlänge von 1000mm, zu reduzieren.

Die Messungen der Wegaufnehmer, welche die Messzone inklusive der Übergangzone umfassen, werden unter der Annahme eines ungerissenen Verhaltens in der Übergangzone auf die Länge der Messzone reduziert. Hierdurch wird die Rissbildung welche im Übergangsbereich auftritt der Messzone zugeteilt und geht somit für die Messung nicht verloren. Der anzusetzende Subtrahend ergibt sich aus der Arbeitsgleichung (11):

$$\begin{aligned}\Delta l &= \int \frac{N}{EA} ds = \sum_{i=1}^n \Delta l_i \\ \Delta l &= \Delta l_0 + \Delta l_1 \\ \Delta l_0 &= \Delta l - \frac{N \cdot l_1}{E \frac{A_0 + A_1}{2}}\end{aligned}\tag{11}$$

Mit: Δl_0 : Verformung der Messzone

Δl_1 : Verformung der Übergangzone

Δl : gemessene Verformung

Die Bezeichnung der Längen und Querschnitte folgen aus Bild 9.

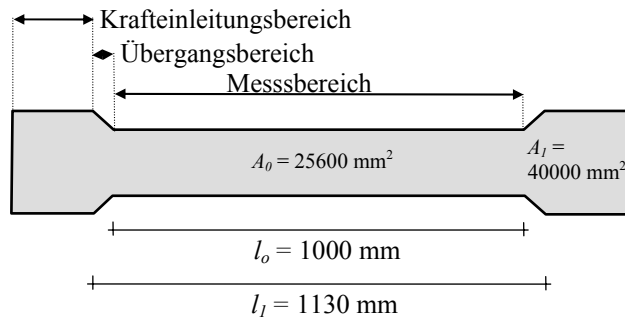


Bild 9: Bezeichnung und Grösse der Parameter

Mit ähnlicher Überlegung kann auch der Kolbenweg der Presse in die Verformung der Probe in der Messzone umgerechnet werden. Hierbei wird wiederum davon ausgegangen, dass die Verformungen der Presse, der Bewehrung und deren Verankerung im Vergleich zur plastischen Rissbildung weitgehend als linear elastisch angesehen werden kann. Da die Steifigkeit der Presse und der Verankerung der Probe nicht bekannt ist, wird eine lineare Funktion erstellt, welche im Moment der Rissbildung die Verformungen des Kolbenweges und der Messzone vergleicht. Hiermit kann die ausserhalb der Messzone liegende Verformung in Abhängigkeit der Last ermittelt werden und von dem gemessenen Kolbenweg abgezogen werden:

$$\begin{aligned}\Delta l &= \Delta l_0 + \Delta l_2 \\ \Delta l_2(F_{Riss}) &= \Delta l(F_{Riss}) - \Delta l_0(F_{Riss}) \\ \Delta l_0 &= \Delta l - \frac{N}{N(F_{Riss})} [\Delta l(F_{Riss}) - \Delta l_0(F_{Riss})]\end{aligned}\quad (12)$$

- Mit: Δl_0 : Verformung der Messzone
- $\Delta l_0(F_{Riss})$: Verformung der Messzone bei Rissbildung (Mittel der Wegmesser)
- Δl_2 : Verformung der Presse, Bewehrung und Übergangszone
- $\Delta l_2(F_{Riss})$: Verformung der Presse, Bewehrung und Übergangszone bei Rissbildung
- Δl : gemessene Verformung (Kolbenweg)
- $\Delta l(F_{Riss})$: gemessene Verformung bei Rissbildung (Kolbenweg)

Mit den auf die Messzone reduzierten Messwerten kann die Verformung der Messzone ermittelt werden. Tabelle 7 zeigt, welche Messwerte in Abhängigkeit der vorhandenen Messungen und der Bruchlokalisierung für die Erstellung der Verformungskurve benutzt wurden. Soweit möglich wurden hierbei einheitlich die Messungen der die Messzone überspannenden Wegmesser West und Ost genutzt. Für den Nachbruchbereich wurde die Verformung wenn nötig aus dem Kolbenweg der Presse ‚Pos‘ zurückgerechnet. Die Messungen der teilweise zusätzlich angebrachten Wegmesser Nord und Süd werden nicht für die Ermittlung der Probenverformung genutzt sondern nur zum Vergleich eingesetzt. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um die Verformung für alle Proben möglichst immer auf die gleiche Weise ermitteln, um eine bestmögliche Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Versuchskörpern sicherzustellen.

	gewählt [mm ²]	A _s [mm ²]	zusätzliche Wegmesser	Bruch	Messwerte Nachbruch	Verformung Δl ₀ aus:
G17	4Ø16	804	Nein	im Knick	-	(W+O)/2 => Δl ₂ aus Pos
G18	4Ø20	1256	Ja	im Knick	N, S	(W+O)/2 => Δl ₂ aus Pos
G19	4Ø12	452	Nein	Mitte	W, O	(W+O)/2
G20	-	-	Nein	im Knick	O	(W+O)/2 => Δl ₂ aus Pos
G30	4Ø15.7	600	Ja	im Knick	N, S, W, O	(W+O)/2

Tabelle 7: Parameter für die Durchführung der Bauteil Zugversuche

In der folgenden Zusammenstellung der Ergebnisse der einzelnen Versuche werden jeweils zwei Typen von Diagrammen dargestellt. Einerseits eine globale Betrachtung der Verformung der Messzone und andererseits eine lokal Betrachtung zu den Vorgängen bei der Rissbildung.

Das Last – Verformungsdiagramm befasst sich jeweils mit der globalen Verformung der Messzone. Es zeigt die gemessene Verformung der induktiven Wegaufnehmer (West, Ost) der Messzone, die aus dem Kolbenweg ermittelte Verformung (Pos) und wenn vorhanden, der auf die Messzone reduzierten induktiven Wegaufnehmer (Nord, Süd). Zur Kontrolle der Exzentrizität wird ergänzend die Rotation (13) aus den jeweils gegenüber liegenden induktiven Wegmessern dargestellt. Als Ergebnis wird die Verformung aus den in Tabelle 7 dargestellten Messwerte bezogen auf die Referenzlänge von 1000 mm ermittelt.

$$\theta = \frac{\Delta l_I - \Delta l_{II}}{d} \quad (13)$$

Die lokalen Effekte der Rissbildung werden mit den geometrisch fein aufgelösten Omega - Dehnungsmessern untersucht. Das Last – Dehnungsdiagramm zeigt jeweils die lokalen Dehnungen über jeweils eine Messlänge von 100 mm (grau). Hierbei sind die am Rand liegenden Omegas gestrichelt gekennzeichnet, da diese einerseits wegen der Rissbildung im Übergangsbereich aber auch wegen Ablösen der Fixierung teilweise grosse Abweichungen aufzeigen. Zum Vergleich ist die im Last Verformungsdiagramm (siehe oben) ermittelte Dehnung angegeben. Als Indikator für lokale Phänomene die sich durch die Rissbildung ergeben, wird eine ‚Streuung‘ als Standardabweichung der einzelnen Dehnungsmesser (ohne Rand Omegas) ermittelt. Diese werden zur besseren Darstellung mit einem Faktor 10 überhöht dargestellt.

4.5.1 VERSUCHSKÖRPER G17

Die mit 4 Ø 16 mm bewehrte Probe zeigt nach einer über die gesamte Messzone verteilten Multirissbildung eine Risslokalisierung im Knick zum Übergangsbereich. Bei abgeschlossener Rissbildung ergibt sich ein mittlerer Rissabstand von rund 100 mm. Die Risslokalisierung findet ausserhalb des mit Messgeräten ausgestatteten Bereiches statt.



Bild 10: Versuchskörper nach Belastungsversuch

Nach Ausbildung vieler, sehr feiner Risse, welche gleichmässig über die Messzone und den Anfang des Übergangsbereiches verteilt sind, lokalisiert sich die Rissbildung am unteren Ende der Probe zwischen Messzone und Übergangsbereich. Die Rissöffnung beginnt genau im Knick und setzt sich in Richtung der Mittelachse der Probe fort. Die gekrümmte Form des Risses (Bild 11a-b) weist darauf hin, dass es zu einer Umlenkung der Spannungstrajektorien im Bereich des Knicks kommt. Bei der Rissöffnung ist das bereits von den Materialzugversuchen bekannte Knacken zu hören.

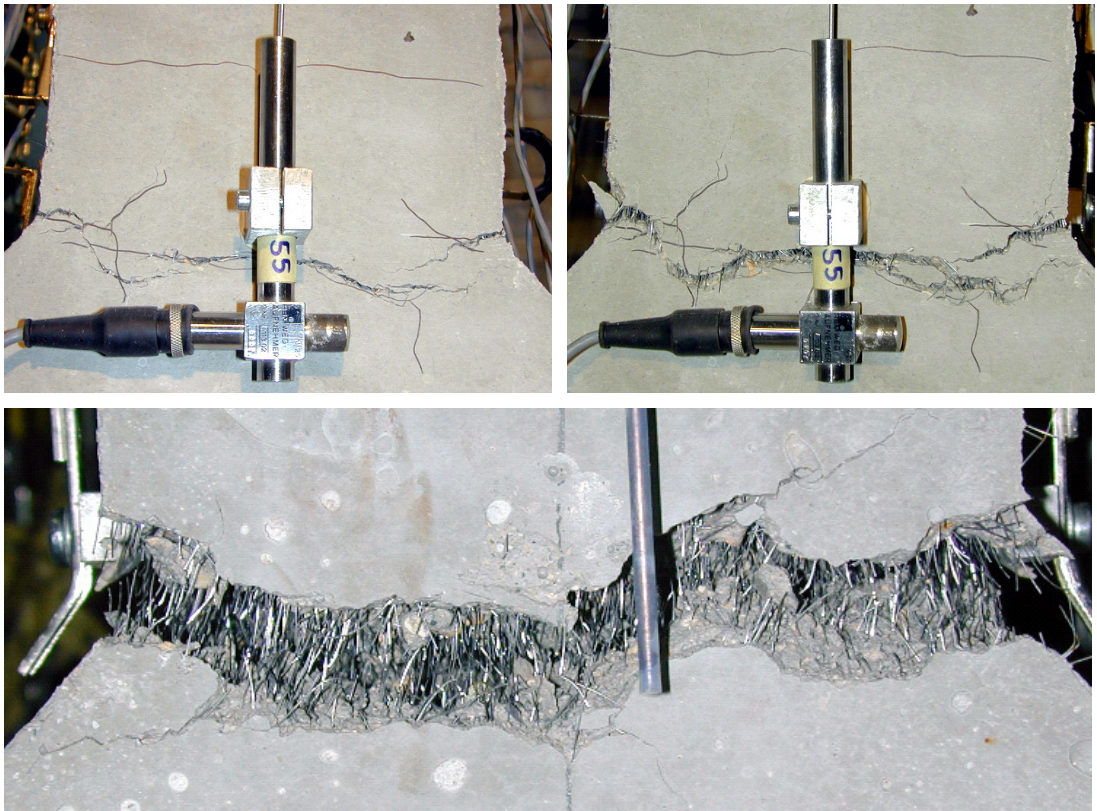


Bild 11a-c: Verlauf der Rissöffnung bei Belastung des Versuchskörpers

Bei Betrachtung der Bruchfläche zeigt sich eine gewisse Konzentration und Orientierung der Fasern. Die Luftseite der Probe beim Betonieren liegt im Bild oben. Es scheint, dass im Zentrum der Probe eine geringere Faserdichte vorhanden ist. Im Bereich der Bewehrung ist zu erkennen, wie insbesondere bei den unteren Stäben beim Betonieren eine Orientierung der Fasern zirkulär um die Bewehrungsstäbe stattgefunden hat.



Bild 12: Bruchfläche des vollständig getrennten Versuchskörpers

Es zeigt sich ein für bewehrten Beton typischer Verlauf mit einer ungerissenen Phase, der Multirissbildung, der Rissöffnungsphase mit einem verfestigenden Verhalten und der endfestigenden Risslokalisierung (Bild 13). Die Belastung führt zunächst zu einer gewissen Rotation der Probe. Beim Überschreiten der Matrixfestigkeit erreicht diese ihr Maximum und verringert sich während der Rissbildung wieder, bis sich anschliessend zu einer grossen Verdrehung in umgekehrter Richtung führt. Die beiden Wegmesser zeigen, da der Riss ausserhalb des Messbereiches liegt, im Nachbruchbereich bei abnehmender Last die elastische Verkürzung der Probe ausserhalb des lokalisierten Risses.

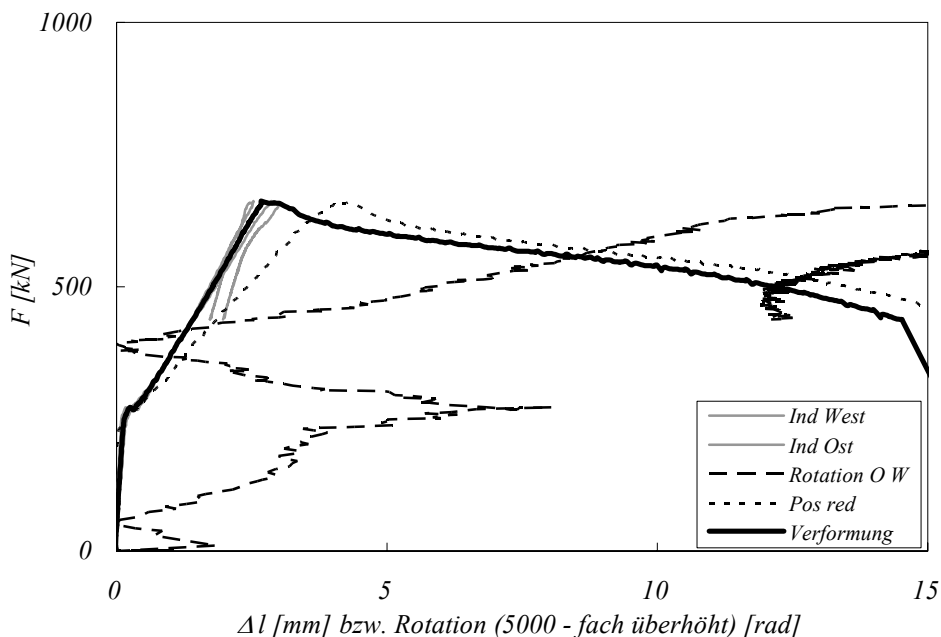


Bild 13: Last – Verformungskurve mit Analyse der Rotation des Versuchskörpers

Die Kurven der Omega – Dehnungsmesser (Bild 14) zeigen mit Zunahme der Last eine immer grösser werdende Abweichung der Dehnung. Die Rand - Dehnungsmesser zeigen ab einer gewissen Makrorissöffnung teilweise unsinnige Messwerte, da es zur Ablösung der Befestigungspunkte kommt. Auch die ‚Streuung‘ der Messwerte zeigt, dass es zu einer unterschiedlichen Dehnung innerhalb der einzelnen Messbereiche der Omega – Dehnungsmesser kommt und folglich eine willkürlich verteilte Rissbildung einsetzt. Ein Vergleich mit der aus der

Längenänderung ermittelten Dehnung zeigt eine gute Übereinstimmung mit der durchschnittlichen Dehnung der Omega - Dehnungsmessern.

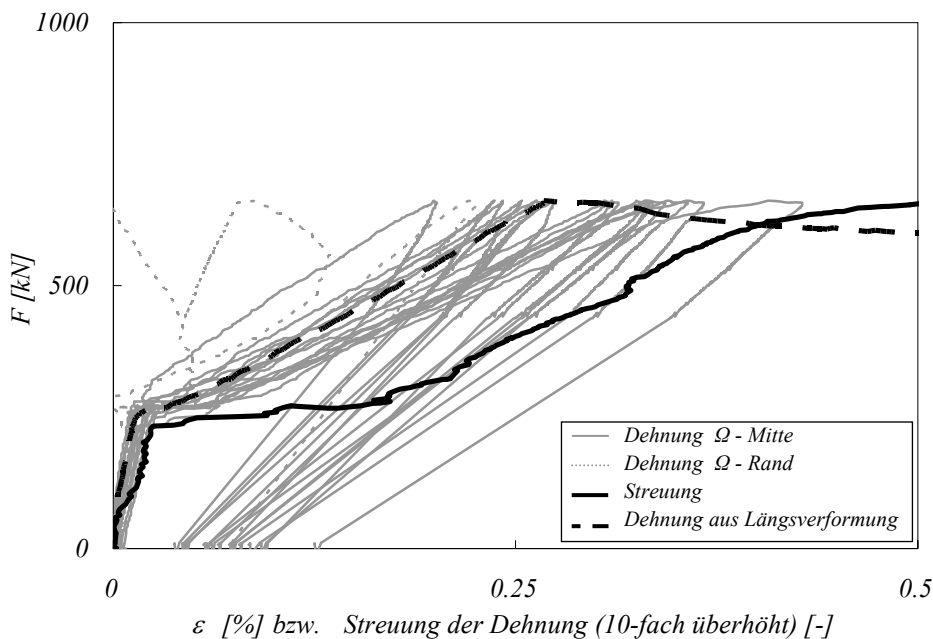


Bild 14: Last – Dehnungskurve mit Analyse der Rissbildung des Versuchskörpers

4.5.2 VERSUCHSKÖRPER G18

Bei dieser mit 4 \varnothing 20 mm am höchsten bewehrten Stütze zeigt sich eine Multirissbildung mit einem mittleren Rissabstand von rund 75 mm. Die Risslokalisierung erfolgt am unteren Ende ausserhalb der Messzone im Knick zur Übergangszone. Mit den zusätzlich angebrachten, die Übergangszone einschliessenden Wegmessern Nord und Süd, kann hier das Nachbruchverhalten direkt beobachtet werden.

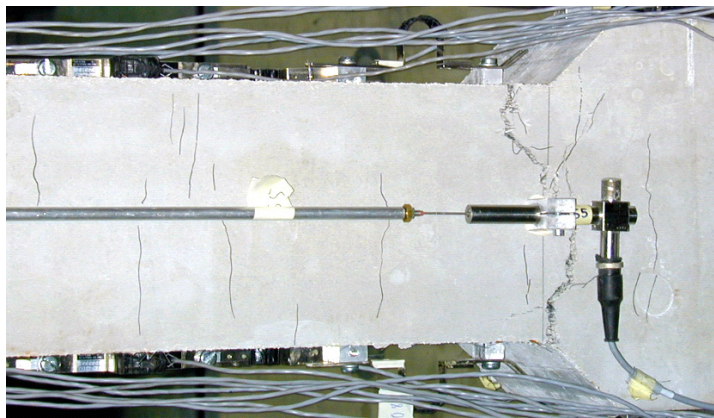


Bild 15: Versuchskörper nach Belastungsversuch

Es zeigt sich zunächst eine Multirissbildung, bei der sogar einer der Risse ca 80 mm innerhalb des Lasteinleitungsbereiches entstanden ist (Bild 16a). Die Rissbildung lokalisiert sich in Folge am unteren Ende der Messzone, wobei der Initialriss auf einer Seite im Knick auf der anderen zweigeteilt jeweils 20 mm versetzt entstanden ist. Der Riss ist leicht gekrümmt in Richtung des Kräfteinleitungsbereiches.

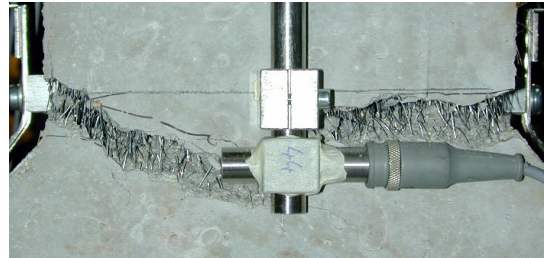
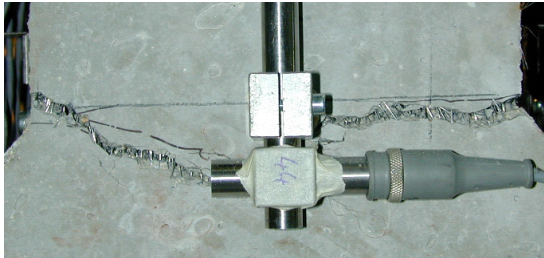
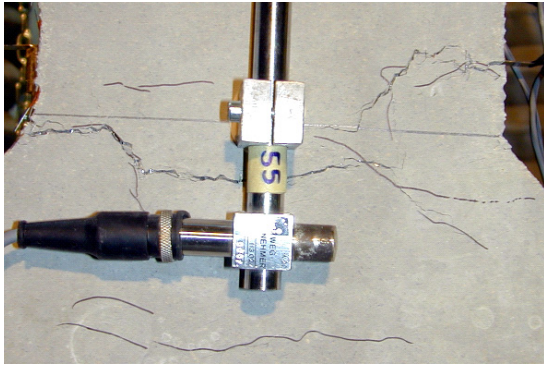


Bild 16a-c: Verlauf der Rissöffnung bei Belastung des Versuchskörpers

Die Fasern sind relativ gleichmässig im Querschnitt verteilt. Die Fasern sind zwischen der Bewehrung in leicht durchhängenden Schichten etwas ausgerichtet.



Bild 17: Bruchfläche des vollständig getrennten Versuchskörpers

Im ungerissenen Bereich zeigt sich eine kleine (O-W) bzw. mittlere (N-S) Exzentrizität, welche sich kurz vor der Multirissbildung wieder reduziert bzw. egalisiert (Bild 18). Während der Rissöffnung steigt die Verdrehung wieder an, wobei die Wegmesser in N-S Richtung jeweils immer eine sehr viel grössere Rotation anzeigen. Bei der Risslokalisierung zeigt sich der Unterschied zwischen den rissüberspannenden Wegmessern N - S und den Wegmessern O - W. Das Rissöffnungsverhalten wird von den Wegmessern N - S in seiner Gesamtheit aufgezeichnet. Es zeigt sich hierbei eine sehr gute Übereinstimmung der gemessenen Verformung mit der aus dem Zylinderweg ermittelten Verformung.

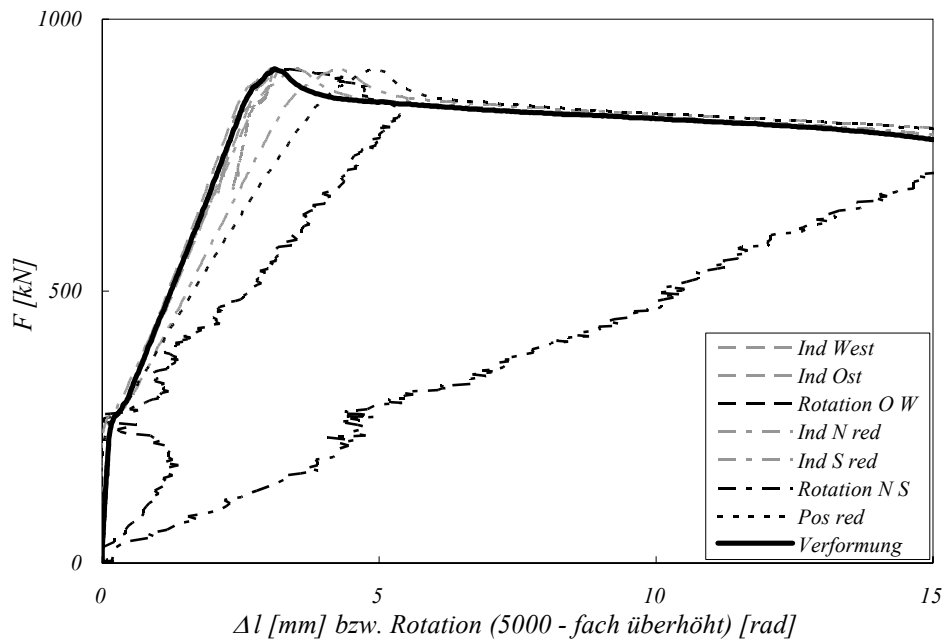


Bild 18: Last – Verformungskurve mit Analyse der Rotation des Versuchskörpers

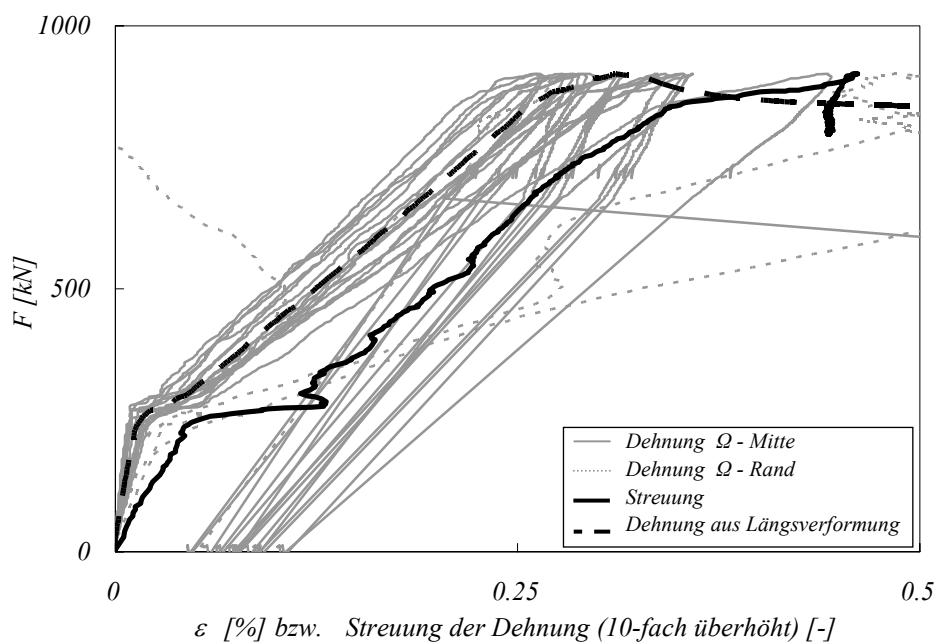
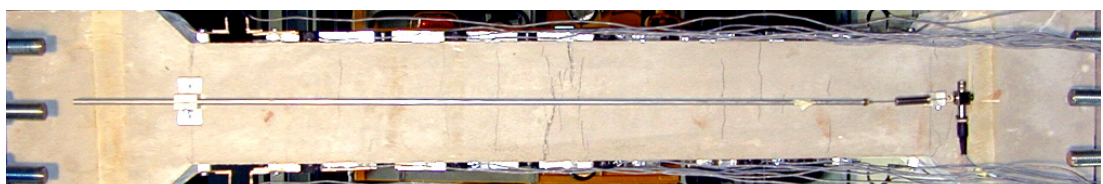


Bild 19: Last – Dehnungskurve mit Analyse der Rissbildung des Versuchskörpers

4.5.3 VERSUCHSKÖRPER G19

Bei der mit $4 \varnothing 12$ mm bewehrten Probe erfolgt die Risslokalisierung in der Mitte der Messzone (Bild 20). Hierdurch kann der vollständige Verlauf der Rissbildung aufgezeichnet werden. Es zeigt sich eine deutliche Multirissbildung mit einem mittleren Rissabstand von 60 mm.



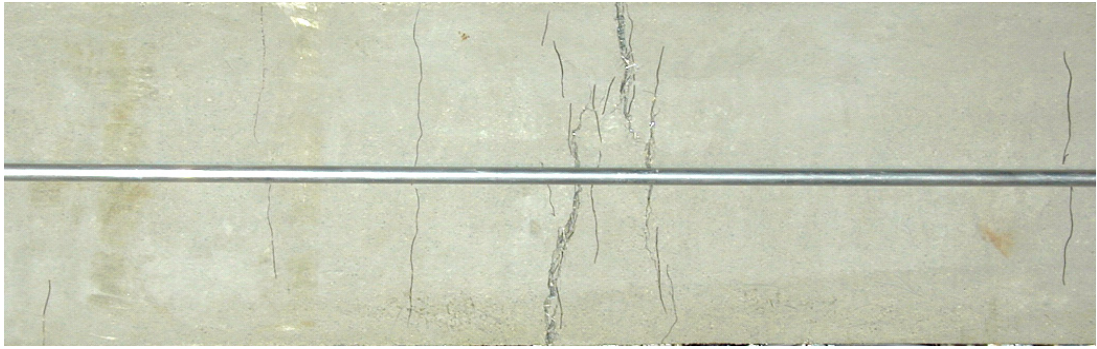


Bild 20a-b: Versuchskörper nach Belastungsversuch

Nach einer gut erkennbaren, über den gesamten Prüfkörper verteilten Multirissbildung, kommt es zur Lokalisierung der Rissbildung in der Mitte des Probekörpers. Die Risse wachsen von den beiden seitlichen, beim Betonieren gegen die Schalung liegenden Rändern aufeinander zu. Hierbei überschneiden sie sich zunächst, wachsen in Folge dann aber zusammen.

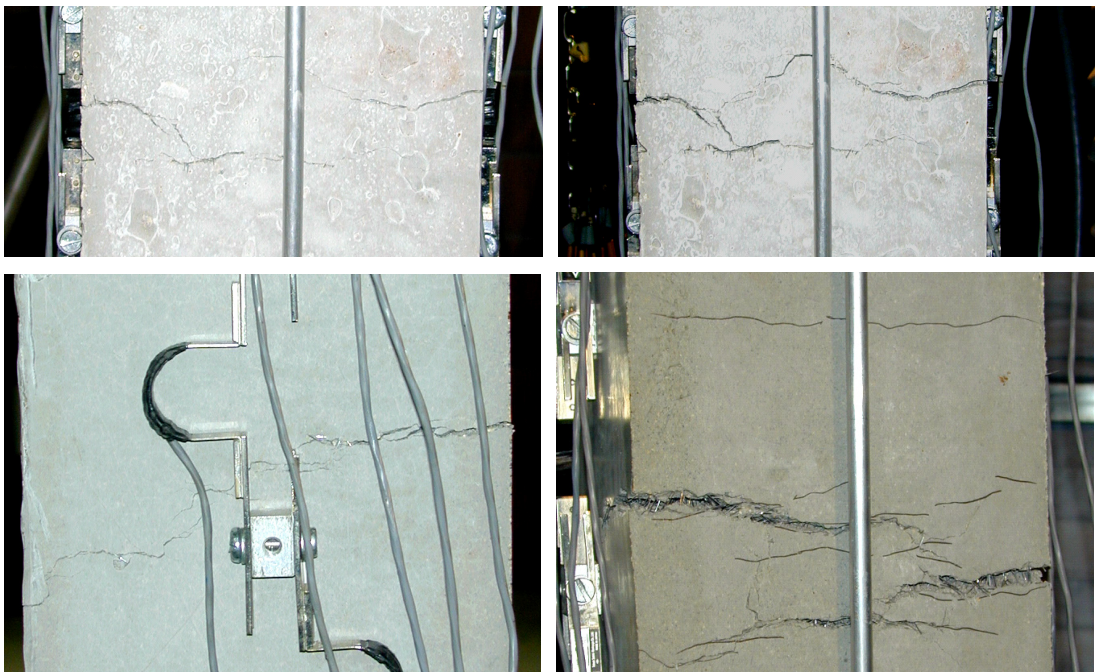


Bild 21a-d: Verlauf der Rissöffnung bei Belastung des Versuchskörpers

Die Bruchfläche zeigt eine leicht inhomogene Verteilung der Fasern (Bild 22). Im Bereich innerhalb der Bewehrung ist ein Bereich mit einer geringen Faserkonzentration vorhanden. Die Fasern sind weitgehend willkürlich orientiert.



Bild 22: Bruchfläche des vollständig getrennten Versuchskörpers

Da die Risslokalisierung in der Mitte der Messzone stattfindet, wird bei dieser Probe der gesamte Verlauf, inklusive der Rissöffnung von den Wegmessern aufgezeichnet (Bild 23). Während der Belastung kommt es im ungerissenen Zustand zu einer leichten Exzentrizität, welche sich bei rund 90% der Matrixfestigkeit stark erhöht. Im Bereich bis zum Erreichen der Zugfestigkeit nimmt die Rotation zunächst wieder ab, bis sie sich beim Versagen erneut stark erhöht.

Bei dieser Kurve lässt sich Kohärenz des aus dem Kolbenweg ermittelten Nachbruchverhaltens und des gemessenen Nachbruchverhaltens überprüfen. Betrachtet man den Nachbruchbereich der aus dem Zylinderweg ermittelten Kurve (Pos red) und verschiebt sie horizontal, bis die jeweiligen Festigkeiten zur Deckung kommen, so sind die beiden Kurven im Nachbruchbereich sehr gut deckungsgleich.

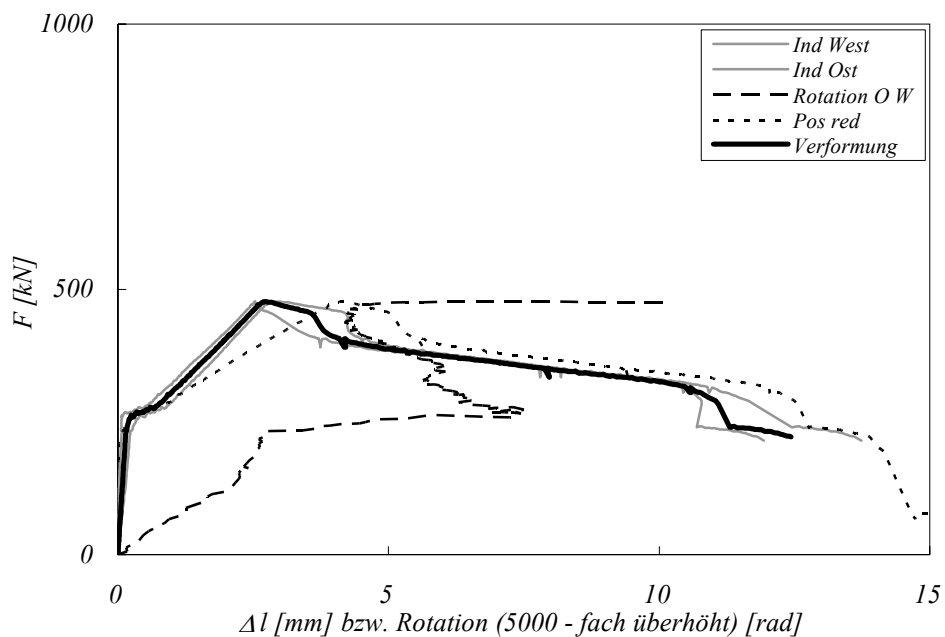


Bild 23: Last – Verformungskurve mit Analyse der Rotation des Versuchskörpers

Im ungerissenen Bereich weichen die Messwerte der Dehnungsmesser nur geringfügig voneinander ab (Bild 24). Kurz vor Erreichen der Matrixzugfestigkeit stellt sich sprunghaft eine grosse Abweichung ein, was bereits hier auf eine lokale Rissbildung hinweist. Während der Multirissbildung egalisieren sich diese Unterschiede aufgrund der relativ gleichmässig verteilten Rissbildung wieder etwas.

Auch wenn die Risslokalisierung in der Mitte der Probe stattfindet, zeigen sich bei den Rand-Dehnungsmessern Messfehler durch Ablösung der Befestigung.

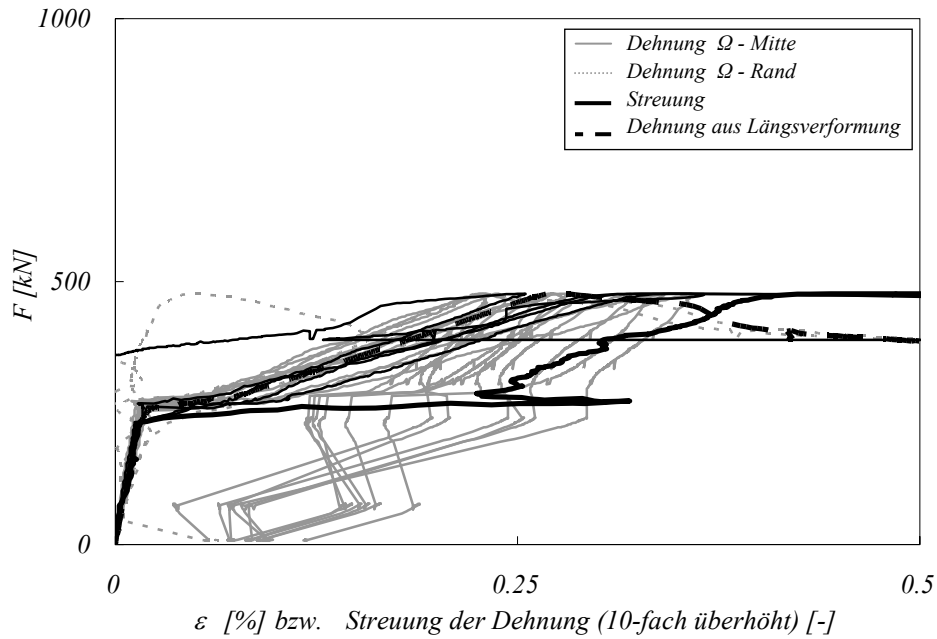


Bild 24: Last – Dehnungskurve mit Analyse der Rissbildung des Versuchskörpers

Bei dieser Probe ist eine detaillierte Betrachtung der rissüberspannenden Omega - Dehnungsmesser möglich (Bild 25). Es zeigt sich, dass bis zum Erreichen der Festigkeit der Probe die Dehnung im Bereich der späteren Makrorissbildung keine Abweichung zu anderen Bereichen aufweist. Erst beim Überschreiten der Zugfestigkeit kommt es zu einer sprunghaften Erhöhung der Dehnung durch die Rissöffnung. Da der Riss auf einer Seite genau unterhalb der Befestigung entsteht, kommt es hier zur Störung der Messung und zu einer negativen Dehnungsänderung.

