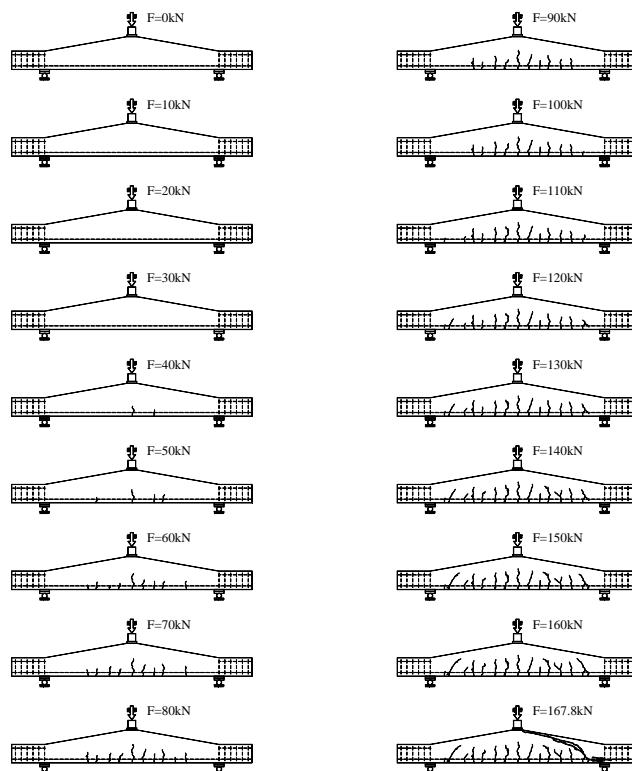
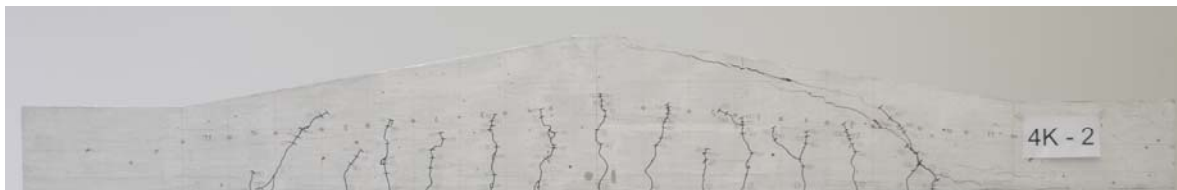


## Querkrafttragfähigkeit von gevouteten Stahlbetonbalken ohne Querkraftbewehrung

### Versuchsbericht Q01-2009



**Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. G. A. Rombach**  
**Mitarbeiter: M.Sc. Vu Hong Nghiep**

**Institut für Massivbau**  
**Technische Universität Hamburg-Harburg**

**Hamburg-Harburg, den 21. Dezember 2009**



## **Zusammenfassung**

Nachfolgend wird über Versuche zur Querkrafttragfähigkeit von gevouteten Stahlbetonbalken ohne Querkraftbewehrung berichtet. Mit Hilfe von experimentellen und numerischen Untersuchungen sollte geklärt werden, ob eine Voutung die Tragfähigkeit von Balken ohne Schubbewehrung ( $V_{ccd}$ ) signifikant beeinflusst. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass der Ansatz von  $V_{ccd}$  beim Querkraftnachweis nicht richtig ist.

Hamburg, den 21. Dezember 2009



**Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Problemstellung und Forschungsziel</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung	1
<b>2</b>	<b>Versuchsprogramm</b>	<b>2</b>
2.1	Festlegung der Versuchskörper	2
2.2	Baustoffe - Materialeigenschaften	5
2.2.1	Beton	5
2.2.2	Bewehrung	5
2.3	Herstellung der Versuchskörper	7
2.3.1	Belastung	9
<b>3</b>	<b>Versuchsergebnisse</b>	<b>10</b>
3.1	Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Normansätzen	17
3.2	Vergleich der Versuchsergebnisse mit verschiedenen Querkraftmodellen	18



# 1 Problemstellung und Forschungsziel

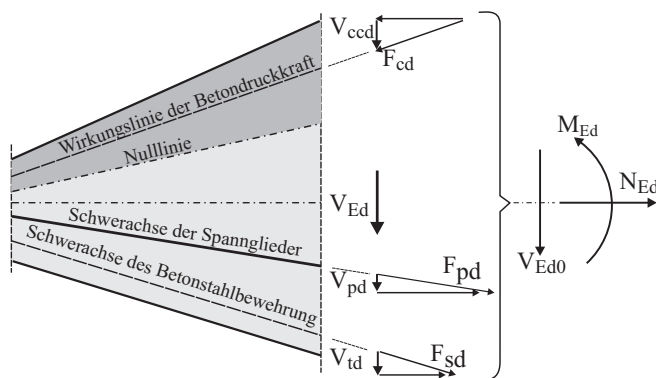
## 1.1 Problemstellung

Während für Stahlbetonbalken mit konstantem Rechteckquerschnitt schon sehr viele Traglastversuche durchgeführt wurden liegen nur sehr wenige experimentelle und theoretische Arbeiten zum Querkrafttragverhalten von gevouteten Trägern ohne Querkraftbewehrung vor. Es stellt sich daher die Frage, ob das derzeit bestehende, weitgehend auf empirischen Untersuchungen basierende Bemessungskonzept auch für Stahlbetonbalken mit veränderlicher Trägerhöhe zutrifft. Insbesondere ist bislang nicht geklärt, ob der nach den einschlägigen Normen zulässige Abzug der Kraftkomponenten des geneigten Druckgurtes ( $V_{ccd}$ ) bei Trägern ohne Querkraftbewehrung richtig ist. Nachfolgend wird über experimentelle und theoretischen Arbeiten berichtet, welchen diesen Problemen nachgehen.

Bei Stahlbetonträgern mit veränderlicher Nutzhöhe oder mit geneigter Spannliedführung ergibt sich der Bemessungswert der Querkraft  $V_{Ed}$  nach DIN 1045-1 unter Berücksichtigung der Kraftkomponenten des Druck- und Zuggurtes rechtwinklig zur Bauteilachse (DIN-FB 102, §4.3.2.4.5 (1)).

$$V_{Ed} = V_{Ed0} - V_{ccd} - V_{td} - V_{pd} \tag{1.1}$$

- mit:  $V_{Ed}$  Bemessungswert der einwirkenden Querkraft  
 $V_{Ed,0}$  Bemessungswert der auf den Querschnitt einwirkenden Querkraft  
 $V_{ccd}$  Bemessungswert der Querkraftkomponente der Druckzone  
 $V_{td}$  Bemessungswert der Querkraftkomponente der Betonstahlzugkraft  
 $V_{pd}$  Querkraftkomponente infolge des geneigten Spannlieds parallel zu  $V_{Ed,0}$  im Grenzzustand der Tragfähigkeit. Falls die Spannstahlspannung die charakteristische Festigkeit übersteigt gilt:  
 $V_{pd} \leq A_p \cdot f_{p01,k} / \gamma_s \cdot \tan \alpha$  im anderen Falle gilt:  $V_{pd} \leq \gamma_p \cdot P_{m,t} \cdot \tan \alpha$



**Bild 1** Querkraftanteile bei veränderlicher Querschnittshöhe (DIN 1045-1, Bild 31)

Die Querkrafttragfähigkeit eines Stahlbetonbalkens ohne Querkraftbewehrung beträgt:

$$V_{Rd,ct} = \left[ \frac{0,15}{\gamma_c} \cdot \kappa \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,12 \cdot \sigma_{cd} \right] \cdot b_w \cdot d \tag{1.2}$$

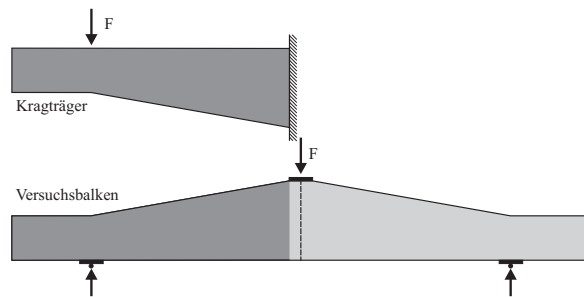
$$V_{Rd,ct,min} = \left[ \frac{\kappa_1}{\gamma_c} \cdot \sqrt{\kappa^3 \cdot f_{ck}} - 0,12 \cdot \sigma_{cd} \right] \cdot b_w \cdot d \tag{1.3}$$

- Mit:  $\kappa$  Beiwert zur Berücksichtigung des Maßstabeffektes  
 $\kappa = 1 + \sqrt{200/d[mm]} \leq 2$   
 $\rho_l$  Längsbewehrungsgrad  
 $\rho_l = A_{sl} / (b_w \cdot d) \leq 0,02$   
 $\sigma_{cd}$  Bemessungswert der Betonspannungen in Höhe und Richtung der Schwerachse des Querschnitts  
 $\kappa_1 = 0,0525$  für  $d \leq 600$  mm  
 $\kappa_1 = 0,0375$  für  $d \geq 800$  mm

## 2 Versuchsprogramm

### 2.1 Festlegung der Versuchskörper

Bei Stahlbetonbauteilen ohne Querkraftbewehrung handelt es sich im Wesentlichen um Platten, da Balken immer einen Mindestschubbewehrung aufweisen müssen. Als Versuchskörper wurden jedoch Balken gewählt, da hiermit die experimentellen Untersuchungen aussagekräftiger sind. Bei Flächenbauteilen kommt als zusätzliche unbekannte Größe der zweiachsiale Lastabtrag hinzu. Zur Vereinfachung wurde als statisches Ersatzsystem kein Kragarm, sondern ein zentrisch belasteter Einfeldträger gewählt (Bild 1).



**Bild 1** Versuchskörper

(10x20 cm) mittig mit einer hydraulischen Presse bis zum Bauteilversagen belastet.

Die Versuchsserie umfasste  $2 \times 9 = 18$  Balken (Bild 2). Die Neigung des Druckgurtes  $\alpha$  wurde in 4 bzw. 5 Stufen von  $0^\circ$  bis  $10,1^\circ$  variiert. Die Stützweite betrug 3,0 m (Balken „L“) bzw. 1,80 m, (Balken „K“) was einer Schubschlankheit  $a/d_{\max}$  von 5,0 bzw. 3,0 entspricht. Alle Balken wiesen unter der mittigen Pressenlast eine Höhe von  $h = 340$  mm auf. Im Bereich außerhalb der Vouten wurden Bügel eingebaut um ein Querkraftversagen zu vermeiden. Die beidseitig gelenkig gelagerten Träger wurden über eine Stahlplatte

Es wurden jeweils 2 identische Versuchskörper hergestellt, um eine Aussage zu den Streuungen der Messergebnisse machen zu können. Alle Balken wiesen eine Längsbewehrung von  $3 d_s = 20$  mm auf. Hiermit ergibt sich ein Bewehrungsgrad  $\rho_l$  von 1,5 % für  $d = 0,30$  m bzw. 3,1 % für  $d = 0,15$  m. Die Längsbewehrung wurde so groß gewählt, um einen Biegebruch vor dem Querkraftversagen zu vermeiden.

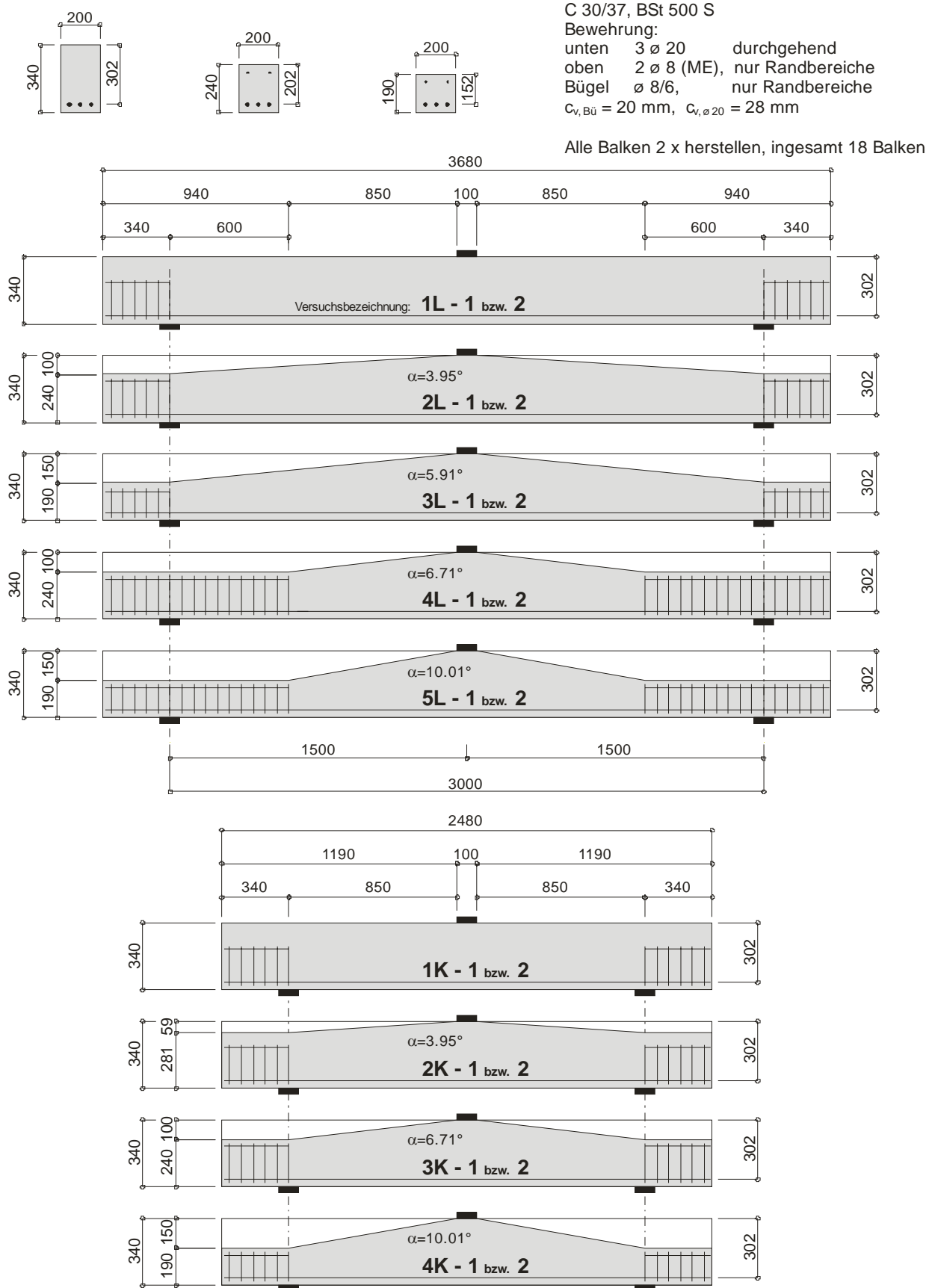
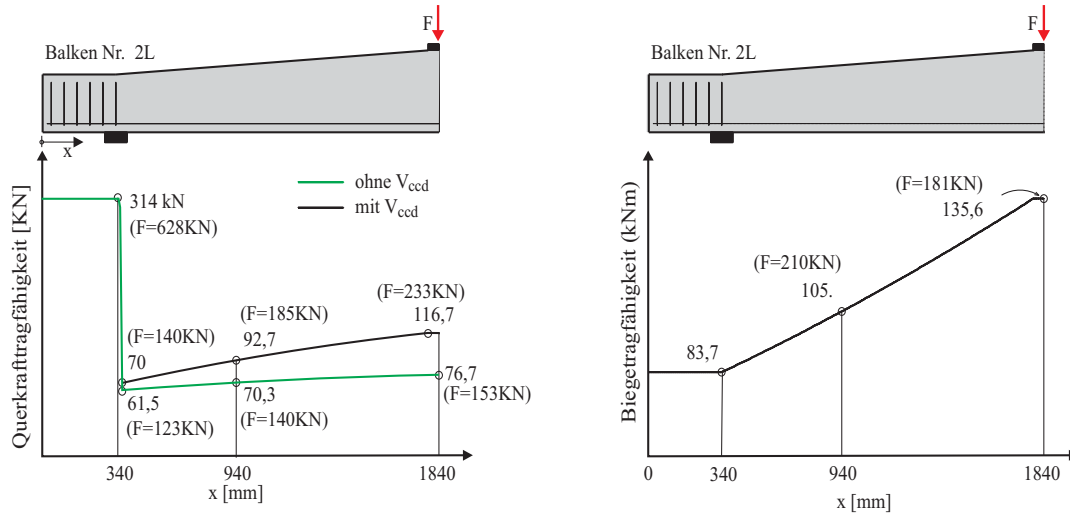


Bild 3 Versuchskörper

Die Bemessung der Stahlbetonbalken erfolgte nach DIN 1045-1. Bild 4 zeigt exemplarisch die Querkraft- und Biegetragfähigkeit des Balkens 2L, wobei die an Betonproben bestimmten Materialkennwerte (Anhang A) angesetzt wurden. Zusätzlich wurde die maximale Verformung in Feldmitte mit Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens bzw. der Rissbildung ermittelt.