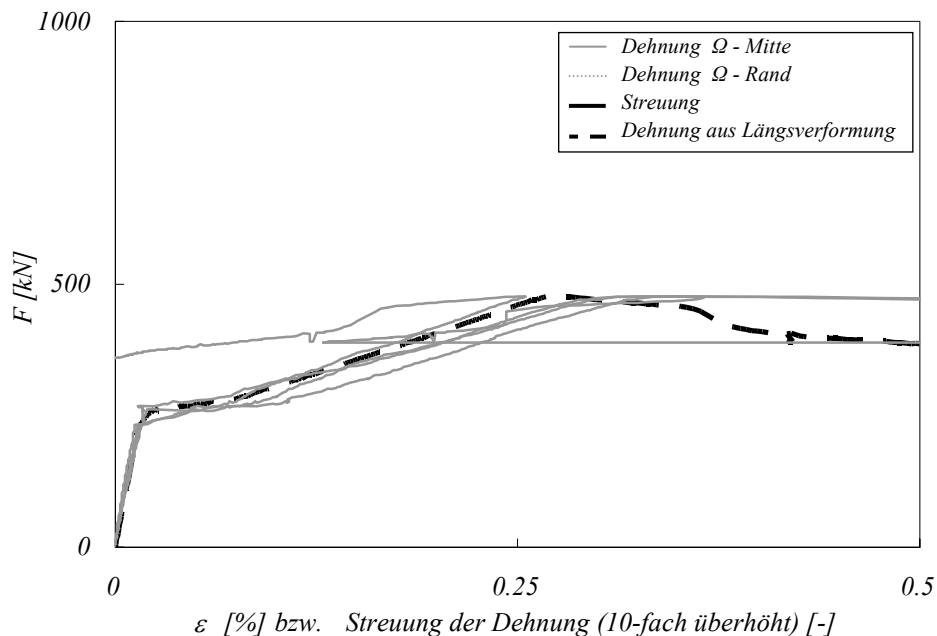


Bild 25: Last Dehnungskurve mit Analyse der rissüberspannenden Dehnungsmessern

4.5.4 VERSUCHSKÖRPER G20

Die unbewehrte Probe zeigt bei der Belastung keinerlei Multirissbildung. Der Bruch erfolgt spröde am unteren Ende der Messzone. Der Riss liegt auf einer Seite innerhalb der Messzone, wodurch mit dem Wegmesser Ost der Verlauf der Rissöffnung aufgezeichnet werden kann.

Bei dem Versuch konnte kein symmetrischer Bruch erzielt werden. Die Probe versagt mit einer Rotation des Querschnittes und einseitigen Rissbildung, wodurch nur eine sehr niedrige Festigkeit erreicht wird. Diese Problematik wird ausführlich in Kapitel 4.6.1 Verdrehung des Probe erörtert.

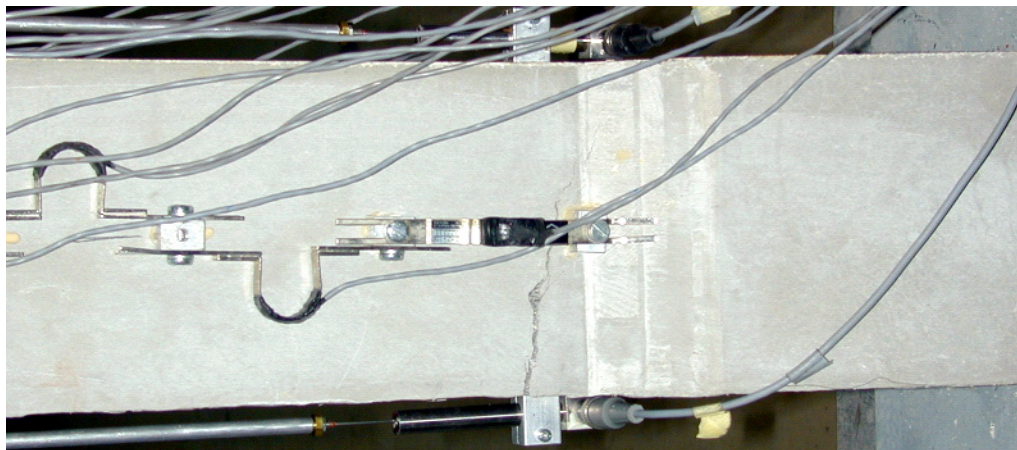


Bild 26: Versuchskörper nach Belastungsversuch

Es zeigt sich ein weitgehend gerader Bruch ohne Ablenkung des Risses. Der Riss öffnet sich zunächst einseitig auf der beim Betonieren oben liegenden Seite. Die einseitige Öffnung des Risses führt zu einer starken Verdrehung der Probe.

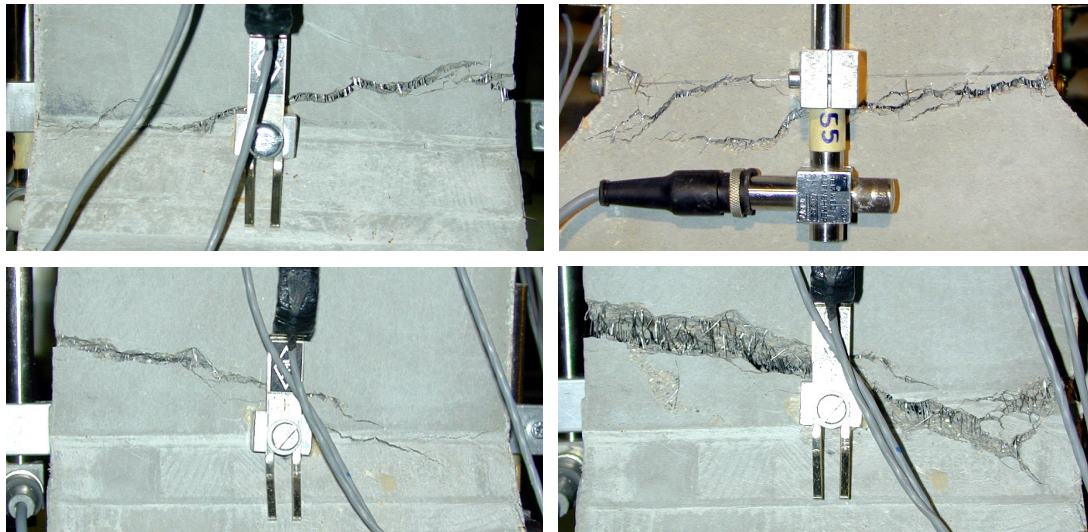


Bild 27a-d: Verlauf der Rissöffnung bei Belastung des Versuchskörpers

Die Proben zeigt nach Überschreiten der relativ niedrig liegenden Zugfestigkeit der Matrix, keinerlei verfestigendes Verhalten. Bereits im ungerissenen Zustand zeigt sich eine grosse Rotation O – W. Die Probe versagt mit einer spontanen einseitigen Rissöffnung, angezeigt durch die sprunghafte Längenänderung des Wegmessers Ost. Der Wegmesser W zeigt zunächst keine Längenänderung. Somit liegt die Nullachse der Rotation ausserhalb des Querschnittes ungefähr auf Höhe der Messachse. Der Riss wächst quer durch den Querschnitt auf die gegenüberliegende Seite (erneut leichte Erhöhung des Widerstandes). Letztendlich trennt dieser den Querschnitt auf

der westlichen Seite knapp ausserhalb des Messbereichs. Somit zeigt der Wegmesser West keine Rissöffnung an.

Solang der Querschnitt nur einseitig getrennt ist, zeigt der Wegmesser Ost aufgrund der Rotation eine annähernd doppelt so grosse Verformung wie der Mittelwert aus dem Zylinderweg. Dies egalisiert sich, sobald der Querschnitt vollständig getrennt ist.

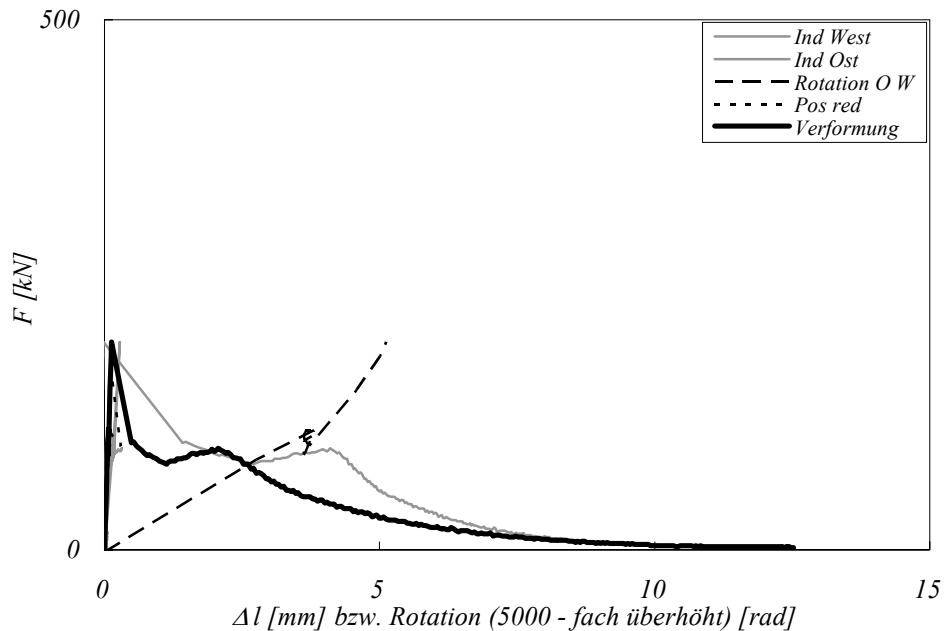


Bild 28: Last – Verformungskurve mit Analyse der Rotation des Versuchskörpers

Die gleich bleibende Steigung der Streuung (Bild 29) zeigt, dass hier keine Änderung des Gefüges und somit keinerlei Rissbildung stattgefunden hat. Beim Überschreiten der Festigkeit steigt die Dehnung der rissüberspannenden Dehnungsmesser aufgrund der lokalisierten Rissöffnung stark an.

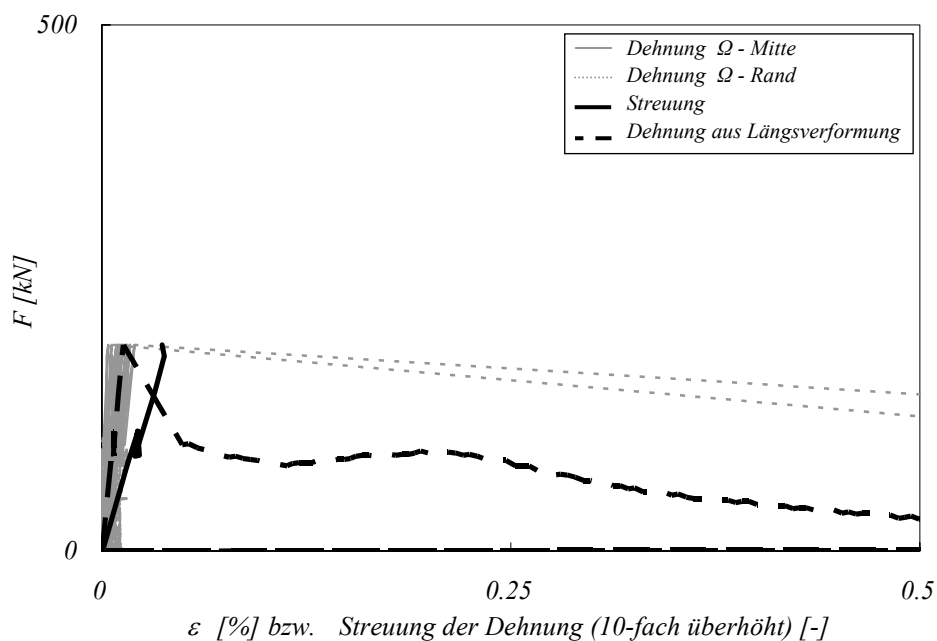


Bild 29: Last – Dehnungskurve mit Analyse der Rissbildung des Versuchskörpers

4.5.5 VERSUCHSKÖRPER G30

Bei der vorgespannten Probe (4 Litzen \varnothing 15.7 mm) kann visuell keine eindeutige Multirissbildung festgestellt werden. Es bilden sich mehrere kleine Risse, doch sind diese Risse aufgrund ihrer geringen Rissweite nur sehr schwer mit blossen Auge zu erkennen. Es kann per Augenschein nicht abschliessend beurteilt werden ob diese wirklich über den gesamten Messbereich verteilt sind. Es bilden sich bei der Risslokalisierung gleichzeitig im oberen und unteren Knick grössere Risse aus, von denen sich letztendlich der Untere öffnet (Bild 30). Dieser liegt innerhalb des Messbereiches.

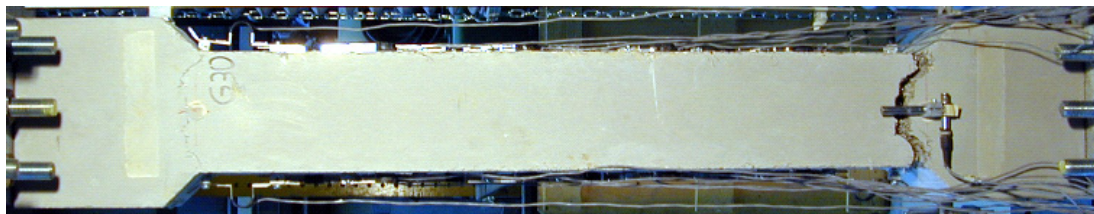


Bild 30: Versuchskörper nach Belastungsversuch

Im Gegensatz zu der visuell nur schwer zu erkennenden Multirissbildung, bilden sich bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt deutlich erkennbare Risse im oberen und unteren Knick zur Übergangszone aus. Diese beginnen zunächst genau im Knick und bilden sich gewölbt einerseits in Richtung Messzone, andererseits in Richtung Lasteinleitungsbereich aus. Es lässt sich zunächst nicht feststellen, in welchen der Risse das Bruch eintreten wird. Bei schon deutlicher Rissöffnung und bereits kompletter Trennung des Querschnittes konzentriert sich die weitere Rissöffnung auf den unteren Riss.

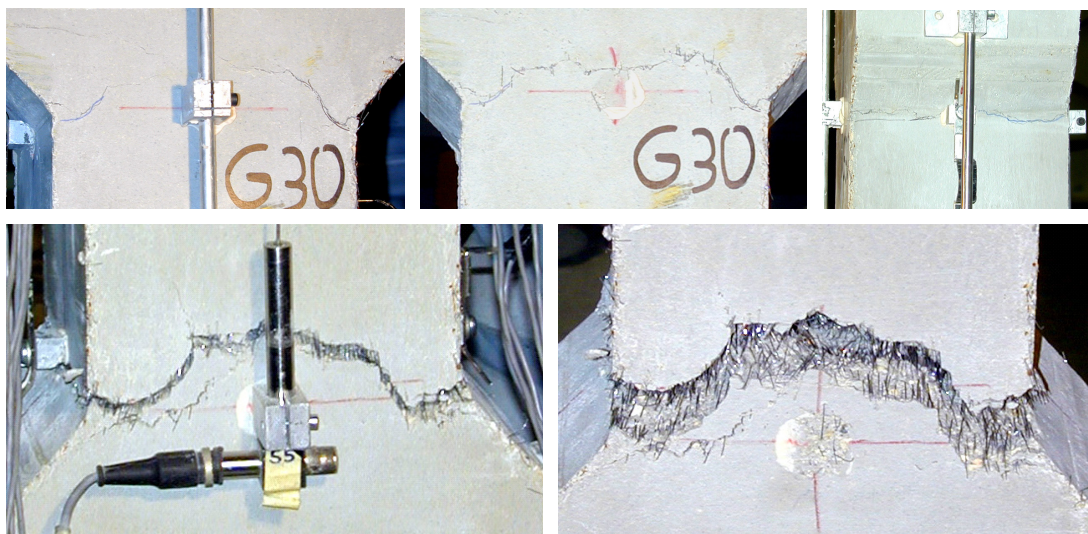


Bild 31a-e: Verlauf der Rissöffnung bei Belastung des Versuchskörpers

Die geöffnete Bruchfläche zeigt eine gute homogene Verteilung der Fasern mit einer leichten Orientierung der Fasern durch schichtweise Lagerung der Fasern zwischen der Bewehrung beim Betonieren (Luftseite beim Betonieren ist auf dem Bild oben).

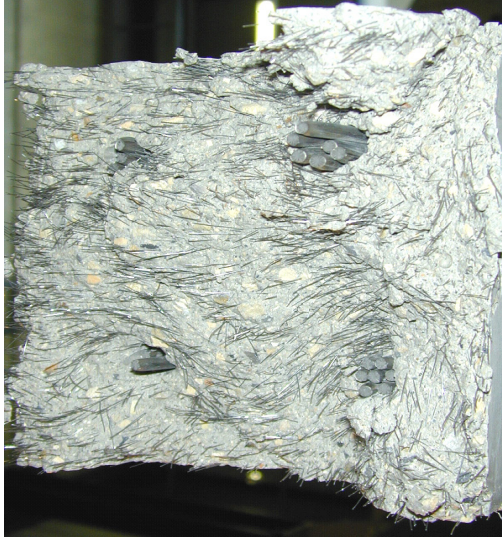


Bild 32: Bruchfläche des vollständig getrennten Versuchskörpers

Der Makroriss liegt knapp innerhalb des Messbereichs, wodurch alle Wegmesser den kompletten Verlauf inklusive des Nachbruchverhaltens aufzeichnen (Bild 33). Die Kurve zeigt, auch wenn optisch keine eindeutige Multirissbildung ausgemacht werden konnte, ein typisches bi-lineares Verhalten, ohne aber eine eindeutige Stufe der Multirissbildung aufzuweisen.

Im ungerissenen Bereich divergieren die Messungen der Wegmesser stark und es kommt zur Verdrehung der Probe um beide Achsen in annähernd gleicher Grösse. In N – S Richtung reduziert sich die Rotation bei 90% der Matrixzugfestigkeit um anschliessend wie die Achse O – W wieder anzusteigen.

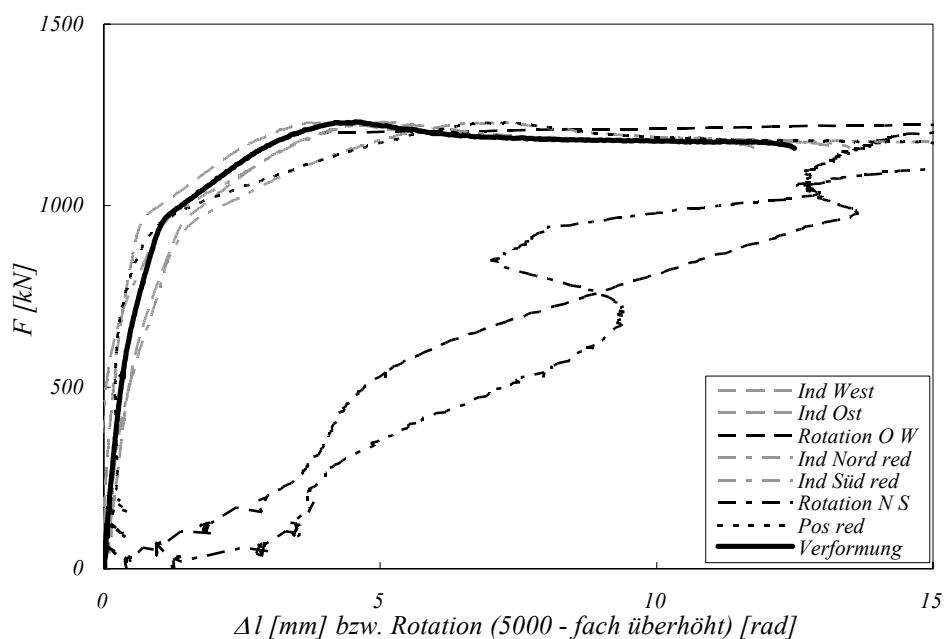


Bild 33: Last – Verformungskurve mit Analyse der Rotation des Versuchskörpers

Der Verlauf der Dehnung stimmt sehr gut mit der aus der Längenmessung ermittelten Dehnung überein (Bild 34). Die Abweichung der einzelnen Messwerte ist gering, nur im Übergangsbereich zwischen den beiden linearen Phasen kommt es zu einer leicht erhöhten Streuung. Dies lässt eigentlich auf eine sehr gut verteilte Multirissbildung schliessen, welche aber visuell nicht eindeutig festgestellt werden konnte. Dies bedeutet, dass hier vermutlich eine sehr gut verteilte Multirissbildung

mit sehr geringer Rissöffnung vorhanden ist. Die am Rand des Messbereiches liegenden Dehnungsmesser weichen sehr früh stark von Durchschnitt ab.

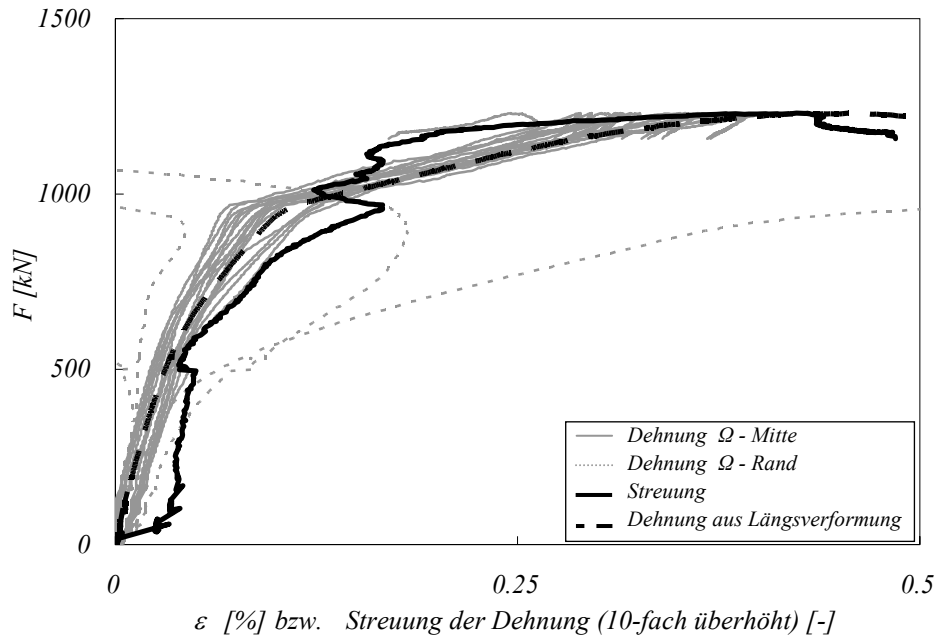


Bild 34: Last – Dehnungskurve mit Analyse der Rissbildung des Versuchskörpers

4.6 WEITERFÜHRENDE UNTERSUCHUNGEN

Folgend werden einige während der Durchführung der Zugversuche beobachteten Phänomene eingehender untersucht und Vergleiche zwischen den einzelnen Untersuchungen angestellt.

4.6.1 VERDREHUNG DES PROBEKÖRPERS

Bei den Versuchen, insbesondere bei der unbewehrten Probe G20, wurden starke Verdrehungen der Versuchskörper beobachtet. Diese führten zu einem verfrühten Versagen des Probekörpers. Die Verdrehung und das hierdurch hervorgerufene asymmetrische Versagen kann entweder aufgrund einer exzentrischen Lasteinleitung oder auch einer Inhomogenität des Materials entstehen. In beiden Fällen wird die Festigkeit auf einer Seite der Probe überschritten, bevor die Rissbildung der Matrix auf der anderen Seite beginnt. Bis zu einer gewissen Exzentrizität bzw. Inhomogenität zentriert sich die Probe aufgrund des Effekts zweiter Ordnung wieder. Wird diese aber überschritten, kommt es zum asymmetrischen Versagen der Probe.

Der Fall der Materialinhomogenität lässt sich mit dem schematischen Spannungs – Dehnungsdiagramm (Bild 35) erläutern. Die Inhomogenität kann sich sowohl durch die Matrix (Betoniervorgang, Betonierrichtung, ungeschalte Seite) ergeben, wie auch durch die Fasern (Faserorientierung, Faserkonzentration). Entsprechend ändert sich die Festigkeit der Matrix ($\Delta f_{ct, Matrix}$) bzw. die Festigkeit des gerissenen Verbundwerkstoffs (Δf_{ct}).

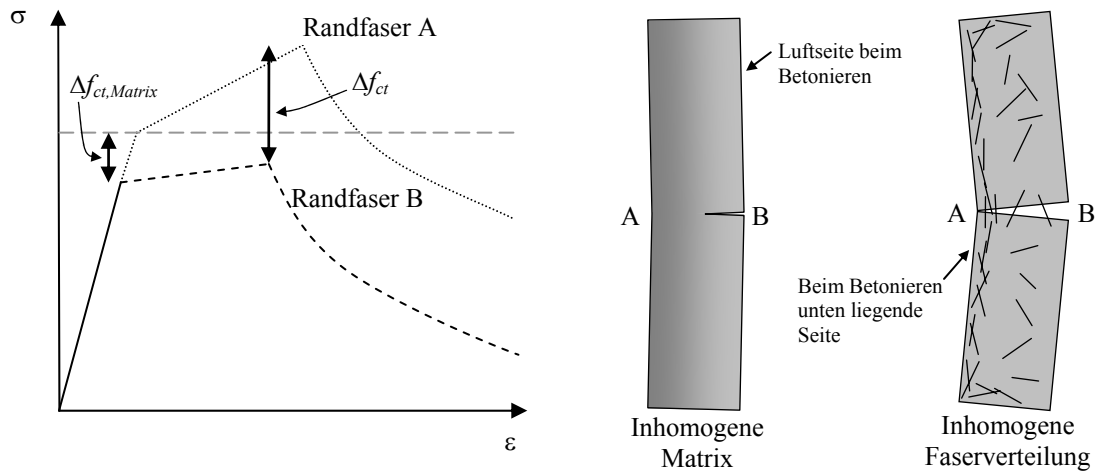


Bild 35: Einfluss von Materialinhomogenitäten auf das Bruchverhalten

Für den Fall der exzentrischen Belastung ist als Grenzkriterium zwischen einem Versagen durch einseitige Rissöffnung und einer Rezentrierung der Probe, durch die Beziehung des auslenkenden Momentes M_I und des rückstellenden Momentes M_{II} gegeben. Wird im Gleichgewichtsfall der beiden Momente die Bruchdehnung der Randfaser überschritten, so kommt es zum Versagen durch asymmetrische Rissöffnung.

Die Momenten- und Spannungszustände sowie die geometrischen Bedingungen sind in Bild 36 dargestellt.

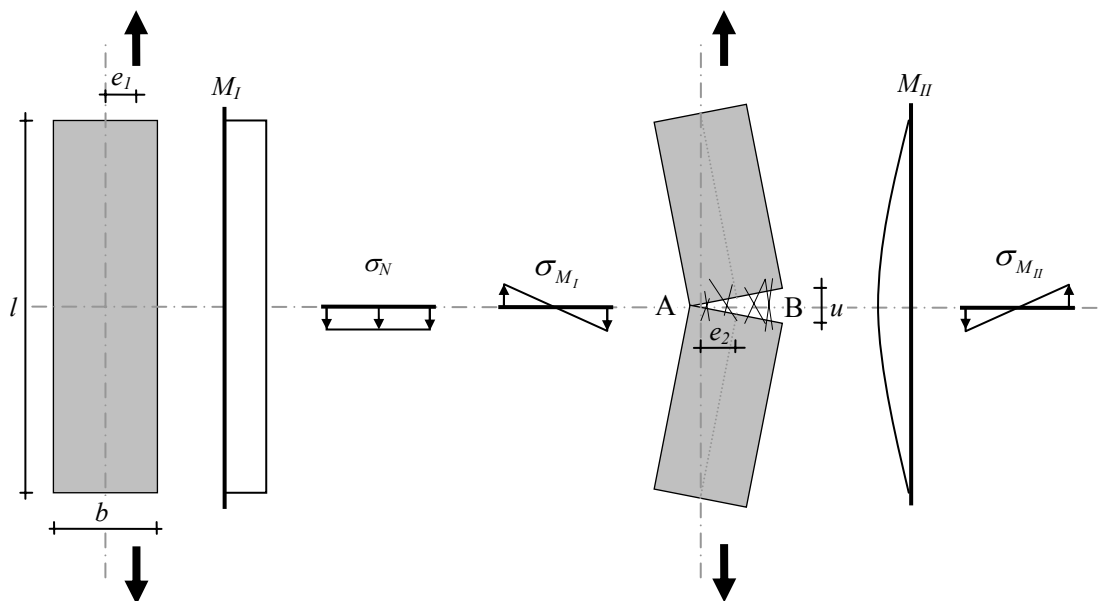


Bild 36: Momenten- und Spannungszustände sowie geometrische Bedingungen des Zugstabes

Bei Belastung der Probe mit einer exzentrischen Last wird durch die ungleich verteilte Spannung frühzeitig die Matrixfestigkeit in der Randfaser B erreicht. Es kommt zur einseitigen Rissbildung. Die Probe verdreht sich, bis ein Gleichgewicht zwischen dem Moment erster und zweiter Ordnung erreicht ist. Kann sich das Gleichgewicht aufgrund der Größe der Exzentrizität nur mit einer Rissöffnung erfüllt werden, bei der in der Randfaser die Zugfestigkeit des Verbundwerkstoffes bereits überschritten ist, versagt die Probe spröde ohne ein verfestigendes Verhalten.

Die geometrischen Beziehungen zwischen der Exzentrizität e_2 , der Grenz-Rissöffnung u und der Zugstabgeometrie lassen sich unter der vereinfachten Annahme der Starrkörperrotation wie folgt darstellen:

$$\frac{u/2}{b} = \frac{e_2}{l/2} \quad (14)$$

$$e_2 = \frac{ulb}{4}$$

Die beiden Momente ermitteln sich zu:

$$M_I = N \cdot e_1$$

$$M_{II} = N \cdot e_2 = N \cdot \frac{ulb}{4} \quad (15)$$

Durch Ansetzen des Momentengleichgewichts ergibt sich als Grenzwert für die initiale Exzentrizität e_I :

$$M_I = M_{II}$$

$$e_1 = \frac{ulb}{4} \quad (16)$$

Beide dargestellten Fälle (Materialinhomogenität und Lastexzentrizität) treten in Realität immer in Kombination auf, wobei sie sich gegenseitig verstärken oder auch kompensieren können. Ab einem gewissen Grad an Exzentrizität und Inhomogenität versagt der Querschnitt spröde, da bei Erreichen der Festigkeit des Querschnittes bereits in einem Teil des Querschnittes die entfestigende Phase erreicht ist. In Folge öffnet sich der Querschnitt, vergleichbar mit einem Klettverschluss, progressiv.

Die hier dargestellten Überlegungen wurden ohne Berücksichtigung einer durchgängigen Bewehrung angestellt. Diese hat aufgrund ihrer homogenen Materialeigenschaften, ihrer symmetrischen Lage und insbesondere aufgrund des plastischen Verhaltens ein sehr grosses rückstellendes Moment (Moment 2. Ordnung) zur Folge. Aus diesem Grund kommt es bei den bewehrten Proben erst bei sehr viel grösserer Inhomogenität bzw. Exzentrizität zu einem asymmetrischen Versagen. Bei den getesteten Proben bewehrten Versuchskörpern trat dies in keinem Fall ein.

4.6.2 RISSBILDUNG IM KNICK ZUR ÜBERGANGSZONE

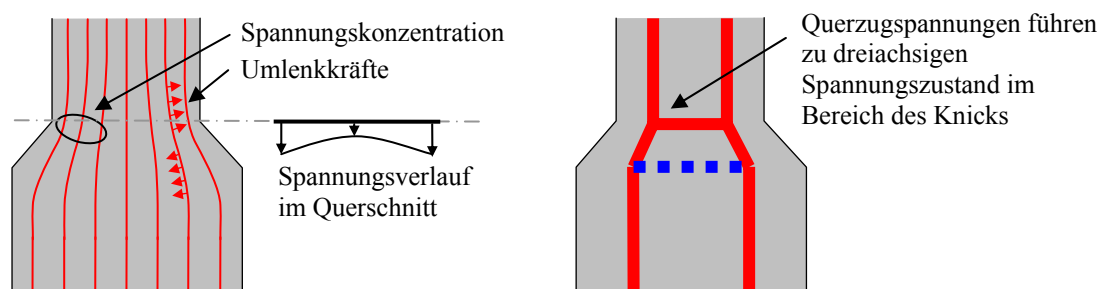
Bei der Versuchsserie kam es bei einigen der Probekörper zum Versagen am Rand des konstanten Bereiches, im Knick zur Übergangszone. Folgend werden die mechanischen Gründe hierfür erörtert. Für die Betrachtung ist zu unterscheiden zwischen dem ungerissenen Zustand I, an dessen Ende es zur initialen Rissbildung kommt und dem gerissenen Zustand II, in dem die Risslokalisierung stattfindet.

Im ungerissenen Zustand gelten die Bedingungen der Kontinuumsmechanik. Die Lastabtragung erfolgt durch die Matrix. Die Spannungstrajektorien werden im Übergangsbereich eingeschnürt, wodurch es einerseits zu Umlenkkraften und andererseits zu Spannungskonzentrationen am Rand kommt (Bild 37a). Um die Umlenkkräfte kompensieren zu können, bildet sich eine Querkzugspannung auf Höhe des Knicks zwischen konstanter Messzone und Übergangszone aus (Bild 37b). Somit ist der Bereich des Knicks sowohl durch eine höhere lokale Zugspannung, als auch durch eine Reduktion der Materialfestigkeit aufgrund der Querkzugspannung für eine initiale Rissbildung prädestiniert.

Im gerissenen Zustand, bei bereits abgeschlossener Multirissbildung, wird die Last von den Fasern über die Rissufer übertragen. Durch die Einschnürung der Spannungstrajektorien herrscht eine erhöhte Spannung am Rand. Die Umlenkkräfte werden ausserhalb des Risses kompensiert, da durch die Fasern nur Spannungen in Richtung der Rissöffnung übertragen werden können. Diese haben folglich keinen Einfluss mehr auf die Festigkeit (Bild 37c). Da in diesem Zustand die Lastabtragung durch die Faser erfolgt, ist hier deren Orientierung für die Festigkeit massgebend (Bild 37d). Durch das Betonieren gegen die Schalung sind zwangsweise die Fasern im Randbereich parallel zum Rand und somit optimal für die Lastabtragung ausgerichtet. Im Bereich des Knicks kommt es ebenfalls zu einer gewissen Orientierung der Fasern, doch gibt es hier zwei Orientierungen, wodurch weniger Fasern optimal zur Lastrichtung liegen. Der Randbereich des Risses im Knick ist somit höher belastet und weist im Vergleich mit den andern Rissen eine geringer festigkeitssteigernde Orientierung der Randfasern auf. Es kommt somit in diesem Bereich tendenziell früher zum Überschreiten der Festigkeit. Der Riss wächst infolge vom geschwächten Rand progressiv quer durch den Querschnitt.

Die Betrachtungen wurden ohne Berücksichtigung der Bewehrung durchgeführt, da die mechanischen Vorgänge weitgehend unabhängig von der eingelegten Bewehrung sind.

Ungerissener Zustand:



Gerissener Zustand:

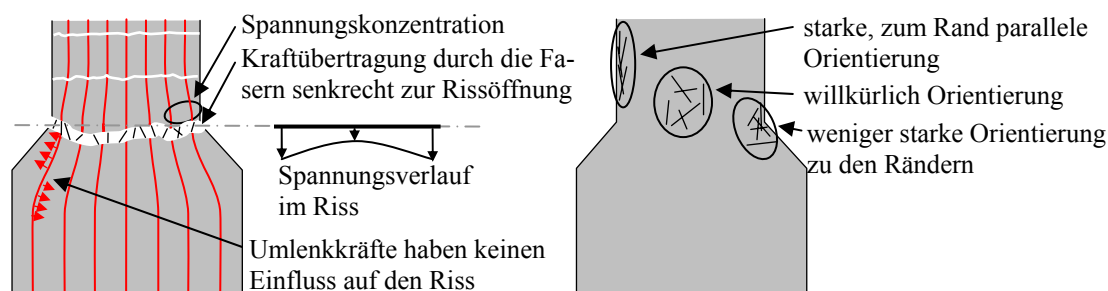


Bild 37a-d: Spannungszustände und Faserwirkung im Knick zur Übergangszone

Bild 38 zeigt die Rissbildung des konstanten Bereichs knapp oberhalb des Knicks. Die durch die Umlenkkräfte im Bereich des Knicks entstandenen Längsrisse setzen sich bis zu 150 mm in die Messzone hinein fort.

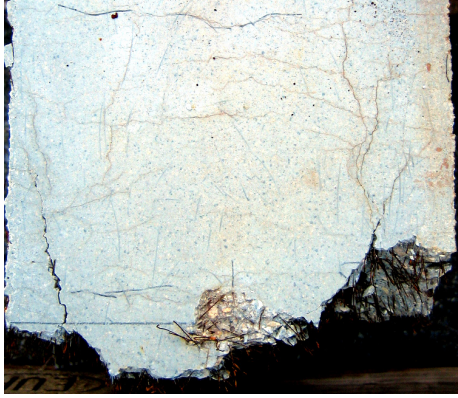


Bild 38: Vergrößerung des Auflagerbereichs

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die oben dargestellten Phänomene zwar zur Rissbildung und Risslokalisierung an einem diskreten Ort führen (=> im Knick am Rand der Probe), doch als gemittelter Wert über den Querschnitt ist der Einfluss wieder weitgehend aufgehoben. Ein Vergleich mit der im konstanten Bereich gerissenen Probe zeigt, dass unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Bewehrungsgrade, dass das mechanische Verhalten und auch die erreichten Festigkeiten sehr gut übereinstimmen (Bild 44 und Tabelle 10). Der Einfluss der Rissbildung im Knick auf die Versuchsergebnisse (erreichte Festigkeiten und mechanisches Verhalten) wird folglich als relativ gering eingeschätzt. Im Rahmen der Dissertation können unter Zuhilfenahme des Zugmodells hierzu genauere Untersuchungen angestellt werden.

4.6.3 MEHRFACHRISSBILDUNG

Bild 39 zeigt die Probe G18 nach Lagerung der Probe während mehrerer Wochen im Freien. Durch den Verwitterungsprozess der Oberfläche tritt ein sehr feines Rissnetz sehr gut optisch hervor. Es zeigt sich, dass bei den Belastungsversuchen neben den visuell beobachteten ‚grossen‘ Multirissen, sich sehr viele kleine Risse zwischen diesen entwickelt haben. Diese ‚grossen‘ Multirisse lassen sich teilweise auch auf der verwitterten Oberfläche noch als weiter geöffnete Risse erkennen. Die ‚feinen‘ Risse sind in erster Linie ebenfalls quer zur Zugrichtung ausgerichtet, es zeigen sich aber auch Risse quer zu den Hauptrissen, welche wahrscheinlich durch oberflächennahes differenzielles Schwinden entstanden sind.

Bei der unbewehrten Probe G20, welche bei der Versuchsdurchführung ohne eine verfestigende Phase versagt und keinerlei Multirissbildung zeigt, kann auch nur eine sehr schwache Ausprägung der Rissbildung bei sehr viel grösserem Rissabstand festgestellt werden.

Es entstehen folglich 2 Arten von Multirissen, solche die wie sie sich beim klassischen Stahlbeton aufgrund des Verbundes mit der Bewehrung ergeben (folgend als Hauptrisse bezeichnet) und solche die aufgrund der rissverteilenden Wirkung der Fasern entstehen (entsprechend als Nebenrisse bezeichnet).



Bild 39: Rissbild des Versuchskörpers G18 nach Lagerung im Freien

Aus der Vergrößerung (Bild 40) lässt sich ein mittlerer Rissabstand von $s_{r,neben\ quer} = 10 - 15\text{ mm}$ in Längsrichtung und von rund $s_{r,neben\ längs} = 30 - 40\text{ mm}$ in Querrichtung ermitteln.

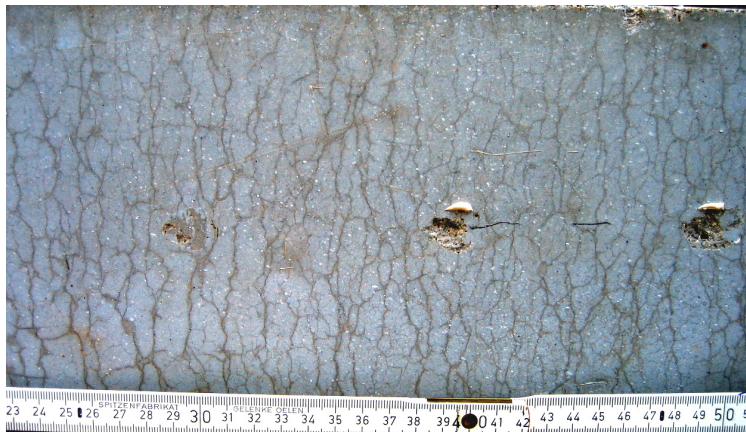


Bild 40a-b: Vergrößerung des Rissbildes des Versuchskörpers G18 nach Lagerung im Freien

Ein Vergleich der Abstände der Hauptrisse $s_{r,haupt} = 50 - 100\text{ mm}$ mit denen der Nebenrisse zeigt, dass jeweils 2 - 4 ‚feine‘ Nebenrisse im Zwischenraum zweier ‚grosser‘ Hauptrisse liegen (Tabelle 8). Dies kann bei genauer Betrachtung der verwitterten Oberfläche auch visuell gut nachvollzogen werden. Im Gegensatz hierzu sind die während der Versuche beobachteten Rissabstände (Werte in Klammern angegeben) wenig aussagekräftig, da aufgrund der geringen Rissöffnung vermutlich bei der Versuchsdurchführung einige Risse nicht erkannt wurden.

	Bewehrung	Bruch	$s_{r,haupt}$ [mm]	$s_{r,neben}$ [mm]	$s_{r,haupt}/s_{r,neben}$
G20	-	Knick	-	12.5	-
G19	4Ø12	Knick	40 (60)	12.5	3.2 (4.8)
G17	4Ø16	Mitte	50 (100)	12.5	4 (8)
G18	4Ø20	Knick	60 (75)	12.5	4.8 (6)
G30	4Ø15.7	Knick		12.5	

Tabelle 8: Beobachtete Rissabstände der Zugversuche

Mit: $s_{r,haupt}$: Rissabstand der ‚grossen‘ Hauptrisse

$s_{r,neben}$: Rissabstand der ‚feinen‘ Nebenrisse

Aufgrund der Beobachtungen wird vermutet, dass die beiden Risstypen durch die zwei unterschiedlichen Bewehrungen (Fasern und Stabbewehrung) entstehen. Der Rissabstand der Hauptrisse ergibt sich aufgrund des Verbundes und der Lasteinleitungslänge mit der Bewehrung. Die Nebenrisse im Zwischenraum entstehen durch die rissverteilende Wirkung der Fasern. Schematisch können die zwei Typen von Multirissen wie folgt dargestellt werden.

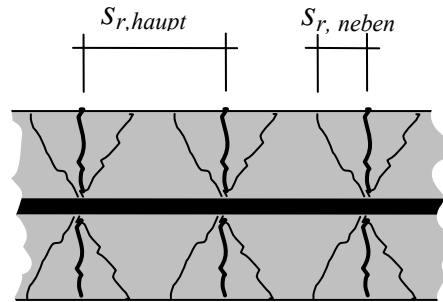


Bild 41: Schema der Multirissbildung mit Haupt- und Nebenrissen

4.6.4 ANTEIL DES UHFB AN DER LASTABTRAGUNG

Folgend wird exemplarisch anhand der Probe G17 die Beteiligung des Faserverbundwerkstoffes UHFB an der Lastabtragung im Verbundquerschnitt untersucht. Bild 42 zeigt den, durch Subtraktion der Stahlspannung $\sigma_s(\epsilon)$ von der gemessenen Spannung im Probekörper $\sigma(\epsilon)$, ermittelten Spannungsanteil $\sigma_c(\epsilon)$ des UHFB. Es zeigt sich für $\sigma_c(\epsilon)$ ein mit den Zugversuchen der Materialversuche gut korrespondierender Verlauf. Die beiden Spannungsspitzen (Rissbildung der Matrix f_t , Zugfestigkeit f_t) liegen genau bei 9.4 MPa. Die Spannungsspitze der Materialfestigkeit des UHFB liegt knapp vor Erreichen der Fließgrenze des Bewehrungsstahls (2.8‰) bei einer Dehnung von 2.5‰. Dies stimmt exakt mit den Ergebnissen der Materialversuche überein $\epsilon(f_{ct}) = 2.5‰$. Bei Erreichen der Fließgrenze des Stahls ist folglich bereits die Zugfestigkeit des UHFB überschritten worden und es kann nur mehr die Zugfestigkeit im Bereich des Nachbruchverhaltens genutzt werden.

Im Nachbruchbereich zeigt sich ein sehr viel langsamerer Spannungsabfall als bei den durchgeführten Materialversuchen. Diese ergibt sich vermutlich durch die komplexe, durch die beiden unterschiedlichen Bewehrungssysteme (Fasern und Stabbewehrung) beeinflusste Rissbildung (siehe auch 4.6.3).

Es zeigt sich somit, dass sich das Tragverhalten eines bewehrten Zugelementes aus UHFB und die erzielten Festigkeiten aus der direkten Überlagerung des Verhaltens des Verbundwerkstoffes UHFB mit dem Verhalten der Stahlbewehrung ergeben.

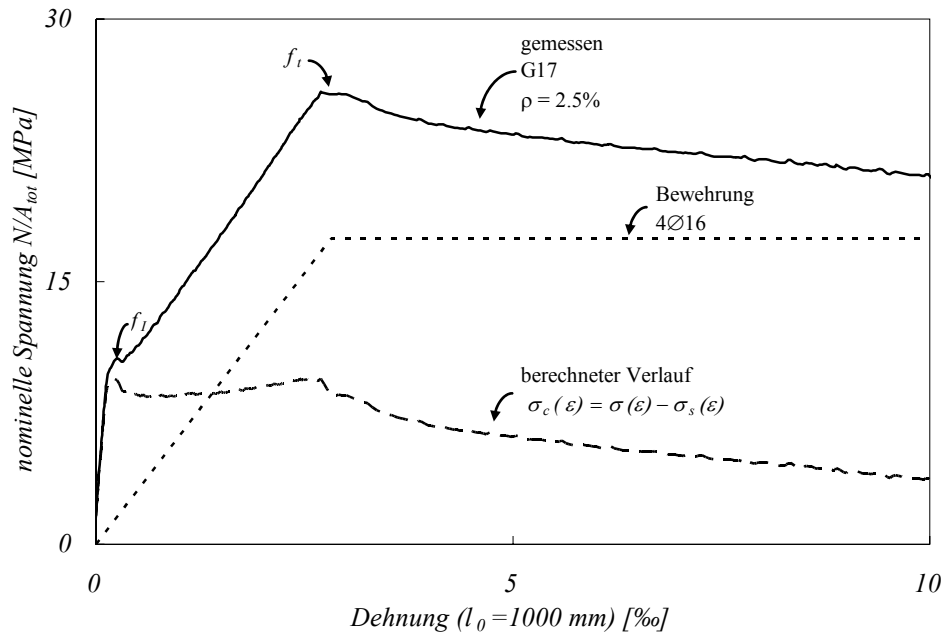


Bild 42: Analyse der Beteiligung des UHFB an der Lastabtragung im Zugelement

Ein Vergleich der charakteristischen Werte der restlichen Versuchskörper findet sich in Tabelle 10.

4.6.5 VORGESPANNTE PROBE

Durch die Spannbettvorspannung wird bei der Probe G30 ein initialer Spannungszustand aufgebracht und somit die Probe überdrückt. Die Spannungsverhältnisse zwischen Beton und der vorgespannten Stahllitzen sowie Beteiligung des UHFB an der Lastabtragung werden folgend untersucht. Das Kraft- bzw. nominale Spannungs - Dehnungsdiagramm (Bild 43) zeigt die Messkurve des vorgespannten Probekörpers G30. In Relation dazu ist die Arbeitslinie des Spannstahls um die Vorspannkraft P_{I1} und die Vordehnung ε_{P_i} versetzt dargestellt.

Ergänzend wird ein zweites Koordinatensystem mit Ursprung im Punkt der Dekompression der Matrix eingeführt. Dieses ist entsprechend um die Verkürzung der Probe beim Übertragen der Spannkraft versetzt. In diesem Koordinatensystem kann der aus der Differenz der Messkurve und der Arbeitslinie des Stahls berechnete Verlauf der Beteiligung des UHFB an der Lastabtragung $\sigma_c(\varepsilon)$ untersucht werden.

Es zeigen sich zunächst im ungerissenen Bereich zwei unterschiedliche Steifigkeiten. Diese ergeben sich wahrscheinlich durch kleine Risse und Fehlstellen, welche im überdrückten Bereich geschlossen sind und sich bei Erreichen der Dekompression öffnen. Die Rissbildung wird bei einer Zugkraft von $F_I = 963 \text{ kN}$ und einer Beteiligung des UHFB von $f_{ct,Matrix} = 8.4 \text{ MPa}$.

Das Plastifizieren des Spannstahls spiegelt sich nur geringfügig im Verlauf der gemessenen Kurve wieder. Dies einerseits, da in diesem Bereich auch der Übergang von der abgeschlossenen Rissbildung zu Rissöffnung liegt (Kompensation der beiden Kurven), aber auch da der Übergang zum Plastifizieren des Spannstahls relativ weich erfolgt (gerundete Kurve).

Die Festigkeit der Probe $F_t = 1230 \text{ kN}$ wird erreicht sobald es zum Faserauszug $f_{ct} = 11.6 \text{ MPa}$ komm. Dies erfolgt bei 3.5% nach der Dekompression der Probe. Dieser Wert liegt höher als die in den Materialversuchen beobachtete Grenze von 2.5%, da sich die Dehnungslokalisierung auf Niveau der Spannkabel bereits auswirkt und

somit die Dehnungsverteilung auf mehrere Nebenrisse (siehe 4.6.3) einen Einfluss hat.

Im Nachbruchbereich sinkt die Beteiligung UHFB sehr viel langsamer als bei den Materialversuchen beobachtet ab. Dies erklärt sich ebenfalls wie in 4.6.4 durch die differenzierte Rissbildung.

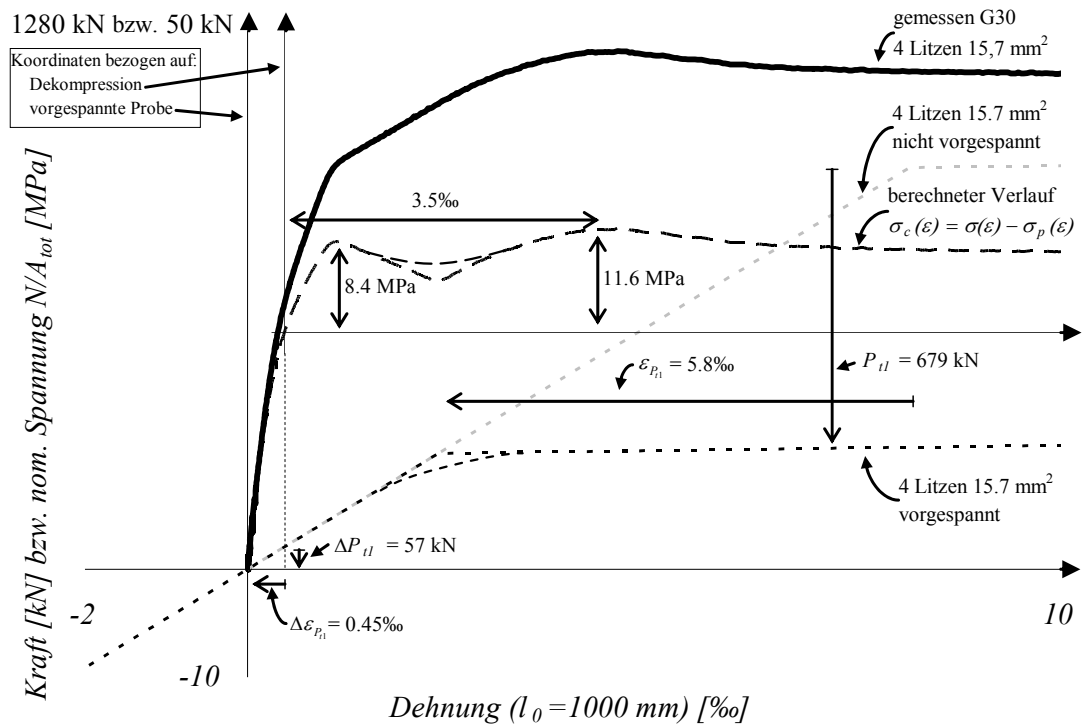


Bild 43: Spannungs – Dehnungsdiagramm des vorgespannten Zugversuchs mit Darstellung der Spannungszustände der Vorspannung und der Beteiligung des UHFB an der Lastabtragung

Als Ergänzung zu obigem Diagramm sind in Tabelle 9 die Kennwerte der Vorspannung zusammengefasst.

Vorspannung	A_p	$A_p \cdot f_{tk}$	$P_0 (0.7 f_{tk})$	P_{tl}	ΔP_{tl}	ε_{p_i}	$\Delta \varepsilon_{p_i}$
[mm]	[mm ²]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[‰]	[‰]
4Ø 15.7	600	1062	732	679	57	5.8	0.45

Tabelle 9: Zusammenfassung der Kennwerte der Vorspannung der Probe G30

Mit: f_{tk} : Streckgrenze des Spannstahls nach Herstellerangaben 1770 MPa

P_0 : Vorspannkraft nach Verkeilen im Spannbett

P_{tl} : Vorspannkraft nach Kraftübertragung auf Probekörper

4.6.6 VERGLEICH DER VERSUCHSRESULTATE UNTEREINANDER

Bild 44 zeigt das Spannungs – Dehnungsdiagramm aller Zugversuche an unbewehrten und bewehrten Bauteilen aus UHFB. Zunächst verhalten sich die Proben im ungerissenen Bereich linear – elastisch. Beim Erreichen der Zugfestigkeit der Matrix im Punkt f_i kommt es zur Mehrfachrissbildung und in Folge zu einer Abnahme der Steifigkeit der Probe. Nach Stabilisierung der Rissbildung verläuft die Kurve mit einem sehr grossen ‚Tension-Stiffening‘ - Effekt parallel zur Spannungs - Dehnungskurve des Stahls. Aufgrund des guten Verbundes zwischen Matrix und Bewehrung (siehe Versuchsbericht Material) ergibt sich somit eine sehr hohe Beteiligung des Betons an der Steifigkeit des Elements. In Abhängigkeit der eingebauten Bewehrungsmenge wird die Zugfestigkeit (f_i) erreicht. Diese liegt weit

über der berechneten Zugfestigkeit des Stahls. Im Gegensatz zum klassischen Stahlbeton kann sich folglich der UHFB durch seine rissüberbrückenden Fasern, an der Lastabtragung im gerissenen Zustand beteiligen. Anschliessend kommt es zur Risslokalisierung, welche sich in einem entfestigenden Verhalten widerspiegelt. Die Spannung fällt zunächst asymptotisch auf die reine Stahlspannung ab (Auszug der Stahlfasern), um bei Erreichen der Streckgrenze des Stahls entsprechend dessen Tragverhaltens zu versagen (ausserhalb des Diagramms).

Das asymmetrische Versagen der unbewehrten Probe, dessen geringe Festigkeit und die fehlende Mehrfachrissbildung bzw. verfestigende Phase wird ausführlich in Kapitel 4.6.1 diskutiert.

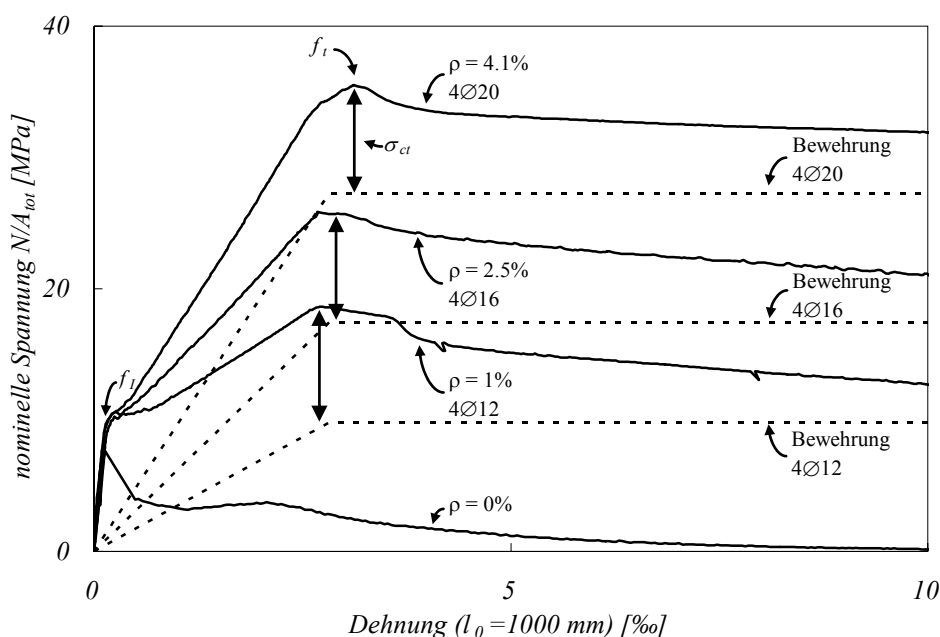


Bild 44: Zusammenfassung der bewehrten und unbewehrten Zugversuche im Spannungs - Dehnungsdiagramm

Ein Vergleich der vorgespannten Probe G30 (4 Litzen 15.7 mm) mit der nicht vorgespannten Probe G18 (4Ø20) ist im Spannungs – Dehnungsdiagramm Bild 45 dargestellt. Die entsprechende Bewehrung ist jeweils angegeben, wobei der Spannstahl ebenfalls im nicht gespannten Zustand dargestellt ist. Die Fläche zwischen der Bewehrung und der Messkurve des Versuchs stellt die Beteiligung des UHFB an der Lastabtragung und somit eine Art ‚Effizienz‘ des Verbundbauteils dar.

Deutlich ist die bekannt hohe Effizienz der Vorspannung zu erkennen. Aufgrund dessen, dass die Probe lange im ungerissenen Zustand verbleibt, besitzen die vorgespannten Proben im Bereich des Gebrauchszustandes eine sehr viel hohe Steifigkeit als die bewehrte Probe. Bei Erreichen der Rissbildung zeigt sich eine starke Abnahme der Steifigkeit. Gegenüber der bewehrten Probe zeigt sich eine sehr viel grössere Verformungskapazität, was Vorteilhaft für das plastische Verhalten eines Bauwerks ist.

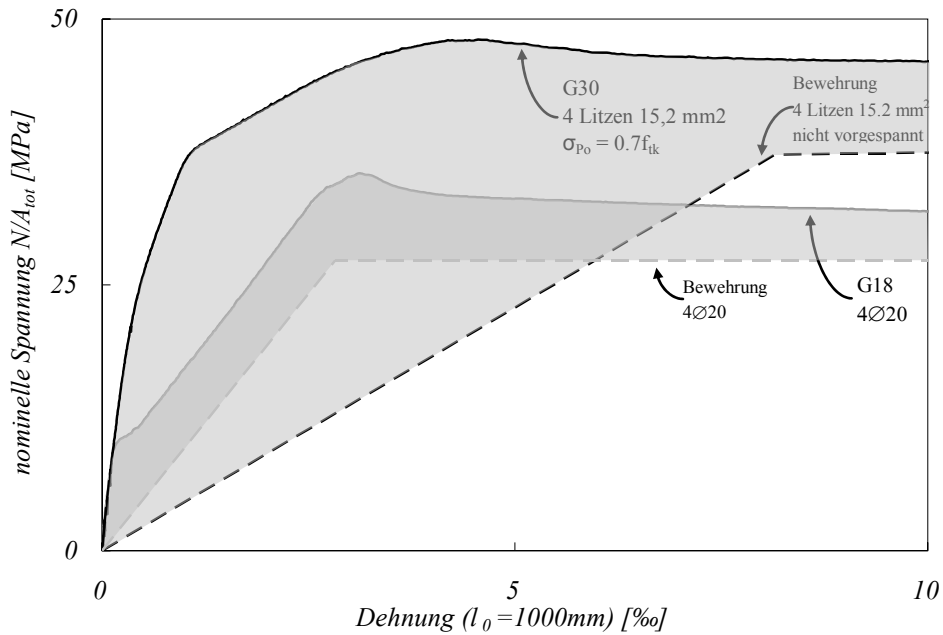


Bild 45: Spannungs – Dehnungsdiagramm des vorgespannten Zugversuchs im Vergleich mit der bewehrten Probe G18 (4Ø20)

In Tabelle 10 werden die Messwerte der Zugversuche an Bauteilen aus UHFB zusammengefasst. Die Rissbildung F_I tritt bei den unbewehrten Proben zwischen 230 und 251 kN ein. Dies bedeutet, dass nach Abzug des durch den Stahl aufgenommenen Anteils, von der Matrix eine Zugspannung $f_{ct,Matrix}$ von 8.6 bis 9.3 MPa aufgenommen wird. Dies liegt im Bereich der bei den Materialversuchen festgestellten Festigkeit von 8.9 MPa (siehe Versuchsbericht Material). Die Festigkeit der bewehrten Zugproben wird je nach eingelegter Bewehrung bei $F_I = 477$ bis 909 kN erreicht. Reduziert man diese Festigkeit um die vom Stahl aufgenommene Kraft F_s , so erhält man den Anteil der durch die Fasern aufgenommenen Spannung σ_t von 8.6 – 8.9 MPa. Dieser liegt etwas niedriger als der bei den Materialversuchen ermittelte Wert von 9.7 MPa. Dies ergibt sich, da bei Erreichen der Fließgrenze des Stahls ist bereits die Zugfestigkeit des UHFB überschritten worden und nur mehr die Zugfestigkeit im Bereich des Nachbruchverhaltens mobilisiert werden kann.

Durch den Vergleich der erzielten Matrixfestigkeiten $f_{ct,Matrix}$ bzw. Vergleich der Festigkeiten des Verbundwerkstoffes σ_{ct} bei Erreichen der Festigkeit des Probekörpers zeigt sich, dass die in Kapitel 4.6.2 diskutierte Problematik der Rissbildung im Knick keine Auswirkung auf die erzielte Festigkeit haben. Die Werte liegen im Bereich der normalen Streuung ohne Tendenz einer niedrigeren Festigkeit durch Bruch im Bereich des Knicks zu zeigen.

	F_s [kN]	Bruch	F_I [kN]	f_I [MPa]	ε_I [‰]	$f_{ct,Matrix}$ [MPa]	F_t [kN]	f_t [MPa]	ε_t [‰]	σ_{ct} [MPa]	
G20	-	-	Knick	196	7.6	0.13	7.6	-	-	-	
G19	4Ø12	252	Knick	230	9.0	0.15	8.6	477	18.6	2.74	8.9
G17	4Ø16	447	Mitte	243	9.5	0.11	9.1	662	25.9	2.84	8.7
G18	4Ø20	699	Knick	251	9.8	0.10	9.3	909	35.5	3.08	8.6
G30	4Ø15.7	1062	Knick	963	37.6	1.0	8.4	1230	48.0	4.3	11.6

Tabelle 10: Zusammenfassung der Zugversuche und Berechnung von Vergleichswerten

Mit: F_s : Kraft im Stahl berechnet aus der Fließgrenze des Stahls $F_s = f_s \cdot A_s$

- F_I bzw. f_I : gemessene Kraft / Spannung an der Grenze des ungerissenen Zustand I
- ε_I : gemessene Dehnung an der Grenze des ungerissenen Zustand I
- $f_{ct,Matrix}$: mit F_I berechnete Matrixfestigkeit $f_{ct,Matrix} = (F_I - \varepsilon_I E_s A_s) / A_{c,netto}$
- F_t bzw. f_t : gemessene Festigkeit / Spannung des Versuchskörpers
- σ_{ct} : mit F_t berechneter von dem Verbundwerkstoff (Fasern+Matrix) übernommener Festigkeitsanteil $f_{ct} = (F_t - F_s) / A_{c,netto}$
- $A_{c,netto}$: Nettofläche des Betonquerschnittes
- A_{tot} : Gesamtquerschnittsfläche zur Ermittlung der nominellen Spannungen

4.7 ZUSAMMENFASSUNG DER ERKENNTNISSE

Bei den Versuchen hat sich gezeigt, dass es während der Belastung meist zu einer mehr oder weniger starken **Verdrehung der Probekörper** kommt. Ein markanter Punkt ist hierbei das Erreichen der Zugfestigkeit der Matrix in dem die Verdrehung bzw. Verdrehungsrichtung sich sprunghaft ändert. Dieses Verhalten ergibt sich in erster Linie aus den Inhomogenitäten der Matrix (initiale Rissbildung bei Erreichen der Matrixzugfestigkeit) bzw. der Faseranordnung (Rissöffnung). Eine symmetrische Bewehrung hat hierbei einen positiven Einfluss auf die Rezentrierung des Versuchskörpers. Ohne diese kann es in gewissen Fällen zu einem asymmetrischen Versagen bei niedrigerer Festigkeit und Ausbleiben des verfestigenden Verhaltens kommen.

Durch die Belastung kommt es zu einer komplexen **Multirissbildung**. Hierbei ist zwischen den visuell einfach zu erkennenden Hauptrissen und den sehr feinen Nebenrisen zu unterscheiden. Erstere entstehen durch die vom klassischen Stahlbeton bekannten Mechanismen der Rissbildung mit einem Rissabstand von 40 - 100 mm, der sich aus der Verbundlänge mit der jeweils eingesetzten Bewehrung ergibt. Die feineren Nebenrisse bilden sich aufgrund der rissverteilenden Wirkung der Fasern im Zwischenbereich mit einem Rissabstand von rund 10 - 15 mm aus.

Die teilweise **inhomogene Verteilung und Orientierung der Fasern** in der Probe hat einen gewissen Einfluss auf das Tragverhalten der Proben. Hierbei ist insbesondere eine asymmetrische Verteilung (Rotation siehe oben) oder das Ausfallen des gesamten Querschnittes durch schichtweise Ablagerung beim Betonieren oder gar durch Betonierstöße problematisch. Kleinere lokale Inhomogenitäten können sich im Mittel über den gesamten Querschnitt wieder ausgleichen. Durch den Einsatz einer durchgehenden Bewehrung können sowohl asymmetrische Verteilungen wie auch komplett gestörte Querschnitte gut kompensiert werden.

Bei den Versuchskörpern kam es teilweise zur **Rissbildung im Bereich des Knicks** zum Übergangsbereich. Diese entstand durch Spannungskonzentrationen und lokale Reduktion der Festigkeit durch Querkraftkräfte, welche aufgrund von Umlenkkräften entstehen. Beim Vergleich mit den im konstanten Bereich gerissenen Proben und den Materialversuchen zeigt sich, dass unter Berücksichtigung des unterschiedlichen Bewehrungsgerades, das Tragverhalten der Proben und die erreichten Festigkeiten nur geringfügig von einander abweichen.

Die **Vorspannung** hat einen sehr positiven Einfluss auf Zugelemente aus UHFB. Durch das Überdrücken des Querschnittes kann sich der UHFB sehr effizient an der Abtragung der Belastung beteiligen. Die Steifigkeit im Bereich des Gebrauchszustandes wird erhöht und es ergibt sich eine grosse Verformungskapazität im Grenzzustand der Tragfähigkeit.

Es zeigt sich, dass das **Tragverhalten** eines bewehrten Zugelementes aus UHFB und die erzielten **Festigkeiten** aus der Überlagerung des Verhaltens des Verbundwerkstoffes UHFB mit dem Verhalten der Stahlbewehrung ergeben. Im Bereich vor Erreichen der Bauteilfestigkeit kann diese Überlagerung direkt erfolgen, im entfestigenden Bereich der Rissöffnung sind für die Superposition noch weitere, die differenzierte Rissbildung berücksichtigende, Betrachtungen anzustellen.

Zusammenfassend lässt sich als **Erkenntnisse für die Konzeption** von Zugelementen feststellen:

Bei Bauteilen welche nur mit Fasern bewehrt sind, führen bereits kleine Inhomogenitäten (siehe G20) zu sehr grossen Änderungen des Tragverhaltens. Bei geringen Unterschieden der Matrixfestigkeit (z.B. auf der nicht geschalteten Seite beim Betonieren) oder der Faserverteilung bzw. -orientierung kommt es zur lokalen Rissbildung ohne eine vorherige Mehrfachrissbildung. Es ist deshalb sinnvoll die Lastabtragung über zusätzliche Bewehrungselemente sicherzustellen, damit die Fasern die Aufgabe der feinen Rissverteilung zuverlässig übernehmen können. Eventuelle Fehlstellen werden dann durch die Bewehrungselemente überbrückt.

Zwang kann hingegen auch bei gewisser Inhomogenität der Fasern aufgenommen werden, da die Kraft bei eingetretener Zwangsverformung abnimmt. Hierbei ist es wichtig eine ausreichend grosse Verformungskapazität sicherzustellen, da es sonst zur Risslokalisierung kommen kann.

Dem Problem von Fehlstellen und Inhomogenitäten kann auch durch den Einsatz von statisch überbestimmten Systemen begegnet werden. Es bildet sich ein plastisches Gelenk, mit einem reduzierten Widerstand aus. Durch Lastumlagerung kann diese Schwachstelle vom statisch überbestimmten System überbrückt werden.

5 (BIEGE-) DRUCKVERSUCH

Es werden Biegedruckversuche an Bauteilen aus UHFB durchgeführt. Um eine baupraktisch relevante Analyse des Tragverhaltens zu erhalten, werden die Elemente mit einer kombinierten Druck – Biegebelastung beaufschlagt.

Es werden die Festigkeit, die Verformungseigenschaften und die Versagensarten untersucht. Hierbei werden die Momenten - Krümmungsbeziehungen für verschiedene konstante Normalkraftniveaus und verschiedene Bewehrungsgrade ermittelt.

Basierend auf den hierbei gewonnenen Erkenntnissen wird im Rahmen der Dissertation ein Model des Bauteilverhaltens von unbewehrten, bewehrten und vorgespannten Druckelementen aus UHFB entwickelt und das Druckverhalten dieser Elemente untersucht.

5.1 EINLEITUNG

Zum besseren Verständnis wird zunächst ein allgemeiner Überblick über mögliche Belastungsarten von Druckelementen in Bauwerken und deren Simulation mittels verschiedener Versuchstypen gegeben.

In Tragwerken kommt es quasi niemals zur reinen axialen Druckbelastung eines Druckelementes. Durch Imperfektionen, zeitabhängige Verformungen, planmässige geometrische Exzentrizitäten und Lastausmittungen wirkt auf die Druckstrebe jeweils eine Kombination von Druck- und Biegebelastung. Diese kann sich in Form einer Zwangsverdrehung an den Stabenden oder einer ausmittigen Wirkung der Normalkraft darstellen. Hierdurch wird das Druckelement lateral verformt und es resultieren Effekte zweiter Ordnung. Diese wirken sich insbesondere bei schlanken, nicht eingespannten, Druckstäben negativ aus, da sie zu einer zusätzlichen Erhöhung der Verformung des Systems führen.

Um das Tragverhalten eines Druckelementes umfassend zu beschreiben, sind alle möglichen Kombinationen von Moment, Normalkraft und Krümmung des Querschnittes zu berücksichtigen. Die Interaktion zwischen den Grössen kann im $M-N-\kappa$ - Raum dargestellt werden. Es ergibt sich eine räumliche Fläche, welche jede mögliche $M-N-\kappa$ Kombination für jeweils ein bestimmtes Druckglied darstellt (Bild 46). Aus dieser Fläche im $M-N-\kappa$ - Raum lassen sich durch Projektion in jeweils eine Ebene das Momenten – Krümmungsdiagramm, das Momenten – Normalkraft – Interaktionsdiagramm und die Rotationskapazität der Stütze jeweils in Abhängigkeit des dritten Parameters ablesen (Bild 47).

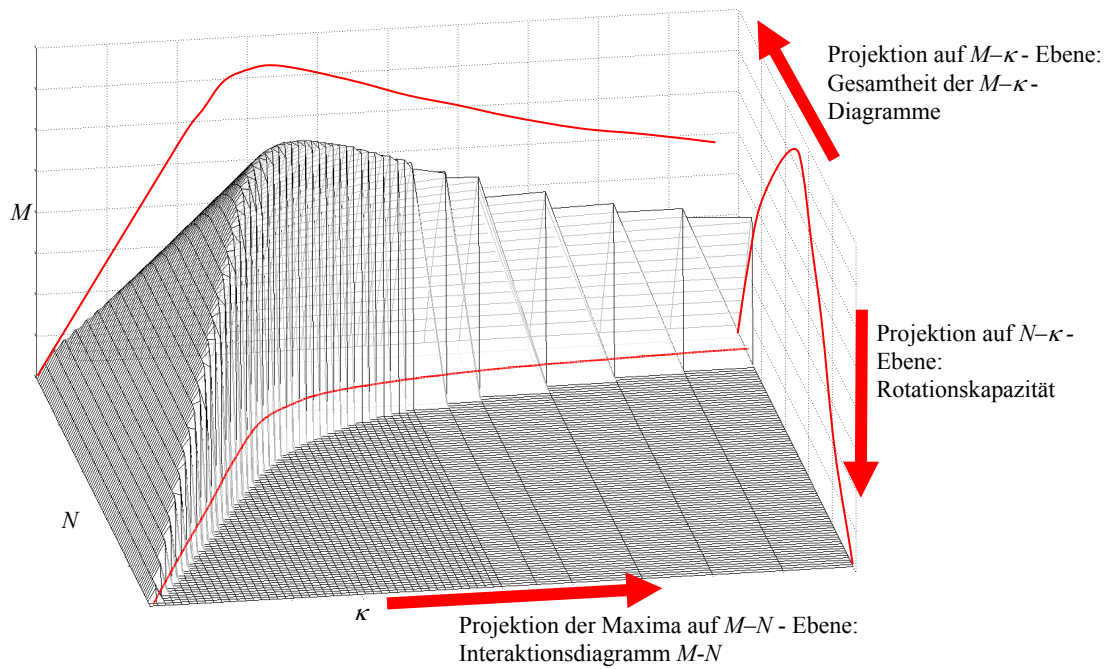


Bild 46: $M-N-\kappa$ -Fläche eines Druckelementes im $M-N-\kappa$ -Raum

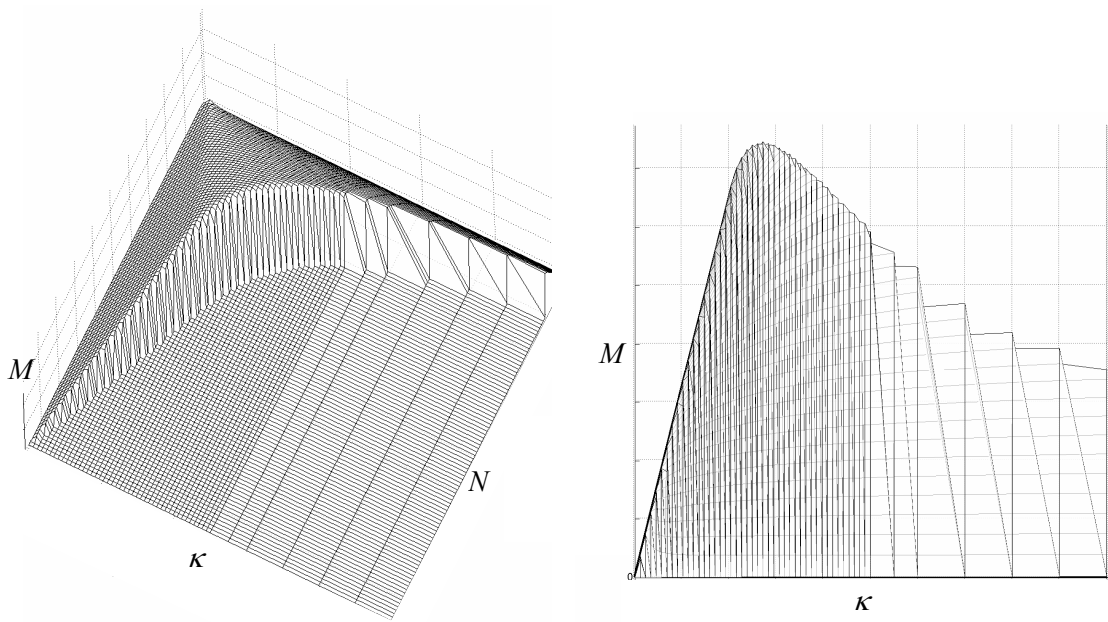


Bild 47a,b: Projektionen des $M-N-\kappa$ -Raums auf (a) die $N-\kappa$ -Ebene bzw. (b) die $M-\kappa$ -Ebene

Eine experimentelle Ermittlung der gesamten $M-N-\kappa$ -Fläche ist aufgrund des hohen Aufwandes nicht möglich, es müssen sinnvoll Versuche ausgewählt werden, um die massgebenden Kennwerte zu ermitteln. Hierbei gibt es grundsätzlich vier Versuchstypen, mit denen das Verhalten von Druckelementen untersucht werden kann:

- Typ 1: Zentrische Knickversuche (versuchstechnisch quasi nicht realisierbar!)
- Typ 2: Knickversuche mit einer initialen Exzentrizität ($e = \text{const}$, $N = \text{variabel}$).