**Bild 4** Querkraft- und Biegetragfähigkeit des Balkens 2L

**Tabelle 1** Rechnerische Tragfähigkeiten

Bal- ken Nr.	Querkrafttragfähigkeit				Momententragfähigkeit			Versa- gensart
	$F_V$ ohne $V_{cdd}$ [kN]	$F_V$ mit $V_{cdd}$ [kN]	Zunahme Voute [%]	Maßgeb. Stelle	$F_M$ [kN]	Durchbiegung gerissen (mm)	Maßgeb. Stelle	
1L	153	153	0	Auflager	181	10,25	Feldmitte	Querkraft
2L	123	140	14	Auflager	181	12,75	Feldmitte	Querkraft
3L	93	119	28	Auflager	181	14,75	Feldmitte	Querkraft
4L	123	210	71	Auflager	181	15,25	Feldmitte	Querkraft
5L	95	237	160	Auflager	181	22,00	Feldmitte	Querkraft
1K	153	153	0	Auflager	301	3,60	Feldmitte	Querkraft
2K	140	155	11	Auflager	301	4,10	Feldmitte	Querkraft
3K	123	152	24	Auflager	301	4,40	Feldmitte	Querkraft
4K	94	139	48	Auflager	301	4,50	Feldmitte	Querkraft

## 2.2 Baustoffe - Materialeigenschaften

### 2.2.1 Beton

Alle Versuchskörper wurden zur gleichen Zeit in einer Batterieschalung betoniert und weisen somit identische Betoneigenschaften auf. Es wurde Transportbeton der Güte C30/37 verwendet, welcher jedoch eine erheblich höhere Festigkeit entwickelte (Anhang A).

#### Betonzusammensetzung:

Zement	CEM III/A 42,5N
Zementgehalt	370 kg/m <sup>3</sup>
Wassergehalt	182 kg/m <sup>3</sup>
Wasser/Bindemittel-Wert	0,49
Korngrößenverteilung	
0 mm - 2 mm	748 kg/m <sup>3</sup>
2 mm - 8 mm	368 kg/m <sup>3</sup>
8 mm - 16 mm	700 kg/m <sup>3</sup>
Zusatzmittel (1BV N9)	2,96 kg/m <sup>3</sup>
Dichte des frischen Betons	2371 kg/m <sup>3</sup>

Die vorhandenen Betonfestigkeiten wurden im Alter von 28, 52 und 101 Tagen mittels zylindrischer und würfelförmiger Probekörper experimentell bestimmt. Nach 52 Tagen ergaben sich bei trockener Lagerung der Versuchskörper folgende Mittelwerte (siehe Anhang A):

Betondruckfestigkeit	$f_{c,cyl} = 54,0 \text{ MPa}$ (50,0 , 52,0 58,0 MPa)
charakteristische Betondruckfestigkeit:	$f_{ck} = f_{c,cyl} - 4 \text{ MPa} = \mathbf{50,0 \text{ MPa}}$
Elastizitätsmodul	$E_c = 31.294 \text{ MPa}$
Spaltzugfestigkeit	$f_{ct,cyl} = 3,6 \text{ MPa}$

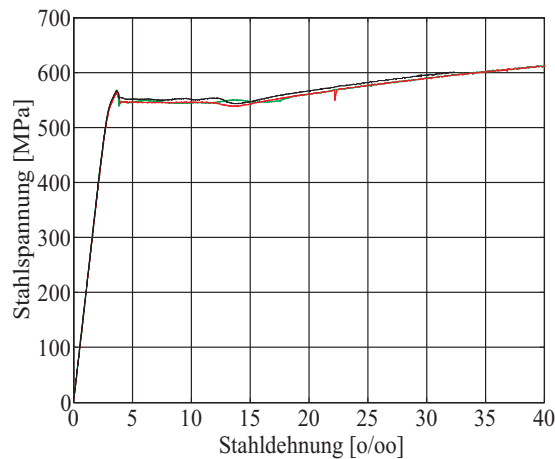
Die Festigkeitswerte zu den Versuchszeitpunkten wurden für die Bestimmung der rechnerischen Tragfähigkeiten mittels folgender Gleichung aus dem CEB-FIP Model Code 90 ermittelt.

$$f_{ck,t} = f_{ck,28} \cdot e^{s[1-\sqrt{28/t}]} \quad (2.4)$$

Der Faktor  $s$  wurde hierbei so bestimmt, dass sich die gemessenen Versuchsfestigkeiten bei 28, 52 und 101 Tagen möglichst genau ergeben. Der Wert liegt  $s$  zwischen 0,21 und 0,35.

### 2.2.2 Bewehrung

Die Bewehrung der Balken bestand aus Stabstahl  $\varnothing 20 \text{ mm}$  der Güte BST 500 S. Die experimentell bestimmten Spannungs-Dehnungs-Linien sind im folgenden Bild dargestellt. Wie man aus den  $\sigma$ - $\epsilon$ -Kurven erkennt, betrug die Fließspannung des Stahls  $f_y = 550 \text{ MPa}$  und der Elastizitätsmodul  $E_s = 190.150 \text{ MPa}$ .



**Bild 5** Spannungs-Dehnungs-Linien des Betonstahls

Nachfolgend sind die wesentlichen Daten der Versuchskörper zusammengestellt.

**Tabelle 3** Zusammenstellung der wichtigsten Parameter der Versuchskörper

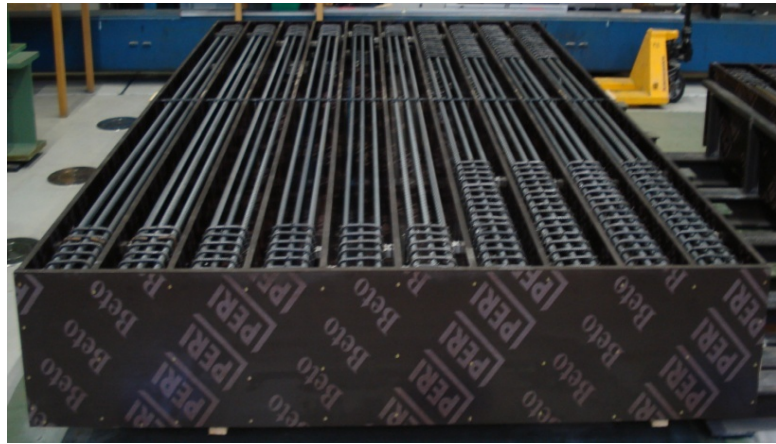
Nr.	Balken	Winkel der Voute $\alpha$	$d$ (mm)	$b$ (mm)	$a/d_{\max}$	$f_{ck}$ [MPa]
1	1L-1	0,00	300–300	200	5	48,1
2	1L-2	0,00	300–300	200	5	49,2
3	2L-1	3,95	200–300	200	5	49,5
4	2L-2	3,95	200–300	200	5	50,0
5	3L-1	5,91	150–300	200	5	50,2
6	3L-2	5,91	150–300	200	5	51,0
7	4L-1	6,71	200–300	200	5	52,2
8	4L-2	6,71	200–300	200	5	52,4
9	5L-1	10,01	150–300	200	5	53,1
10	5L-2	10,01	150–300	200	5	53,3
11	1K-1	0,00	300–300	200	3	53,9
12	1K-2	0,00	300–300	200	3	54,0
13	2K-1	3,95	240–300	200	3	54,2
14	2K-2	3,95	240–300	200	3	54,2
15	3K-1	6,71	200–300	200	3	54,3
16	3K-2	6,71	200–300	200	3	54,3
17	4K-1	10,01	150–300	200	3	54,8
18	4K-2	10,01	150–300	200	3	54,8

## 2.3 Herstellung der Versuchskörper

Die Versuchskörper wurden in der Versuchshalle des Institutes für Massivbau hergestellt und dort auch bis zu der Versuchsdurchführung gelagert. Es wurde Transportbeton der Güte C30/37 verwendet.



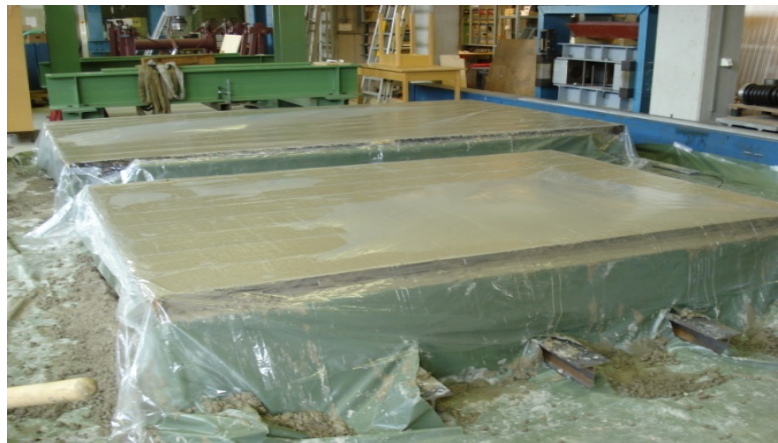
(a) Schalung



(b) Bewehrung



(c) Betonprüfkörper



(d) Nachbehandlung

**Bild 6** Herstellung der Versuchskörper

### 3.2.3 Messsystem - Datenerfassung

Während der Versuche wurden die Verformungen an der Trägerunterseite, die Dehnungen an der Trägeroberseite (Druck) und in der Schwerachse sowie die Öffnung des Biegerisses in Trägermitte kontinuierlich aufgezeichnet (Bild 7). Im Einzelnen wurden folgende Werte gemessen:

- 2x3 Betondehnungen ( $\epsilon_{l\ 1-3}$ ,  $\epsilon_{r\ 1-3}$ ) an der Trägeroberseite (3 auf jeder Seite)
- 2x9 Betondehnungen (manuell gemessen) in der Schwerachse des Trägers ( $\epsilon_{l\ 4-12}$ ,  $\epsilon_{r\ 4-12}$ )
- 3x Verformungen ( $w_b$ ,  $w_m$ ,  $w_r$ )
- 1x Rissöffnung ( $r_m$ ) in der Feldmitte

Weiterhin wurden die Versuche mit 2 Videokameras aufgezeichnet. Die Anordnung der Messelemente ist exemplarisch für den Balken 2L im folgenden Bild dargestellt.

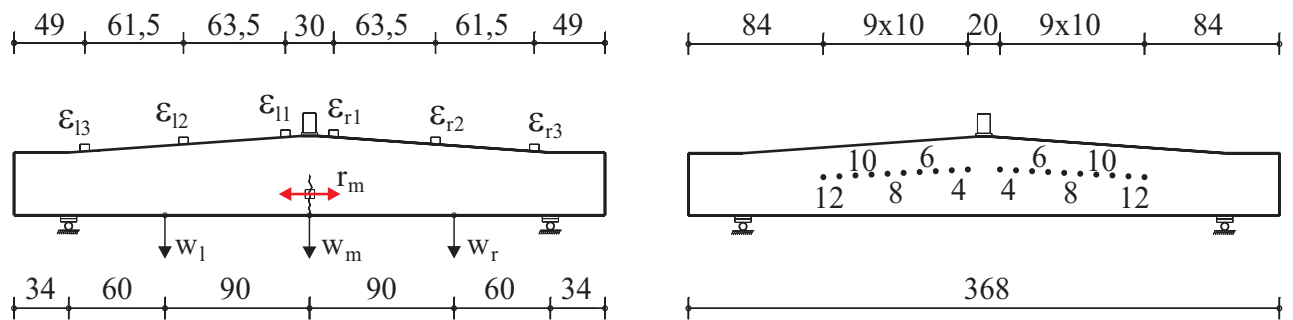
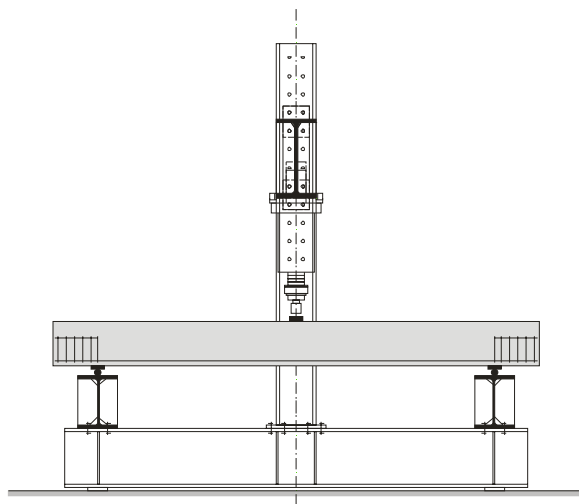


Bild 7 Anordnung der Messelemente (Balken 2L)

### 3.3 Versuchsdurchführung

#### 3.3.1 Versuchsanordnung

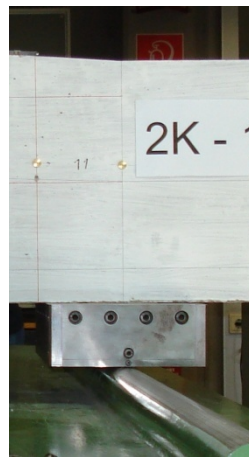
Die Balken wurden mittig durch eine hydraulische Presse bis zum Bruch stufenweise belastet. Die Kontaktfläche der Lastverteilungsplatte betrug 100 mm x 200 mm. Die Träger waren über eine Stahlplatte auf Rollen gelenkig und verschieblich gelagert.



a) Versuchsrahmen



(b) Auflager



(c) Unverschiebliches Auflager

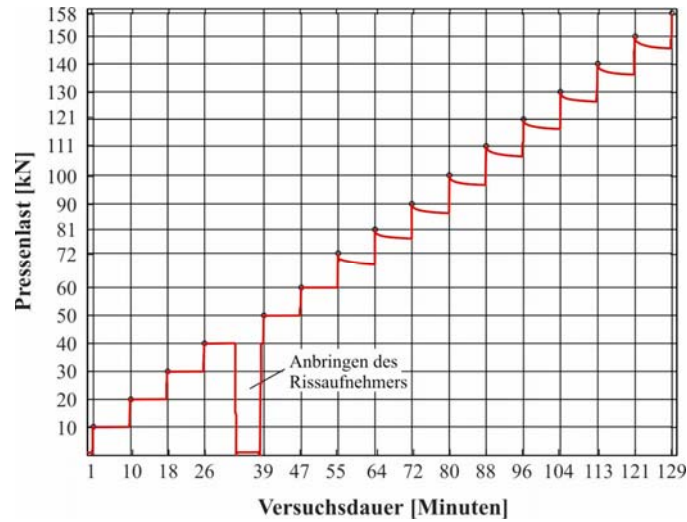


(d) Hydraulische Presse

Bild 8–Versuchsaufbau

2.3.1 Belastung

Die Belastung wurde alle 8 Minuten um ca. 10 kN gesteigert. Die Zeit wurde u.a. für die manuelle Messung der Betondehnungen in der Schwerachse benötigt. Weiterhin wurden alle neuen Risse markiert. Der Dehnungsaufnehmer ( $r_m$ ), welcher die Breite des Biegerisses in Feldmitte aufnahm, konnte erst beim Auftreten des ersten Biegerisses angebracht werden. Im Bereich der Bruchlast wurde auf Wegsteuerung umgeschaltet.



**Bild 9** Last-Zeit-Kurve des Versuchskörper 1L-2

### 3 Versuchsergebnisse

(a) **Versagensart:** Von den 18 durchgeführten Versuchen trat bei 14 Balken (1L, 2L, 3L, 1K, 2K, 3K und 4K) ein Querkraft- und bei 4 (4L, 5L) ein Biegeversagen auf (Tab. 4).

(b) **Biegeversagen:** Die Balken 4L und 5L, welche auf Biegung versagten, zeigten ein sehr duktileres Tragverhalten. Im Bereich der Bruchlast vergrößerte sich die Breite der Biegerisse in Feldmitte und die Durchbiegung nahm sehr stark zu. Der Balken versagte jedoch noch nicht, da die Spannung in der Bewehrung die Bruchgrenze nicht erreichte.