- Typ 3: Knickversuche mit schräg gestellten Auflagern ($\varphi = \text{const}$, $N = \text{variabel}$).
- Typ 4: Versuche mit konstanter Axiallast und aufgezwungener Auflagerrotation ($N = \text{const}$, $\varphi = \text{variabel}$)

In der Literatur finden sich Versuchsreihen zu jedem hier aufgeführten Versuchstyp. Es seien hier nur zwei kurz erwähnt. Eine grosse Versuchsreihe mit Stahlbetonstützen aus Normalbeton, bei denen verschiedene Versuchstypen zum Einsatz kamen, wurden in den 80er Jahren von S. D. Busco durchgeführt [2]. Eine ergänzende Studie zu den hier dargestellten Untersuchungen wird aktuell am IS – BETON erarbeitet. Es werden Knickversuche an Stützen mit einer exzentrischen Lasteinleitung (Typ 2) durchgeführt [3].

Von den oben dargestellten Versuchstypen kommen in den meisten experimentellen Untersuchungen die Typen 2 oder 4 zur Anwendung. In Bild 48 sind die beiden Typen schematisch dargestellt.

Die Versuche des Typs 2 (Knickversuch) durchlaufen eine schief im Raum liegende gekrümmte Ebene (Bild 48a). Die Neigung hängt hierbei von der Grösse der Exzentrizität und dem sich daraus ergebenden Verhältnis von M zu N ab. Der Einfluss der 2. Ordnung führt zur Verkrümmung der Ebene, wobei diese entgegen der Darstellung nicht zwingend über den gesamten Bereich gleichmässig ist. Der Extremfall des zentrischen Drucks würde sich als eine von der $N - \kappa$ Grundfläche aufwölbende Ebene darstellen.

Die Versuche mit konstanter Normalkraft und aufgezwungener Randverdrehung (Bild 48b) verlaufen hingegen in einer klar definierten Ebene. Sie repräsentieren direkt das $M - \kappa$ - Diagramm für eine bestimmte Normalkraft.

Um die gesamte $M-N-\kappa$ - Fläche mit Versuchen abzudecken, kann bei Typ 2 die Exzentrizität e variiert werden. Dies führt bei extremen Werten für e mitunter zu Problemen, wodurch ein Abdecken der gesamten $M-N-\kappa$ - Fläche problematisch ist. Mit Typ 4 kann sehr systematisch durch Variation von N der komplette Bereich untersucht werden.

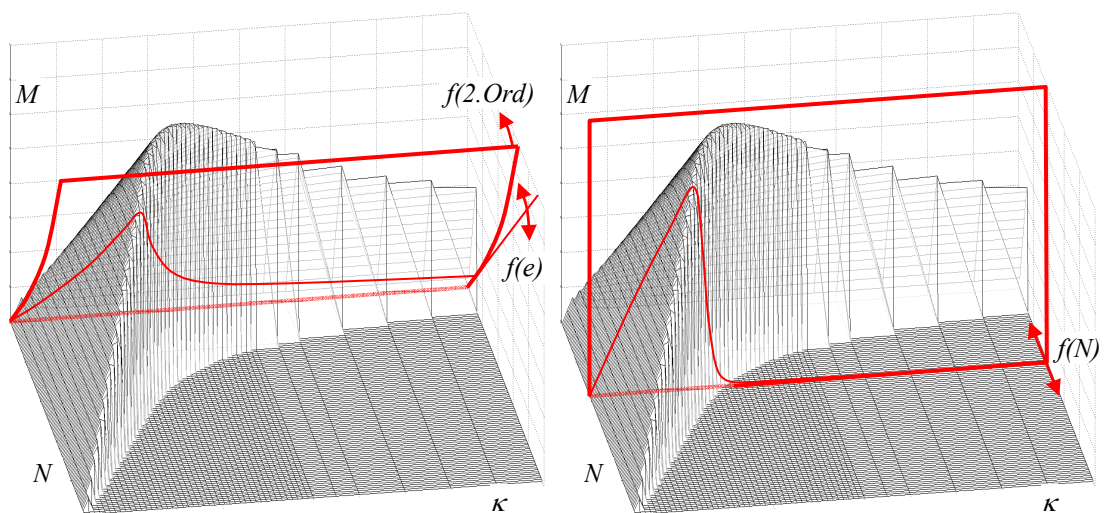


Bild 48a,b: Schematische Darstellung der Versuchstypen 2 und 4 im $M-N-\kappa$ - Raum mit Angabe der Variationsparameter

5.2 VERSUCHSPARAMETER

Für die hier dargestellten Versuche kommt der Versuchstyp 4 zum Einsatz, da hier die Eingangswerte N und M an beiden Rändern genau gesteuert werden können und somit eine genaue Auswertung der Versuche möglich ist. Des Weiteren kann aus den Versuchen die Momenten - Krümmungsbeziehung (M - κ - Diagramm) für eine vorgegebene Axialkraft N direkt abgeleitet werden.

Die getesteten Druckelemente weisen eine quadratische Querschnittsfläche mit einer Kantenlänge von 160 x 160 mm ($A = 25600 \text{ mm}^2$) auf. Seine Länge beträgt 1500 mm bei 1000 mm Messlänge (Details siehe Abschnitt Probekörper). Es ergibt sich für den unbewehrten Querschnitt eine Schlankheit von:

$$\lambda = \frac{s_k}{i} = \frac{s_k}{\sqrt{\frac{I}{A}}} = 32.5 \quad (17)$$

Neben Versuchen an nur faserbewehrten Proben werden auch zusätzlich Stabstahl bewehrte bzw. vorgespannte Proben untersucht. Für die 3 Serien kommen folgende Probekörper zum Einsatz:

Kriterien	A_c [mm ²]	gewählt	$A_S ; A_P$ [mm ²]	$F_S ; F_P$ [kN]	P_P [kN]	$\rho = \frac{A_S}{A_c - A_S}$ [%]	ρ_{bez} [%]
Unbewehrt	25600	-	-	-	-	-	-
Bewehrt	24344	4Ø20	1256	628	-	4.1%	0.8%
Vorgespannt	25000	4T15	600	1062	743	-	-

Tabelle 11: Bewehrung der Probekörpertypen

(Erläuterung des bezogenen Bewehrungsgrades ρ_{bez} siehe Zugelemente)

Für jede Serie werden jeweils 3 Proben hergestellt, welche auf jeweils drei unterschiedlichen Belastungsniveaus getestet werden. Die Niveaus werden für die unbewehrten Proben ermittelt und jeweils für die andern Probekörper übernommen um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Um ein möglichst gut Abdeckung des gesamten Tragbereiches des Druckelementes zu erreichen, werden die Versuche bei 30%, 50% und 70% der Festigkeit durchgeführt.

Die Festigkeit der unbewehrten Probe unter Annahme eines perfekt zentrischen Drucks ergibt sich zu:

$$F_c = A_c \cdot f_c = 25600 \text{ mm}^2 \cdot 190 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 4864 \text{ kN} \quad (18)$$

Entsprechend werden die Proben wie folgt belastet:

Kriterien	F_c [kN]	$F_S F_P$ [kN]	F_{tot} [kN]	$0.7 F_c$ [kN]	$0.5 F_c$ [kN]	$0.3 F_c$ [kN]
Unbewehrt	4864	-	4864	3500	2500	1500
Bewehrt	4864	628	5492	3500	2500	1500
Vorgespannt	4864	670	4194	3500	2500	1500

Tabelle 12: Festigkeit und Lastniveaus der Probekörpertypen

5.3 VERSUCHSAUFBAU

Der Probekörper ist in einem System mit beidseitigen Hebelarmen welche mit zwei Hydraulikzylindern miteinander verbunden sind montiert (siehe Bild 49). Dieses System ist mittels zweier Kippklager in eine 10 MN Trebel Prüfmaschine der Firma Schenk montiert. Somit kann mit der Prüfmaschine eine beliebige axiale Belastung aufgebracht werden, welche unabhängig von einer durch das Pressenpaar eingetragenen Zwangsverformung ist.

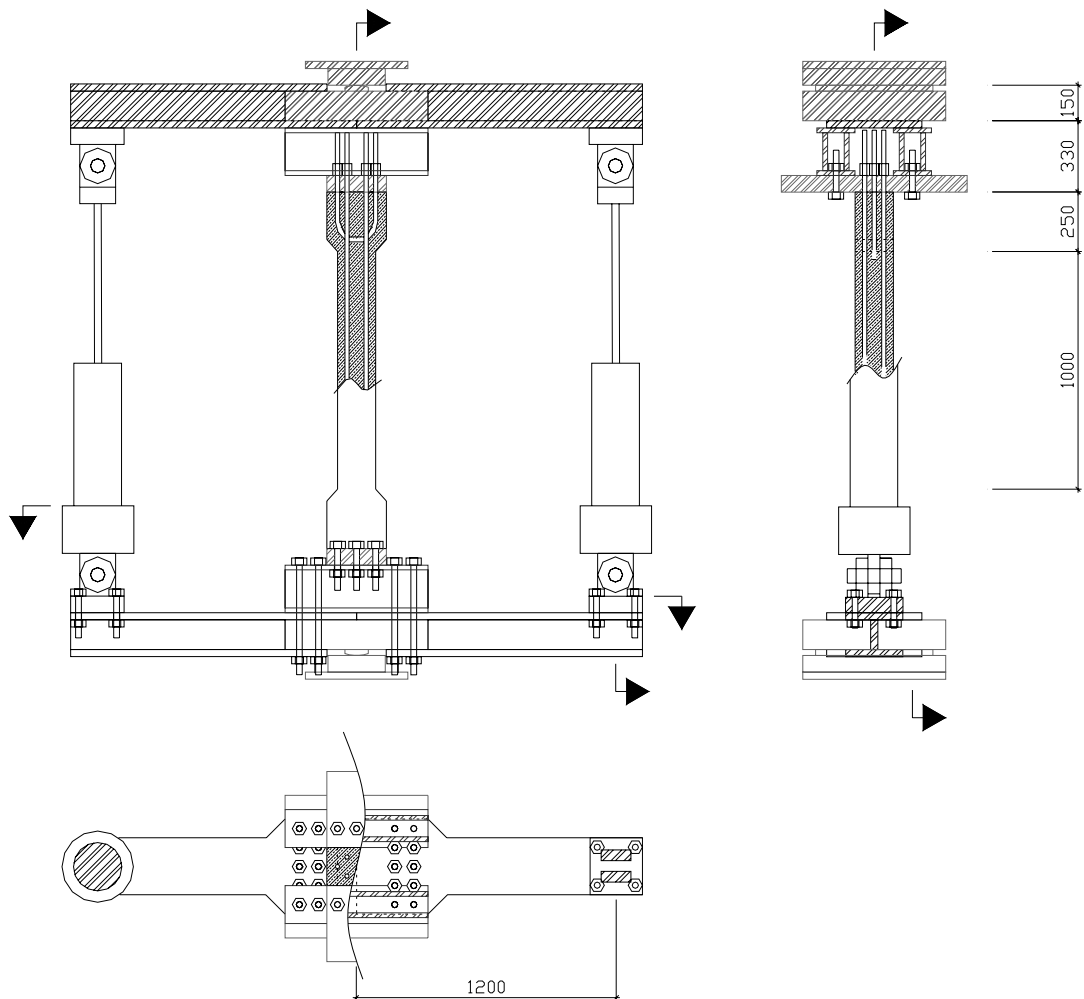


Bild 49: Konstruktionszeichnung des Versuchstandes

Aufgrund des für die eine Befestigung der Probe im Versuchsstand nötigen Platzes, ergibt sich ein relativ grosser Abstand zwischen dem Rotationsnullpunkt des Kippklagers und der Probe. Dies für im ausgelenkten Zustand zu einem Hebelarm, welcher bei Betrachtungen 2. Ordnung zu berücksichtigen ist.

Durch die besondere Bauart des Kippklagers befindet sich dessen Rotationsnullpunkt auf der jeweils zur Probe orientierten Oberfläche der Lagerplatte (siehe Bild 50). Durch Abrollen der Lagerwalze des Kippklagers kommt es zu einer lateralen Verschiebung der Wirkungslinie der Axialkraft.

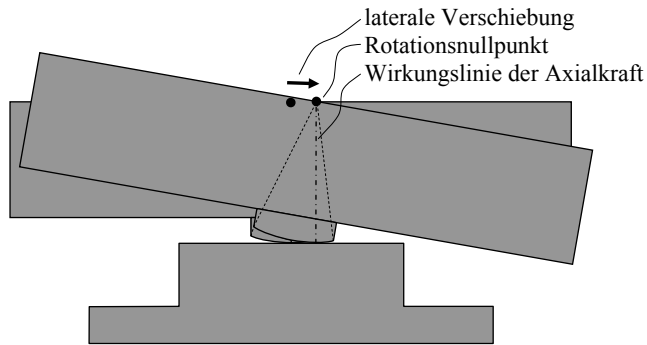


Bild 50: Kinematik des Linienlagers

Bild 51 zeigt den in die 10 MN Prüfmaschine eingebauten Versuchsstand in der Ansicht.

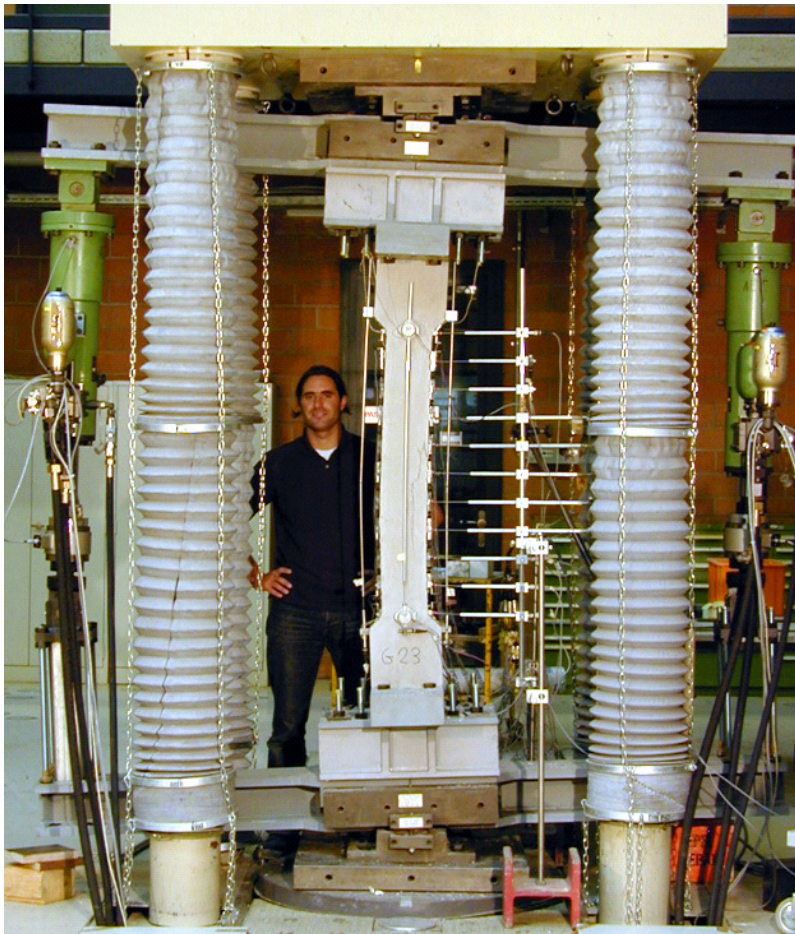


Bild 51: Versuchsstand eingebaut in die 10 MN Prüfmaschine Schenk - Trebel

5.4 MESSEINRICHTUNG

Längs der Probe werden Messungen im Abstand von 10 cm durchgeführt. Hierbei wird die seitliche Auslenkung, sowie die Dehnung jeweils der gedrückten und gezogenen Randfaser erfasst (siehe Bild 52). Zusätzlich werden die Längsverformung der Probe und die Rotation am Rand der Messzone aufgezeichnet.

Somit lassen sich sowohl die globalen Vorgänge (Verdrehung der Probe, Längenänderung) als auch lokale Vorgänge (Krümmung in den Schnitten, seitliche Auslenkung, Rissbildung / Plastifizieren) erfassen.

Neben den Dehnungs- und Verformungsmessungen werden auch die Kolbenwege und Kräfte der Hebelpressen und der zentralen Presse der Prüfmaschine aufgezeichnet.

Die Aufzeichnung erfolgt mittels eines digitalen Messverstärkers UPM60 und einem PC zum Speichern der Messwerte. Die Messwerte werden in einem Intervall von 1 – 5 Sekunden aufgezeichnet.

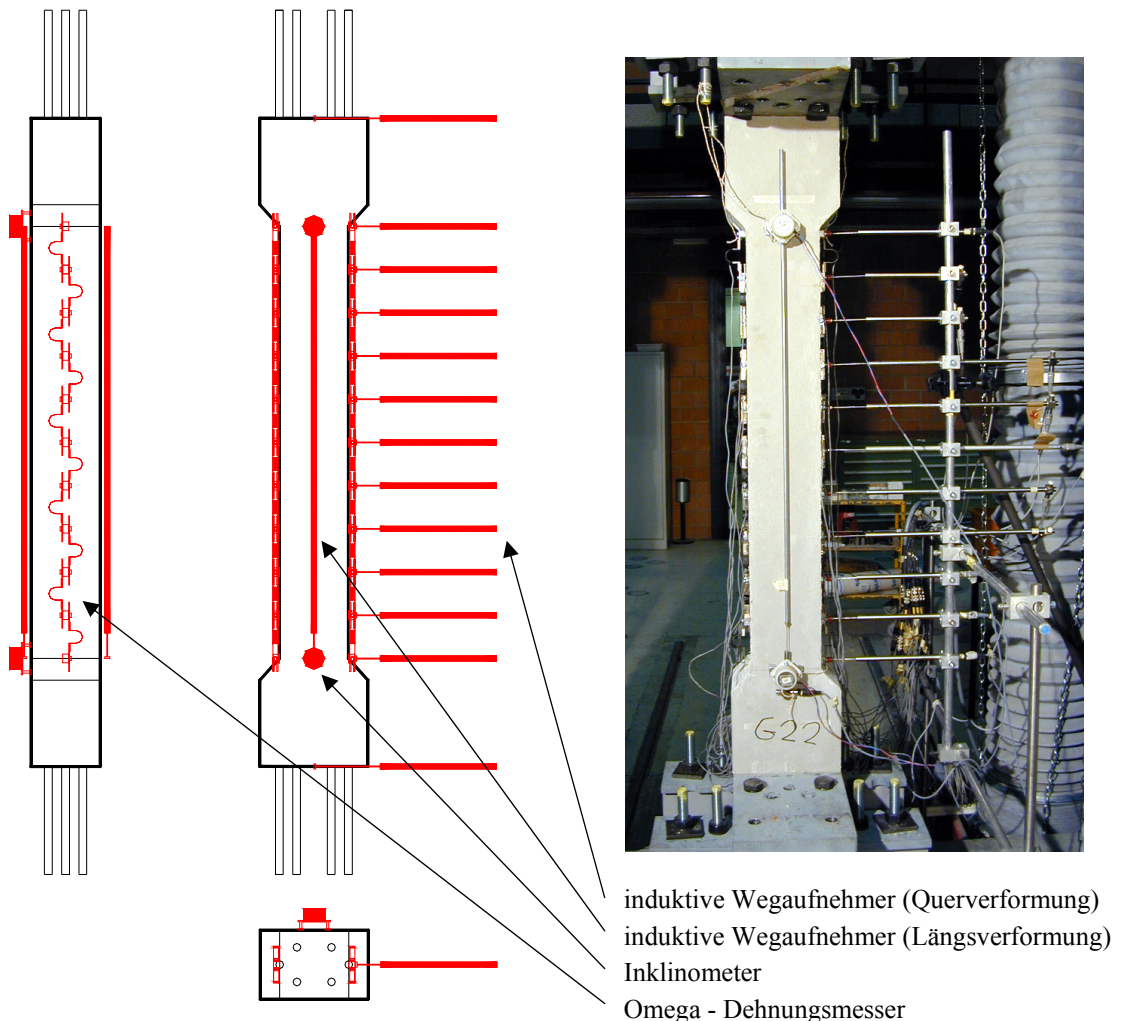


Bild 52: Messeinrichtung der Druckversuche

5.5 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Bei konstanter Normalkraft wird mittels des Pressenpaars eine beidseitig symmetrische Rotation auf die Probe aufgebracht (Bild 53). Der Verlauf der Belastung stellt sich in einem Interaktionsdiagramm $M-N$ zunächst als eine gerade auf der N – Achse (Hochachse) dar. Bei konstanter Normalkraft wird folgend ein Moment bis zum Versagen aufgebracht.

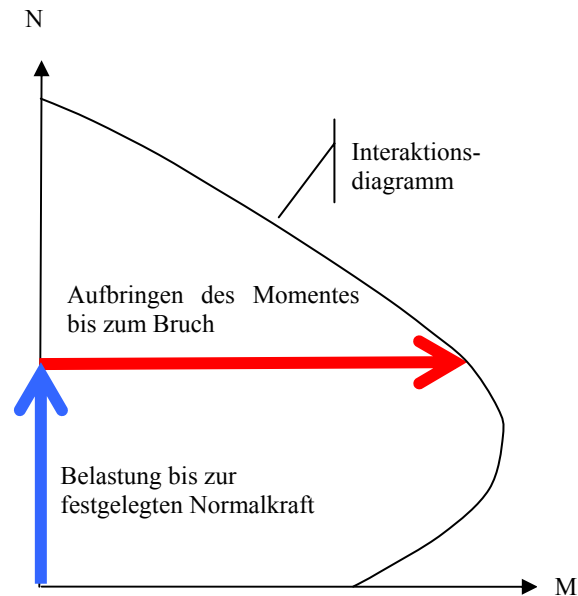
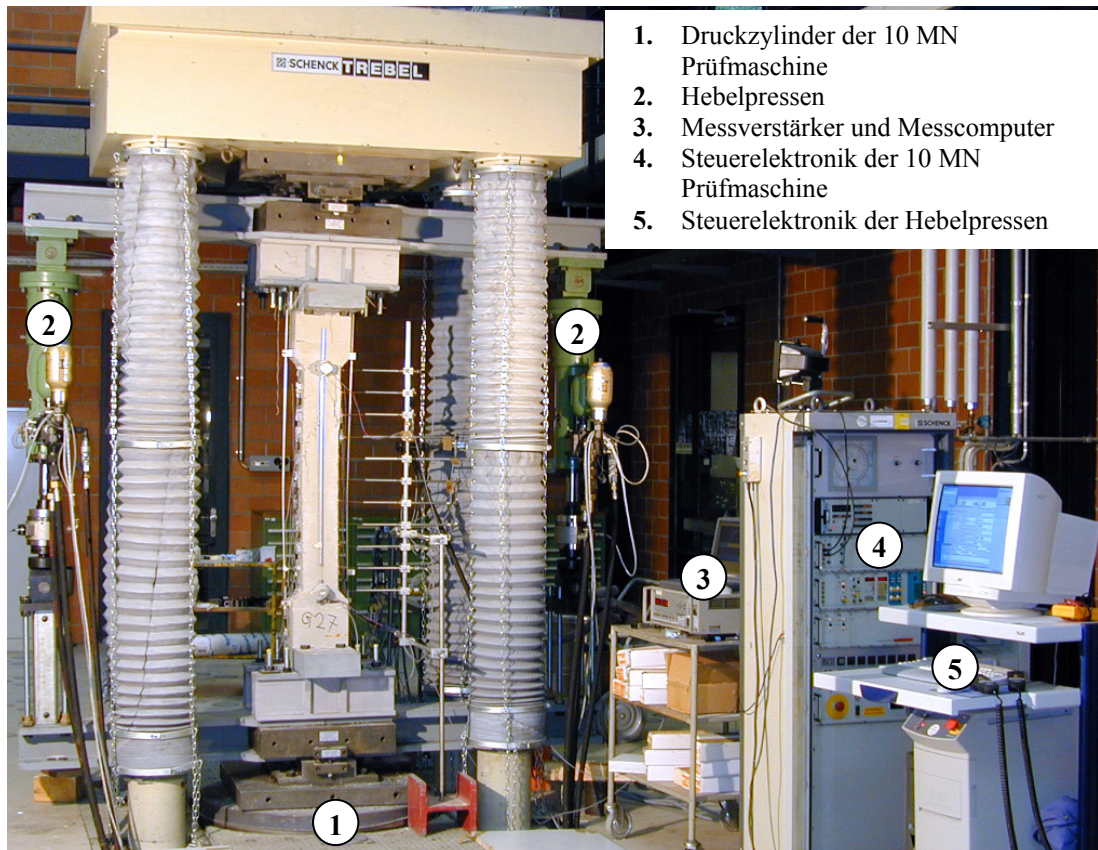


Bild 53: Belastungsschema

Hierzu wird bei entkoppelten Hebelpressen die vorgesehene Normalkraft mittels der 10 MN Prüfmaschine aufgebracht (Bild 54). Die Steuerelektronik wird derart geregelt, dass die Kraft konstant gehalten wird. Nun werden die Hebelpressen eingekoppelt und die komplette Messtechnik bis auf die Kraftmessung und die Pressenwege auf Null gesetzt. Die Messeinrichtung wird gestartet und mittels der Hebelpressen wird mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit von 25 mm/h die Verdrehung aufgebracht. Die Steuerelektronik ist hierbei derart geregelt, dass die rechte Presse gesteuert wird und die linke Presse der Verformung in entgegengesetzter Richtung folgt. Somit wird eine gleichmässige beidseitige Zwangsverdrehung aufgebracht, ohne dabei die axial wirkende Kraft zu beeinflussen.

Ab dem Erreichen der Festigkeit des Druckgliedes und somit der Plastifizierung des Querschnittes ist es nicht mehr möglich die Normalkraft aufrecht zu erhalten, da sonst der Querschnitt von der kraftgesteuerten Presse schlagartig zerdrückt würde. Deshalb wird für die Aufzeichnung des entfestigenden Bereiches der Druckzylinder der Prüfmaschine blockiert und die Längsverformung konstant gehalten.



1. Druckzylinder der 10 MN Prüfmaschine
2. Hebelpressen
3. Messverstärker und Messcomputer
4. Steuerelektronik der 10 MN Prüfmaschine
5. Steuerelektronik der Hebelpressen

Bild 54: Versuchstand mit Mess- und Steuertechnik bestehend aus der Messeinheit UPM60, Steuerschrank der Prüfmaschine Schenk – Trebel 10 MN und der Steuereinheit der Hebelpressen (von rechts nach links)

5.6 GEOMETRIE, KINEMATIK UND KRÄFTE AM VERSUCHSSTAND

Um aus den Messwerten und der Belastung, die Last und die Verformungen bzw. später die Verdrehung, Krümmung und Steifigkeit des Probekörpers ermitteln zu können, ist zunächst die Geometrie und Kinematik des Versuchstandes näher zu betrachten. Bild 55 zeigt das verformte System mit den verschiedenen für die weiteren Untersuchungen in Betracht zu ziehenden Exzentrizitäten e .

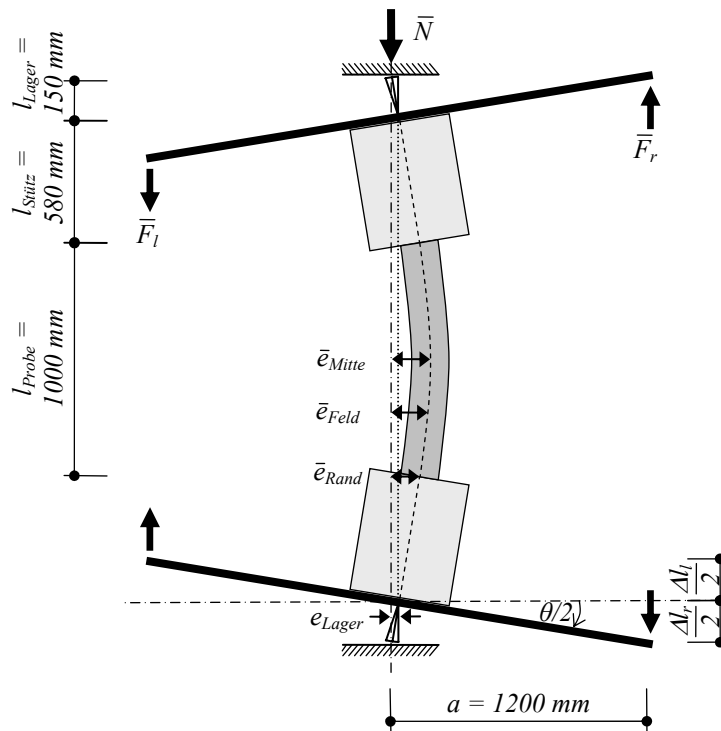


Bild 55: Geometrische und kinematische Zusammenhänge am verformten System (inkl. Verschiebung im Gelenk)

In (19) sind die Zusammenhänge zwischen der gemessenen Exzentrizität \bar{e} und der statischen Exzentrizität (Abstand gegenüber der Wirkungslinie der Axiallast) e dargestellt. Hierbei liegt neben den Exzentrizitäten \bar{e}_{Rand} , \bar{e}_{Mitte} und verschiedenen Messwerten $\bar{e}_{Feld}(x)$ auch der Verdrehungswinkel θ der Ränder der Messzone als Messwert vor.

$$\begin{aligned}
 e_{Lager} &= \frac{\theta}{2} \cdot l_{Lager} \\
 e_{Rand} &= \bar{e}_{Rand} - e_{Lager} \\
 e_{Mitte} &= \bar{e}_{Mitte} - e_{Lager} \\
 e_{Feld}(x) &= \bar{e}_{Feld}(x) - e_{Lager}
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

Um einen Bezug zur Norm SIA 262 [5] (siehe Bild 56) herzustellen, sind in (20) die Beziehungen für die dort definierten Exzentrizitäten e_2 und e_3 dargestellt.

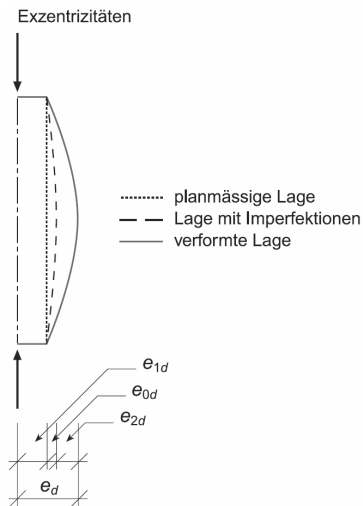


Bild 56: Definition der Exzentrizitäten nach Norm SIA 262 [5]

$$\begin{aligned}
 e_{2,\max} &= e_{\text{Mitte}} - e_{\text{Rand}} \\
 e_2(x) &= e_{\text{Feld}}(x) - e_{\text{Rand}} \\
 e_3 &= e_{\text{Rand}}
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

Die Exzentrizität e_0 (Imperfektion des Versuchskörpers) ist aufgrund der hohen Präzision der Schalung und dem durch die Bewehrungselemente sichergestellten zentrischen Einbau gering und kann deshalb vernachlässigt werden. Die planmässige Ausmitte e_1 wird hier durch das aufgebrachte Zwangsmoment berücksichtigt.

Bild 57 zeigt am statischen System die Wirkung der Pressenkräfte auf den Probekörper und die daraus resultierende Normalkraft und Momentenverläufe am reduzierten statischen System. Das Moment zweiter Ordnung setzt sich hierbei aus dem Moment, das sich aufgrund der Exzentrizität am Rand der Messstrecke ergibt und dem Moment aufgrund der Durchbiegung des Probekörpers zusammen.

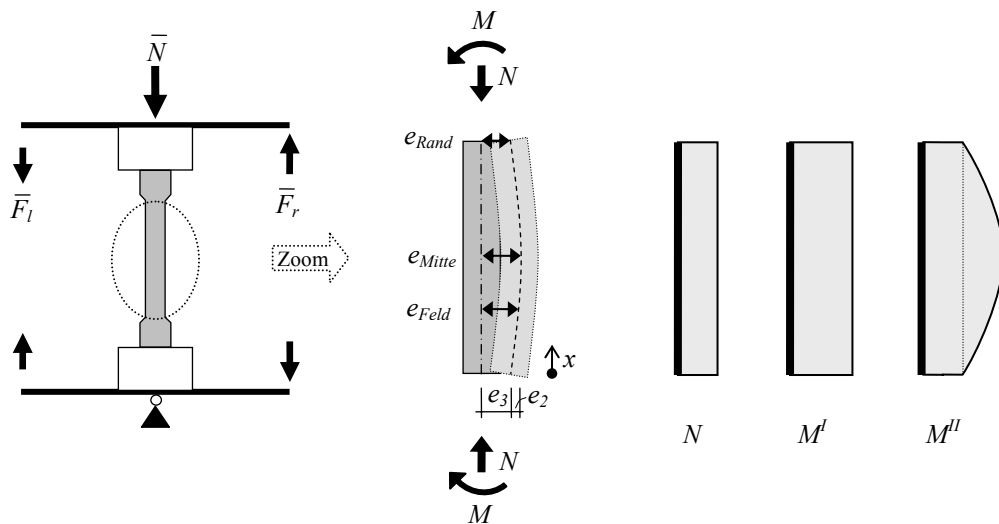


Bild 57: Statisches System bzw. reduziertes statisches System und Schnittkräfte des Versuchsaufbaus. (Momentenverlauf aufgrund Zwangsverdrehung M^I , Verformung des Prüfkörpers bzw. Veränderung der Geometrie des Versuchstandes M^{II})

Mit der gemessenen Normalkraft \bar{N} , den Pressenkräften \bar{F}_l & \bar{F}_r und den Exzentrizitäten lassen sich die auf die Probe wirkende Normalkraft N sowie die Momente wie folgt ermitteln:

$$\begin{aligned}
 N &= \bar{N} + (F_l - F_r) \\
 M^I &= (F_l + F_r) \cdot a \\
 M_{\max}^{II} &= N \cdot e_{\text{Mitte}} = N \cdot (e_2 + e_3) \\
 M^{II}(x) &= N \cdot e_{\text{Feld}}(x) = N \cdot (e_2(x) + e_3) \\
 M_{\text{Rand}}^{II} &= N \cdot e_{\text{Rand}} = N \cdot e_3
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

Die Beziehungen von Verdrehungswinkel, der Dehnung der Randfaser und der Krümmung zeigt Bild 58. Hierbei muss beachtet werden, dass von den Omega – Dehnungsmessern ein $\Delta\varepsilon$ und nicht die absolute Dehnung inklusive der Normalkraftverformung gemessen wird, da sie nach Aufbringen der Axiallast auf Null gesetzt werden.

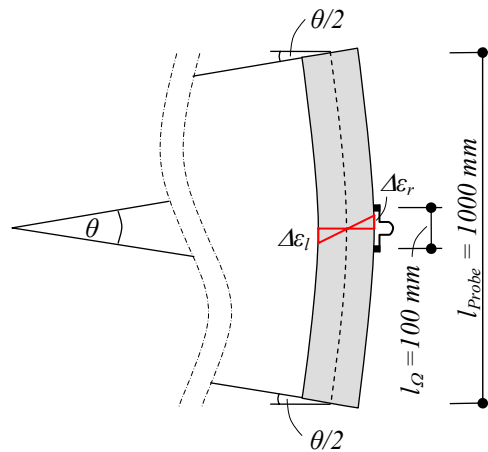


Bild 58: Zusammenhänge zwischen Verdrehungswinkel, Krümmung und Verformung der Randfasern

Aufgrund der geometrischen Beziehungen lässt sich die Verdrehung θ und entsprechend die Krümmung κ ermitteln:

$$\begin{aligned}
 \theta &= \frac{(\Delta\varepsilon_l - \Delta\varepsilon_r)l}{d} \\
 \kappa &= \frac{\theta}{l} = \frac{\Delta\varepsilon_l - \Delta\varepsilon_r}{d}
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

Für die Höhe des Hebelarms d ergibt sich für die liegend montierten mittleren Omega – Dehnungsmesser 180 mm (Prüfkörperdicke + 2 * Höhe der Befestigungselemente). Die am Rand montierten Omega – Dehnungsmesser sind stehend befestigt, weshalb ein Hebelarm von $d_{\text{Rand}} = 240$ mm zu anzusetzen ist.