(c) **Querkraftversagen:** Das Querkraftversagen erfolgte fast immer sehr plötzlich, nachdem sich der kritische, breite Schubriss gebildet hatte. Die Balken wiesen anschließend keine Tragfähigkeit mehr auf. Der kritische Schubriss war in der Laststufe vor dem Bruch oftmals nicht zu erkennen. Das Versagen lässt sich in 3 Stufen aufteilen:

1. Zunächst bilden sich vertikale Biegerisse. Bei einer Belastung von ca.  $0,5F_u$  hat der maximale Biegeriss in Feldmitte die Schwerachse des Balkens erreicht.
2. Die Höhe und die Breite der Biegerisse nehmen zu und es bilden sich geneigte Schubrisse.
3. Bei der Bruchlast  $F_u$  bildet sich plötzlich ein neuer, breiter Schubriss. Es kommt zu einem Versagen des Verbundes zwischen Beton und Längsbewehrung. Der breite Schubriss ist größtenteils sehr plötzlich aus einem Biegeriss entstanden (Bild 10c).

Nähere Einzelheiten zur Rissentwicklung können dem Anhang B entnommen werden. In Tabelle 4 sind die wesentlichen Versuchsergebnisse aufgelistet.

**Tabelle 4**–Versuchsergebnisse

Balken	$d$ [mm]	$b$ [mm]	$a/d$	$\alpha$ [°]	$\rho$ [%]	$f_{ck}$ [MPa]	$F_{Test}$ [kN]	Versagensart
1L-1	300 - 300	200	5	0,00	1,57 - 1,57	48,1	151	Querkraft
1L-2	300 - 300	200	5	0,00	1,57 - 1,57	49,2	158	Querkraft
2L-1	200 - 300	200	5	3,95	2,36 - 1,57	49,5	150	Querkraft
2L-2	200 - 300	200	5	3,95	2,36 - 1,57	50,0	149	Querkraft
3L-1	150 - 300	200	5	5,91	3,14 - 1,57	50,2	133	Querkraft
3L-2	150 - 300	200	5	5,91	3,14 - 1,57	51,0	139	Querkraft
4L-1	200 - 300	200	5	6,71	2,36 - 1,57	52,2	207	Biegung
4L-2	200 - 300	200	5	6,71	2,36 - 1,57	52,4	207	Biegung
5L-1	150 - 300	200	5	10,01	3,14 - 1,57	53,1	206	Biegung
5L-2	150 - 300	200	5	10,01	3,14 - 1,57	53,3	207	Biegung
1K-1	300 - 300	200	3	0,00	1,57 - 1,57	53,9	151	Querkraft
1K-2	300 - 300	200	3	0,00	1,57 - 1,57	54,0	139	Querkraft
2K-1	240 - 300	200	3	3,95	1,96 - 1,57	54,2	167	Querkraft
2K-2	240 - 300	200	3	3,95	1,96 - 1,57	54,2	170	Querkraft
3K-1	200 - 300	200	3	6,71	2,36 - 1,57	54,3	159	Querkraft
3K-2	200 - 300	200	3	6,71	2,36 - 1,57	54,3	160	Querkraft
4K-1	150 - 300	200	3	10,01	3,14 - 1,57	54,8	170	Querkraft
4K-2	150 - 300	200	3	10,01	3,14 - 1,57	54,8	168	Querkraft

Wie man aus Tabelle 5 erkennt liefert der Ansatz der DIN 1045-1 mit  $V_{ccd}$  teilweise auf der unsicheren Seite liegende Werte. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Bemessungswerte mit einem Sicherheitsfaktor von  $\gamma = 1,8$  multipliziert wurden um den Mittelwert (Versuchswert) zu erhalten. Die rechnerische Tragfähigkeit der Versuche 1K mit konstantem Querschnitt liegt erheblich über den Versuchswerten.

**Tabelle 5** – Vergleich der Normtragfähigkeiten (Mittelwerte  $\gamma = 1,8$ ) mit der maximalen Versuchslast

Balken	Rechn. Querkrafttragfähigkeit [kN]		$f_{ck}$ [MPa]	Versuch [kN]
	ohne $V_{ccd}$	mit $V_{ccd}$		
1L-1	166	166	48,1	151
1L-2	167	167	49,2	158
2L-1	143	158	49,5	150
2L-2	143	158	50,0	149
3L-1	117	137	50,2	133
3L-2	117	138	51,0	139
4L-1	-	-	52,2	207
4L-2	-	-	52,4	207
5L-1	-	-	53,1	206
5L-2	-	-	53,3	207
1K-1	173	173	53,9	151
1K-2	173	173	54,0	139
2K-1	163	180	54,2	167
2K-2	163	180	54,2	170
3K-1	155	184	54,3	159
3K-2	155	184	54,3	160
4K-1	134	178	54,8	170
4K-2	134	178	54,8	168

Tabelle 6–Versuchsergebnisse: Durchbiegung, Dehnungen und Rissbreiten beim Bruch

	$W_m$ [mm]	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_3$	$r_m$ [mm]
		[mm/m]			
		-1,38	-0,65	-0,08	
		-1,40	-0,60	-0,08	
1L1	10,80	-1,39	-0,63	-0,08	
		-1,61	-0,50	-0,09	
		-1,40	-0,65	-0,12	
1L2	11,50	-1,51	-0,58	-0,11	0,31
		-1,22	-0,86	-0,10	
		-1,50	-0,85	-0,09	
2L1	11,90	-1,36	-0,86	-0,10	0,35
		-1,47	-0,90	-0,10	
		-1,40	-0,84	-0,10	
2L2	12,00	-1,44	-0,87	-0,10	0,32
		-1,28	-0,80	-0,12	
		-1,28	-0,80	-0,11	
3L1	11,80	-1,28	-0,80	-0,12	0,30
		-1,17	-0,92	-0,11	
		-1,13	-1,00	-0,10	
3L2	12,10	-1,15	-0,96	-0,11	0,28
		-2,00	-1,81	-1,62	
		-2,08	-1,70	-1,60	
4L1	20,00	-2,04	-1,76	-1,61	0,30
		-1,82	-1,80	-1,65	
		-2,05	-1,78	-1,65	
4L2	20,00	-1,94	-1,79	-1,65	0,50
		-1,80	-2,50	-3,25	
		-1,95	-2,40	-3,30	
5L1	28,00	-1,88	-2,45	-3,28	0,50
		-1,99	-2,75	-3,20	
		-1,80	-2,50	-3,00	
5L2	25,00	-1,90	-2,63	-3,10	0,30

	$W_m$ [mm]	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_3$	$r_m$ [mm]
		[mm/m]			
		-0,78	-0,26	-0,10	
		-0,63	-0,47	-0,10	
1K1	2,80	-0,71	-0,37	-0,10	0,19
		-0,55	-0,34	-0,07	
		-0,71	-0,26	-0,07	
1K2	2,35	-0,63	-0,30	-0,07	0,14
		-0,90	-0,41	-0,09	
		-0,95	-0,41	-0,09	
2K1	3,10	-0,93	-0,41	-0,09	0,19
		-0,89	-0,44	-0,11	
		-0,98	-0,42	-0,12	
2K2	3,20	-0,94	-0,43	-0,12	0,19
		-0,81	-0,48	-0,10	
		-0,81	-0,47	-0,10	
3K1	3,20	-0,81	-0,48	-0,10	0,19
		-0,89	-0,63	-0,13	
		-0,77	-0,47	-0,09	
3K2	3,20	-0,83	-0,55	-0,11	0,21
		-0,81	-0,56	-0,13	
		-0,92	-0,55	-0,14	
4K1	2,88	-0,87	-0,56	-0,14	0,23
		-0,93	-0,72	-0,14	
		-0,90	-0,79	-0,12	
4K2	3,35	-0,92	-0,76	-0,13	0,25

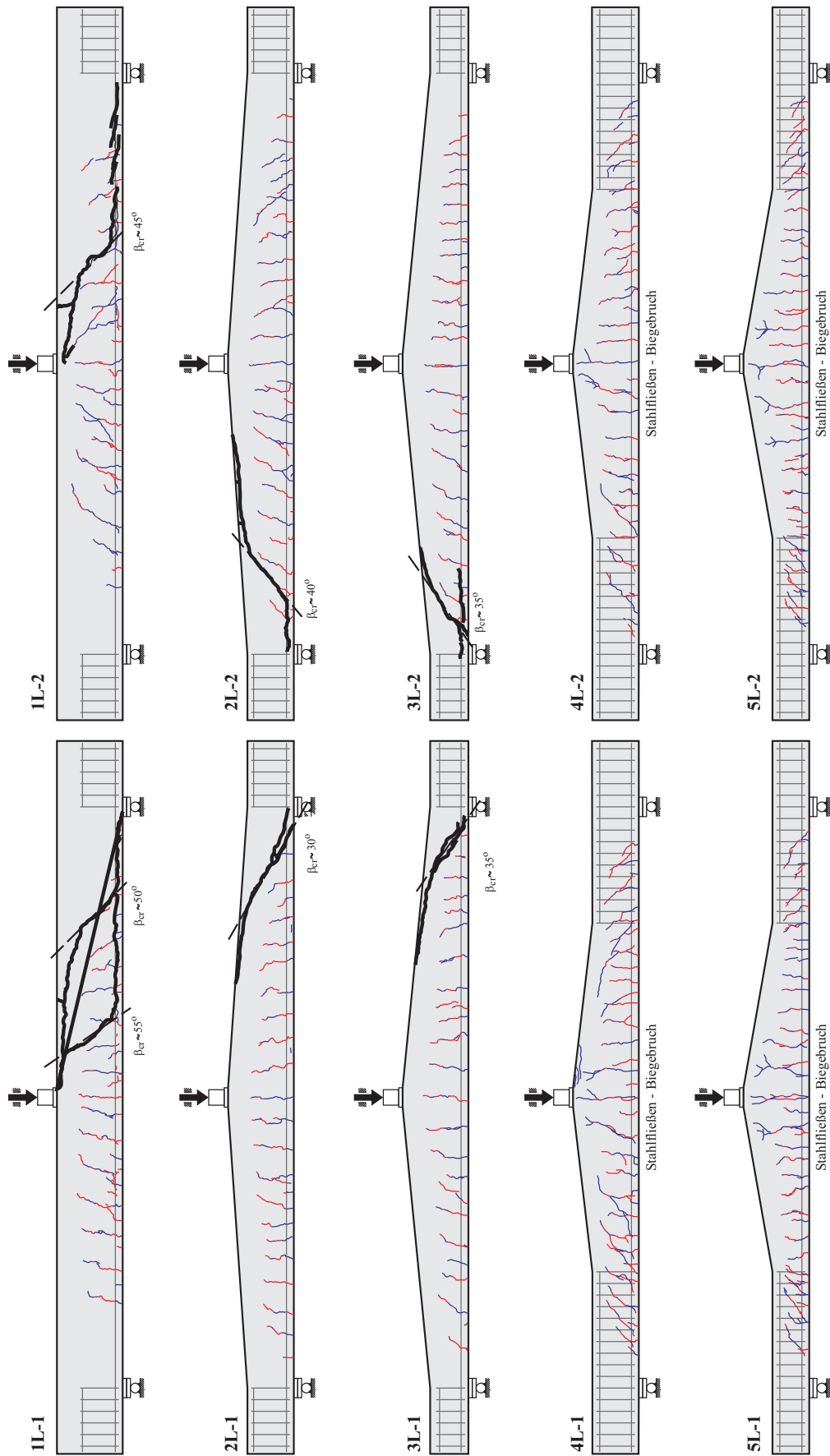


Bild 10a Rissbilder der langen Balken (L)

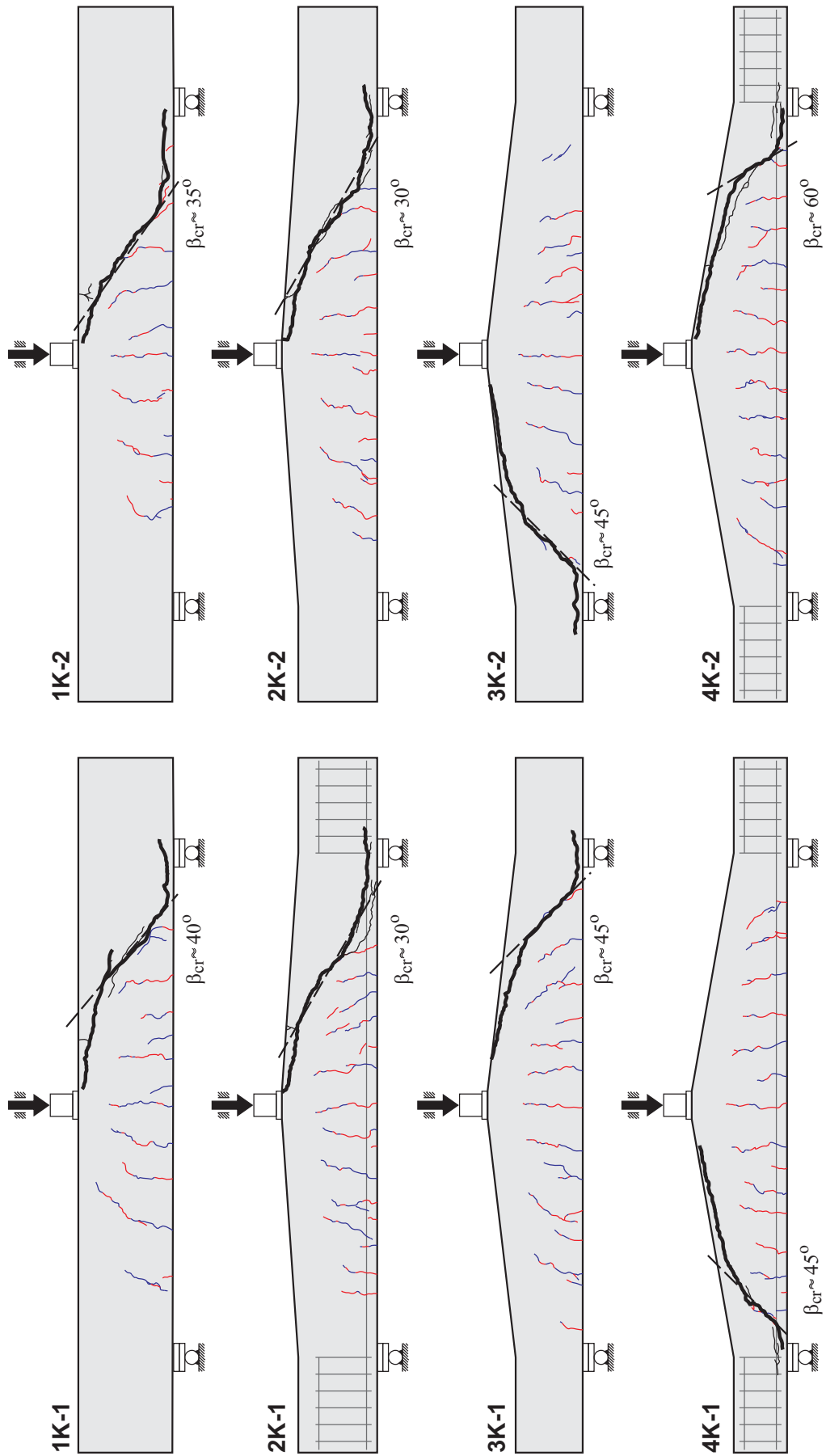
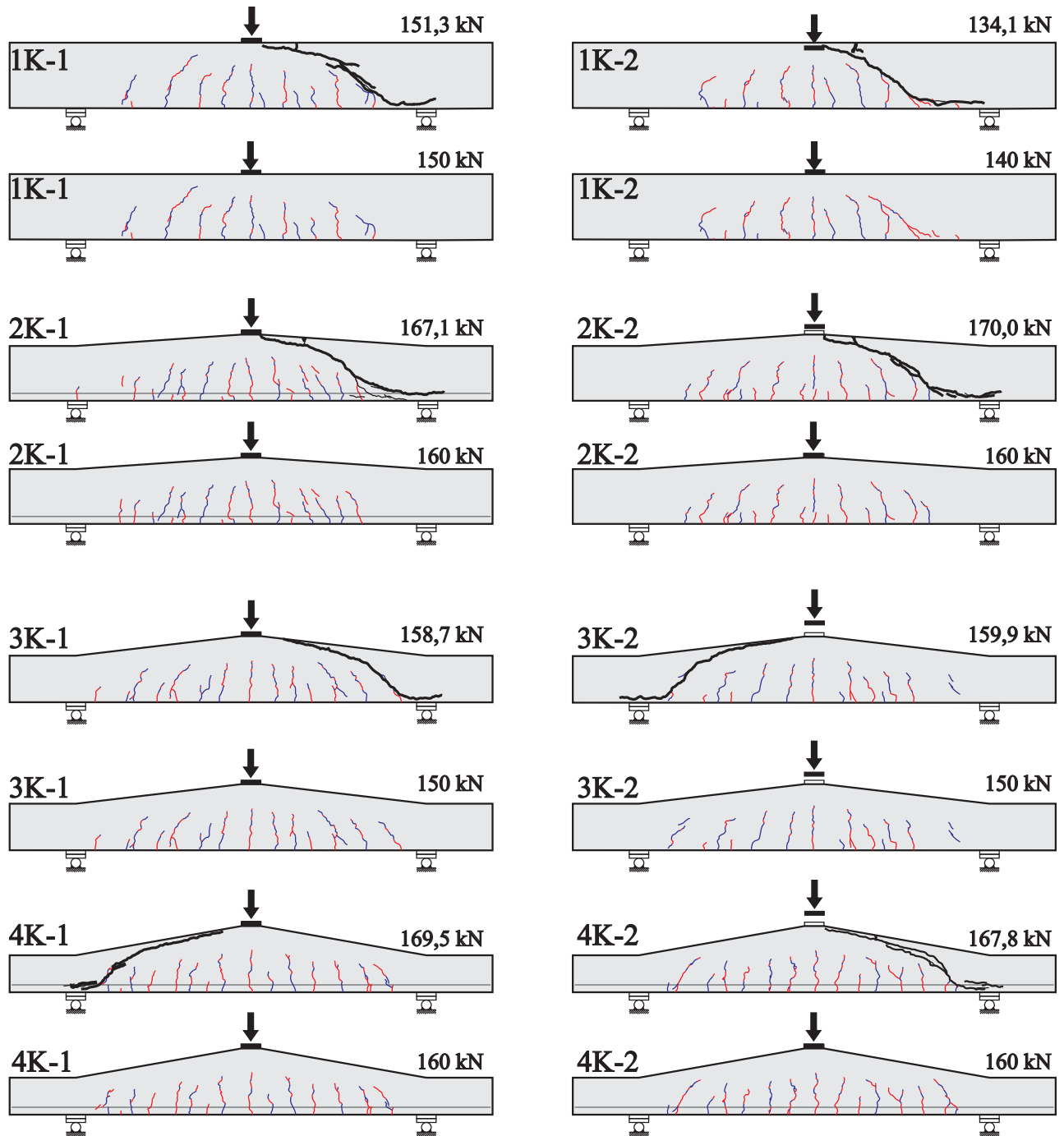