5.7 VERSUCHSERGEBNISSE

Es erfolgt zunächst eine Grundausswertung der Versuchsergebnisse jeder einzelnen Stütze, in der die Ergebnisse in Diagrammen ausführlich dargestellt werden. Ergänzt

wird dies durch Fotos der Bruchentwicklung und des Bruchbildes, sowie einer Beschreibung der speziellen Vorgänge und Besonderheiten des jeweiligen Probekörpers.

Tabelle 13 zeigt einen Überblick der Versuchsparameter der Versuchskörper geordnet nach den verschiedenen axialen Belastungsniveaus und nach den Bewehrungstypen. In selbiger Reihenfolge ist auch die anschließende Grundausswertung sortiert.

Belastung [MN]	Bewehrung	Versuchskörper
1.5	unbewehrt	G22
1.5	4 Ø20	G23
1.5	4 Ø15.7	G29
2.5	unbewehrt	G21
2.5	4 Ø20	G24
2.5	4 Ø15.7	G27
3.5	unbewehrt	G26
3.5	4 Ø20	G25
3.5	4 Ø15.7	G28

Tabelle 13: Übersicht der Versuchsparameter (Axialbelastung und Bewehrung) der einzelnen Versuchskörper

Im Einzelnen enthält die Grundausswertung folgende Untersuchungen:

FOTOGRAFISCHE DOKUMENTATION

Anhand von Fotos werden der Versuchsverlauf, sowie das Bruchbild und die Bruchlokalisierung dokumentiert. Hierbei erfolgt die Verformung der Probe entgegen der ansonsten aus darstellungstechnischen Gründen gewählten Richtung jeweils nach links.

- (a) Entwicklung der Rissbildung
- (b) Lokalisierung des Bruches innerhalb des Probekörpers
- (c) Detailaufnahmen der Bruchzone

ANALYSE DES BELASTUNGSVERLAUFES

- (a) Normalkraft – Momentendiagramm

Das Normalkraft – Momentendiagramm zeigt die auf die Probe wirkende Normalkraft N [kN] aufgetragen gegenüber dem aus der Zwangsverdrehung resultierenden Momentes $M_{Mitte,tot}$ [kNm] in Probenmitte (1. + 2. Ordnung). Als schwarze Linie ist zusätzlich der Sollwert der Axialbelastung angegeben. Mit diesem Diagramm kann der Verlauf der Belastung untersucht werden.

Bei allen Versuchen zeigt sich bis zum maximalen Moment jeweils nur eine sehr geringe Abweichung von der Sollkraft. Erst nach Überschreiten des maximalen Momentes fällt die Normalkraft ab, da der Versuch hier nur mehr mit blockierter Längsverformung gefahren werden kann (siehe 5.5 Versuchsdurchführung).

- (b) Momenten - Krümmungsdiagramm

Im Momenten – Krümmungsdiagramm wird das resultierende Moment M [kNm] für die verschiedenen Verkrümmungszustände κ [1/m] dargestellt. Aufgrund der konstant gehaltenen Normalkraft N (siehe (a)) stellt sich das M - κ -Diagramm bis zum Erreichen der Biegefestigkeit in der besonderen Form mit konstanter

Normalkraft dar. Im weniger relevanten entfestigenden Bereich ist dies nicht mehr gegeben.

Die Betrachtung erfolgt einerseits mit der mittleren Krümmung ($\theta_{Rand} / l_{Probe}$) für die Momente (M_{tot} , M^I , M^{II}), sowie andererseits für die lokalen Momente $M(x)$ (Mittel $M(x)$, $M(x) Rand$, $M(x)$) gegenüber den lokalen Krümmungen $\kappa(x)$ aus den gemessenen Dehnungen der Randfasern. Letztere Auswertung erfolgt jeweils nur bis zum Erreichen der Festigkeit, da sich im Nachbruchbereich eine starke Lokalisierung Krümmung ergibt.

Die einzelnen ausgewerteten Momente ergeben sich wie folgt:

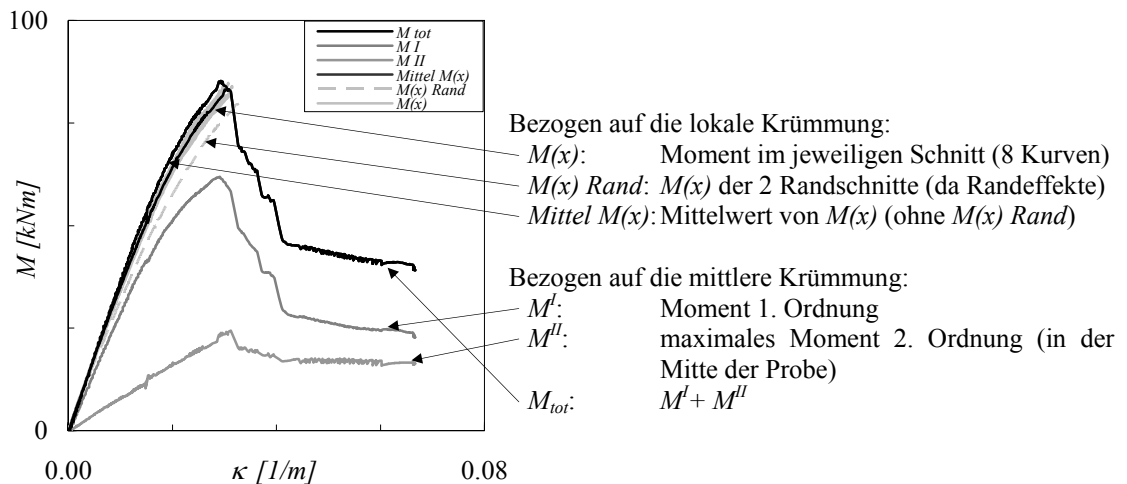


Bild 59: Beispiel eines Momenten – Krümmungsdiagramms mit Erläuterung der einzelnen Kurven

BETRACHTUNG DISKRETER LASTSTUFEN

Es wird eine Analyse der Zustände längs des Probekörpers bei verschiedenen diskreten Laststufen durchgeführt. Die Laststufen sind hierbei auf das Moment 1. Ordnung bezogen und unterteilen sich in die Zwischenschritte $\frac{1}{4} M_{max}^I$, $\frac{1}{2} M_{max}^I$, $\frac{3}{4} M_{max}^I$ und M_{max}^I . Ergänzend werden für die Auslenkung die Stufen θ_{max} und $(\theta(M_{max}^I) + \theta_{max})/2$ betrachtet.

(a) Auslenkung

Verlauf der Auslenkung $e(x)$ gegenüber der initialen Achse der Probe.

(b) Moment

Momentenverlauf $M(x)$ des gesamten Momentes und des Momentes 1. Ordnung (gestrichelt dargestellt).

(c) Dehnung der Randfaser

Dehnungsverlauf der jeweils linken und rechten Randfasern. Bei der gemessenen Dehnung handelt es sich um eine Dehnungsänderung, da die Messungen nach Aufbringen der Normalkraft auf Null zurückgesetzt wurden. Im Bereich der Randschnitte zeigt sich, dass mitunter ein Randeffekt auftritt, der einen Einfluss auf die Krümmung in diesem Bereich hat.

(d) Krümmung

Krümmungsverlauf $\kappa(x)$ der einzelnen Schnitte und mittlere Krümmung κ aus der Randverdrehung (gestrichelt dargestellt).

KOMMENTAR ZU BESONDERHEITEN DES EINZELNEN VERSUCHS

Beschreibung der besonderen Vorgänge, Ereignisse und Ergebnisse des jeweiligen Versuchs.

FOTOGRAFISCHE DOKUMENTATION

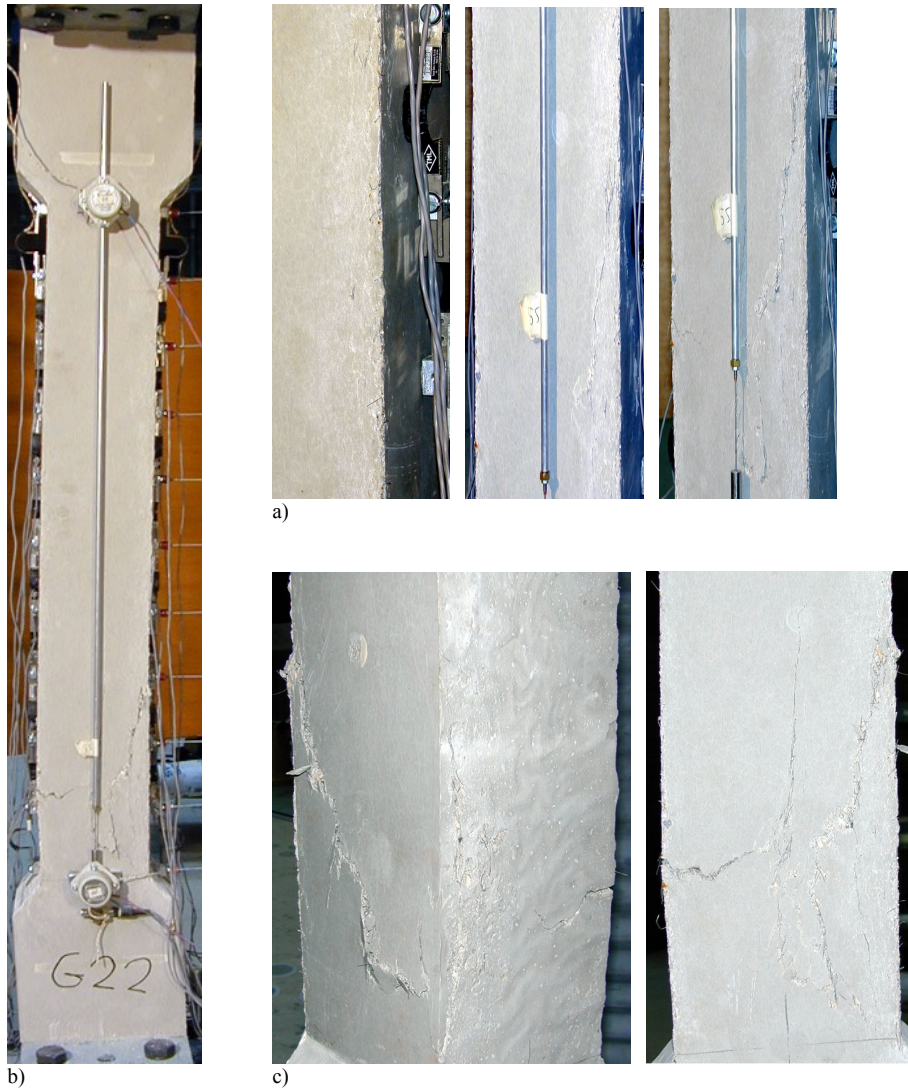


Bild 60a-c: Entwicklung des Bruches (a), Versuchskörper nach der Belastung (b) und Details der Bruchzone (c)

ANALYSE DES BELASTUNGSVERLAUFES

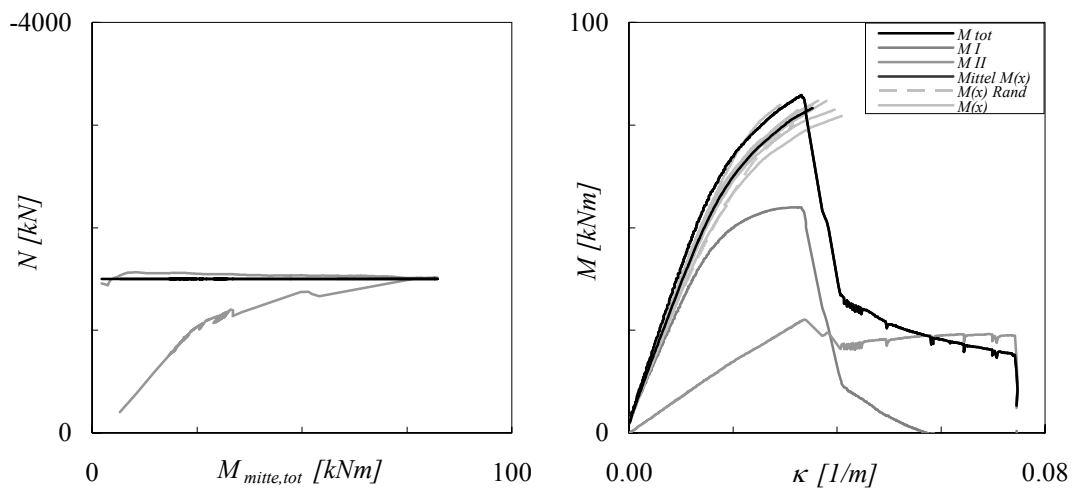


Bild 61a,b: Normalkraft – Momentenverlauf (a) und Momenten – Krümmungsverlauf (b)

BETRACHTUNG DISKRETER LASTSTUFEN

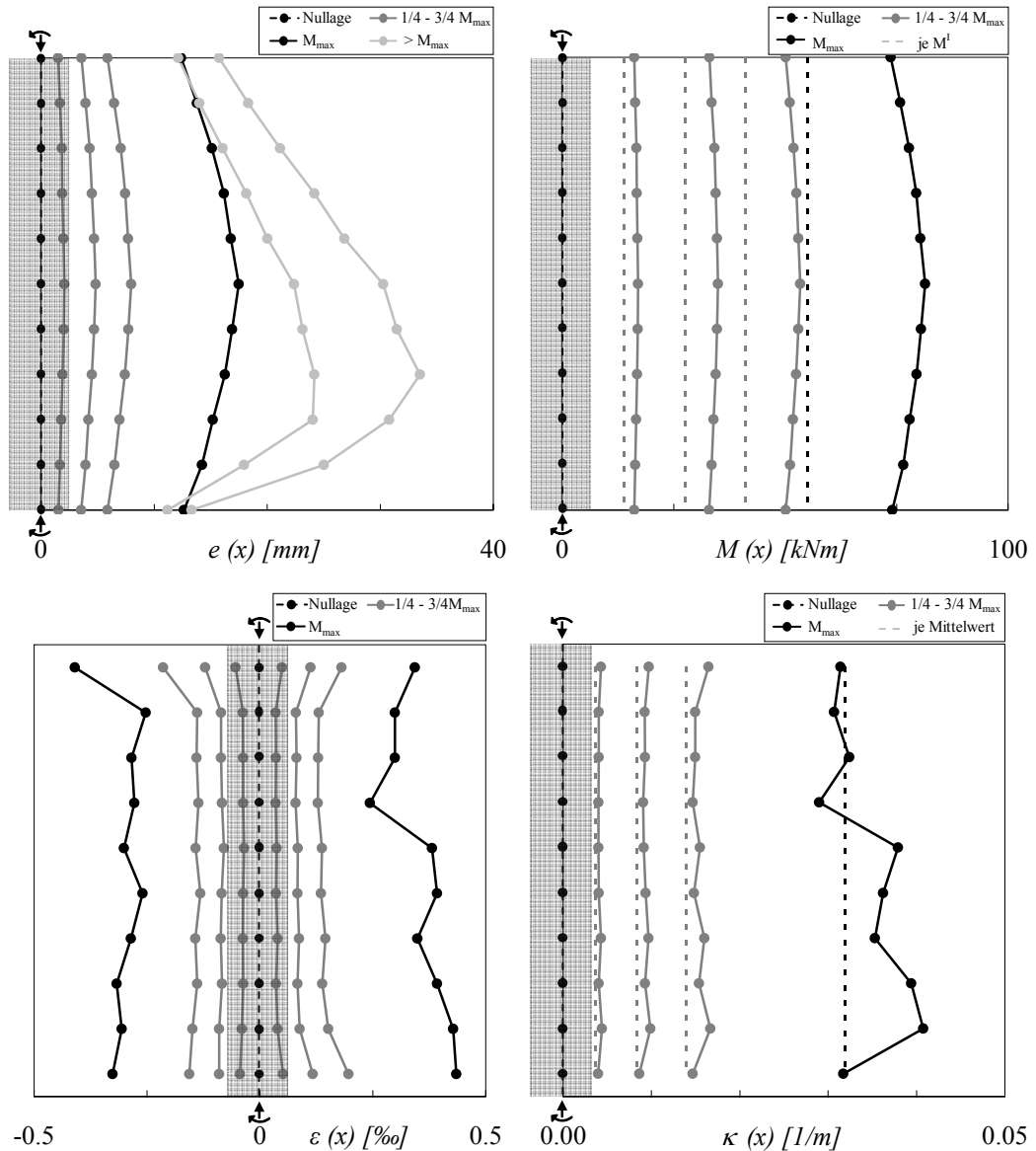


Bild 62a-d: Schnittweise Analyse längs des Prüfkörpers $l(x)$ jeweils für die Laststufen Nullage, $1/4 - 3/4 M_{max}$, M_{max} und teilw. $>M_{max}$: (a) Auslenkung $e(x)$, (b) Moment $M(x)$ inkl. M^l , (c) Dehnung der Randfaser $\varepsilon(x)$, (d) Krümmung $\kappa(x)$ inkl. mittlere Krümmung κ aus der Randverdrehung θ

KOMMENTAR ZU BESONDERHEITEN DES EINZELNEN VERSUCHS

Bruchbild und Ablauf des Versagens:

- Auf der Druckseite bilden sich zunächst kleine Längsrisse aus (unteres $1/4$).
- Es erfolgt ein sanfter duktiler Bruch der Druckzone (ca. $1/3$ QS-Tiefe) mit gleichzeitigem Öffnen eines Zugrisses (ca. $1/3$ QS-Tiefe).
- In der Mitte des Bruchquerschnittes bildet sich ein annähernd unzerstörter Bereich aus (ca. $1/3$ QS-Tiefe), welcher der sich plastisch verformt (plastisches Gelenk).

Verläufe und Schnittanalyse:

- Die Normalkraft fällt langsam ab jedoch schneller als bei einer bewehrten Probe.
- Es kommt zu einer Umkehrung des Momentes 1. Ordnung (\Rightarrow Stabilität).
- Die Schnittanalyse zeigt deutlich die Bruchlokalisierung.

FOTOGRAFISCHE DOKUMENTATION

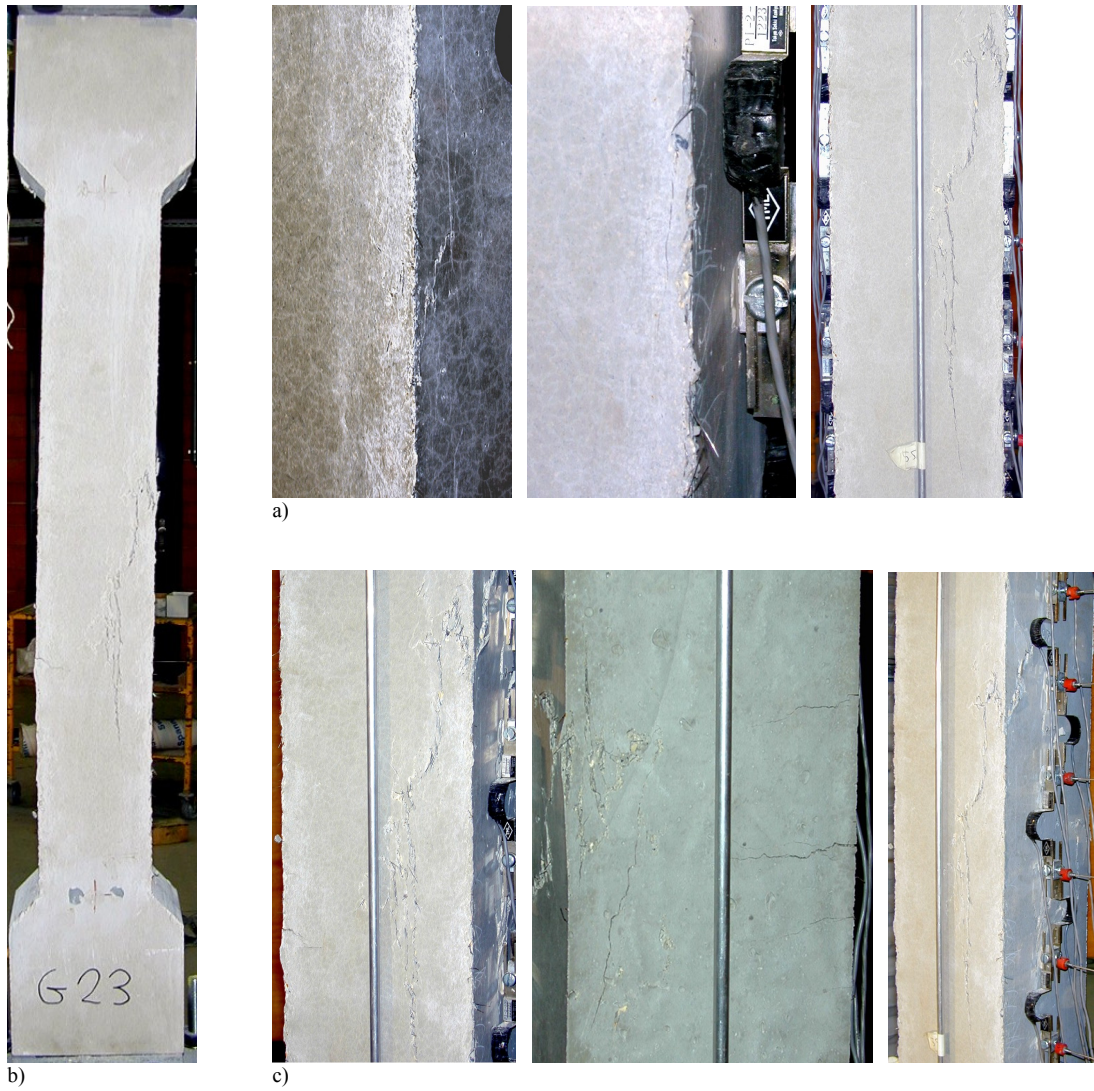


Bild 63a-c: Entwicklung des Bruches (a), Versuchskörper nach der Belastung (b) und Details der Bruchzone (c)

ANALYSE DES BELASTUNGSVERLAUFES

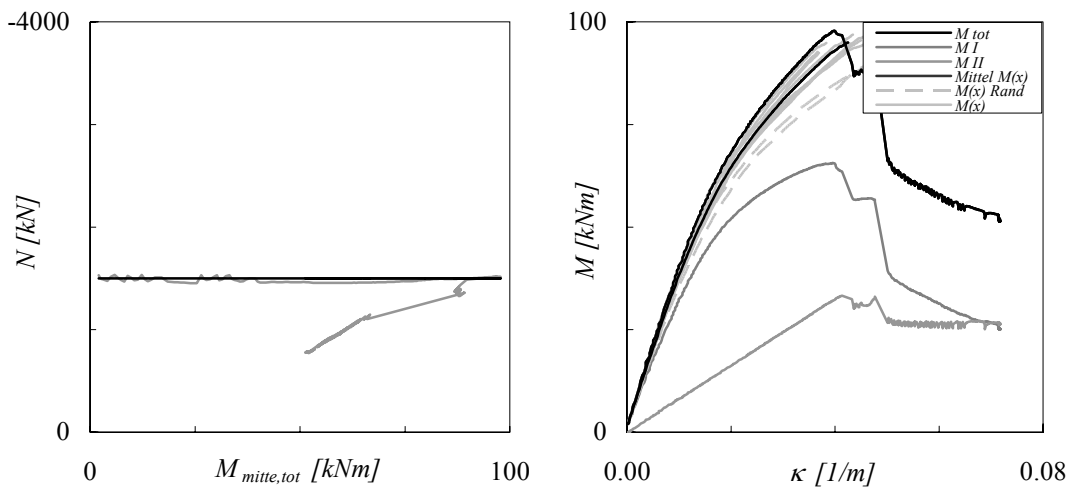


Bild 64a,b: Normalkraft – Momentenverlauf (a) und Momenten – Krümmungsverlauf (b)

BETRACHTUNG DISKRETER LASTSTUFEN

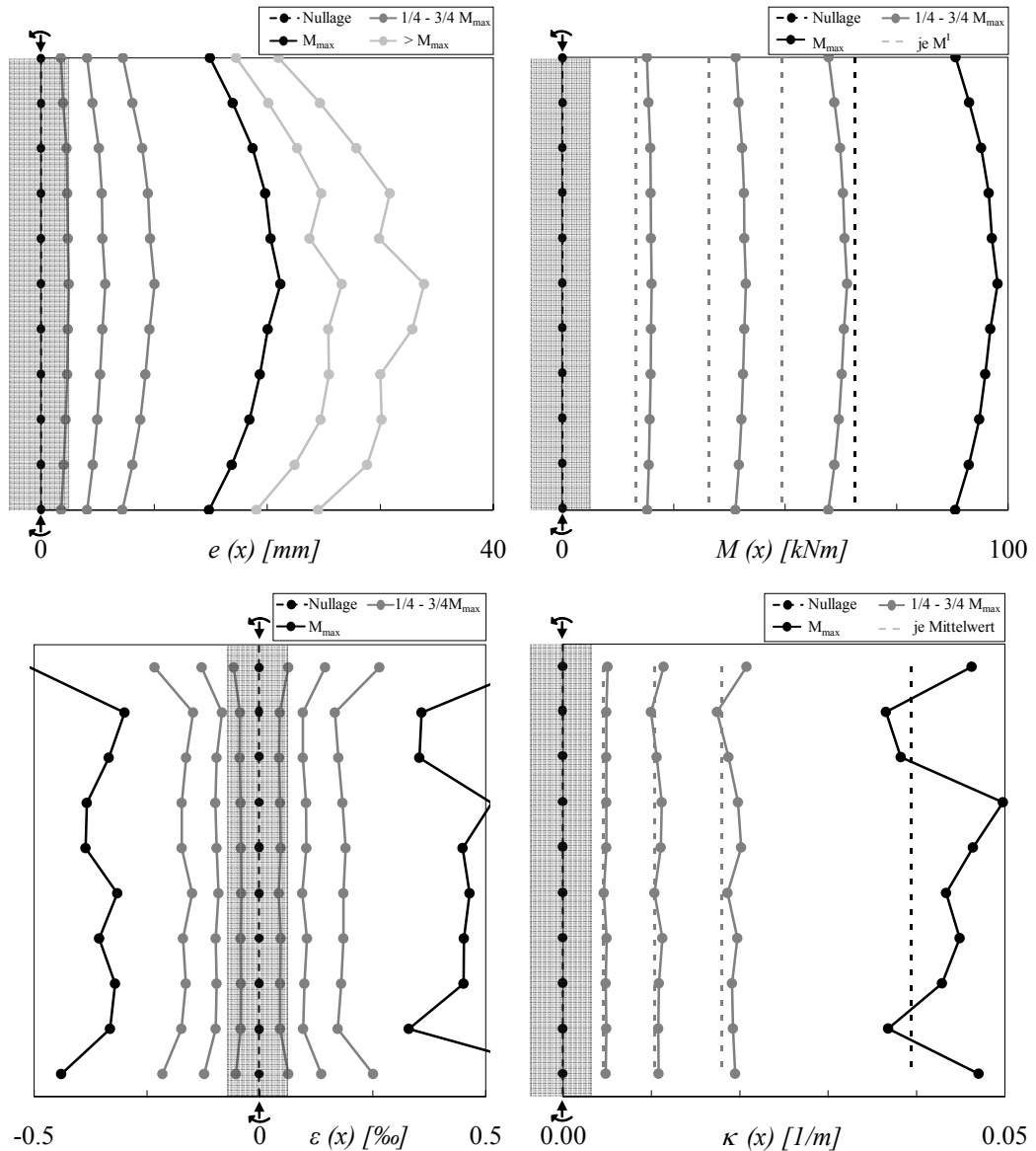


Bild 65a-d: Schnittweise Analyse längs des Prüfkörpers $l(x)$ jeweils für die Laststufen Nullage, $1/4 - 3/4 M_{max}$, M_{max} und teilw. $>M_{max}$: (a) Auslenkung $e(x)$, (b) Moment $M(x)$ inkl. M^l , (c) Dehnung der Randfaser $\varepsilon(x)$, (d) Krümmung $\kappa(x)$ inkl. mittlere Krümmung κ aus der Randverdrehung θ

KOMMENTAR ZU BESONDERHEITEN DES EINZELNEN VERSUCHS

Bruchbild und Ablauf des Versagens:

- Der Bruch erfolgt weitgehend duktil durch Abspalten der Druckzone auf Höhe der Druckbewehrung über halbe Probekörperlänge.
- Das Wachstum dieses Risses erfolgt langsam mit fortschreitender Verdrehung des Probekörpers.
- Es bildet sich ein plastisches Gelenk, bei dem sich auf der Zugseite 5 Risse mit einem mittleren Rissabstand von 8 cm bilden (Rissverteilung durch die Zugbewehrung).

Verläufe und Schnittanalyse:

- Aufgrund der niedrigen Normalkraft und der Bewehrung fällt die Normalkraft nur langsamen ab.
- Das Moment bleibt relativ lange auf einem hohen Niveau.

FOTOGRAFISCHE DOKUMENTATION



Bild 66a-c: Entwicklung des Bruches (a), Versuchskörper nach der Belastung (b) und Details der Bruchzone (c)

ANALYSE DES BELASTUNGSVERLAUFES

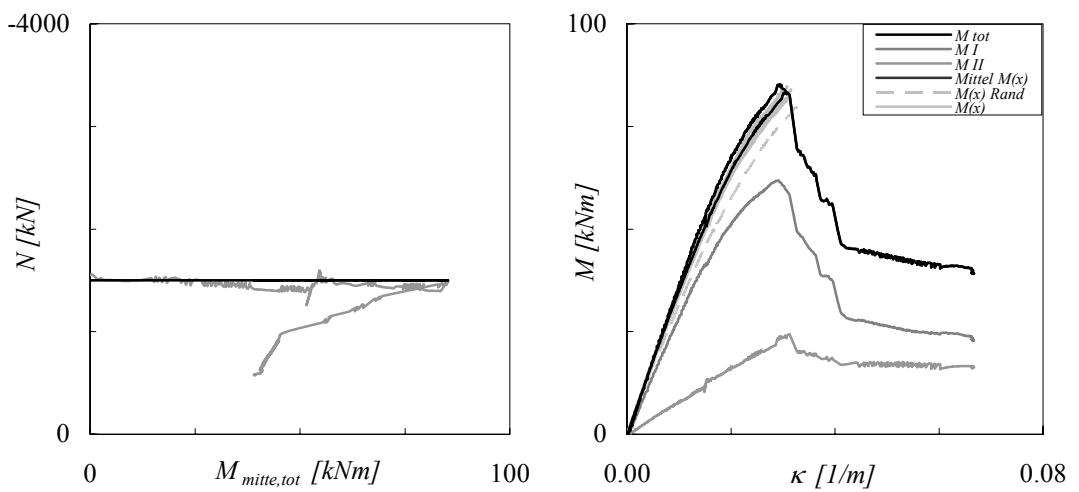


Bild 67a,b: Normalkraft – Momentenverlauf (a) und Momenten – Krümmungsverlauf (b)

BETRACHTUNG DISKRETER LASTSTUFEN

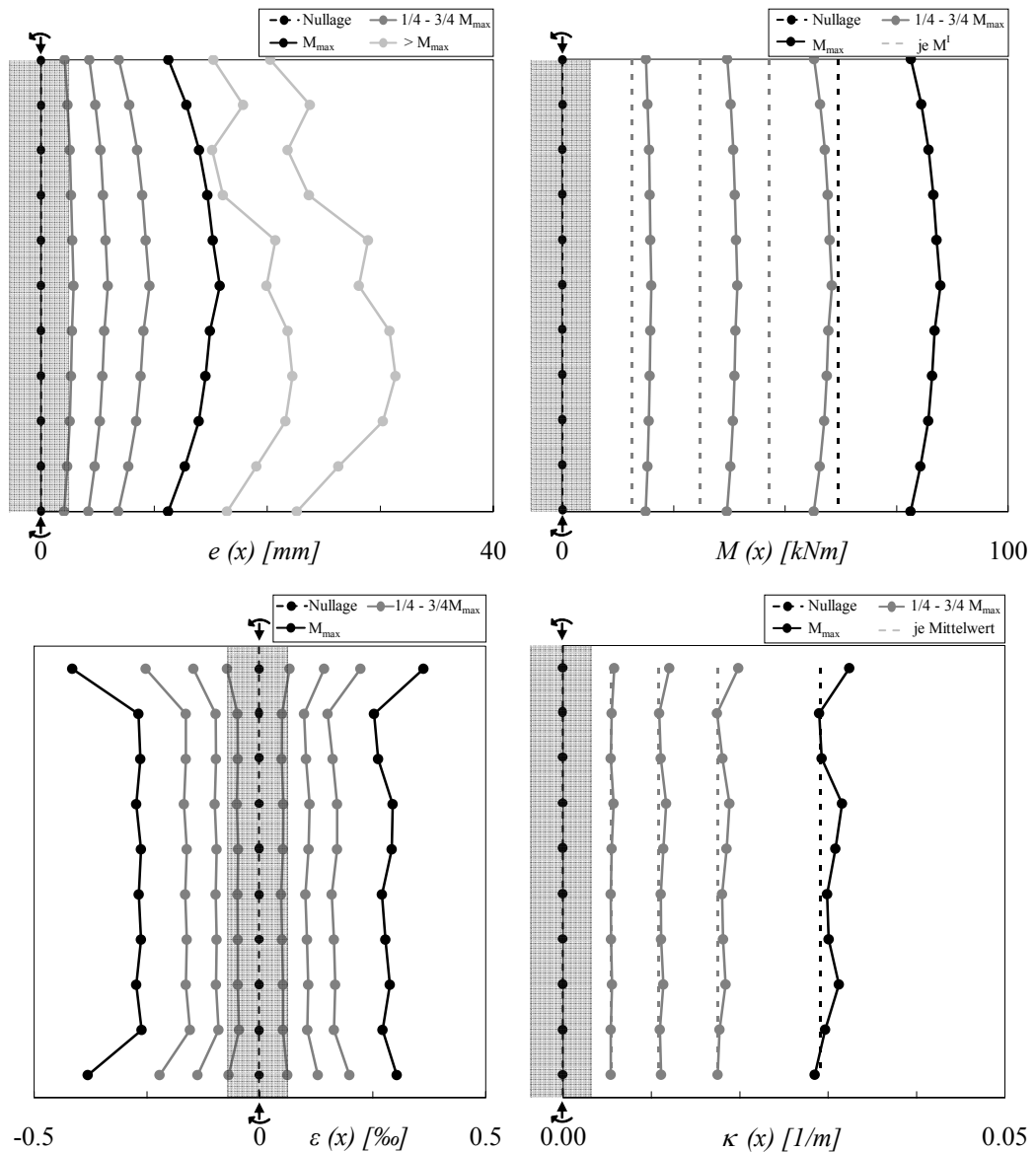


Bild 68a-d: Schnittweise Analyse längs des Prüfkörpers $l(x)$ jeweils für die Laststufen Nullage, $1/4 - 3/4 M_{max}$, M_{max} und teilw. $>M_{max}$: (a) Auslenkung $e(x)$, (b) Moment $M(x)$ inkl. M^l , (c) Dehnung der Randfaser $\varepsilon(x)$, (d) Krümmung $\kappa(x)$ inkl. mittlere Krümmung κ_{aus} aus der Randverdrehung θ

KOMMENTAR ZU BESONDERHEITEN DES EINZELNEN VERSUCHS

Bruchbild und Ablauf des Versagens:

- Zunächst leichtes Abplatzen der Druckzone.
- Es kommt zu einem duktilen Bruch, wobei sich langsam ein Längsriß auf Höhe der Bewehrung über rund $2/3$ der Probekörperhöhe ausbildet.
- Bei weit fortgeschrittener Rotation und Absinken der Normalkraft kommt es zur Öffnung eines Zugrisses (plastisches Gelenk).

Verläufe und Schnittanalyse:

- Die Normalkraft und das Moment fallen relativ langsam ab.
- Das Moment stabilisiert sich nach dem Bruch längere Zeit bei rund $1/2 M_{Max}$.
- In der Schnittanalyse zeigt sich die Lokalisierung des Bruches.

FOTOGRAFISCHE DOKUMENTATION

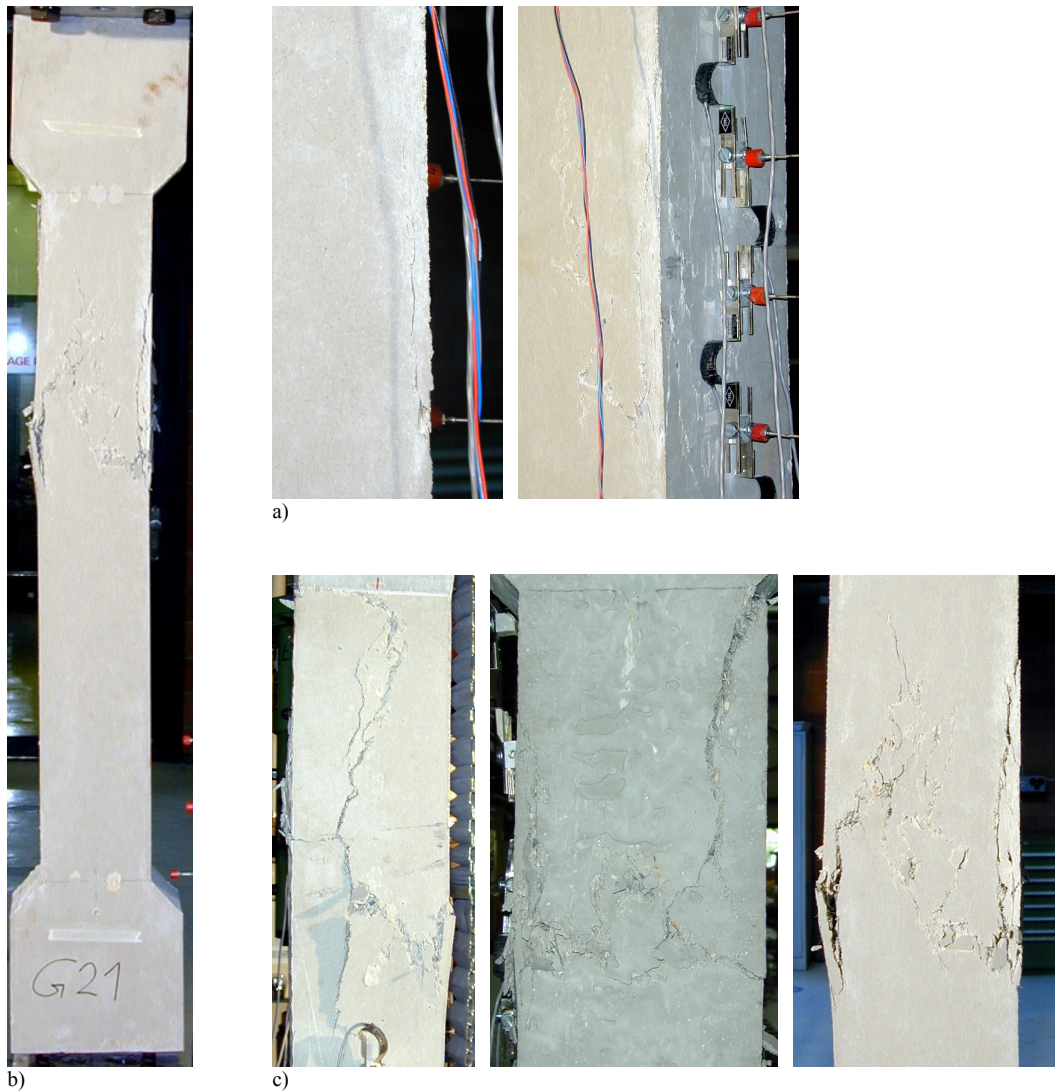


Bild 69a-c: Entwicklung des Bruches (a), Versuchskörper nach der Belastung (b) und Details der Bruchzone (c)

ANALYSE DES BELASTUNGSVERLAUFES

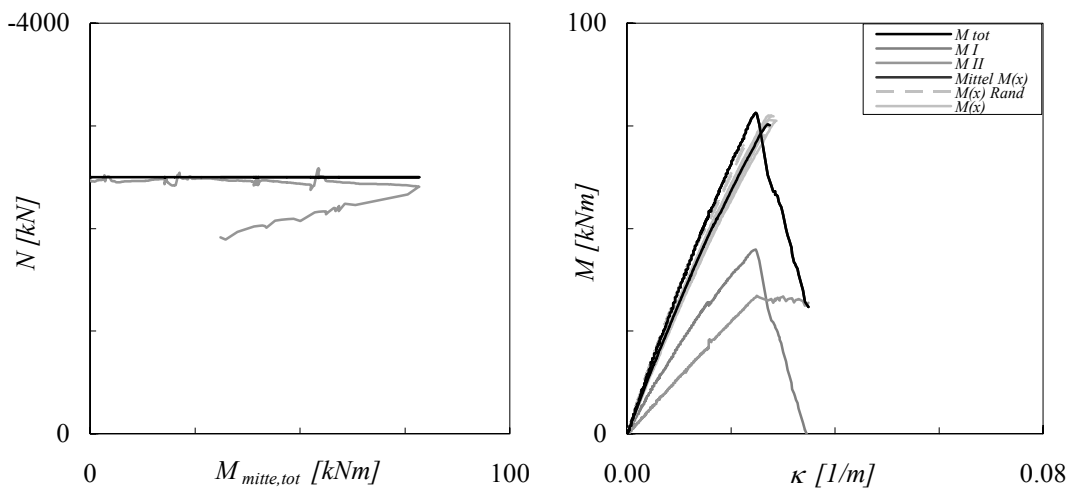


Bild 70a,b: Normalkraft - Momentenverlauf (a) und Momenten - Krümmungsverlauf (b)

BETRACHTUNG DISKRETER LASTSTUFEN

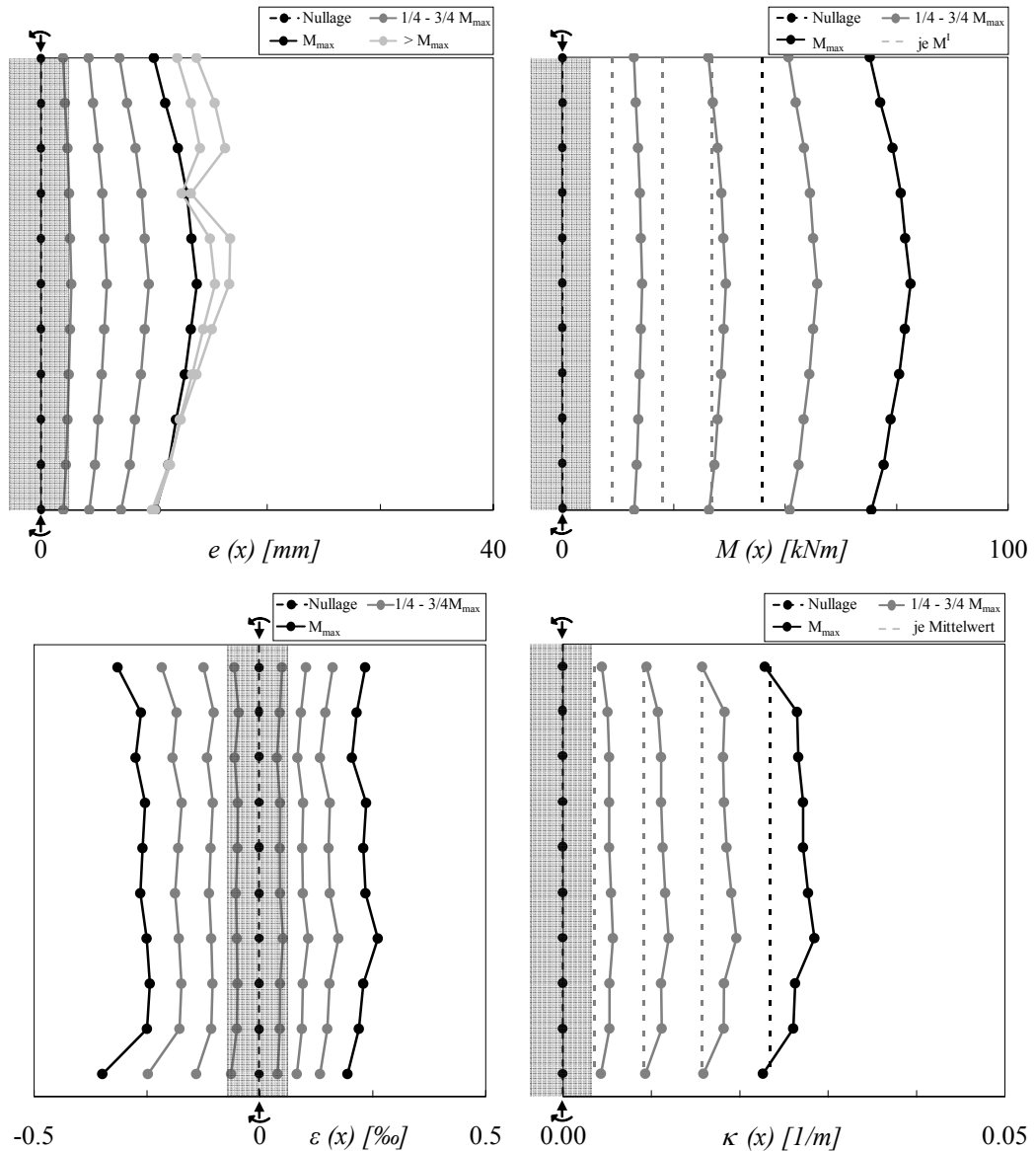


Bild 71a-d: Schnittweise Analyse längs des Prüfkörpers $l(x)$ jeweils für die Laststufen Nullage, $1/4 - 3/4 M_{max}$, M_{max} und teilw. $>M_{max}$: (a) Auslenkung $e(x)$, (b) Moment $M(x)$ inkl. M^I , (c) Dehnung der Randfaser $\varepsilon(x)$, (d) Krümmung $\kappa(x)$ inkl. mittlere Krümmung κ aus der Randverdrehung θ

KOMMENTAR ZU BESONDERHEITEN DES EINZELNEN VERSUCHS

Bruchbild und Ablauf des Versagens:

- Es zeigt sich zunächst ein progressives schichtweises Abplatzen der Druckzone.
- Der Bruch erfolgt schlagartig bei $1/3$ (von oben) der Probekörperhöhe.
- Es kommt zur Längsspaltung der Probe über $1/3$ der Probenhöhe, sonst typischer Druckbruch mit diagonaler Rissbildung.

Verläufe und Schnittanalyse:

- Es kommt zu einem mässig schnellen Abfall der Normalkraft und des Momentes.
- Das Moment 2. Ordnung wird nach dem Bruch grösser als das Moment 1. Ordnung (kein grosser Widerstand da keine zusätzliche Bewehrung).
- Bei der schnittweisen Analyse fällt im Nachbruchbereich ein Messfühler aus.

FOTOGRAFISCHE DOKUMENTATION

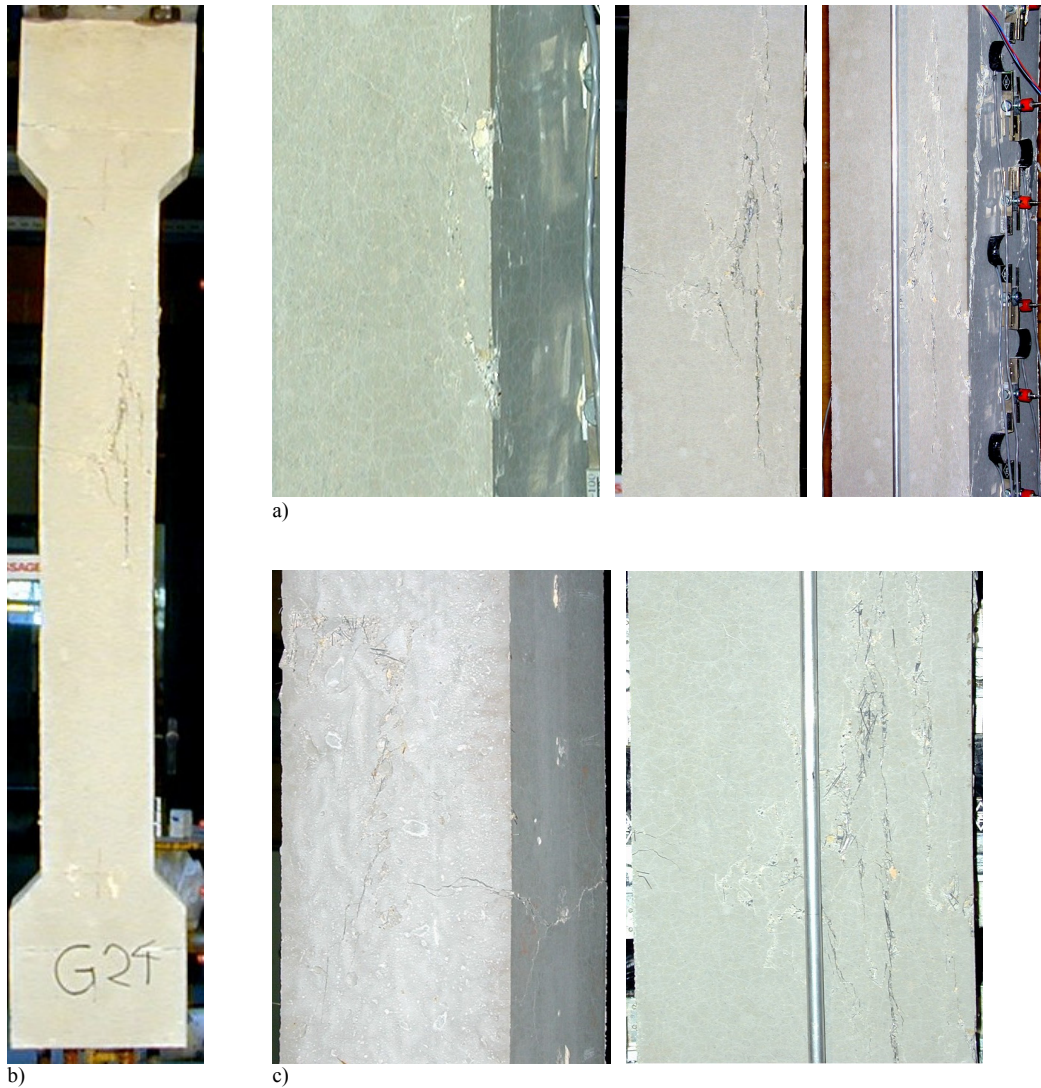


Bild 72a-c: Entwicklung des Bruches (a), Versuchskörper nach der Belastung (b) und Details der Bruchzone (c)

ANALYSE DES BELASTUNGSVERLAUFES

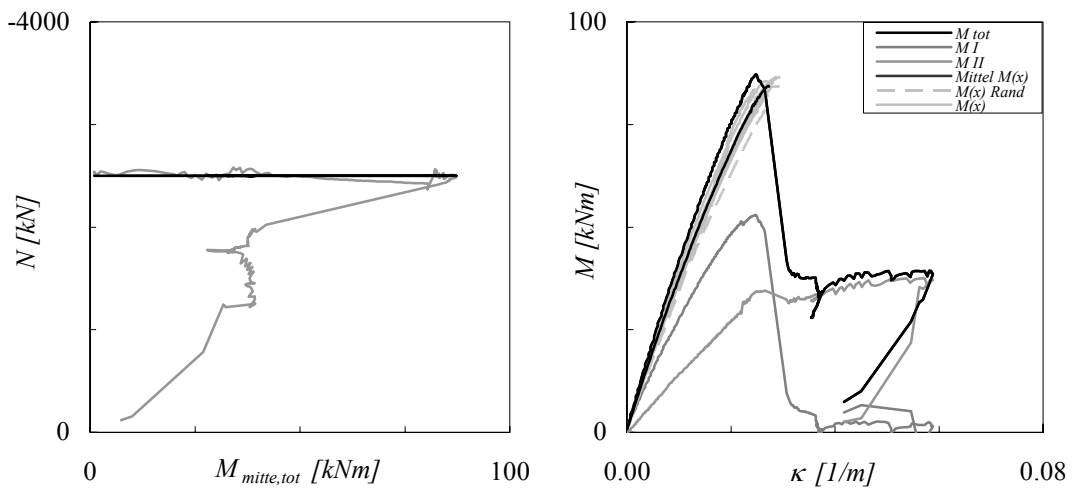


Bild 73a,b: Normalkraft – Momentenverlauf (a) und Momenten – Krümmungsverlauf (b)

BETRACHTUNG DISKRETER LASTSTUFEN

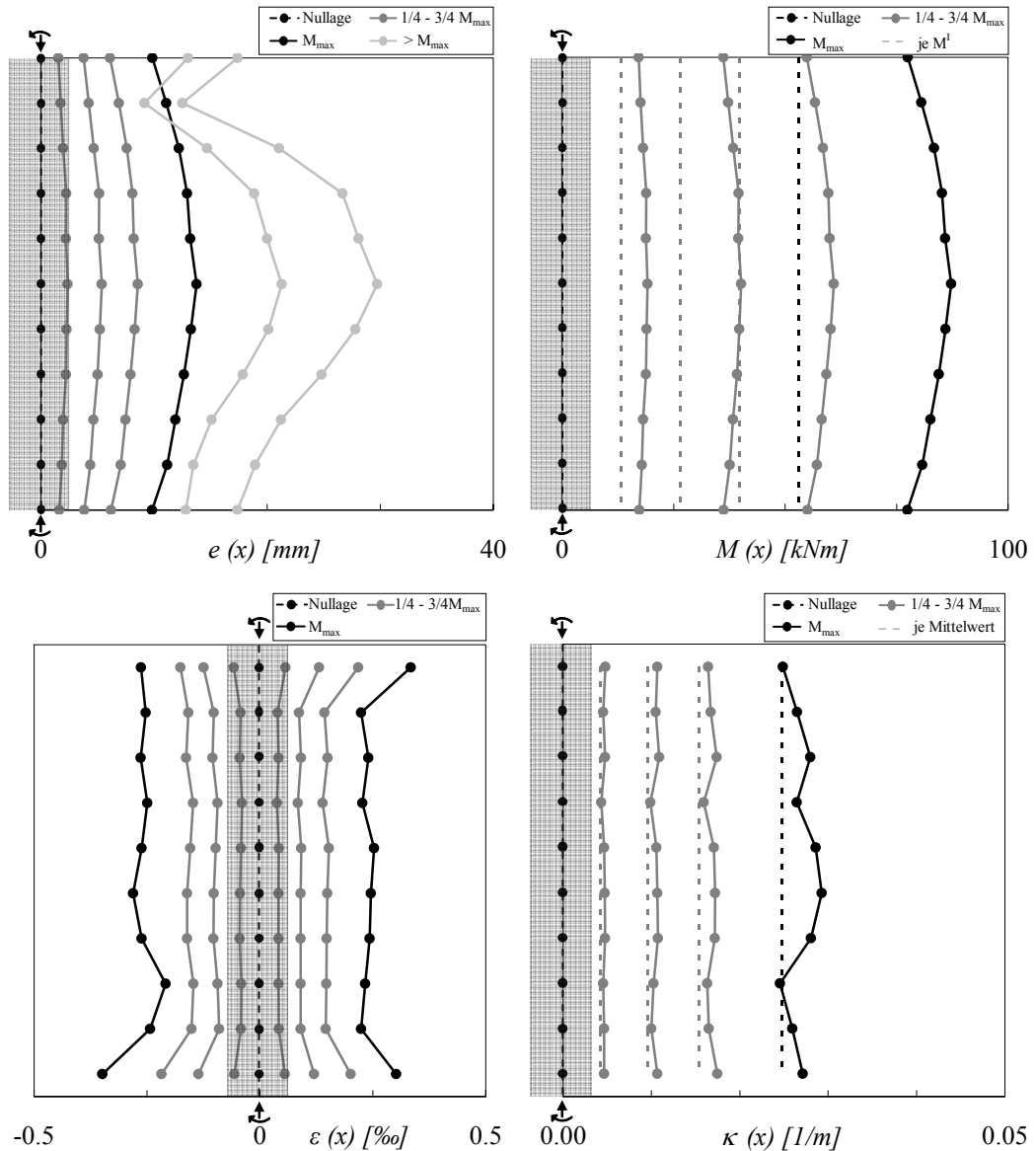


Bild 74a-d: Schnittweise Analyse längs des Prüfkörpers $l(x)$ jeweils für die Laststufen Nullage, $1/4 - 3/4 M_{max}$, M_{max} und teilw. $>M_{max}$: (a) Auslenkung $e(x)$, (b) Moment $M(x)$ inkl. M^l , (c) Dehnung der Randfaser $\varepsilon(x)$, (d) Krümmung $\kappa(x)$ inkl. mittlere Krümmung κ aus der Randverdrehung θ

KOMMENTAR ZU BESONDERHEITEN DES EINZELNEN VERSUCHS

Bruchbild und Ablauf des Versagens:

- Leichte oberflächliche Abplatzungen auf der Druckseite.
- Duktileres Versagen in der Mitte der Probe mit Längsrissen auf Höhe der Bewehrung.
- Ausbildung eines plastischen Gelenkes mit 1 Zugriss bei weit fortgeschrittenem Abfall der Normalkraft.

Verläufe und Schnittanalyse:

- Aufgrund der Bewehrung kommt es bei rund $1/2 M_{Max}$ zur Stabilisierung des Momentes. In diesem Bereich ist das Moment 1. Ordnung bereits annähernd auf Null abgefallen.
- Die Auslenkung im Nachbruchbereich zeigt deutlich die mittige Lage der Bruchzone (2. Wegmesser von oben ist ausgefallen).

FOTOGRAFISCHE DOKUMENTATION

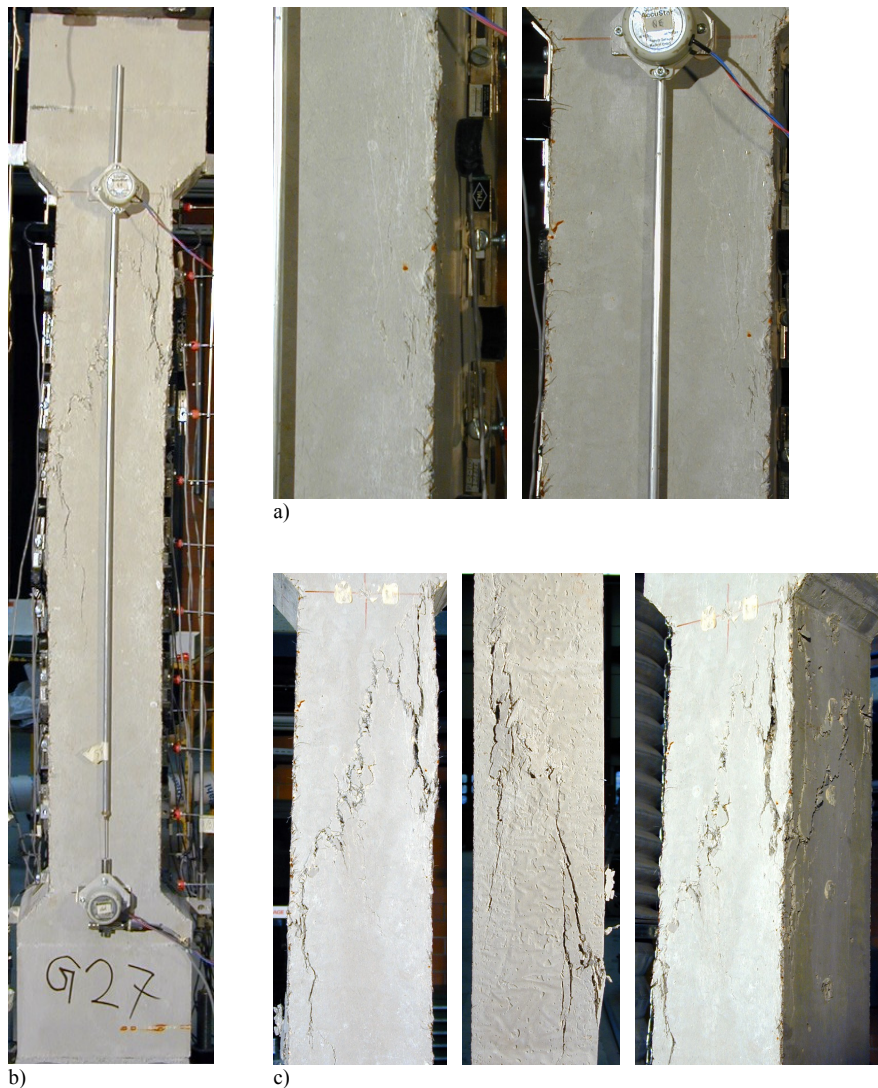


Bild 75a-c: Entwicklung des Bruches (a), Versuchskörper nach der Belastung (b) und Details der Bruchzone (c)

ANALYSE DES BELASTUNGSVERLAUFES

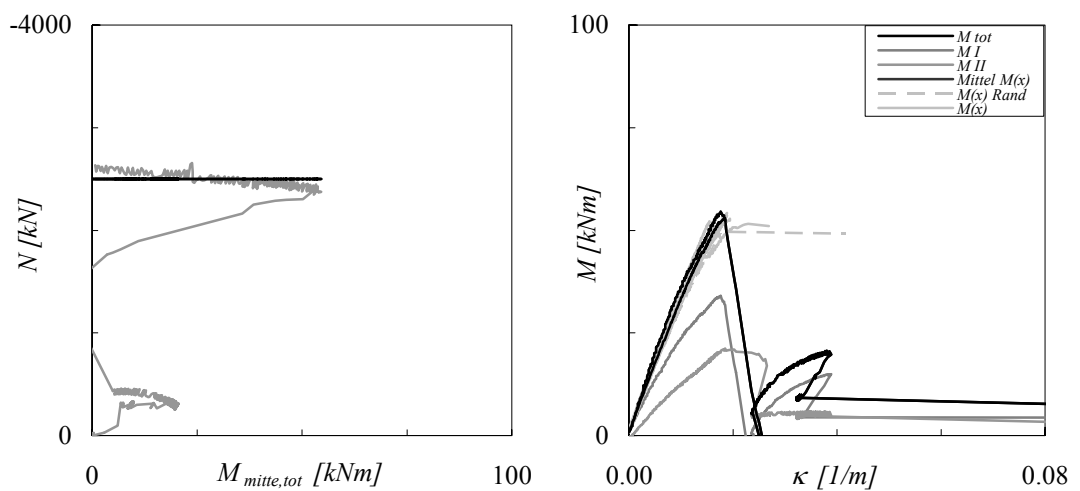


Bild 76a,b: Normalkraft – Momentenverlauf (a) und Momenten – Krümmungsverlauf (b)

BETRACHTUNG DISKRETER LASTSTUFEN

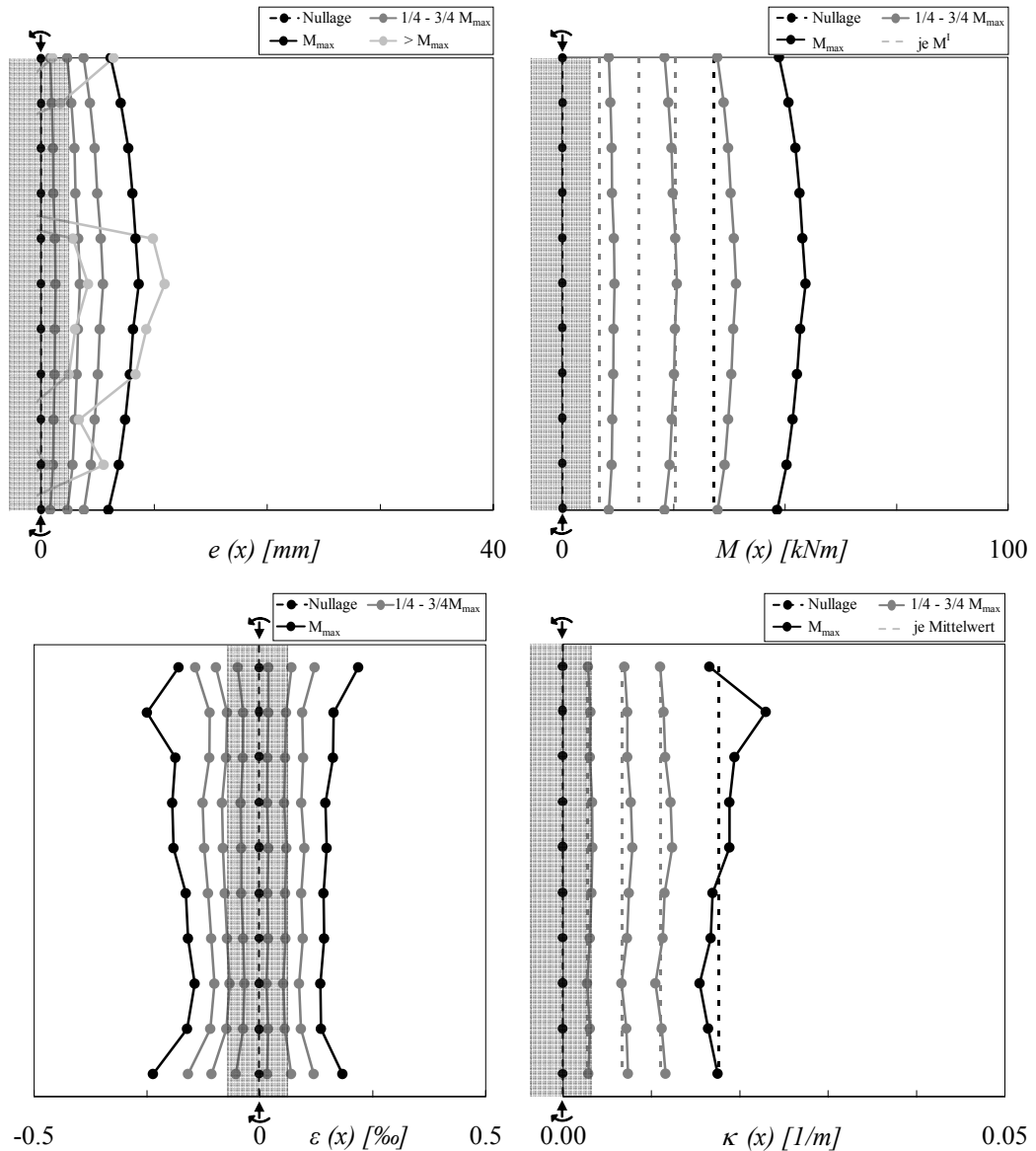


Bild 77a-d: Schnittweise Analyse längs des Prüfkörpers $l(x)$ jeweils für die Laststufen Nullage, $1/4 - 3/4 M_{max}$, M_{max} und teilw. $>M_{max}$: (a) Auslenkung $e(x)$, (b) Moment $M(x)$ inkl. M^l , (c) Dehnung der Randfaser $\varepsilon(x)$, (d) Krümmung $\kappa(x)$ inkl. mittlere Krümmung κ aus der Randverdrehung θ

KOMMENTAR ZU BESONDERHEITEN DES EINZELNEN VERSUCHS

Bruchbild und Ablauf des Versagens:

- Zunächst linsenförmige Abplatzungen auf der Druckseite bei $1/4$ (von oben).
- Bereits vor Erreichen von M_{max} sind grössere Risse zu erkennen.
- Schlagartiges Versagen mit diagonalem Riss über $1/2$ der Probenlänge; dieser Riss wird nicht der Bewehrung beeinflusst (kein Längsriss über Bewehrung).

Verläufe und Schnittanalyse:

- Es zeigt sich eine Restabilisierung auf einem sehr niedrigen Normkraftniveau, hierbei steigt das Moment sogar erneut an. Die Spannlitzen sind im Bereich der Bruchzone in dieser Phase bereits entspannt und können als Passive Bewehrung erneut eine Belastung aufnehmen.
- Die Schnittweise Analyse zeigt eine Rezentrierung der Probe im Nachbruchbereich (evt. rückstellende Wirkung der Spannlitzen).

FOTOGRAFISCHE DOKUMENTATION



Bild 78a-c: Entwicklung des Bruches (a), Versuchskörper nach der Belastung (b) und Details der Bruchzone (c)

ANALYSE DES BELASTUNGSVERLAUFES

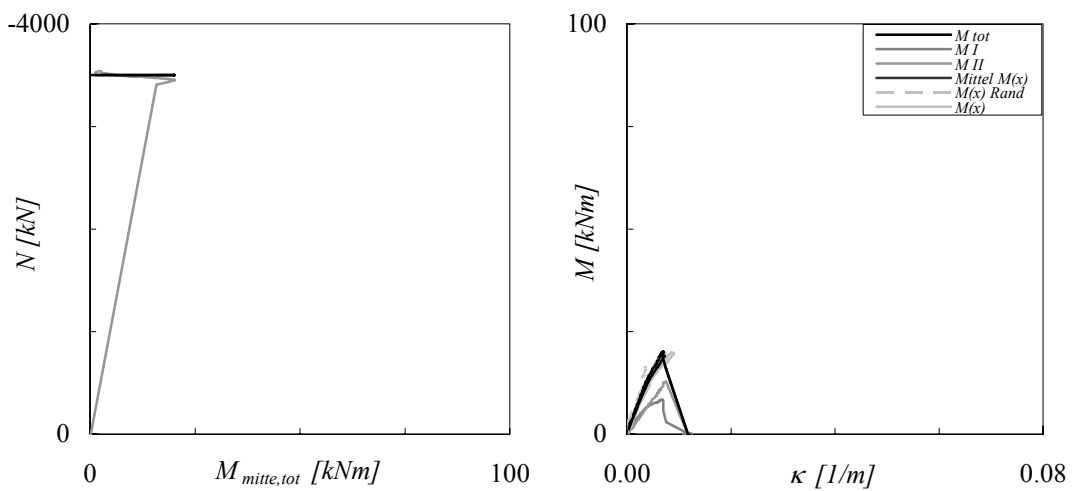


Bild 79a,b: Normalkraft – Momentenverlauf (a) und Momenten – Krümmungsverlauf (b)

BETRACHTUNG DISKRETER LASTSTUFEN

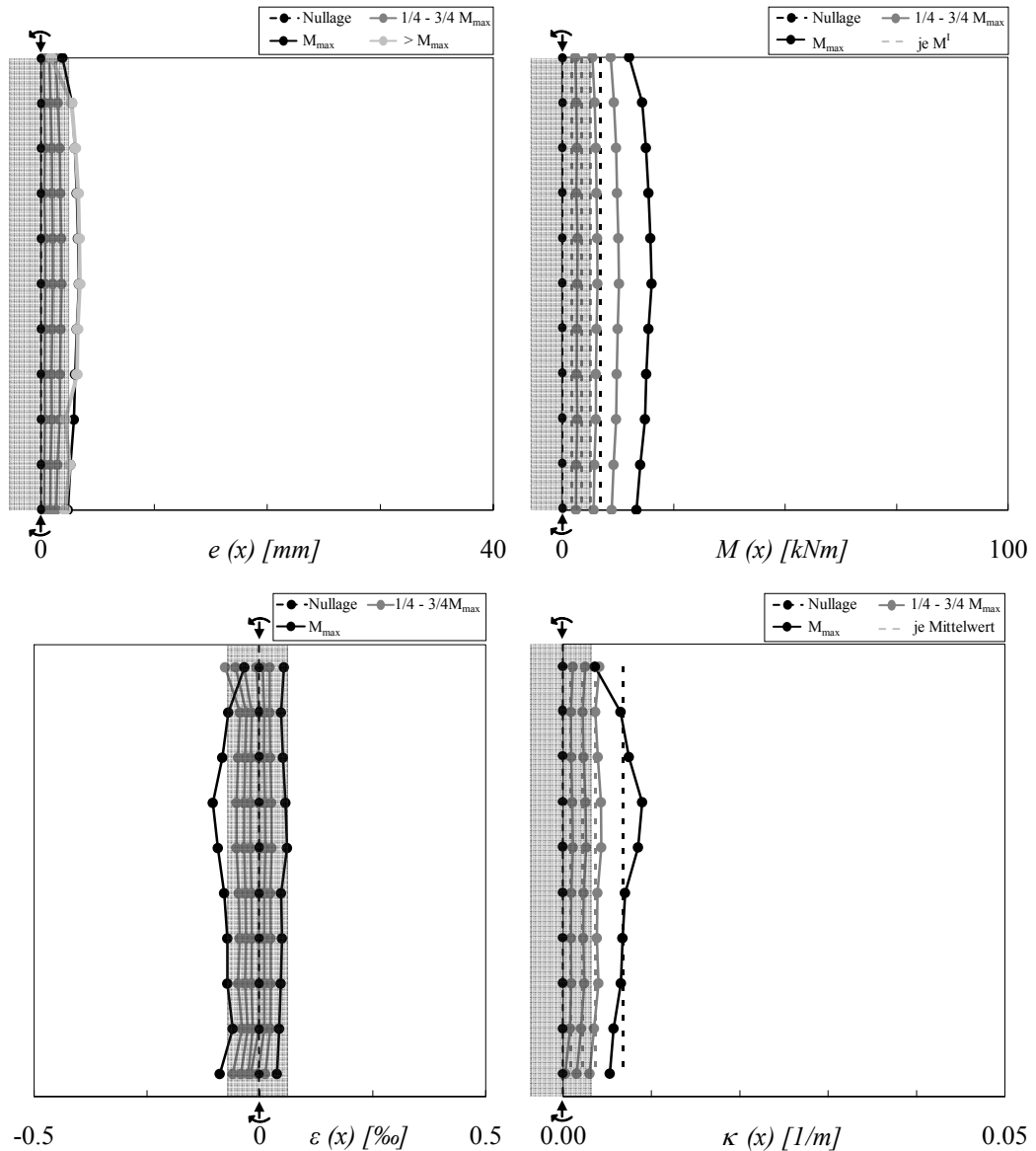


Bild 80a-d: Schnittweise Analyse längs des Prüfkörpers $l(x)$ jeweils für die Laststufen Nullage, $1/4 - 3/4 M_{max}$, M_{max} und teilw. $>M_{max}$: (a) Auslenkung $e(x)$, (b) Moment $M(x)$ inkl. M^I , (c) Dehnung der Randfaser $\varepsilon(x)$, (d) Krümmung $\kappa(x)$ inkl. mittlere Krümmung κ aus der Randverdrehung θ

KOMMENTAR ZU BESONDERHEITEN DES EINZELNEN VERSUCHS

Bruchbild und Ablauf des Versagens:

- Es sind zunächst leichte Schubspannungsrisse im Krafeinleitungsbereich zu erkennen.
- Sehr sprödes Versagen mit diagonalem Bruch quer durch den Querschnitt, welcher zur kompletten Trennung der Probe in 2 Hälften führt.
- In der Bruchfuge ist sehr viel pulverisierter Beton zu finden.

Verläufe und Schnittanalyse:

- Es kommt zu einem schlagartigen Abfall der Normalkraft.
- In der Belastungsphase ist das M^I und M^{II} annähernd gleich gross.
- Die seitliche Auslenkung und entsprechend das Moment 2. Ordnung, die Dehnungen der Randfasern und die Krümmung sind bei dieser Probe bei weitem am kleinsten.