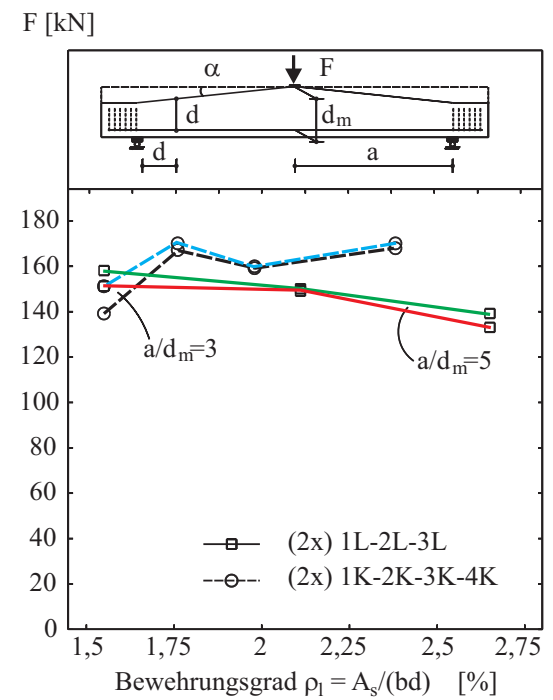
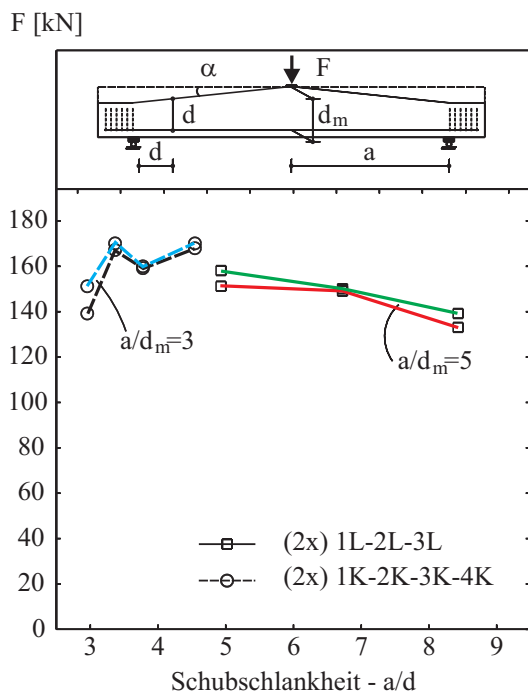
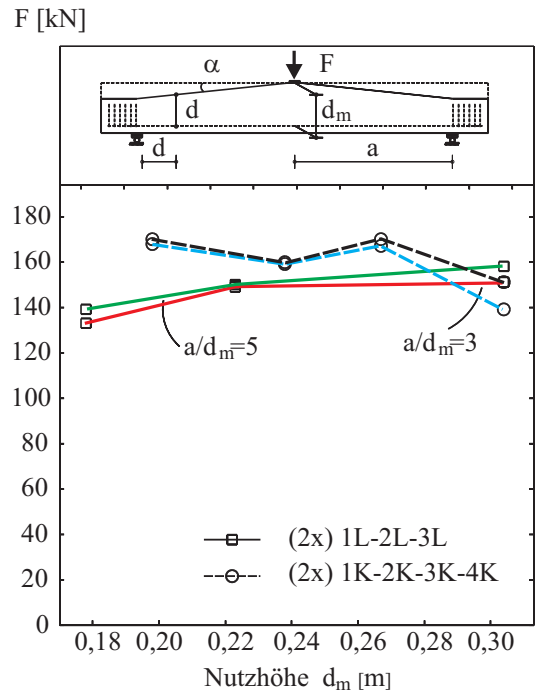
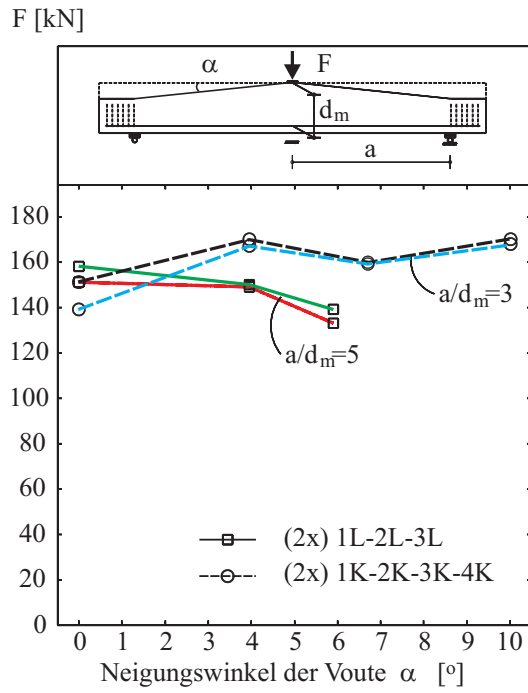
Bild 10b Rissbilder der kurzen Balken (K)



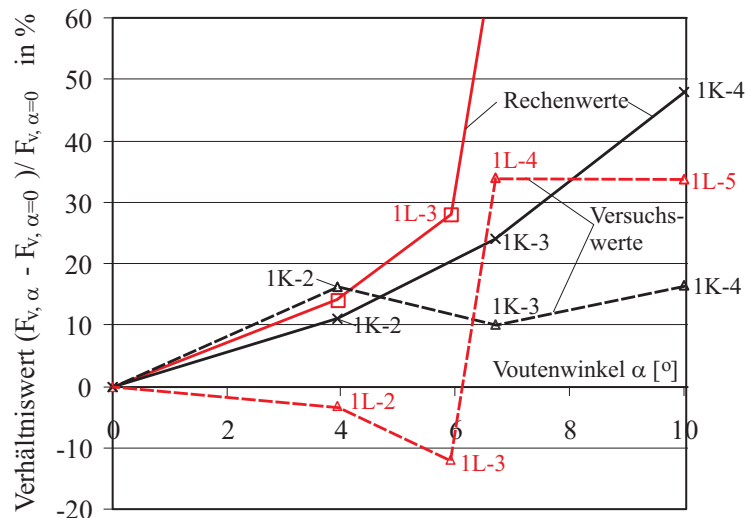
**Bild 10c** Rissbilder der kurzen Balken (K) beim Versagen und in der Laststufe zuvor

Es zeigt sich, dass sowohl die Grenzlasten als auch die Verformungen, Betondehnungen und Rissbreiten der Versuche mit gleicher Geometrie sehr gut übereinstimmen. Die Betondehnungen verlaufen bis kurz vor dem Versagen nahezu linear. Gleiches gilt auch für die Durchbiegung in der Mitte nach Auftreten des ersten Biegerisses.

In Bild 11 sind die wesentlichen Versuchsergebnisse grafisch dargestellt. Man erkennt, dass die Traglasten bei den kurzen Balken mit steigendem Voutenwinkel abnehmen, während sie bei den langen Balken nahezu konstant bleiben. Aus Bild 12 wird deutlich, dass die Traglaststeigerungen durch  $V_{ced}$ , wie sie sich rechnerisch ergeben, nicht zutreffen.



**Bild 11** Traglast in Abhängigkeit von den wesentlichen Parametern



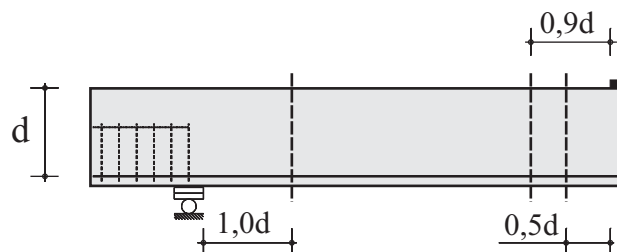
**Bild 12** Rechnerische und experimentelle Traglaständerungen infolge einer Voute

### 3.1 Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Normansätzen

Nachfolgend werden die Bruchlasten aus den Versuchen den Querkrafttragfähigkeiten nach folgenden Normen gegenübergestellt.

DIN 1045-01:2008      SN 262-2003      ACI 318-05      CSA A23.3-2004

Es werden die rechnerischen Schubtragfähigkeiten mit und ohne  $V_{ccd}$  sowie die Sicherheitsfaktoren bestimmt. Hierbei ist zu beachten, dass der maßgebende Querschnitt nach DIN 1045-1:2008  $1,0d$  vom Auflagerrand entfernt liegt, während CSA A23.3-2004 und SN 262-2003 einen Abstand von  $0,9d$  und  $0,5d$  annehmen.



**Bild 13** Maßgebende Schnitte

Die Versuche 4L und 5L, welche auf Biegung versagten, werden nicht weiter betrachtet. Die detaillierte Auswertung ist im Anhang C zusammengestellt.

### 3.2 Vergleich der Versuchsergebnisse mit verschiedenen Querkraftmodellen

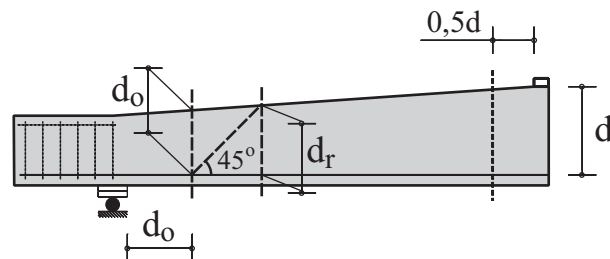
Nachfolgend werden die Versuchstragfähigkeiten mit den Rechenwerten verschiedener Modelle (siehe Tab. 7) verglichen.

**Tabelle 7** Untersuchte Querkraftmodelle

Nr.	Autor	Jahr	Abkürzung	Grundlagen
1	Reineck K.H.	1990	Reineck	Bruchmechanismus
2	Zararis P.D. und Papadakis G.C.	2001	Zararis	
3	Zink M.	2000	Zink	
4	Tureyen A.K. und Frosch R.J.	2003	Tureyen	
5	Park H.G., Choi K.K. und Wight J.K.	2006	Park	
6	Gastebled O.J. und May I.M.	2001	Gastebled	Bruchmechanik
7	Bentz E.C.	2005	Bentz	Empirisches Modell
8	Bazant Z.P. und Yu Q.	2005	Bazant	
9	Kim D., Kim W. und White R.N.	1999	Kim D	
10	Kim J.K.	1996	Kim JK	
11	Latte, S.	2009	Latte	Semi-Empirisches Modell
12	Debaiky	1982	Debaiky	Gevoutete Balken
13	MacLeod	1994	MacLeod	

Die “modified compression field theory”, worauf die kanadische Norm sowie der ASSHTO basiert, wurde bereits im vorherigen Abschnitt betrachtet. Gleiches gilt auch für das Modell des CEB-FIP Model Code 1990, welcher weitgehend dem Ansatz der DIN 1045-1 und dem Eurocode entspricht. Die Schweizer Norm basiert auf der “Theorie des kritischen Biegerisses”, welche schon im Abschnitt 3.1 untersucht wurde. Stabwerksmodelle, welche auf der Plastizitätstheorie basieren, werden nicht betrachtet, da sie für schubslanke Balken ohne Querkraftbewehrung keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern.

Der kritische Schnitt wird bei dem Modell von Latte wie bei der Theorie des kritischen Biegerisses im Abstand von  $0,5 d$  von der Last gewählt (Bild 14). Die maßgebende Stelle für die Modelle von MacLeod und Houmsi ist ebenfalls im folgenden Bild dargestellt.



**Bild 14** Maßgebende Schnitte für die Modelle von Latte und MacLeod / Houmsi

Die Ergebnisse können dem Anhang D entnommen werden.

## **Anhänge**

Anhang A: Betoneigenschaften	Seiten A1 - A2
Anhang B: Messwerte	Seiten B1 - B54
Anhang C: Vergleich der Versuchswerte mit Normen	Seiten C1 - C12
Anhang D: Vergleich mit verschiedenen Modellen	Seiten D1 - D3

## Anhang A: Betoneigenschaften

### Betondruckfestigkeit

Es wurden insgesamt 3x3 Betonwürfel mit 150 mm Seitenlänge in Wasser gelagert und nach 28 Tagen (06.04.2009), 52 Tagen (30.04.2009) und 101 Tagen (18.06.2009) getestet.

**Tabelle A.1**– Versuchsergebnisse der Betonwürfel - Betonalter 28 Tage

Körper Nr.	Abmessung (mm)			Gewicht (kg)	Dichte (kg/m <sup>3</sup> )	Bruchlast (kN)	$f_{c,cube}$ (MPa)
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>h</i>				
1	151,8	150,1	150,1	8,161	2386	1392	61,1
2	151,2	150,1	150,0	8,158	2396	1450	63,9
3	151,5	150,0	150,0	8,129	2385	1442	63,5
Mittelwert					2389		<b>62,8</b>

$f_{c,cube}$  ist die mittlere erreichte Betonfestigkeit im Labor. Der für die Berechnung benötigte charakteristische Wert eines zylindrischen Körpers nach 28 Tagen ergibt sich aus folgender Gleichung zu:

$$f_{ck,cyl} = (0,75/0,95) \cdot f_{c,cube} - 4 \text{ MPa} = (0,75/0,95) \cdot 62,8 - 4 \text{ MPa} = \mathbf{45,5 \text{ MPa}}$$

mit: (0,75/0,95): Umrechnungsfaktor vom Würfel auf einen zylindrischen Prüfkörper  
 4 MPa : Umrechnungsfaktor von Mittel- auf charakteristischen Wert im Labor

**Tabelle A.2**– Versuchsergebnisse der Betonwürfel - Betonalter 52 Tage

Körper Nr.	Abmessung (mm)			Gewicht (kg)	Dichte (kg/m <sup>3</sup> )	Bruchlast (kN)	$f_{c,cube}$ (MPa)
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>h</i>				
1	150,9	150,0	150,1	8,015	2359	1466	64,8
2	151,2	149,9	149,9	8,008	2357	1500	66,2
3	151,8	150,0	149,9	8,122	2380	1528	67,1
Mittelwert					2365		<b>66,0</b>

$$f_{ck,cyl} = (0,75/0,95) \cdot f_{c,cube} - 4 \text{ MPa} = (0,75/0,95) \cdot 66,0 - 4 \text{ MPa} = \mathbf{48,1 \text{ MPa}}$$

**Tabelle A.3**– Versuchsergebnisse der Betonwürfel - Betonalter 101 Tage

Körper Nr.	Abmessung (mm)			Gewicht (kg)	Dichte (kg/m <sup>3</sup> )	Bruchlast (kN)	$f_{c,cube}$ (MPa)
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>h</i>				
1	152,2	150,0	150,0	8,039	2347	1669	73,1
2	152,1	150,0	150,0	8,024	2345	1637	71,8
3	151,3	149,9	150,0	8,001	2352	1699	74,9
Mittelwert					2348		<b>73,3</b>

$$f_{ck,cyl} = (0,75/0,95) \cdot f_{c,cube} - 4 \text{ MPa} = (0,75/0,95) \cdot 73,3 - 4 \text{ MPa} = \mathbf{53,9 \text{ MPa}}$$

**Elastizitätsmodul und Druckfestigkeit**

4 zylindrische Prüfkörper  $\phi 150/300\text{mm}$  wurden unter den gleichen Bedingungen (in der Laborhalle) wie die Balken gelagert und nach 52 Tagen (30.04.2009) getestet.

**Tabelle A.4**–Versuchsergebnisse der zylindrischen Betonproben - Betonalter 52 Tage

Körper Nr.	Abmessung (mm)		Gewicht (kg)	Dichte (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_o$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$\varepsilon_o$ mm/m	$\varepsilon_u$ mm/m	$E_c$ (MPa)	Bruchlast (kN)	$f_{c,cyl}$ (MPa) (trocken)
	$\phi$	$h$									
1	150,0	299,0	12,460	2358	-	-	-	-	-	958	54,2
2	149,9	300,0	12,490	2359	17,8	0,5	0,574	0,033	32.071	957	54,2
3	150,0	299,3	12,478	2359	17,8	0,5	0,592	0,035	31.098	953	53,9
4	150,0	300,0	12,521	2362	17,8	0,5	0,603	0,039	30.712	946	53,5
Mittelwert				2360					31.294		<b>54,0</b>

**Spaltzugfestigkeit**

3 zylindrische Prüfkörper  $\phi 150/300\text{mm}$  wurden unter den gleichen Bedingungen (in der Laborhalle) wie die Balken gelagert und nach 101 Tagen (18.06.2009) getestet.

**Tabelle A.5** Spaltzugfestigkeit der zylindrischen Betonproben - Betonalter 101 Tage

Körper Nr.	Abmessung (mm)		Gewicht (kg)	Dichte (kg/m <sup>3</sup> )	Bruchlast (kN)	$f_{ct,sp}$ (MPa) (trocken)
	$\emptyset$	$h$				
1	150,0	299,8	12,447	2349	253,2	3,58
2	150,0	299,9	12,462	2351	244,6	3,46
3	150,0	299,8	12,405	2341	264,2	3,74
Mittelwert				2350	254,0	<b>3,60</b>