FOTOGRAFISCHE DOKUMENTATION

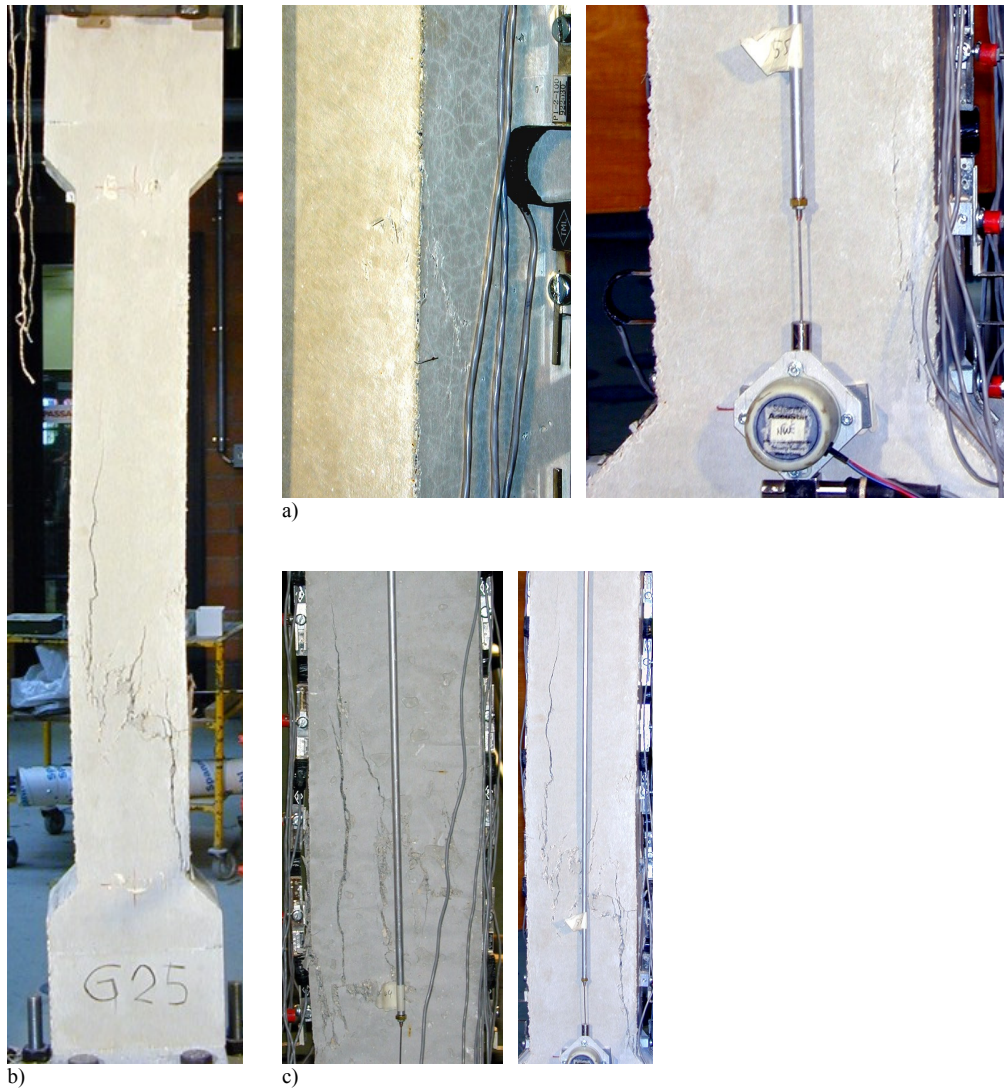


Bild 81a-c: Entwicklung des Bruches (a), Versuchskörper nach der Belastung (b) und Details der Bruchzone (c)

ANALYSE DES BELASTUNGSVERLAUFES

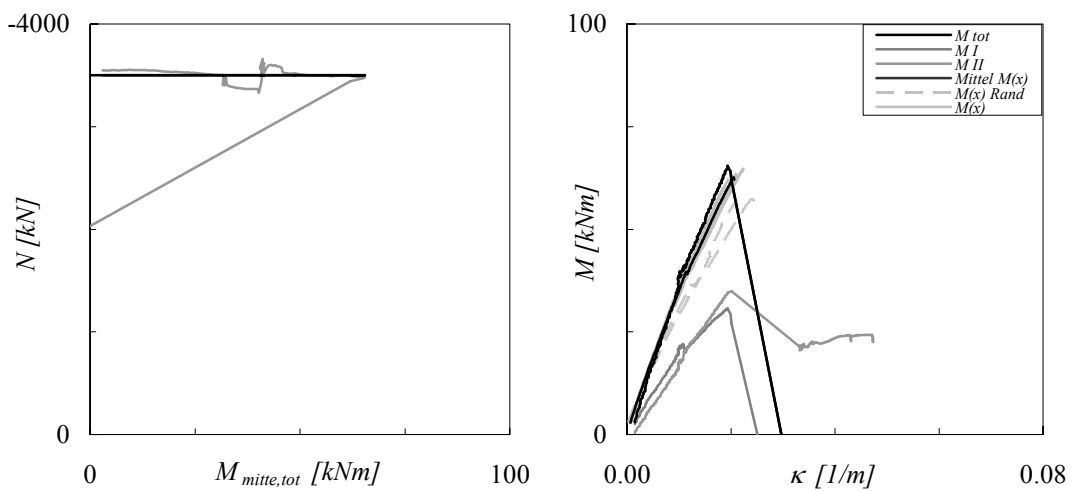


Bild 82a,b: Normalkraft – Momentenverlauf (a) und Momenten – Krümmungsverlauf (b)

BETRACHTUNG DISKRETER LASTSTUFEN

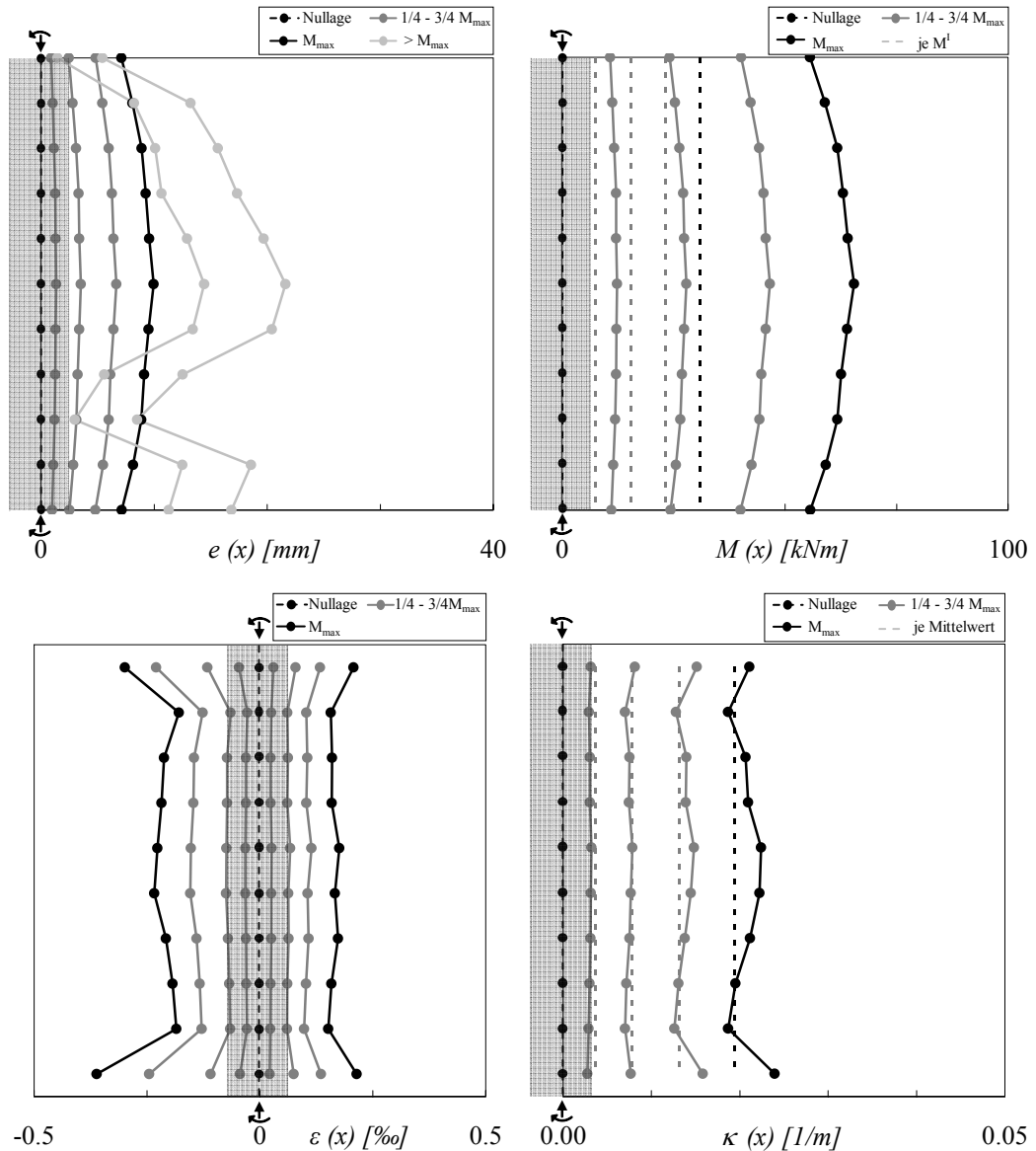


Bild 83a-d: Schnittweise Analyse längs des Prüfkörpers $l(x)$ jeweils für die Laststufen Nullage, $1/4 - 3/4 M_{max}$, M_{max} und teilw. $>M_{max}$: (a) Auslenkung $e(x)$, (b) Moment $M(x)$ inkl. M^I , (c) Dehnung der Randfaser $\varepsilon(x)$, (d) Krümmung $\kappa(x)$ inkl. mittlere Krümmung κ^I aus der Randverdrehung θ

KOMMENTAR ZU BESONDERHEITEN DES EINZELNEN VERSUCHS

Bruchbild und Ablauf des Versagens:

- Hörbares Knistern und Längsrissbildung auf der Druckseite.
- Schlagartiges Versagen; zermalmtter zentraler Bereich und je einem Längsriss auf der Zug- und Druckseite entlang der Bewehrung.
- Die Stütze bleibt trotz des spröden Versagens sehr kompakt zusammen.

Verläufe und Schnittanalyse:

- Trotz der hohen Normalkraft kann bei dieser Probe noch ein hohes Moment aufgebracht werden.
- Der Abfall der Normalkraft und des Momentes erfolgt entsprechend schnell.
- M^I und M^{II} steigen annähernd parallel an. Im Nachbruchbereich wird M^I negativ und wirkt stabilisierend für das System (\Rightarrow Stabilitätsversagen).
- 2 Messfühler der seitlichen Auslenkung sind im Nachbruchbereich ausgefallen.

FOTOGRAFISCHE DOKUMENTATION



Bild 84a-c: Entwicklung des Bruches (a), Versuchskörper nach der Belastung (b) und Details der Bruchzone (c)

ANALYSE DES BELASTUNGSVERLAUFES

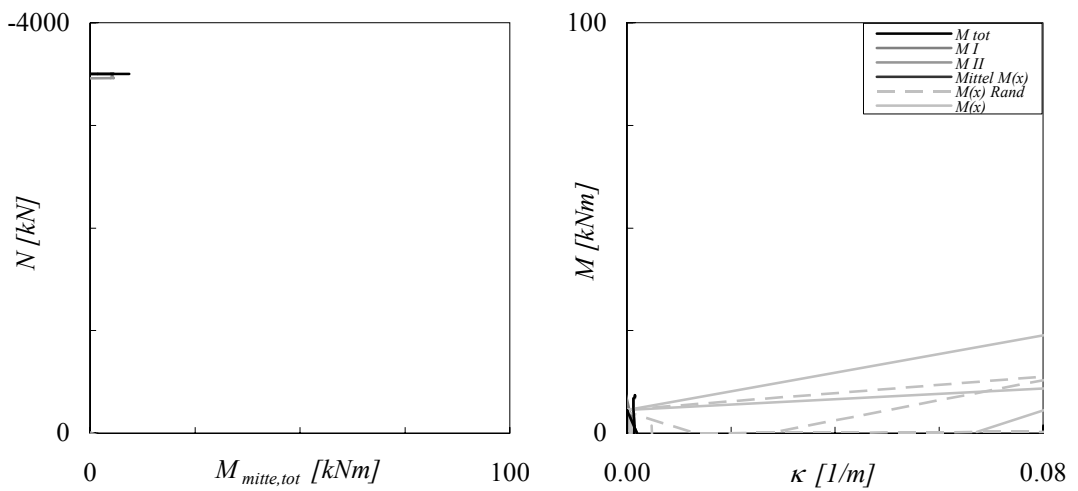


Bild 85a,b: Normalkraft – Momentenverlauf (a) und Momenten – Krümmungsverlauf (b)

BETRACHTUNG DISKRETER LASTSTUFEN

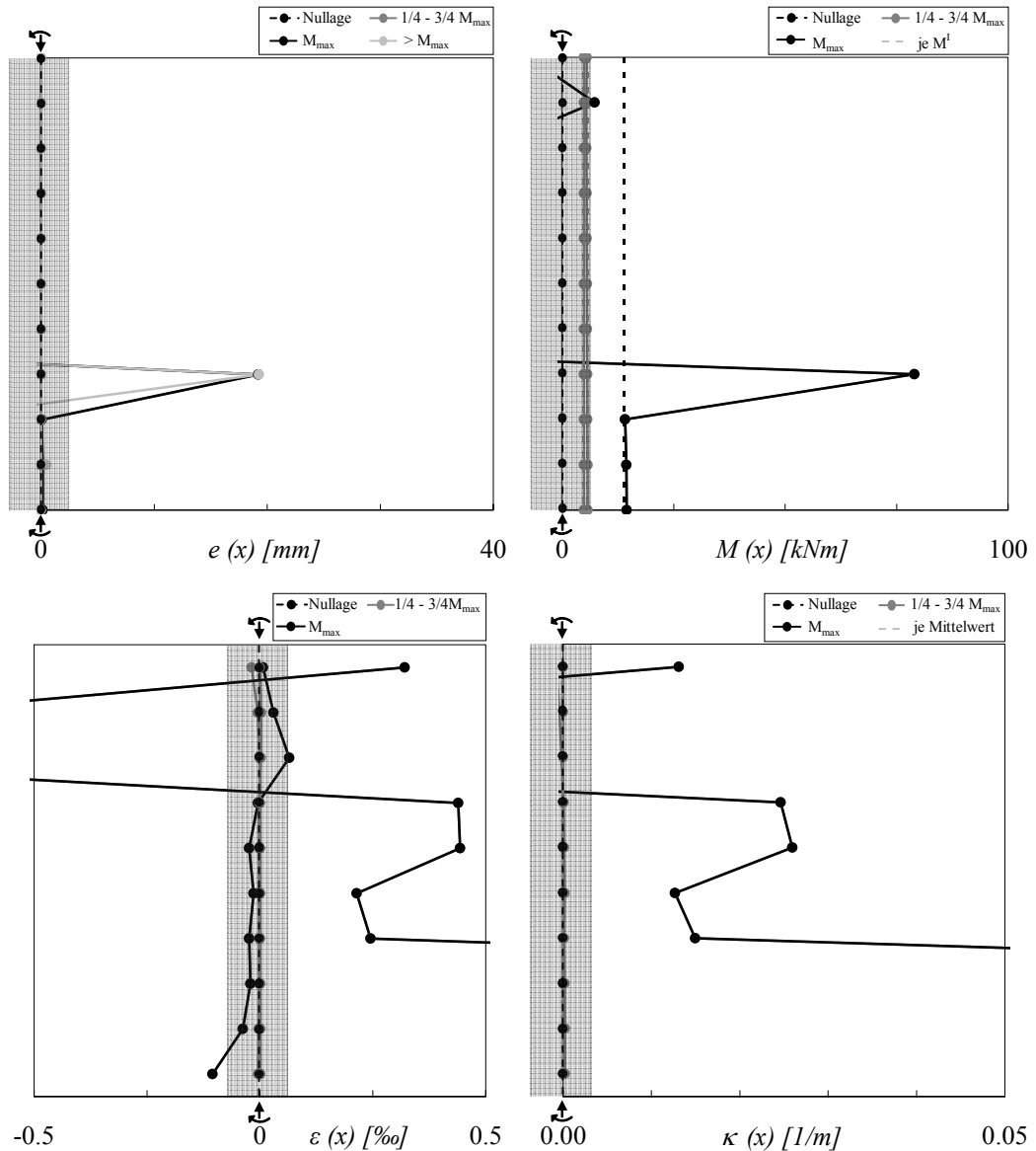


Bild 86a-d: Schnittweise Analyse längs des Prüfkörpers $l(x)$ jeweils für die Laststufen Nullage, $1/4 - 3/4 M_{max}$, M_{max} und teilw. $>M_{max}$: (a) Auslenkung $e(x)$, (b) Moment $M(x)$ inkl. M^l , (c) Dehnung der Randfaser $\varepsilon(x)$, (d) Krümmung $\kappa(x)$ inkl. mittlere Krümmung κ_{aus} aus der Randverdrehung θ

KOMMENTAR ZU BESONDERHEITEN DES EINZELNEN VERSUCHS

Diese Probe versagt bereits beim Aufbringen einer minimalen Rotation, da in Kombination mit der Vorspannung die Druckfestigkeit bereits annähernd erreicht ist.

Bruchbild und Ablauf des Versagens:

- Es zeigt sich zunächst ein Schubriss im Bereich der Krafteinleitung.
- Vom initialen Riss im Einleitungsbereich ausgehend kommt es zum explosionsartigen Versagen mit Diagonal- und Längsrissen annähernd auf der gesamten Probekörperlänge.

Verläufe und Schnittanalyse:

- Nach Aufbringen eines minimalen Momentes versagt die Probe explosionsartig, sodass keine sinnvolle Analyse des Verlaufes bzw. der einzelnen Schnitte möglich ist.

5.8 WEITERFÜHRENDE UNTERSUCHUNGEN

Folgend werden drei Studien dargestellt, welche vergleichend alle Versuchskörper gemeinsam betrachten. Hierbei stellt 5.8.1 eine Zusammenfassung der Ergebnisse aller in 5.7 einzeln aufgeführten Proben da.

5.8.1 VERGLEICH DER ERGEBNISSE DER EINZELNEN PROBEKÖRPER

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Grundauswertung verglichen und zusammengefasst.

In Tabelle 14 sind zur Übersicht die verschiedenen Bewehrungen und die axialen Belastungen der verschiedenen Probekörper dargestellt. Es werden die maximalen Momente und die dabei auftretenden Verformungen bzw. Verkrümmungen angegeben.

Bewehrung		N	M_{max}^I	$M_{Rand,tot}$	$M_{Mitte,tot}$	$\kappa(M_{max}^I)$	$e_2(M_{max}^I)$	EI_{hom}
		[MN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[1/m]	[mm]	[MNm ²]
G22	unbewehrt	1.5	55	74	81	0.032	4.96	3.28
G23	4 Ø20	1.5	66	88	98	0.039	6.27	3.68
G29	4 Ø15.7	1.5	62	78	85	0.029	4.56	3.47
G21	unbewehrt	2.5	45	69	78	0.023	3.74	3.28
G24	4 Ø20	2.5	53	78	87	0.025	3.91	3.68
G27	4 Ø15.7	2.5	34	48	55	0.018	2.59	3.47
G26	unbewehrt	3.5	8	16	20	0.007	1.21	3.28
G25	4 Ø20	3.5	31	56	65	0.019	2.83	3.68
G28	4 Ø15.7	3.5	-	-	-	-	-	3.47

Tabelle 14: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse aller Probekörper G21 - G29

BRUCHVERHALTEN

Aus den Beobachtungen während des Versuches und der fotografischen Dokumentation lässt sich folgendes Bruchverhalten feststellen (Zusammenfassung siehe Tabelle 15):

Durch das Aufbringen der Zwangsverdrehung kommt es bei allen Proben zunächst zu schichtweisen linsenförmigen Abplatzungen auf der Druckseite. Diese reichen teilweise bis auf die Ebene der Bewehrung. Durch die Abplatzungen reduziert sich der zur Kraftabtragung zur Verfügung stehende Querschnitt.

Das Versagen erfolgt entweder als ein Druckversagen des verbleibenden Nettoquerschnittes mit Bildung eines diagonalen Schubrisses (Proben mit hoher Normalkraft oder keiner zusätzlichen Bewehrung) oder es bildet sich eine plastische Zone aus, wobei sich die weitere Verdrehung der Probe auf dieses plastische Gelenk lokalisiert (Proben mit niedriger Normalkraft und Bewehrung).

Bei der Ausbildung eines plastischen Gelenkes sind innerhalb des Querschnittes drei deutlich voneinander zu unterscheidende Bereiche erkennbar: der abgeplatzte Bereich in der Druckzone ($\approx 1/3$ Querschnittstiefe), eine plastische zentrale Zone, in der die Matrix weitgehend intakt ist und eine grosse Krümmung aufweist ($\approx 1/3$ Querschnittstiefe) und die Zugzone in der sich ein oder mehrere Zugrisse ausbilden ($\approx 1/3$ Querschnittstiefe).

Bei den bewehrten Querschnitten zeigt sich in der Zugzone eine Mehrfachrissbildung und somit eine Verteilung des plastischen Gelenkes auf einen grossen Bereich. Es

kommt teilweise erst nachdem die axiale Kraft schon stark abgesunken ist zur Rissbildung auf der Zugseite kommt.

Die Bewehrung führt teilweise zu einer Lokalisierung der Längsrissbildung auf der Ebene der Bewehrungselemente (meist druckseitig). Dieser Effekt ist bei Spannlitzen und bei hohen axial Lasten geringer, hat aber bei einigen Proben quasi zu einer Längsspaltung über die gesamte Probenlänge geführt.

Bezüglich der Länge der Bruchzone kann festgestellt werden, dass, je höher die Normalkraft ist, desto länger ist der Bereich in dem sich Abplatzungen, Risse und Längsspaltungen der Probe ausbilden. Bei den unbewehrten Proben ist der Bruchbereich tendenziell kürzer, da keine Längsspaltung entlang der Bewehrungselemente eintritt.

Ohne Bewehrung und bei hoher Normalkraft kommt es zum Zerschneiden der Probe in mehrere Stücke.

$N_{[MN]}$	Bewehrung		Versagen	Abfallen M & N	Bruch modus	Zugriss	Riss auf Bewehrung	Stabilisierung	MI
1.5	unbewehrt	G22	duktiler Versagen	langsam	Typ 1	1 Riss	-	-	spät auf Null
1.5	4 Ø20	G23	duktiler Versagen	langsam	Typ 1	Multiple Risse	druckseitig	-	-
1.5	4 Ø15.7	G29	duktiler Versagen	langsam	Typ 1	1 Riss	druckseitig	$M \approx 40 \text{ kNm}$	-
2.5	unbewehrt	G21	schnell	mittel	Typ 2	-	-	-	spät auf Null
2.5	4 Ø20	G24	duktiler Versagen	langsam - mittel	Typ 1	1 Riss	druckseitig	$M \approx 40 \text{ kNm}$	auf Null
2.5	4 Ø15.7	G27	schlagartig	schnell - mittel	Typ 2	-	Nein	$N \approx 400 \text{ kN}$, anwachsen M	kurzzeitig Negativ
3.5	unbewehrt	G26	2 Bruchstücke	sofort Null	Typ 2	-	-	-	k.A.
3.5	4 Ø20	G25	schlagartig	sehr schnell	Typ 2	-	zug- & druckseitig	-	Negativ
3.5	4 Ø15.7	G28	explosionsartig	schlagartig	Typ 2	-	Nein	-	k.A.

Tabelle 15: Beobachtungen beim Versagen der Proben

Typ 1: Abspaltung der Druckzone, Ausbildung eines plastischen Gelenks

Typ 2: Druckbruch mit diagonalem Schubriss

Zusammenfassend kann man feststellen: Je höher die axiale Last desto spröder das Verhalten. Bei niedriger Normalkraft entwickelt sich die Rissbildung langsam fortschreitend mit der aufgezwungenen Verdrehung. Bei hoher Normalkraft kommt es zu einem schlagartigen bis explosionsartigen Versagen. Die axiale Last sinkt entsprechen bei niedriger Axiallast langsam ab, bzw. geht bei sprödem Versagen sprunghaft zurück. Mit einer passiven Bewehrung ist das Verhalten auch bei höherer Last noch duktil.

MAXIMALWERTE

Eine Analyse der Maximalwerte aller Probekörper zeigt den Einfluss der axialen Last auf das aufnehmbare Moment und die Rotationskapazität der Probe (Bild 87a,b). Die Diagramme zeigen für die verschiedenen Normalkräfte bzw. Probekörper das Moment 1. Ordnung (aufgebrachtes Moment) bzw. das in Probekörpermitte wirkende Moment ($M_{Mitte,tot}$) (Diagramm a) und die jeweils erzielte Krümmung (Diagramm b).

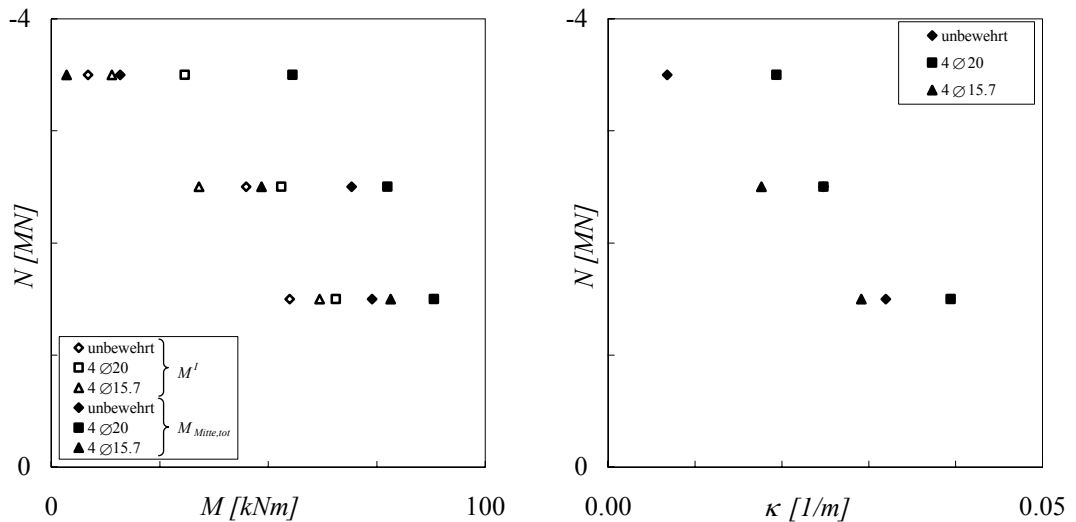


Bild 87a,b: Vergleich aller Probekörper bezüglich des maximalen Momentes M^I und $M_{Mitte,tot}$ (a) und der Krümmungen $\kappa(M_{max})$ bei M_{max}

Es kann festgestellt werden:

- Je niedriger die Normalkraft, desto höher ist die Biegedruckfestigkeit.
- Bei den passiv bewehrten Proben ergibt sich für jede Normalkraft jeweils die höchste Biegefestigkeit.
- Bei den vorgespannten Proben zeigt sich zunächst bei niedriger axialer Last gegenüber der unbewehrten Probe eine höhere Biegefestigkeit. Bei hoher axialer Last ergibt sich aufgrund des axialen Lastanteils aus der Vorspannung eine sehr niedrige Festigkeit.
- Auch die Verformungskapazität, dargestellt durch die mittlere Krümmung, nimmt mit kleiner werdender Normalkraft zu.

ANALYSE DER EINZELNEN SCHNITTEN

Die folgenden Diagramme (Bild 88a-c) vergleichen jeweils die Verformungs- (a), Momenten- (b) und Krümmungsverläufe (c) aller Probekörper beim jeweils maximalen Moment.

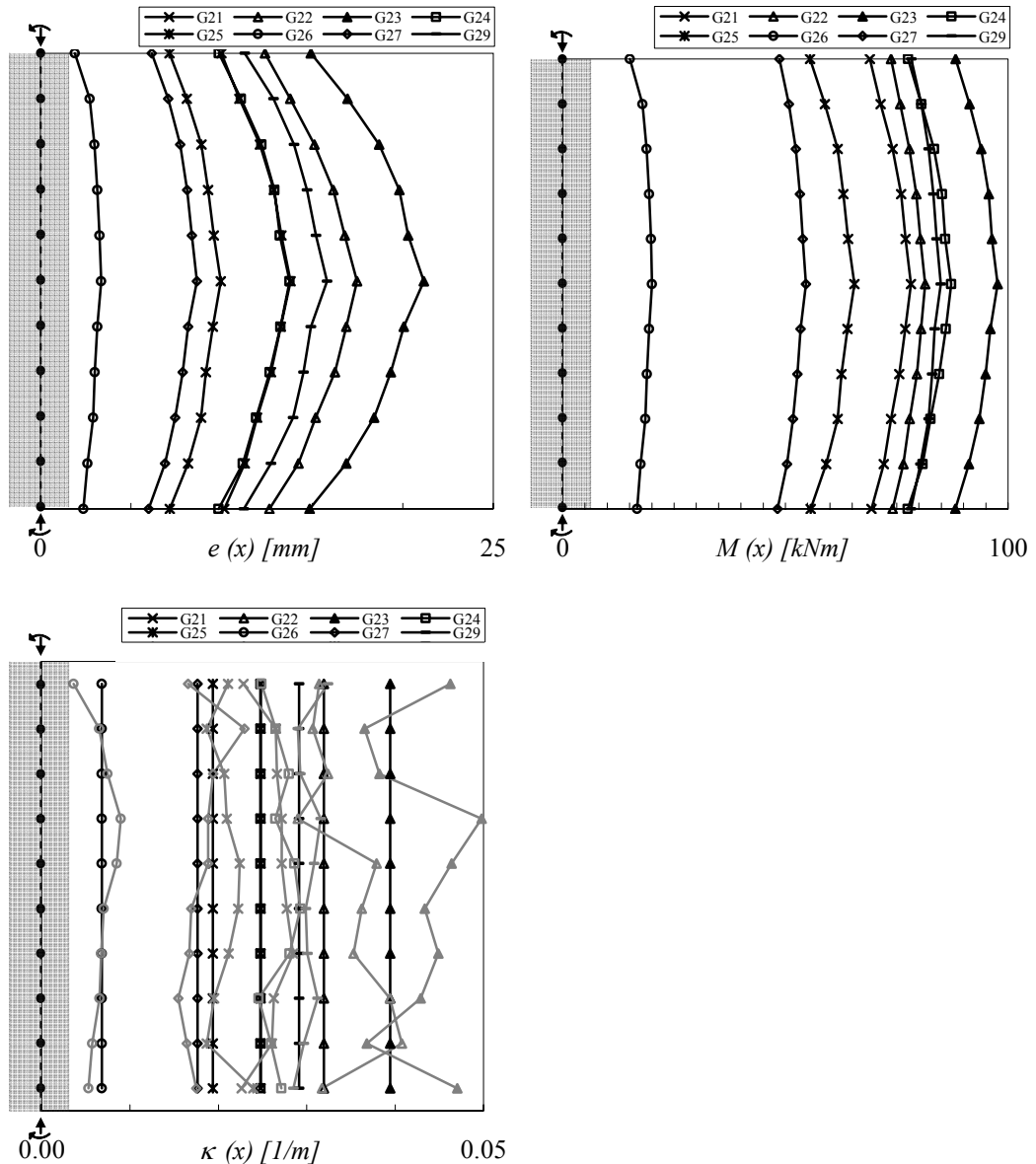


Bild 88a-c: Vergleich der Auslenkung $e(x)$ (a), des Momentes $M(x)$ (b) und der mittleren Krümmungen κ bzw. der Krümmungen jeweils im Messschnitt $\kappa(x)$ (c) jeweils beim maximalen Moment $M_{\text{Mitte,tot}}$ (ohne Probe G28)

Anhand dieser Analysen der einzelnen Schnitte kann man feststellen:

- Die Verformung ist weitgehend symmetrisch und zeigt bei den meisten Proben einen leichten Knick in der Mitte der Probe, auch wenn die meisten Proben letztendlich nicht genau mittig versagt haben.
- Der Einfluss der 2. Ordnung wirkt sich stark auf die Erhöhung des Momentes am Rand der Probe aus, jedoch sehr viel weniger auf die relative Erhöhung des Momentes in der Mitte der Probe gegenüber dem Moment am Rand.
- Die Ermittlung der Krümmung in den Schnitten ist aufgrund der geringen Dehnungsänderungen und der Differenzbildung eine sehr sensible Auswertung und liefert teilweise bereits bei geringen Störungen keine sinnvollen Ergebnisse mehr. Die Krümmung der Schnitte und die mittlere Krümmung aus der Randverdrehung weisen dennoch weitgehend übereinstimmende Resultate auf. Die mittlere Krümmung weist eine tendenziell höhere Steifigkeit auf, da die Inklinometer im Bereich zur Übergangszone montiert sind und somit eine etwas geringere Verdrehung messen (Randeffekt).

MOMENTEN – KRÜMMUNGSVERLAUF

In der Grundausswertung wurde eine genaue Untersuchung der Momente und Krümmungen in den verschiedenen Schnitten sowie der Anteile aus 1. und 2. Ordnung durchgeführt (Bsp. Bild 89).

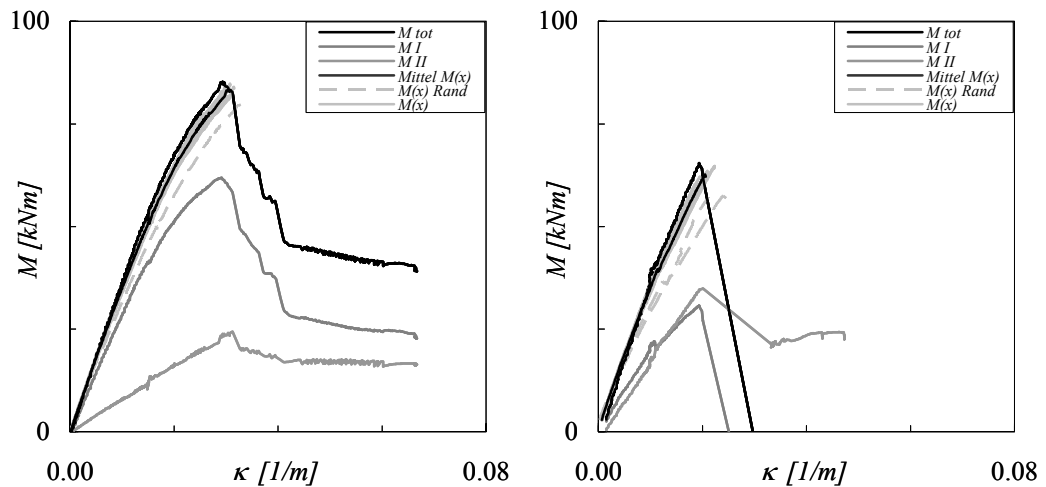


Bild 89: Beispiele der M - κ -Diagramme der Grundausswertung

Bei der Grundausswertung konnte festgestellt werden:

- Im M - κ -Diagramm kommt es zu einer Abweichung der verschiedenen Momentenverläufe, da das mittlere Moment vom Mittelwert der Momente in den Schnitten abweicht. Ebenso weicht die mittlere Krümmung vom Mittelwert der Krümmungen im Schnitt ab.
- Das Verhältnis vom Moment 1. Ordnung zum Moment 2. Ordnung hängt von der Grösse der Normalkraft ab. Im Fall der höchsten Normalkraft (3.5 MN) ist das resultierende M^{II} annähernd so gross wie M^I .
- Bei Proben mit hoher Normalkraft bzw. ohne zusätzliche Bewehrung fällt das Moment 1. Ordnung beim Versagen annähernd auf Null ab oder wird sogar negativ. Fällt es unter Null, ist ein Stabilitätsversagen eingetreten und das Moment 1. Ordnung wirkt stützend für das System.

In Bild 90 sind zur zusammenfassenden Darstellung jeweils nur das Moment in der Mitte der Probe gegenüber der mittleren Krümmung im M - κ -Diagramme dargestellt.

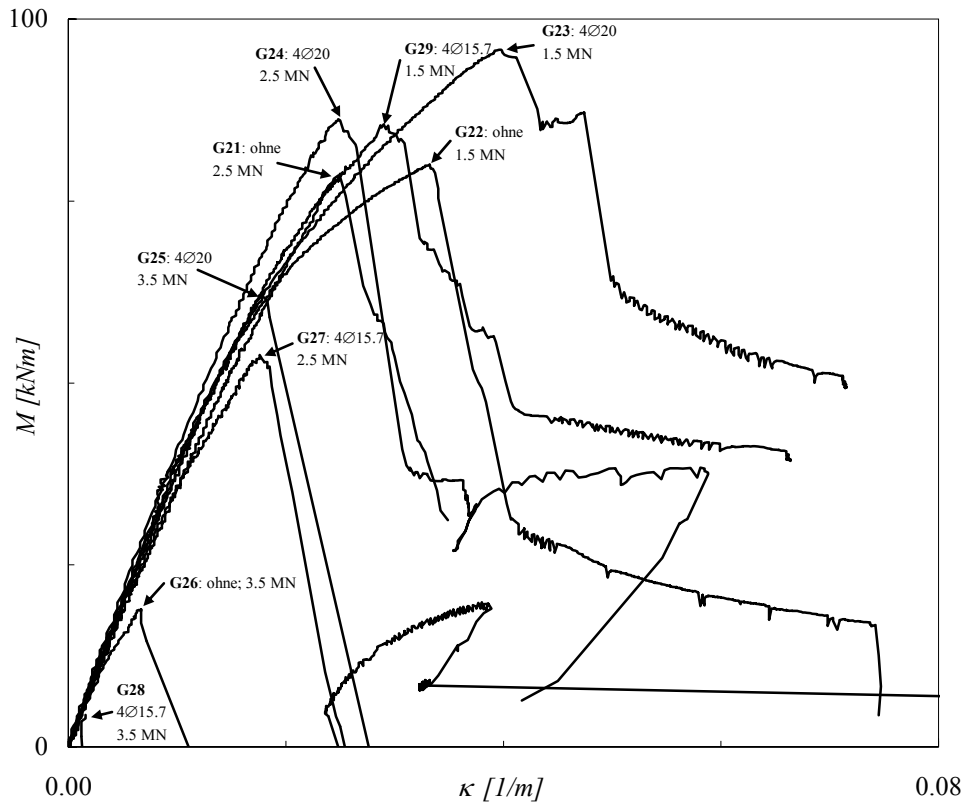


Bild 90: Momenten – Krümmungsverlauf aller Probekörper; dargestellt ist jeweils das Moment in der Mitte der Probe $M_{Mittle,tot}$ gegenüber der Krümmung κ ermittelt aus der Randverdrehung θ

Die bereits während der Versuchsdurchführung festgestellten unterschiedlichen Versagensarten (duktil, spröde) spiegeln sich auch sehr deutlich im Verlauf der M - κ -Diagramme wieder. Das schnelle Abfallen des Momentes ist charakteristisch für ein schlagartiges Versagen des Querschnittes. Ein langsames Abfallen mit einer Stabilisierung oder erneuten Verfestigung zeichnet ein duktiler Verhalten aus. Ebenso weist ein abgerundeter Verlauf im Bereich des maximalen Momentes auf ein duktiler Verhalten hin. Hierbei kommt es bereits vor Erreichen der Biegefestigkeit durch Rissbildung zu einer erhöhten Krümmungszunahmen.

5.8.2 STEIFIGKEITSENTWICKLUNG

Die Biegesteifigkeit EI ergibt sich entsprechend der axialen Steifigkeit EA aus dem Verhältnis der Last zur Verformung. Für die Biegeverformung somit das Verhältnis des Momentes M zur Krümmung κ gilt:

$$M = \kappa \cdot EI$$

$$EI(\kappa) = \frac{M}{\kappa} \quad (23)$$

Das Flächenträgheitsmoment $I(\kappa)$ weist zunächst im ungerissenen Zustand den Wert I_{hom} auf. Die Biegesteifigkeit EI_{hom} des Querschnitts ergibt sich aus dem Flächenträgheitsmoment I_{hom} sowie dem Elastizitätsmodul E des Betons und der Bewehrung zu:

$$EI_{hom} = E_c \frac{bd^3}{12} + E_s A_s z_s^2 \quad (24)$$

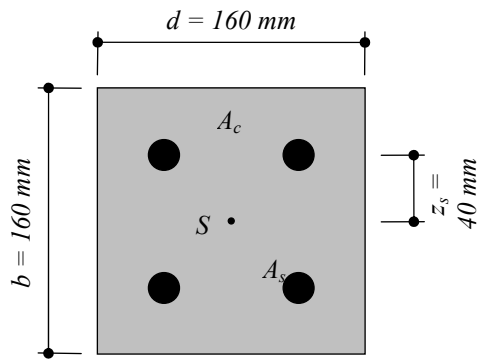


Bild 91: Querschnitt des Versuchskörpers

Mit dem in Bild 91 dargestellten Querschnitt und den im 1. Teil des Versuchsberichtes [1] ermittelten Materialkennwerten, ergibt sich die Steifigkeit im ungerissenen Zustand der drei Probekörpertypen zu:

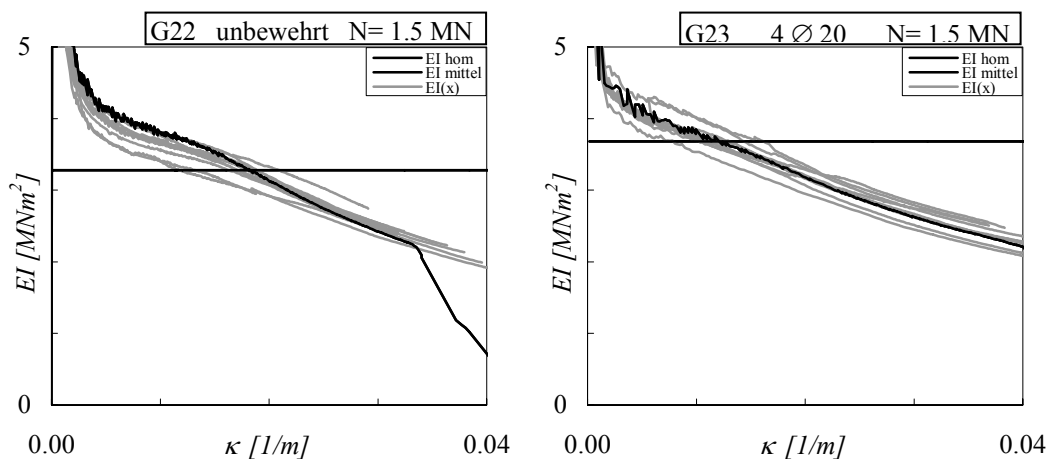
$$\text{unbewehrt: } EI_{c,\text{hom}} = 60\text{GPa} \cdot \frac{160^4 \text{mm}^4}{12} = 3.28\text{MNm}^2$$

$$4 \text{ } \varnothing 20: \quad EI_{4\varnothing 20,\text{hom}} = EI_{c,\text{hom}} + 197\text{GPa} \cdot 4 \cdot 314\text{mm}^2 \cdot 40^2 \text{mm}^2 = 3.68\text{MNm}^2 \quad (25)$$

$$4 \text{ } \varnothing 15.7: \quad EI_{4T15,\text{hom}} = EI_{c,\text{hom}} + 195\text{GPa} \cdot 4 \cdot 150\text{mm}^2 \cdot 40^2 \text{mm}^2 = 3.47\text{MNm}^2$$

Mit der in den Versuchen aufbrachten Verdrehung kommt es zunehmend zur Rissbildung bzw. zum Plastifizieren des Querschnittes und die Steifigkeit $EI(\kappa)$ nimmt in Folge ab.

Die Diagramme Bild 92a-h zeigen jeweils die Entwicklung der Biegesteifigkeit aufgetragen gegenüber der Krümmung. Dargestellt ist der Verlauf des Mittelwerts EI_{mittel} ermittelt aus der Randverdrehung θ und dem Moment in der Mitte der Probe $M_{\text{mitte,tot}}$, der Verlauf der Steifigkeit $EI(x)$ in den einzelnen Schnitten sowie der berechnete Wert von EI_{hom} .



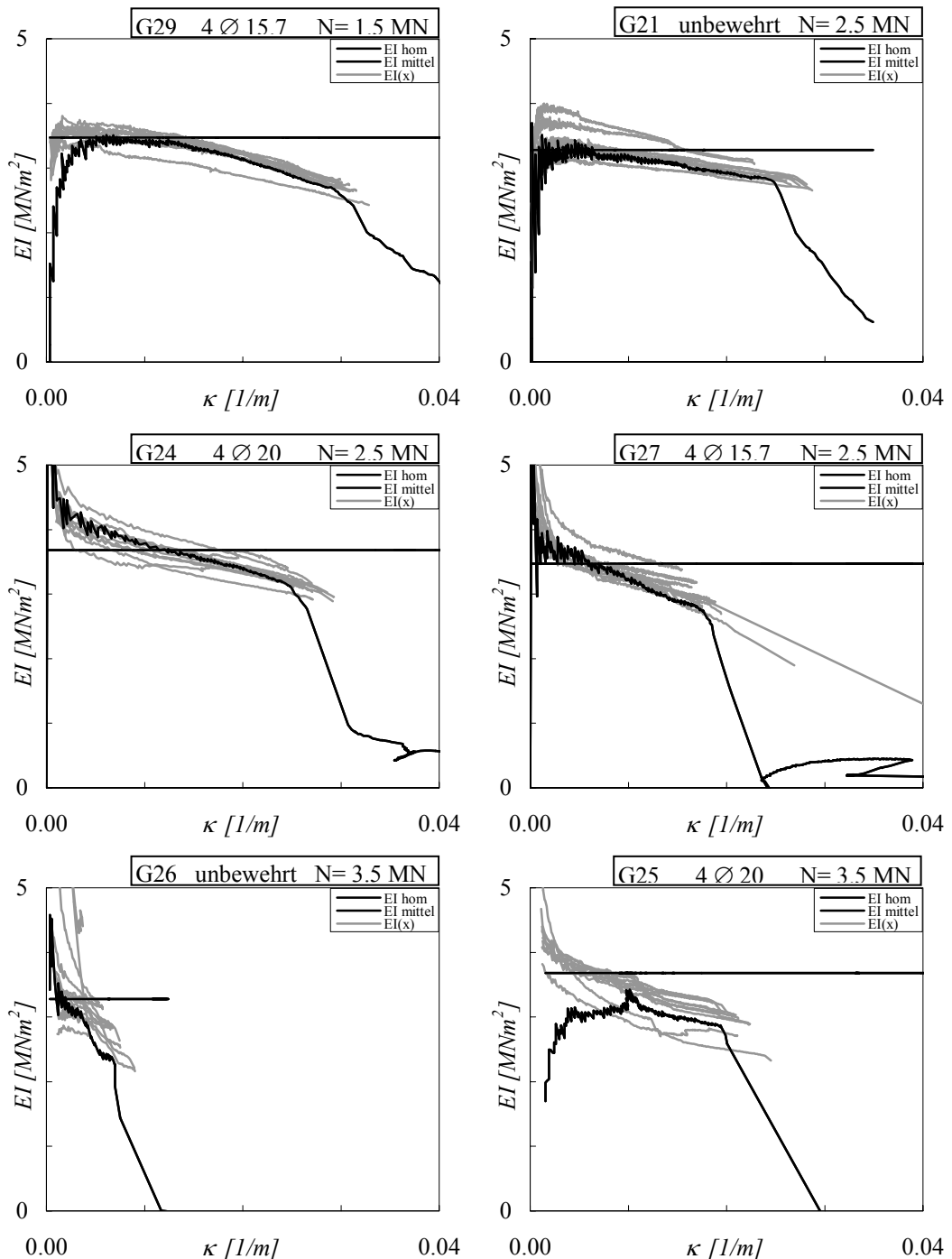


Bild 92a-h: Entwicklung der Steifigkeit der Proben G21-29 (ohne G28) und Vergleich mit der berechneten Steifigkeit der ungerissenen Probe EI_{hom}

Für kleine Krümmungen weichen die Resultate zunächst relativ stark ab und streuen für die verschiedenen Versuche in beide Richtungen. Dies ergibt sich aufgrund der sehr sensiblen Quotientenbildung von M/κ für sehr kleine κ -Werte.

Sobald eine gewisse Krümmung erreicht wird, passt sich die gemessene EI Kurve sehr gut an die berechnete EI_{hom} Gerade an. Bei grösser werdender Krümmung kommt es zu Abplatzungen und zur Rissbildung und somit zur Abnahme der Steifigkeit der Probe. Man kann deutlich erkennen, dass bei den spröde versagenden Proben die Steifigkeit sehr viel schneller abnimmt als bei den duktil versagenden Druckelementen.

In Bild 93 werden die berechneten Steifigkeiten der ungerissenen Proben EI_{hom} mit der Steifigkeit $EI(M_{max})$ bei maximalem Moment M_{max} verglichen. Es zeigt sich, dass

sich bei der mittleren Belastung von 2500 MN die geringste Abnahme der Steifigkeit ergibt. Bei der Belastung von 1500 MN kommt es zu Rissen auf der Zugseite und bei der hohen Belastung von 3500 MN zur starken Abplatzungen auf der Druckseite, was in beiden Fälle zu einer erhöhten Abnahme der Steifigkeit führt.

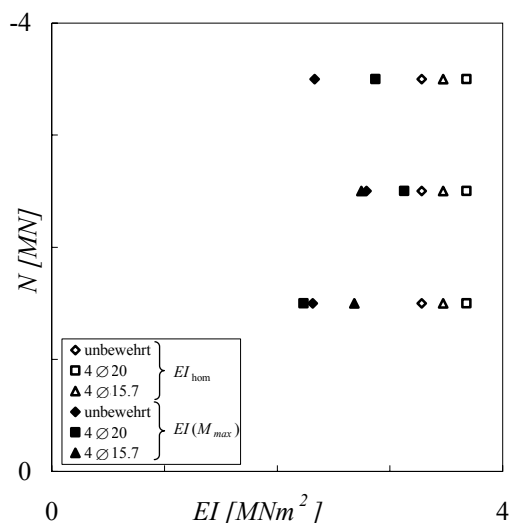


Bild 93: Vergleich der berechneten Steifigkeit EI_{hom} und der Steifigkeit $EI(M_{max})$ bei maximalen Moment M_{max} aller Probekörper (G21-G29)

5.8.3 NACHRECHNUNG DER VERSUCHE MIT VEREINFACHTEN MODELLEN

Um vorab die Grenzwerte für den Versuchsverlauf abschätzen zu können, wurde eine grobe Berechnung mit einfachen Modellen durchgeführt. Hierzu wurde einerseits das Interaktionsdiagramm mit dem Querschnittsbemessungsprogramm Fagus von Cubus ermittelt und andererseits die möglichen M-N- κ Zustände mit einem einfachen Modell ermittelt. Die berechneten Modellkurven werden folgend wiedergegeben, um die Abweichungen von den Versuchsergebnissen und deren Gründe zu untersuchen, sowie nötige Verbesserungen der Modelle zu erörtern.

QUERSCHNITTSPROGRAMM FAGUS

Fagus ist ein Querschnittsbemessungsprogramm der Programmgruppe Cubus. Mit einem Analysemodul des Programmpakets können sehr rasch einfache Standarduntersuchungen durchgeführt werden. Die durchgeführten Berechnungen erfolgen nur für den unbewehrten und mit 2 Ø 20 bewehrten Querschnitt (keine Vorspannung). Der Querschnitt wird mit einem parametrisierten Einheitsquerschnitt für die Bewehrung modelliert. Hierdurch können durch Eingabe des Bewehrungsgrades die beiden Fälle bewehrt bzw. unbewehrt abgehandelt werden (Bild 94).

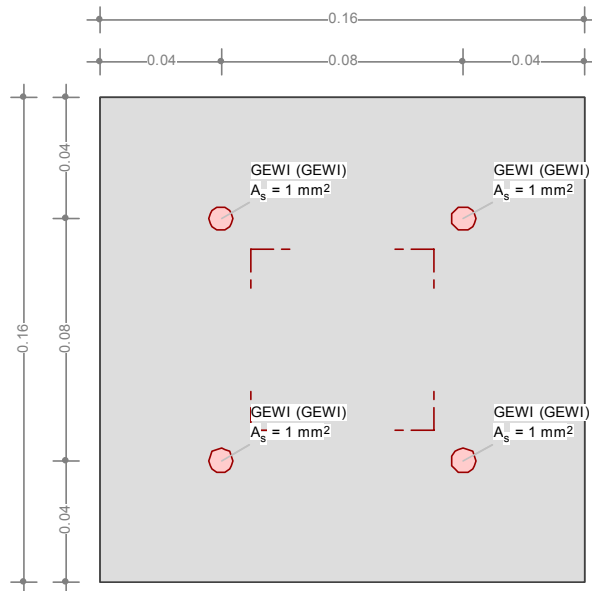


Bild 94: Modellierter Querschnitt des Druckelements mit Einheitsquerschnitt für die Bewehrung

Die Materialkennwerte (Tabelle 16) werden aus den Versuchsergebnissen der Materialversuche direkt übernommen (siehe Versuchsbericht [1]).

Baustoff	$-f_c / -f_y$ [N/mm ²]	f_{ct} / f_y [N/mm ²]	E [kN/mm ²]
UHFB	-191.0	9.7	60
GEWI	-556.0	556.0	210

Tabelle 16: Tabelle der eingegebenen Materialkennwerte (aus [1])

Für die Berechnungen wird vom Programm ein elastisch - plastisches Verhalten mit einer Begrenzung der Grenzdruckdehnung von 4‰ zugrunde gelegt (4.4‰ ergaben sich im Versuch, dies ist aber programmtechnisch nicht möglich). Für die Zugseite wird nach Erreichen von f_{ct} ein plastisches Verhalten angenommen (Bild 95).

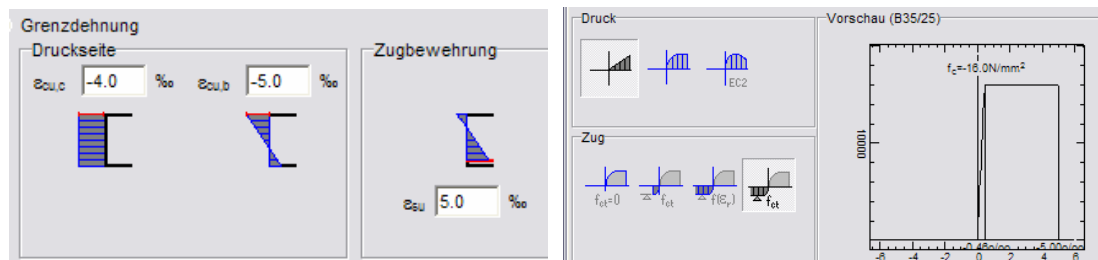


Bild 95a,b: Einstellungen der Berechnungsparameter von Fagus

Mit dem Analysemodul wird das Momenten – Normalkraft - Interaktionsdiagramm des bewehrten ($\rho = 4.1\%$) und des unbewehrten Querschnittes ($\rho = 0\%$) ermittelt (Bild 96). Zum Vergleich sind die Versuchsergebnisse der bewehrten (Punkt) und der unbewehrten Probekörper (Raute) eingetragen.

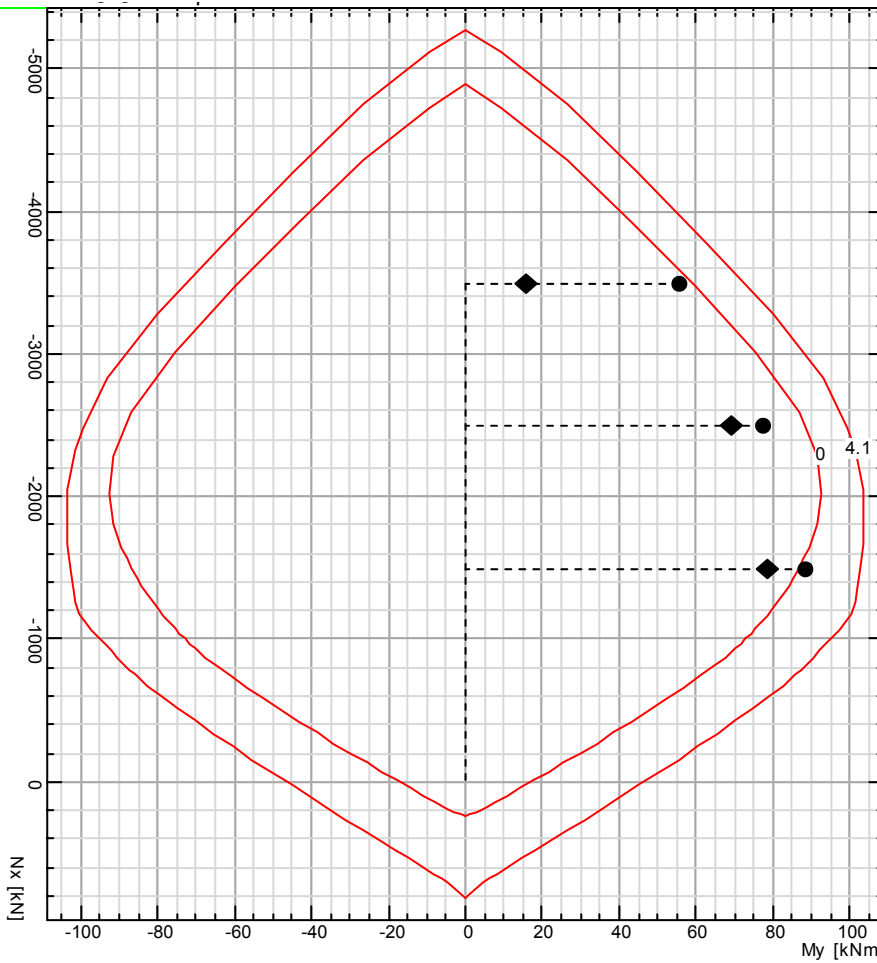


Bild 96: $M-N$ – Interaktionsdiagramm sowie die Versuchsergebnisse der bewehrten ($\rho = 4.1\%$) und unbewehrten Querschnitte ($\rho = 0\%$).

Es zeigt sich, dass mit der Berechnung die Festigkeit des Querschnittes insbesondere bei hohen axialen Lasten überschätzt wird. Hierbei weicht bei niedrigen axialen Lasten die Biegedruckfestigkeit um rund 10% und bei hohen axialen Lasten bis zu 70% ab.

Betrachtet man die Momenten – Krümmungen – Diagramme im Vergleich zu den Versuchsergebnissen zeigt sich die Problematik deutlich (Bild 97). Im linear elastischen Bereich wird der Kurvenverlauf gut wiedergegeben. Im nichtlinearen Bereich wird das Matrixverhalten vom Programm optimal plastisch angenommen. Die Materialversuche [1] haben gezeigt, dass das Materialverhalten sehr viel spröder ist und sich kein plastisches Plateau ergibt. Die Probe versagt deshalb bereits sehr früh im nichtlinearen Bereich, während mit dem Modell ein weiterer Anstieg der Festigkeit berechnet wird.

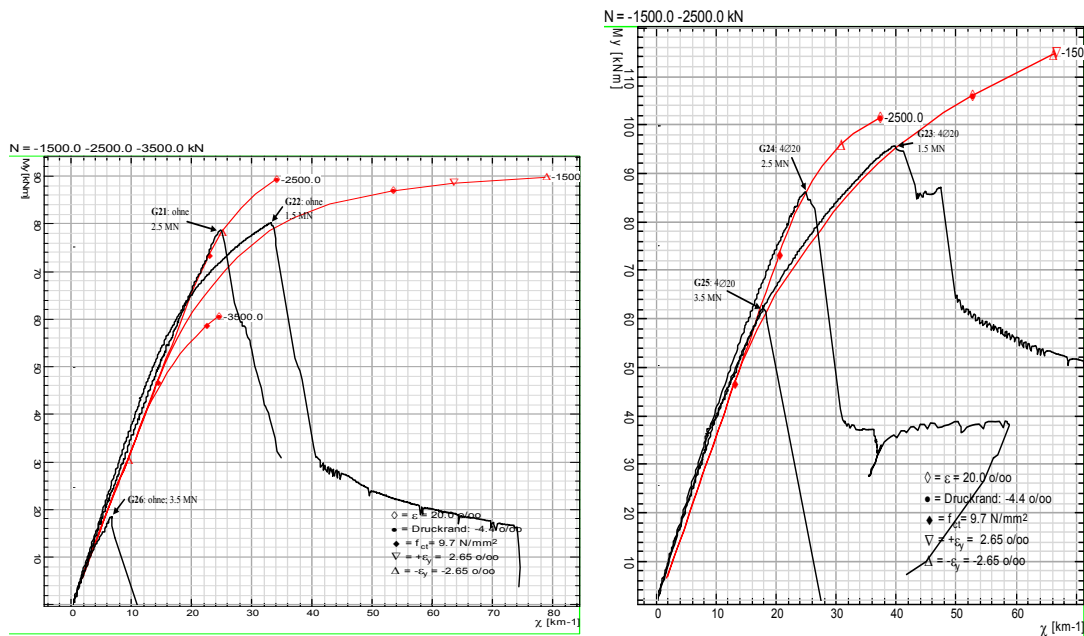


Bild 97a,b: Momenten – Krümmungs – Diagramm der unbewehrten (a) und bewehrten Proben (b) im Vergleich zu den Versuchsergebnissen (Diagramme gestaucht auf gleiche Massstäbe).

Dies zeigt, dass mit auf den Materialeigenschaften von Normalbeton basierenden Bemessungsprogrammen zwar für den Bereich der Gebrauchstauglichkeit (Voraussetzung: ungerissen, nicht plastifiziert) gute Abschätzungen des Verformungsverhaltens möglich sind. Im Gegensatz dazu wird für den Bereich des Grenzzustandes der Tragfähigkeit von den im Programm verwendeten Modellen mit Ausnutzung der Plastizität die Festigkeit überschätzt. Es gilt für die Berechnung, angepasste Materialgesetze anzusetzen, welche das spröde Verhalten des Materials berücksichtigen.

LINEARES MODELL AUF EXCEL

Mit einem einfachen, in Excel erstellten, Modell wird versucht, das entfestigende Verhalten besser abzubilden. Dem Modell liegt ein lineares Materialverhalten (Zug und Druck) mit einem abrupten Spannungsabfall bei Überschreiten der Druck- bzw. Zugfestigkeit zugrunde (Bild 98). Für eine detaillierte Beschreibung siehe Versuchsbericht Teile 1 Materialversuche [2].

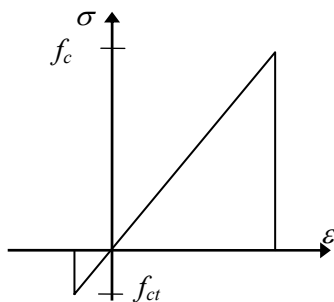


Bild 98: Materialgesetz der Modellierung

Die Auswertung erfolgt ausschliesslich für den unbewehrten Querschnitt. Es wird die Gesamtheit der möglichen Momenten – Krümmungs - Normalkraft Zustände ermittelt. Hierdurch wird ein umfassender Vergleich mit den Versuchen möglich und damit auch eine Betrachtung im Nachbruchbereich bei abnehmender Normalkraft.

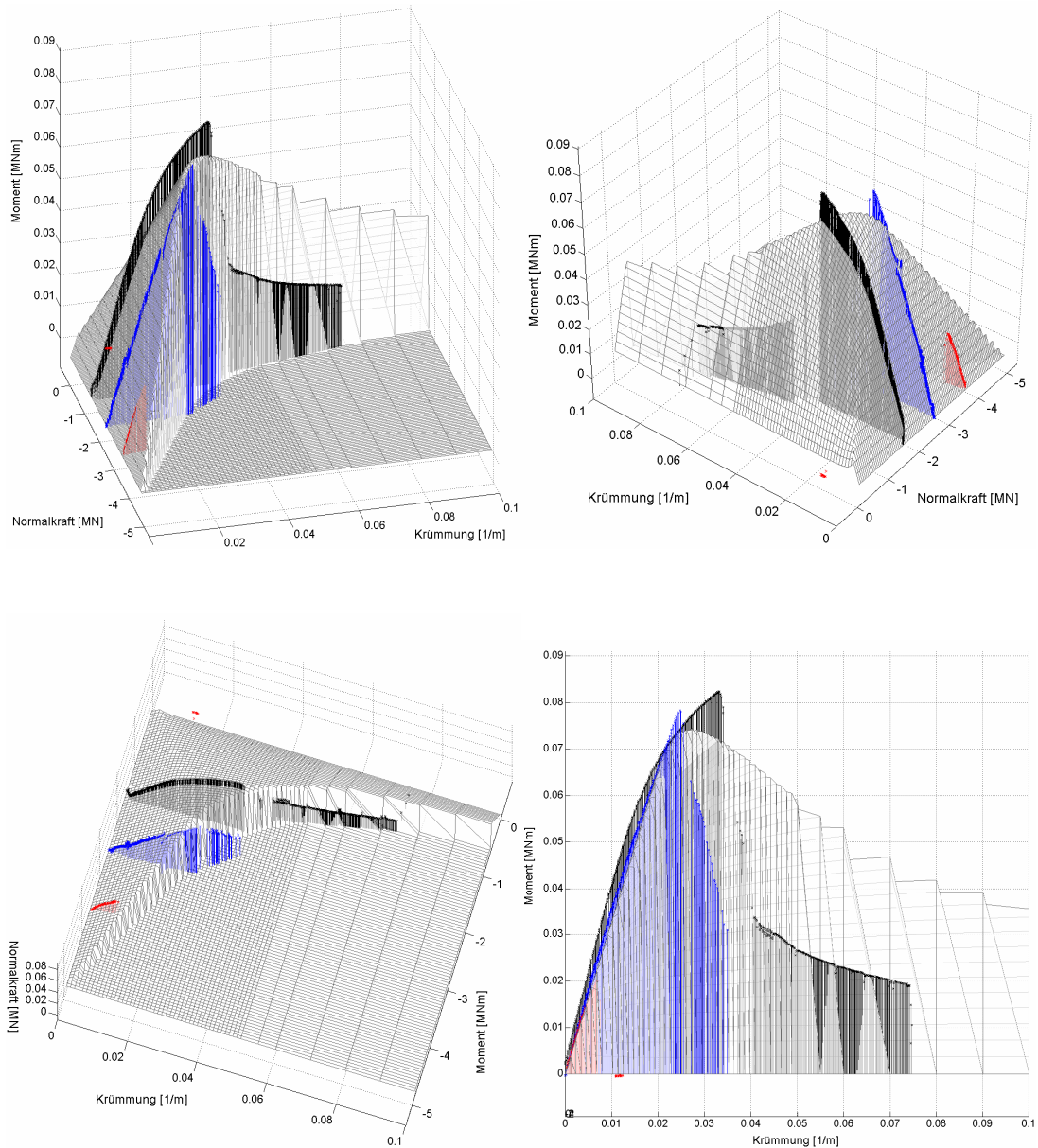


Bild 99a-d: Darstellung der Oberfläche der möglichen M - κ - N Beziehung des unbewehrten Querschnitts und der Versuchsergebnisse der unbewehrten Proben. (a-c) verschiedener 3D Ansichten; (d) Projektion auf die M - κ -Ebene

Die Versuchskurven folgen zunächst weitgehend der berechneten M - κ - N -Oberfläche, wobei das Modell das Moment jeweils leicht unterschätzt. Für die beiden Kurven mit duktilem Verhalten wird die Festigkeit jeweils bei einer mit dem Modell übereinstimmender Krümmung erreicht. Das Modell unterschätzt hierbei die gemessenen Biegemomente. Das spröde Verhalten der Probe mit grosser axialer Vorbelastung wird vom Modell überschätzt, die Probe versagt weitaus früher. Im Nachbruchbereich wird das Verhalten der duktilen Proben gut wiedergegeben. In der Ansicht von schräg oben (Bild 99c) lässt sich die Abnahme der Normalkraft im Nachbruchbereich sehr gut erkennen. Sie folgt weitgehend dem Verlauf der entfestigenden Flanke des Modells.

Mit diesem Modell konnte durch die Annahme eines elastisch - spröden Materialverhaltens eine untere Grenze des M - κ - Verlaufes abgesteckt werden. Die Fagus - Berechnung ermittelt aufgrund des elastisch - plastischen Materialmodells eine obere Grenze des Verlaufes. Dies kann man deutlich in den beiden ermittelten Modellkurven erkennen, die jeweils die Momente, die Biegefestigkeit und das

Nachbruchverhalten unterschätzen (\Rightarrow lineares Model auf Excel) bzw. überschätzen (\Rightarrow Fagus Querschnittsberechnung).

Um korrekte Bemessungen durchführen zu können müssen für ultra hochfeste Betone angepasste Materialmodelle entwickelt werden. Dies insbesondere, da die Gefahr besteht, dass der Einfachheit halber Berechnungen mit vom Normalbeton extrapolierten Materialmodellen durchgeführt werden und hierbei die Festigkeit überschätzt wird.

5.9 ZUSAMMENFASSUNG DER ERKENNTNISSE

Bei den Versuchen hat sich bezüglich des **Bruchverhaltens** gezeigt, dass es bei Aufbringen der Zwangsverdrehung bei allen Proben zunächst zu schichtweisen linsenförmigen Abplatzungen auf der Druckseite kommt. Das *Versagen* des Druckelements erfolgt letztendlich entweder als ein Druckversagen des verbleibenden Nettoquerschnittes mit Bildung eines diagonalen Schubrisses (Proben mit hoher Normalkraft oder keiner zusätzlichen Bewehrung) oder es bildet sich eine plastische Zone aus, wobei sich die weitere Verdrehung der Probe auf dieses plastische Gelenk lokalisiert (Proben mit niedriger Normalkraft und Bewehrung).

Bei Ausbildung eines *plastischen Gelenkes* sind innerhalb des Querschnittes drei deutlich voneinander zu unterscheidende Bereiche erkennbar: Der abgeplatzte Bereich in der Druckzone, eine plastisch verformte zentrale Zone und letztlich eine gerissene Zugzone.

Die Bewehrung führt teilweise zu einer Lokalisierung der *Längsrissbildung* auf der Ebene der Bewehrungselemente. Dieser Effekt ist bei Spannritzen und bei hohen axial Lasten geringer, hat aber bei einigen Proben quasi zu einer Längsspaltung über die gesamte Probenlänge geführt.

Zusammenfassend kann man feststellen: Je höher die axiale Last desto *spröder* das Verhalten. Bei niedriger Normalkraft kommt es zu einem *duktilen* Versagen. Die Rissbildung entwickelt sich langsam vorschreitend mit der aufgezwungenen Verdrehung. Bei hoher Normalkraft kommt es zu einem schlagartigen bis explosionsartigen Versagen. Mit einer passiven Bewehrung ist das Verhalten auch bei höherer Last noch duktil.

Dieses Verhalten spiegelt sich auch im **Momenten – Krümmungsdiagramm** wieder. Das schnelle Abfallen des Momentes ist charakteristisch für ein schlagartiges sprödes Versagen des Querschnittes. Ein langsames Abfallen mit einer Stabilisierung oder erneuten Verfestigung zeichnet ein duktileres Verhalten aus. Ebenso weist ein abgerundeter Verlauf im Bereich des maximalen Momentes auf ein duktileres Verhalten hin.

Die Druckelemente weisen zunächst eine **Steifigkeit** von EI_{hom} auf. Bei grösser werdender Krümmung kommt es zur *Rissbildung* und zu *Abplatzungen* und somit zur Abnahme der Steifigkeit der Probe. Man kann deutlich erkennen, dass bei den spröde versagenden Proben die Steifigkeit sehr viel schneller abnimmt als bei den duktil versagenden Druckelementen.

Die erreichte **Festigkeit** der Druckelemente ist abhängig von der Normalkraft und der Bewehrungsart. Je niedriger die Normalkraft, desto höher ist die Biegedruckfestigkeit. Bei den passiv bewehrten Proben ergibt sich für jedes Normkraftniveau jeweils die höchste Biegedruckfestigkeit. Bei den vorgespannten Proben zeigt sich zunächst bei niedriger axialer Last eine höhere Biegefestigkeit gegenüber der unbewehrten Probe. Bei hoher axialer Last ergibt sich, aufgrund des axialen Lastanteils aus der Vorspannung, eine sehr niedrige Festigkeit.

Die Versuche wurden mit **vereinfachten Modellen nachgerechnet**. Hierzu wurde einerseits das Querschnittsberechnungsprogramm Fagus mit einem elastisch – plastischem Materialverhalten und andererseits ein in Excel erstelltes Modell mit einem elastisch – sprödem Materialmodell benutzt. Hierdurch konnten die jeweils oberen und unteren Grenzwerte des Verhaltens ermittelt werden. Die beiden ermittelten Modellkurven unterschätzen (\Rightarrow lineares Modell auf Excel) bzw.

überschätzen (\Rightarrow Fagus Querschnittsberechnung) jeweils die Momente, die Biegefestigkeit und das Nachbruchverhalten. Für die Bemessungspraxis ist es wichtig, dass ein für den UHFB angepasstes Materialmodell ermittelt wird, da die Gefahr besteht, dass wenn man die heute für die Bemessung von Normalbeton üblichen elastisch – plastischen Materialmodelle nutzt die Biegefestigkeit des UHFB überschätzt.

LITERATUR

- [1] **Jungwirth J., Muttoni A.**, *Versuche an Bauteilen aus ultrahochfesten Beton – Teil 1 Material*, Projekt 00.02, Bericht 00.02.R3, EPFL-IS-BETON, Lausanne, **2004**.
- [2] **Dal Busco S.**, *Déformabilité et capacité portante des colonnes en béton armé*, Thèse de doctorat, 241 pages, Lausanne, Suisse, **1988**.
- [3] **Stirnimann D., Jungwirth J., Muttoni A.**, *Versuche an Stützen aus ultrahochfestem Beton*, Projekt 00.02, Bericht 00.02.R5, EPFL-IS-BETON, **2004**.
- [4] **Stirnimann D., Jungwirth J., Muttoni A.**, *Flambage de colonnes en Béton fibré à ultra haute performance (BFUHP)*, Projekt 00.02, Bericht 00.02.R6, EPFL-IS-BETON, Lausanne, **2004**.
- [5] **SN EN 262: 2003**, *Betonbauten*, SIA 262, 76 pp., Zürich, Schweiz, **2003**.

DANKSAGUNG

Das Forschungsprojekt ‚ultrahochfester Beton‘, in dessen Rahmen die hier dargestellten Versuche realisiert werden konnten, wird vom Verband der Schweizer Zementindustrie CEMSUISSE unterstützt und finanziert. Hierfür gilt ihnen unser grosser Dank.

Das IS - BETON bedankt sich bei den Firmen Eiffage und SIKA für die kostenlose Bereitstellung ihres ultrahochfesten Betons BSI[®]/CERACEM, sowie der Firma VSL für die Bereitstellung der Litzen und der Spannvorrichtung.

Ein grosser Dank gilt auch den Studenten Daniel Stirnimann, Matthias Neukomm und Jacques Seywert, sowie dem Mechaniker - Team des IS für die grosse Hilfe bei den umfangreichen Laborarbeiten.