Anhang B: Messwerte

VERSUCHSBALKEN 1L1

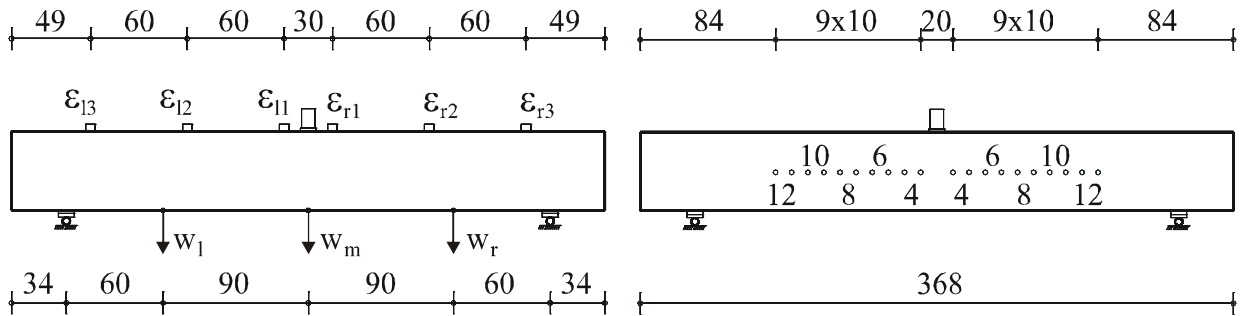


Bild B.1L1.1- Messstellen

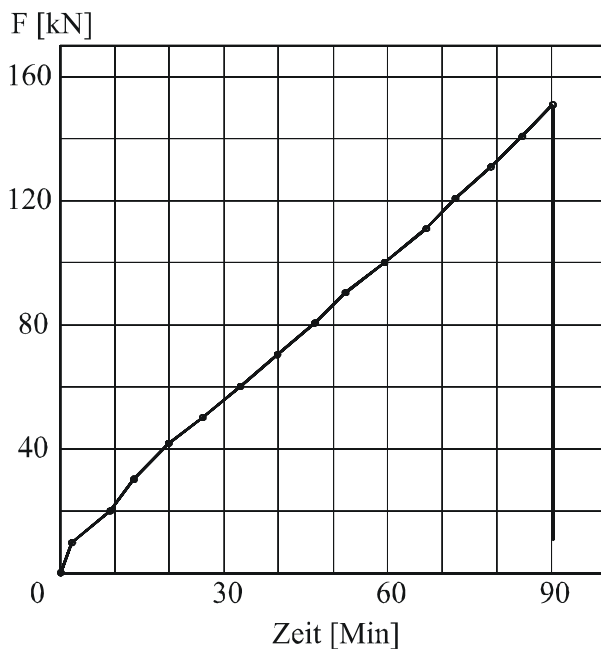


Bild B.1L1.2- Last-Zeit-Kurve

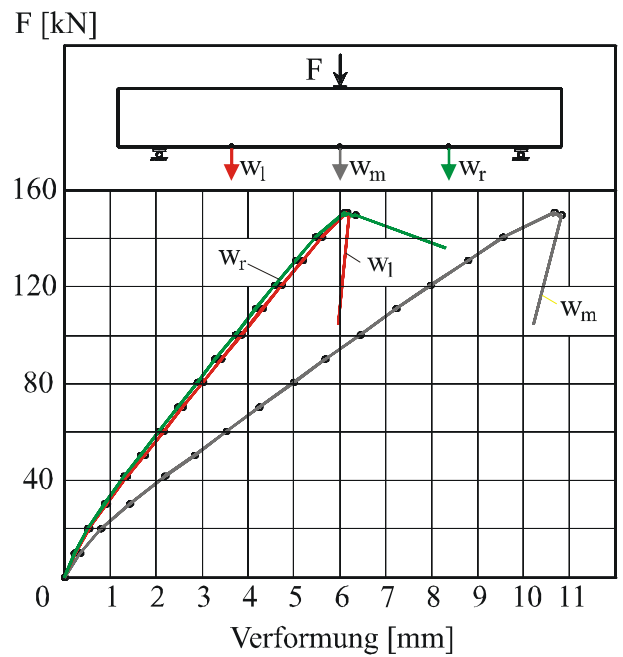


Bild B.1L1.3- Last-Verformungs-Kurve

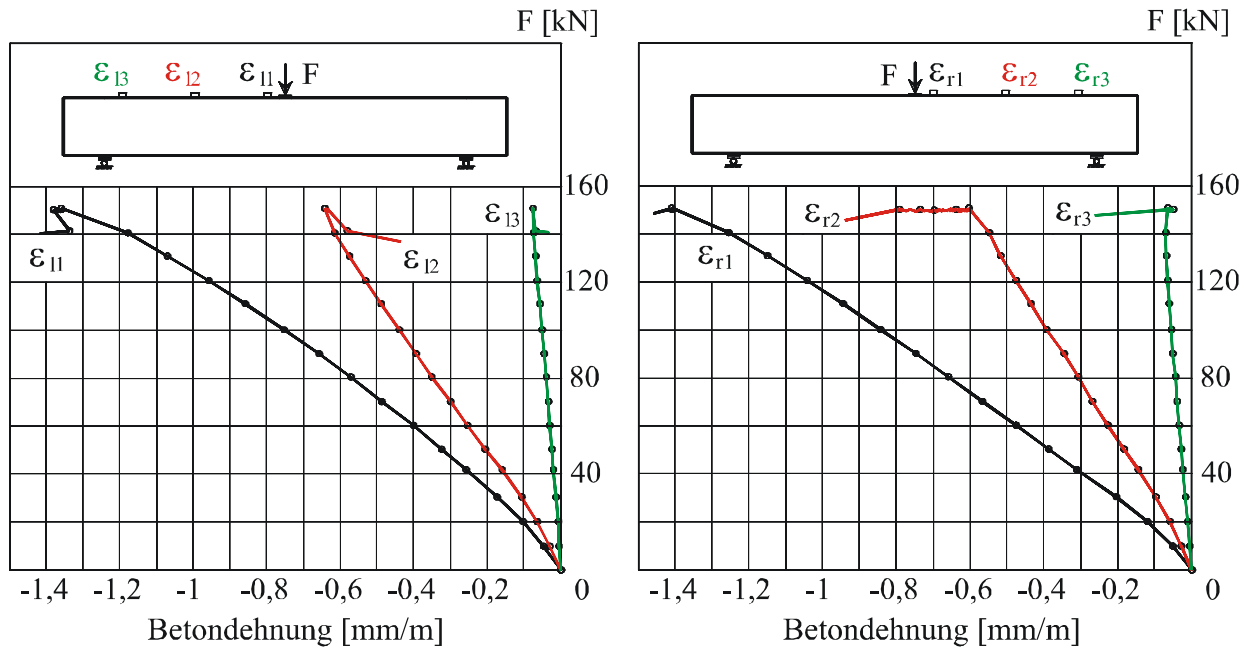


Bild B.1L1.4- Betondehnungen an der Trageroberseite

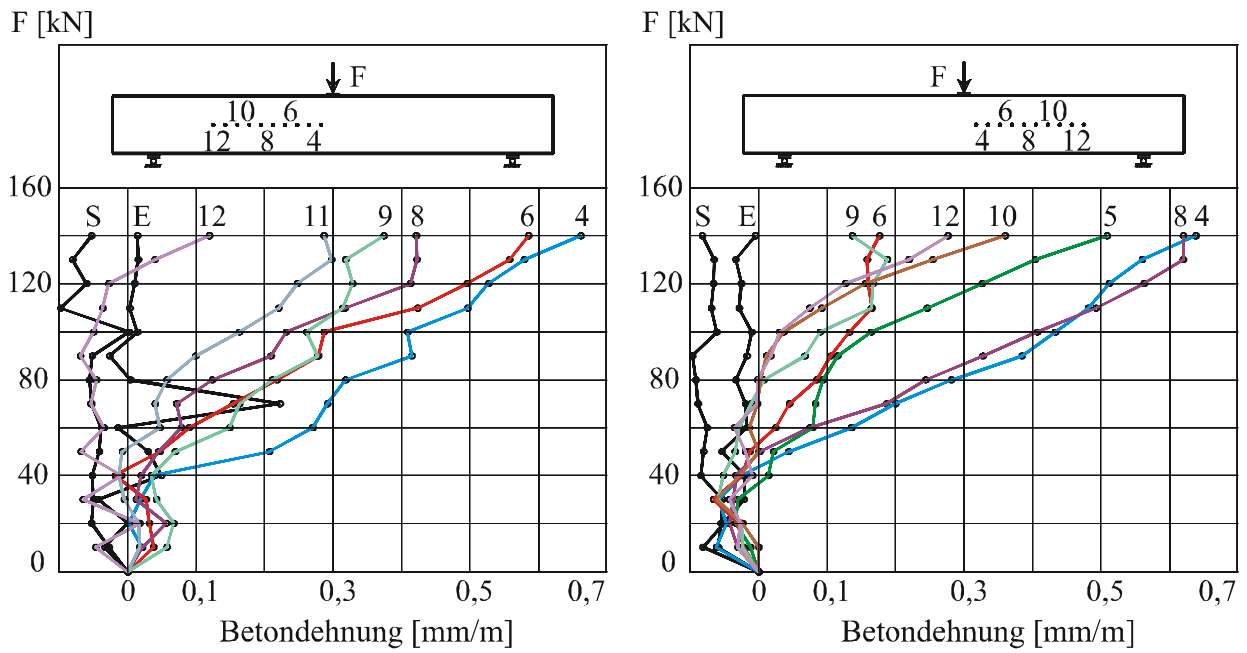


Bild B.1L1.5- Betondehnungen in der Schwerachse

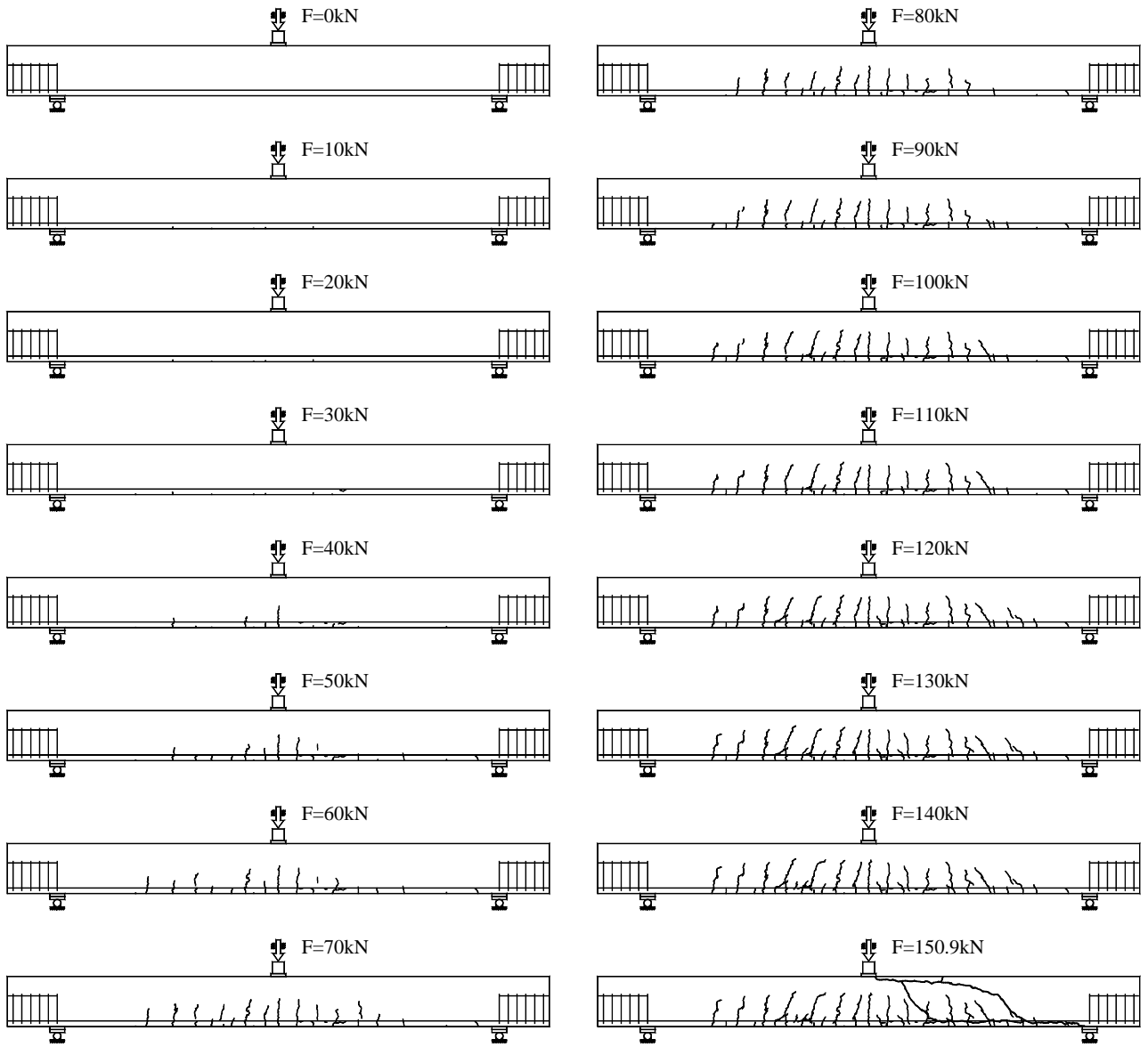


Bild B.1L1.6- Rissentwicklung für Balken 1L1

**VERSUCHSBALKEN 1L2**

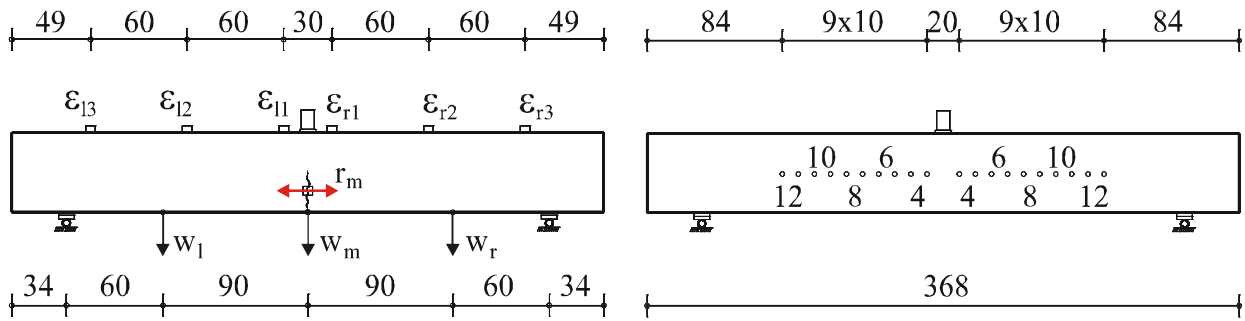


Bild B.1L2.1- Messstellen

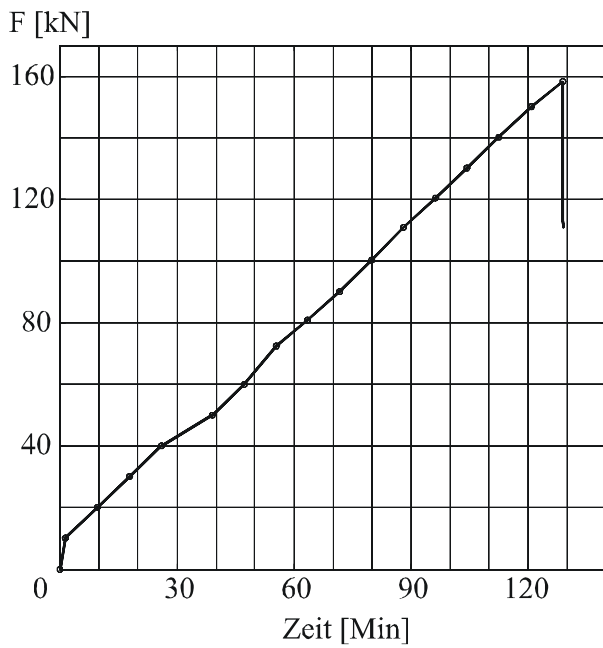


Bild B.1L2.2-Last-Zeit-Kurve

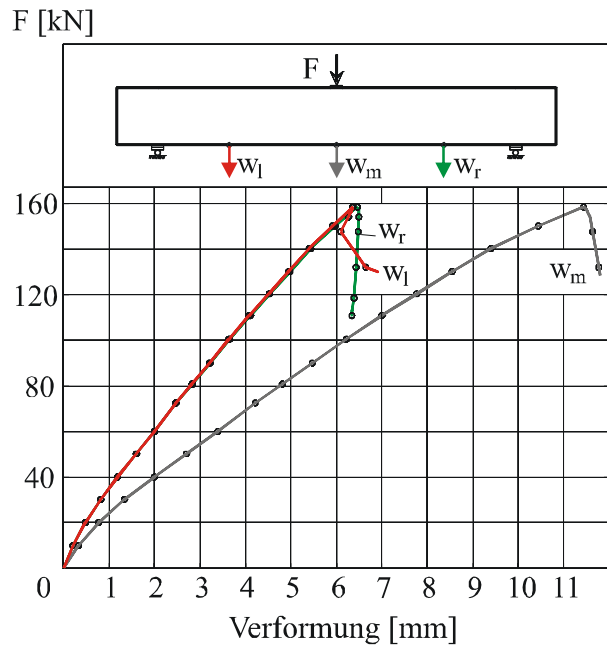


Bild B.1L2.3-Last-Verformungs-Kurve

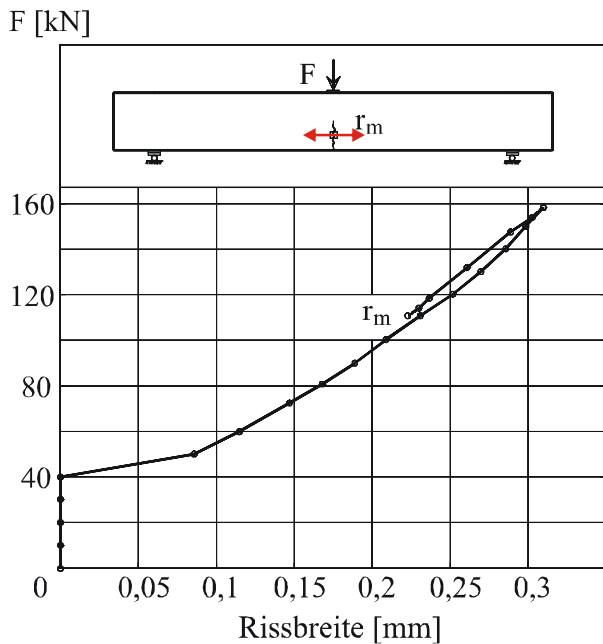


Bild B.1L2.4-Rissbreitenentwicklung

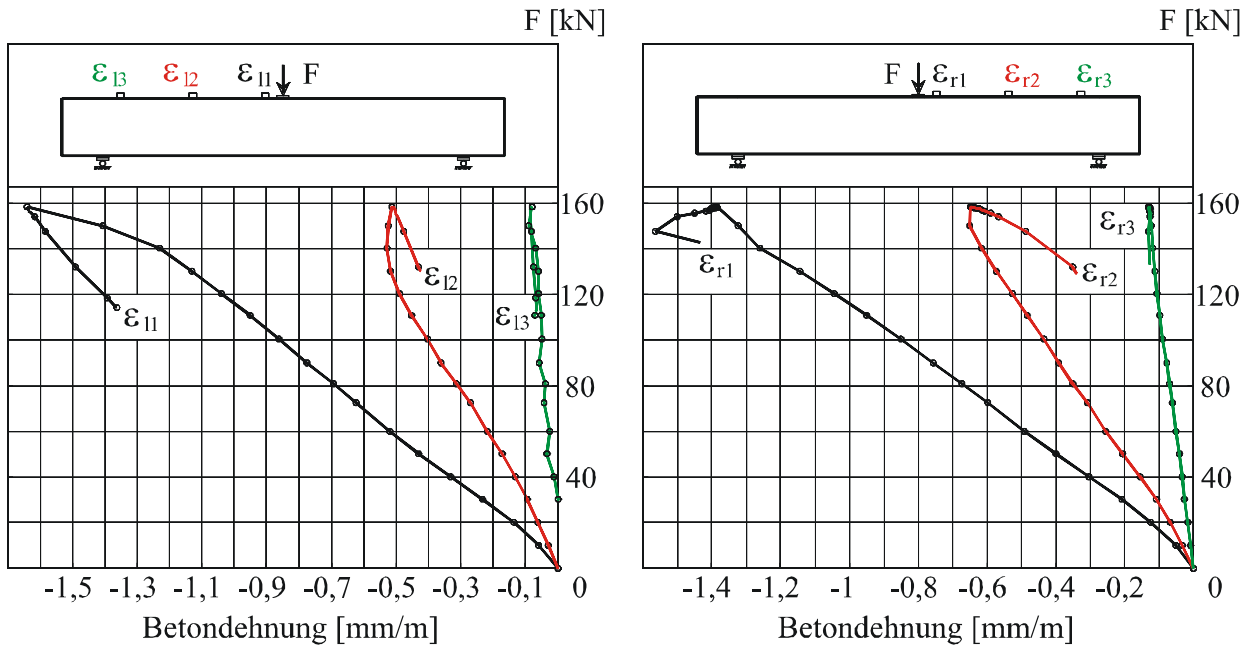


Bild B.1L2.5-Betondehnungen an der Trägeroberseite

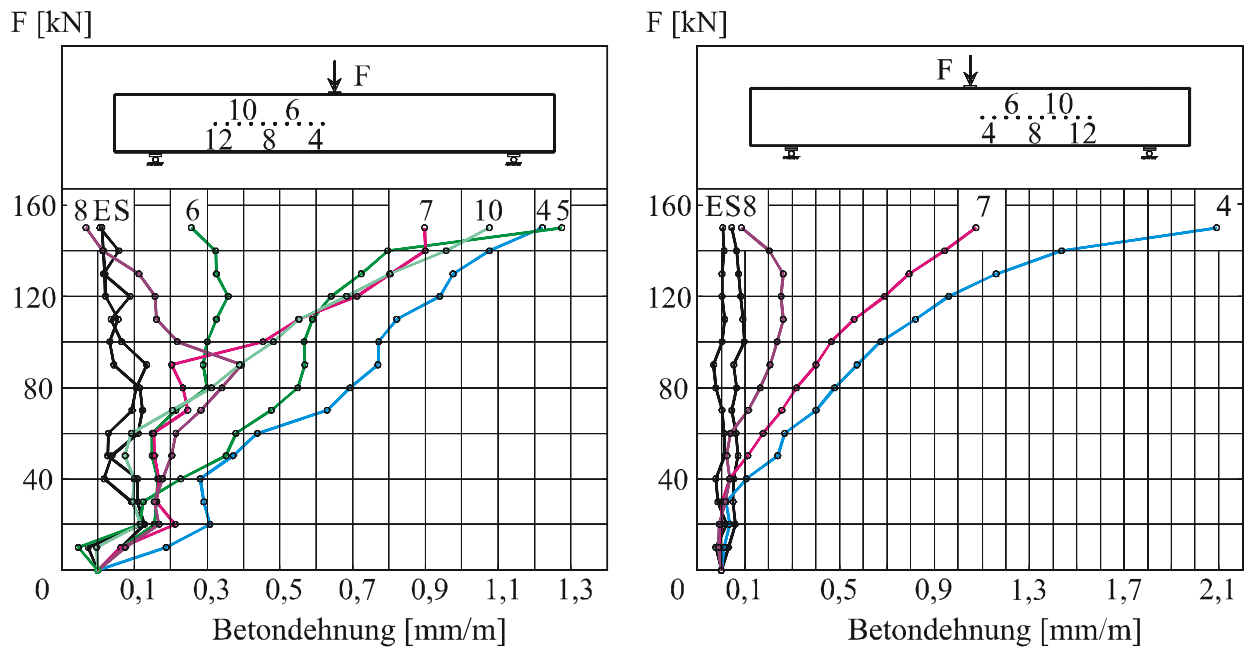


Bild B.1L2.6- Betondehnungen in der Schwerachse

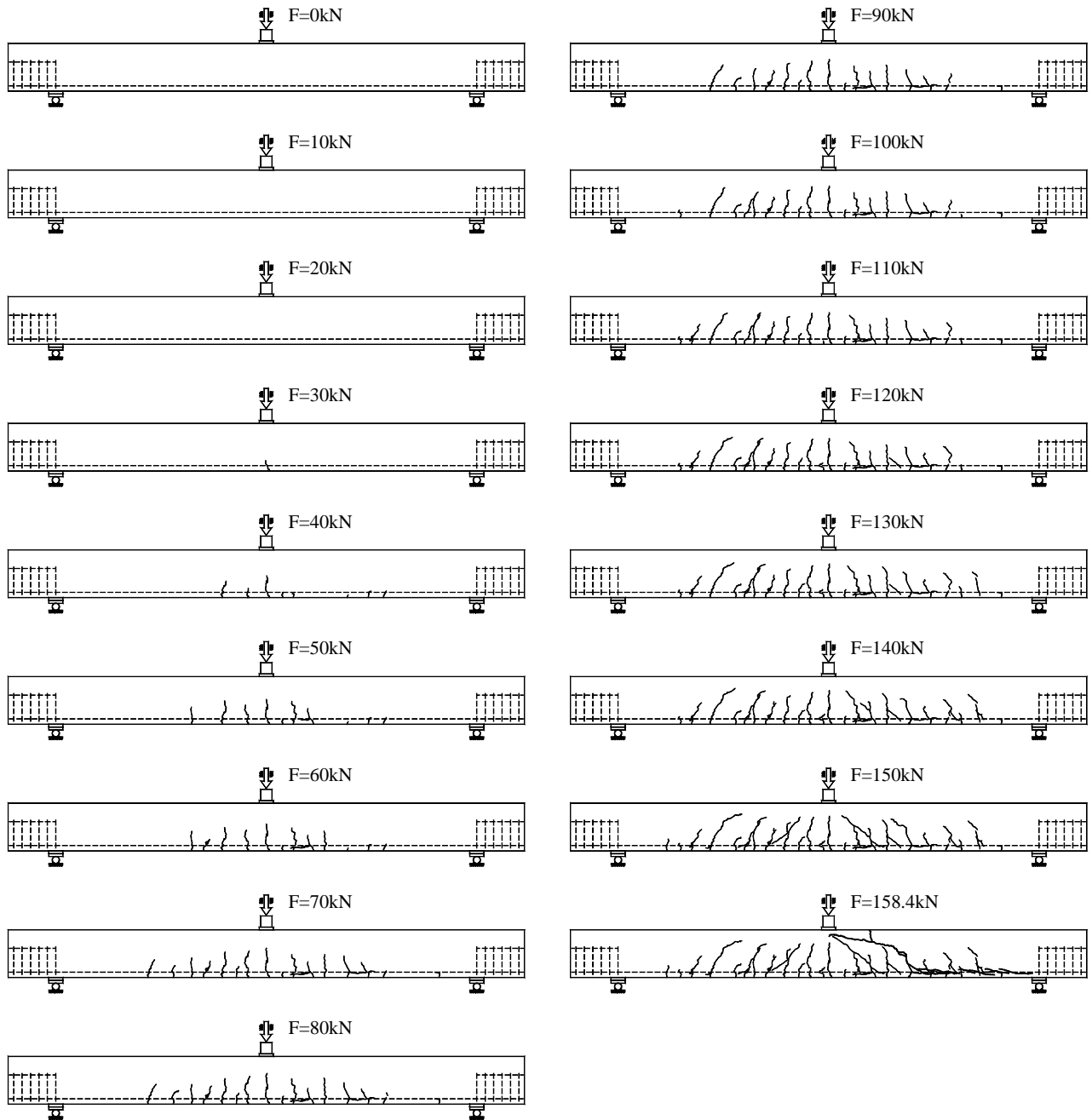


Bild B.1L2.4-Rissentwicklung

**VERSUCHSBALKEN 2L1**

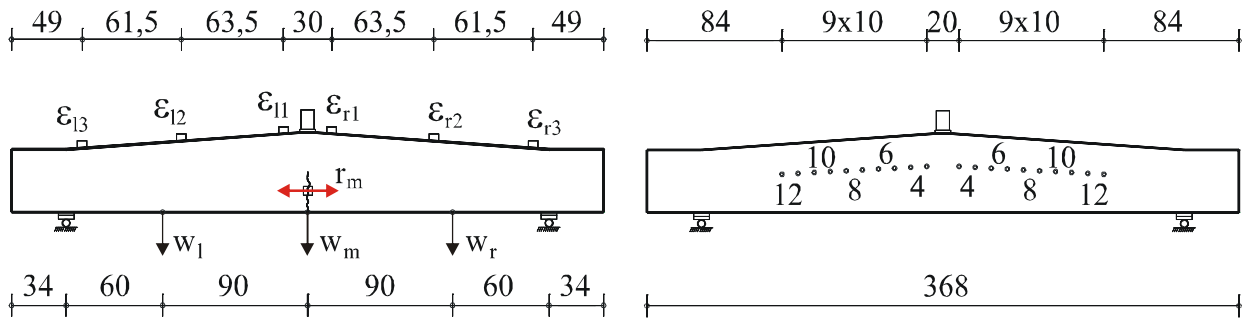


Bild B.2L1.1- Messstellen

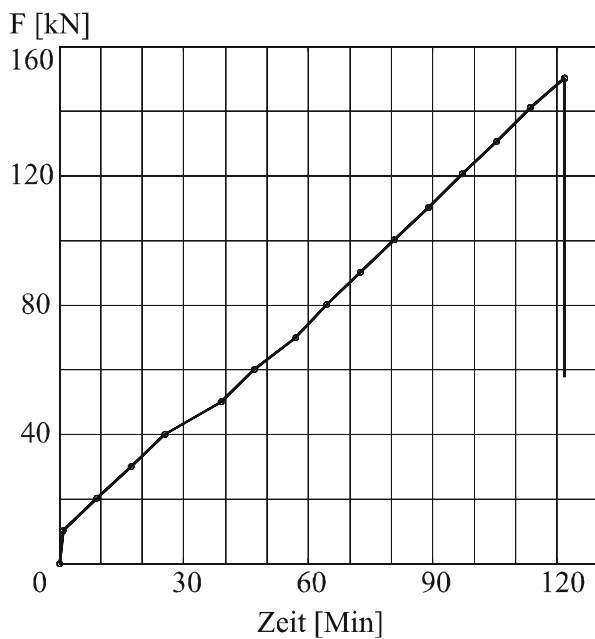


Bild B.2L1.2-Last-Zeit-Kurve

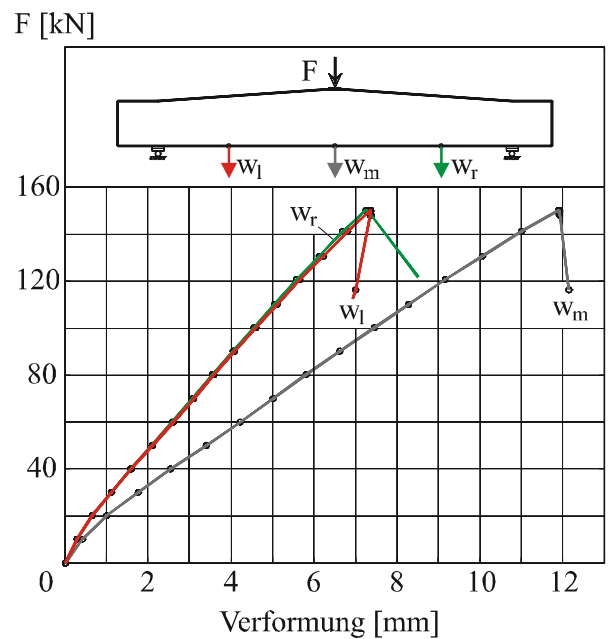


Bild B.2L1.3-Last-Verformungs-Kurve

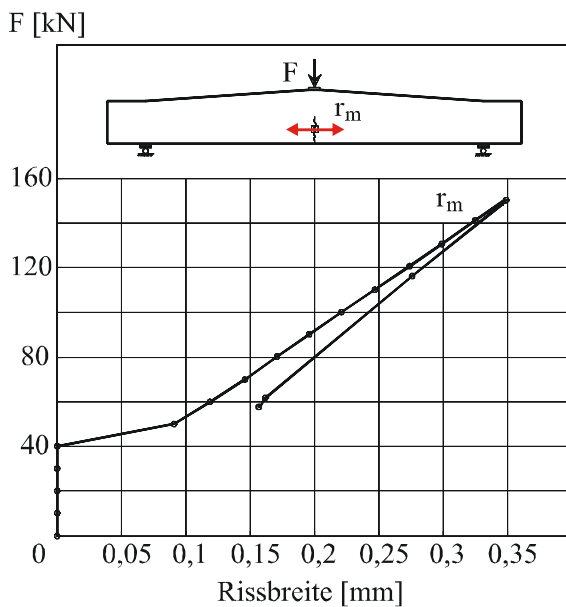


Bild B.2L1.4-Rissbreitenentwicklung

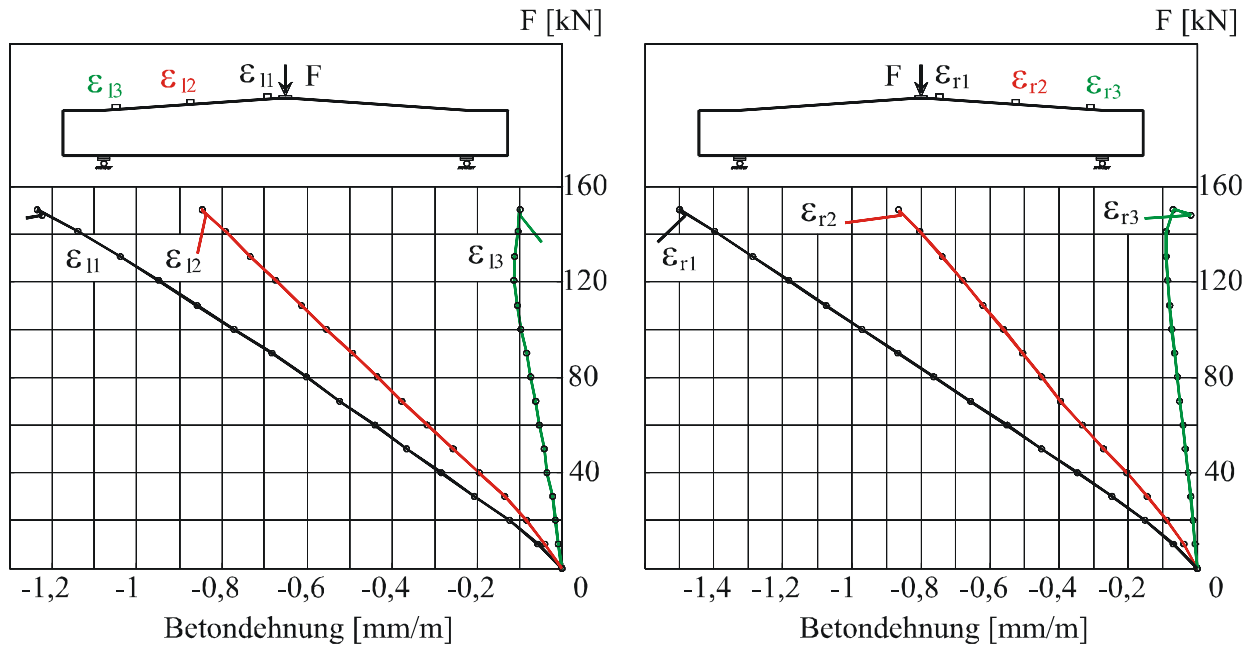


Bild B.2L1.5-Betondehnungen an der Trägeroberseite

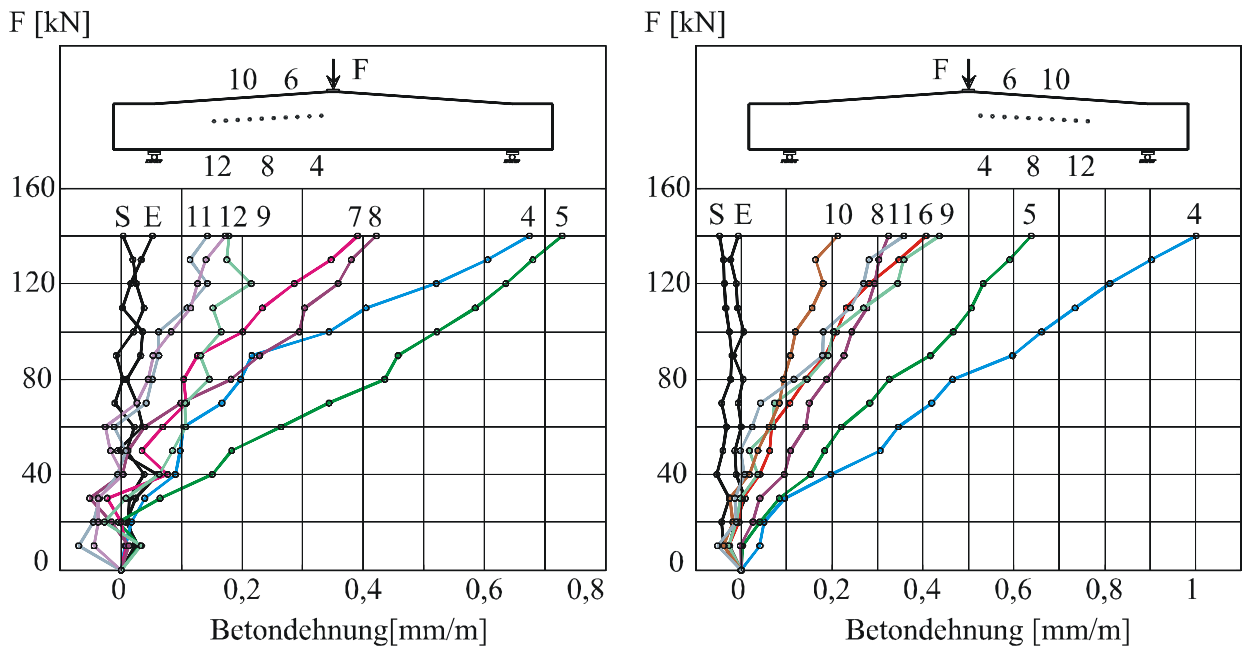


Bild B.2L1.6- Betondehnungen in der Schwerachse

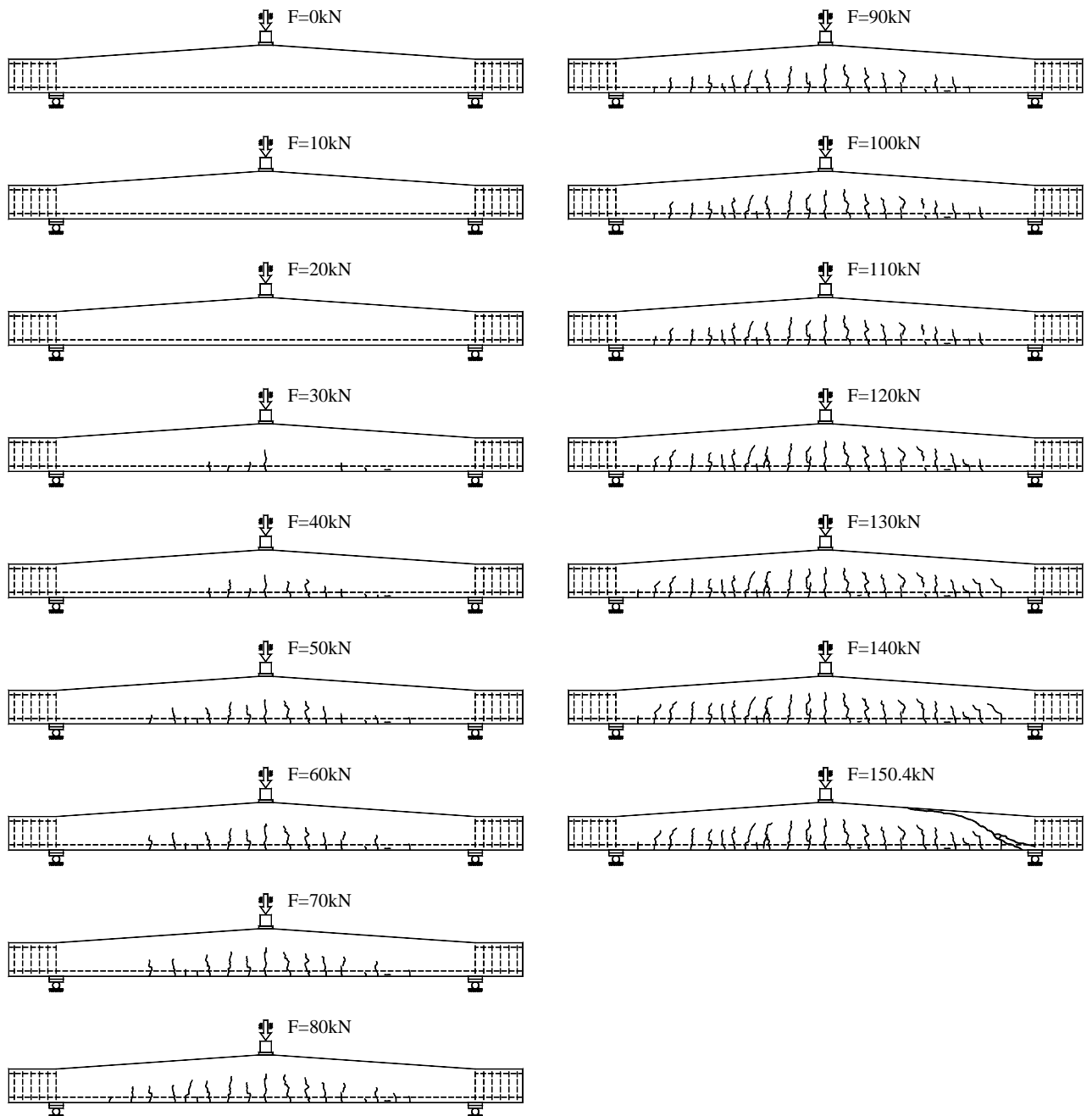


Bild B.2L1.7- Rissentwicklung für Balken 2L1

**VERSUCHSBALKEN 2L2**

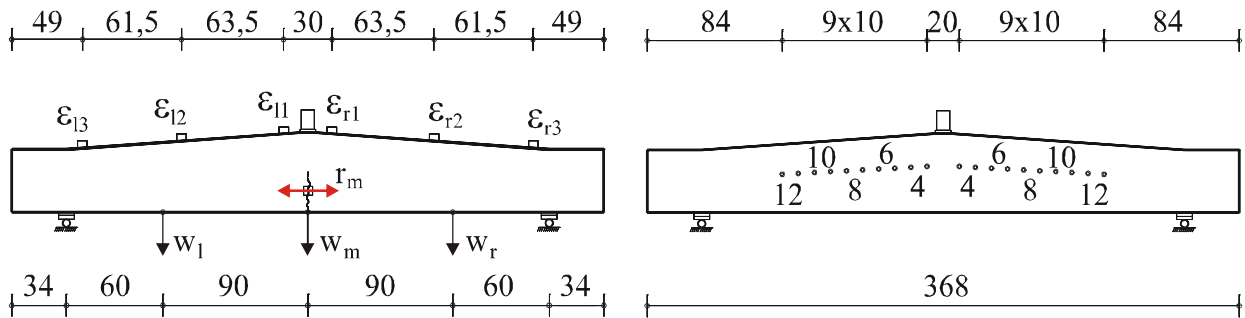


Bild B.2L2.1- Messstellen

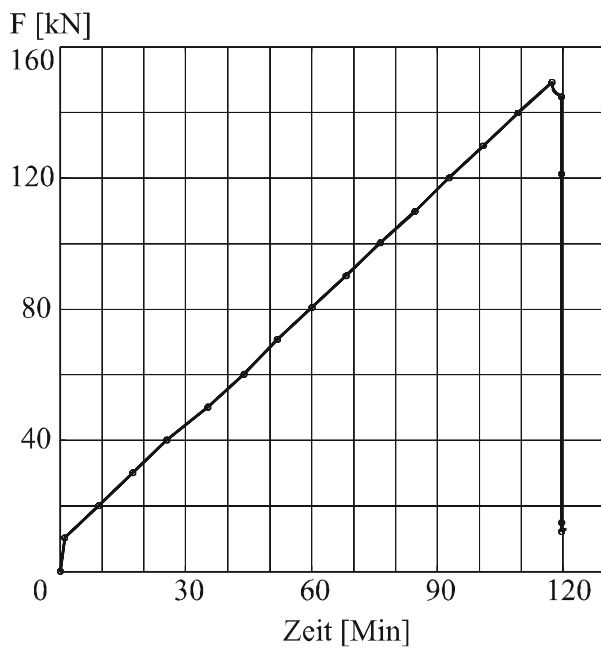


Bild B.2L2.2-Last-Zeit-Kurve

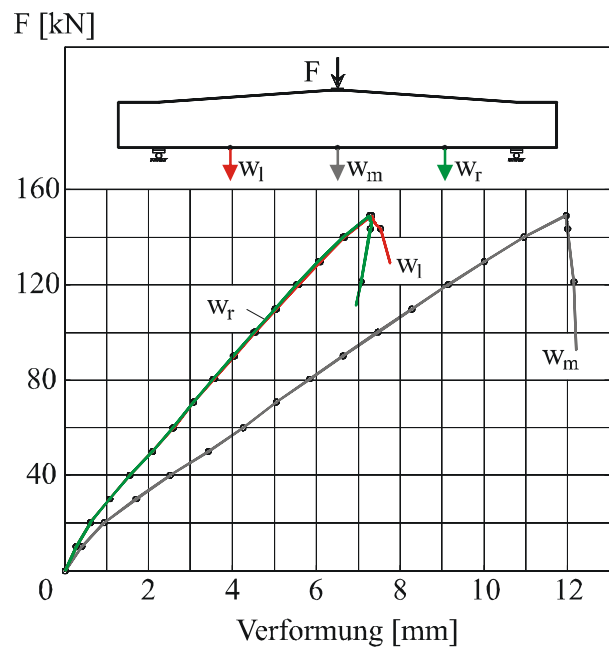


Bild B.2L2.3-Last-Verformungs-Kurve

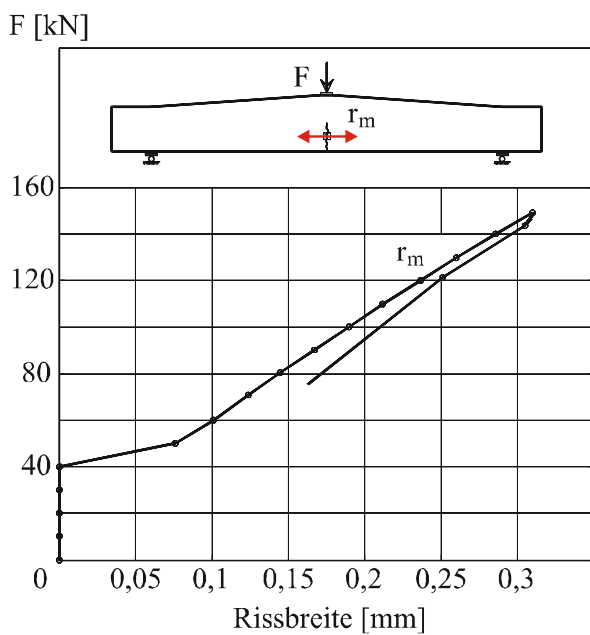


Bild B.2L2.4-Rissbreitenentwicklung

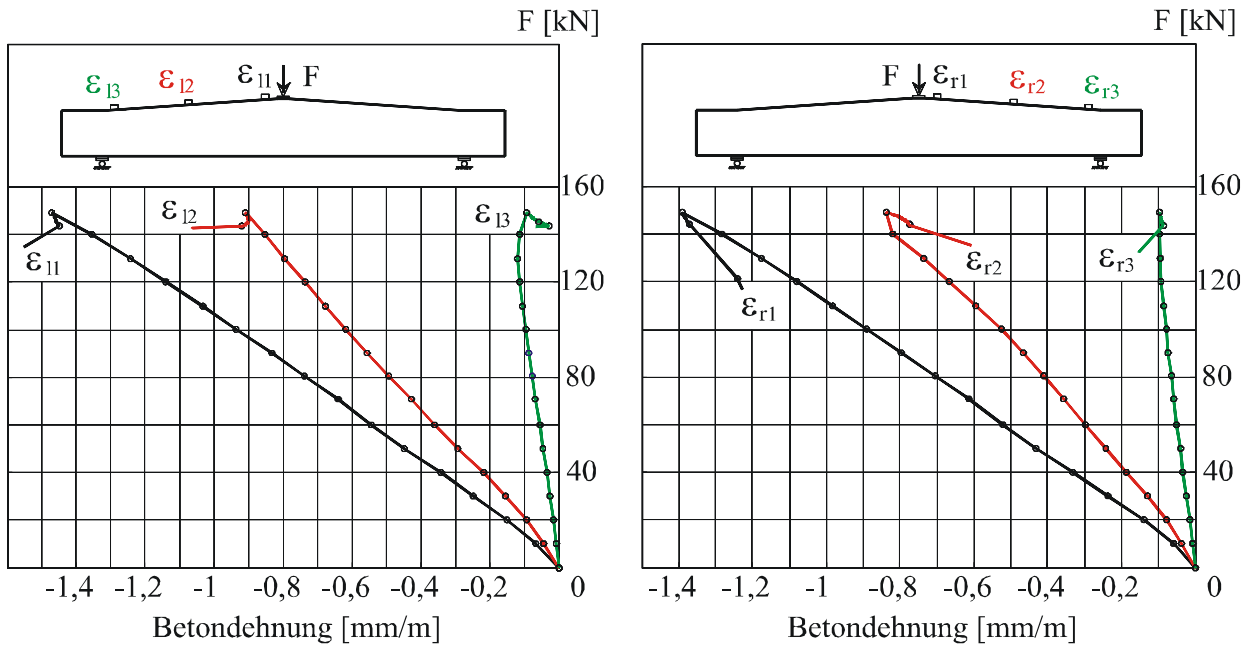


Bild B.2L2.5-Betondrehungen an der Trageroberseite

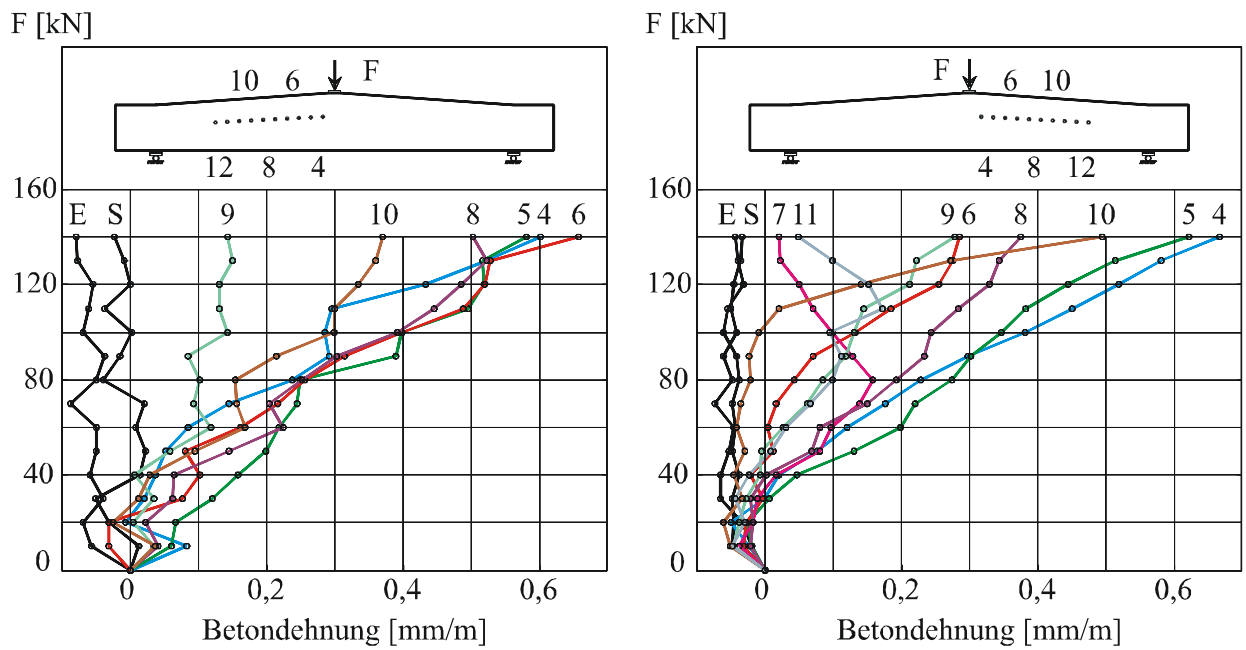


Bild B.2L2.6- Betondrehungen in der Schwerachse

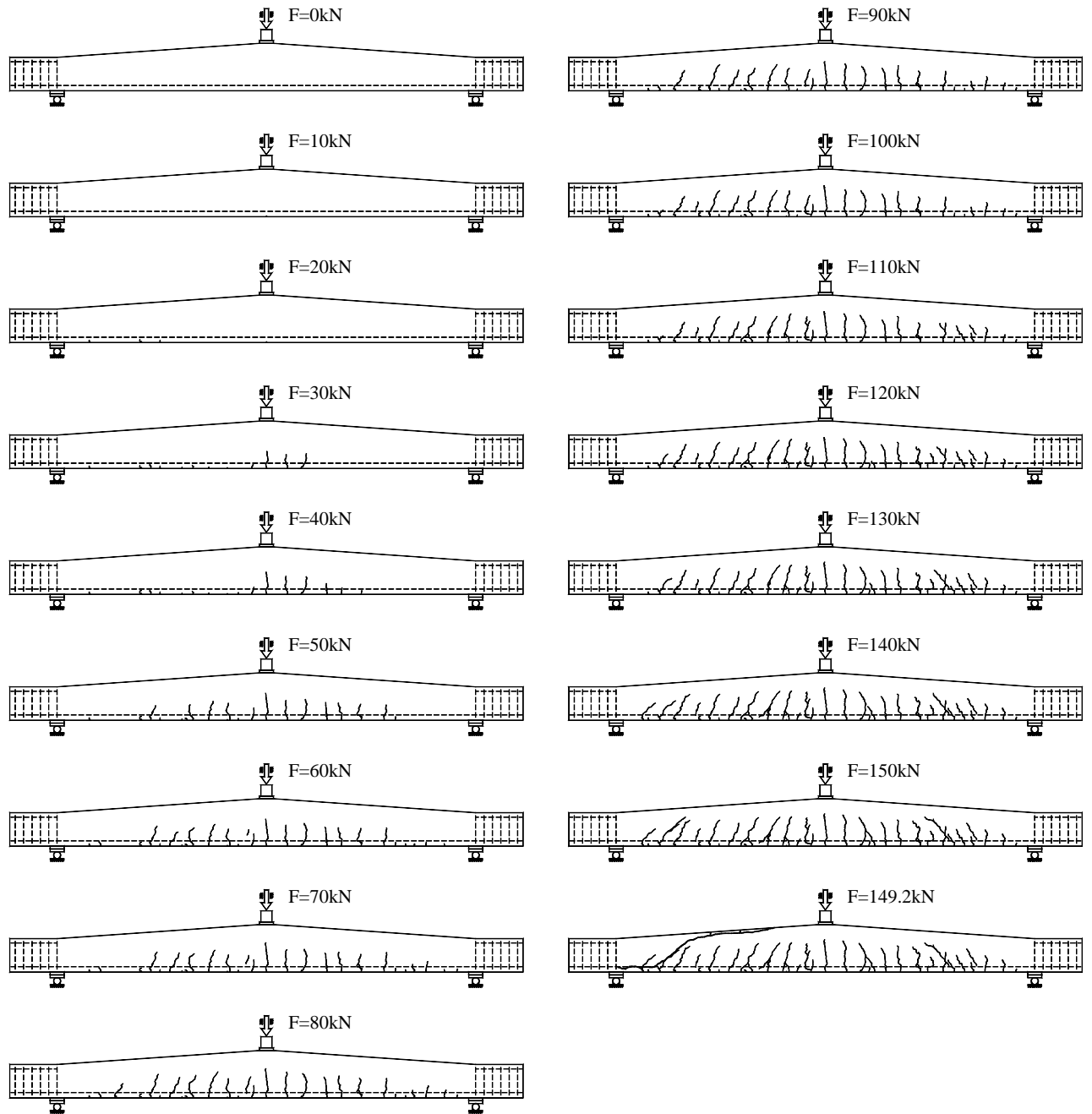


Bild B.2L2.7- Rissentwicklung 2L2

**VERSUCHSBALKEN 3L1**

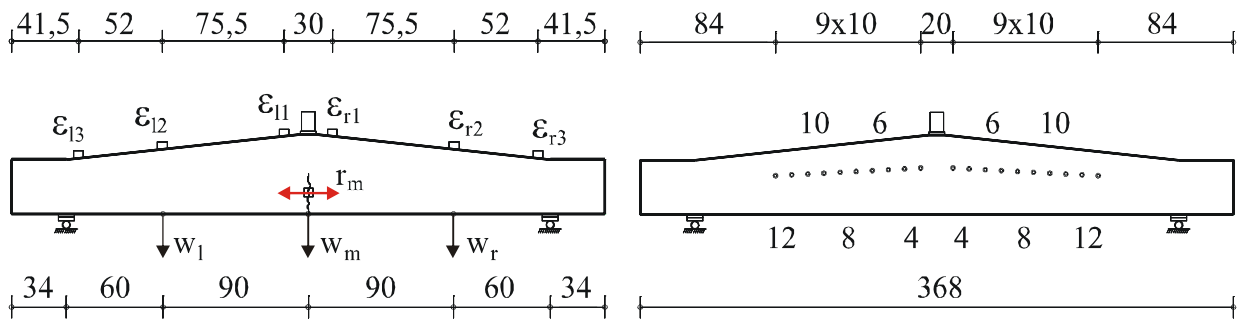


Bild B.3L1.1- Messstellen

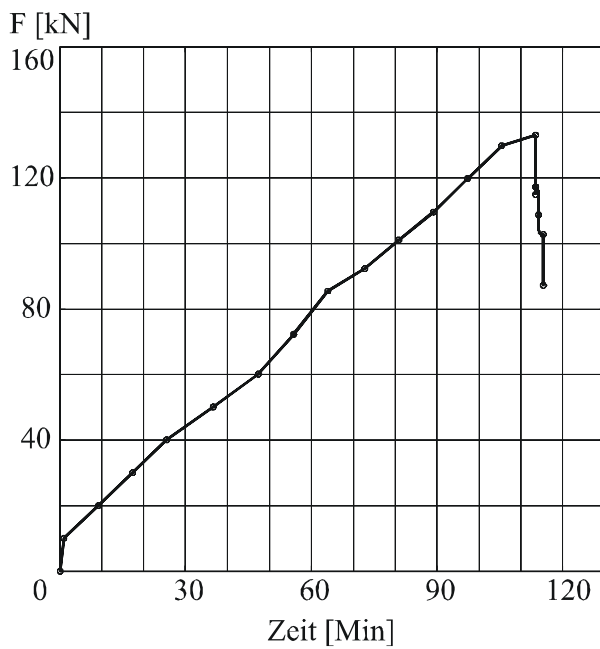


Bild B.3L1.2-Last-Zeit-Kurve

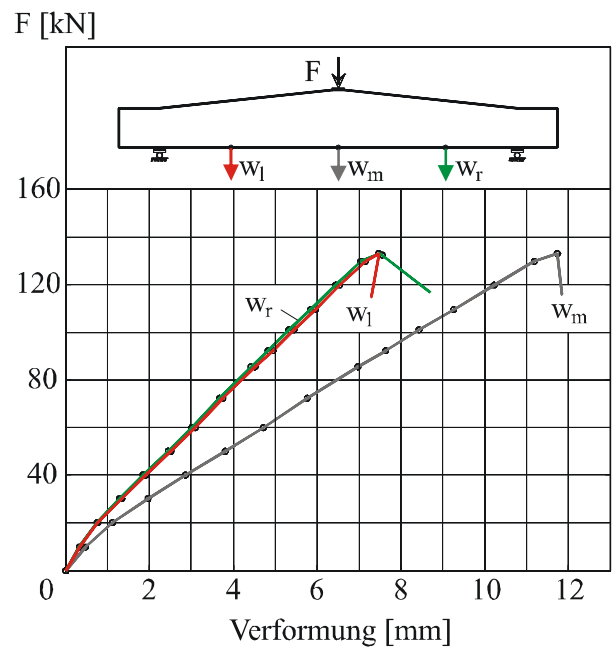


Bild B.3L1.3-Last-Verformungs-Kurve

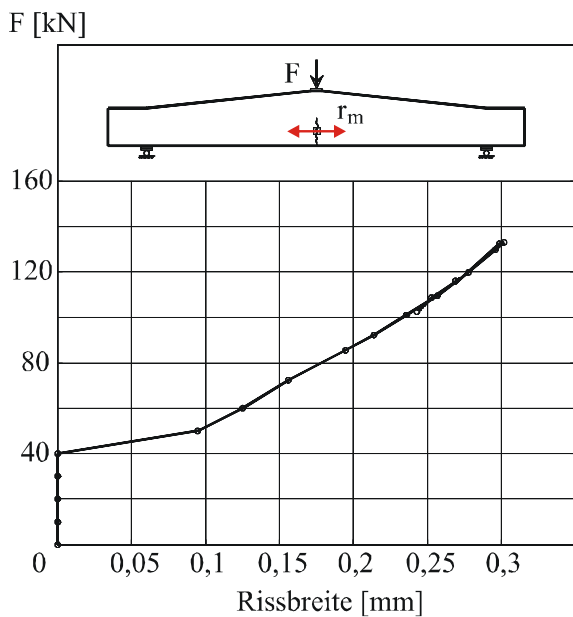


Bild B.3L1.4-Rissbreitenentwicklung

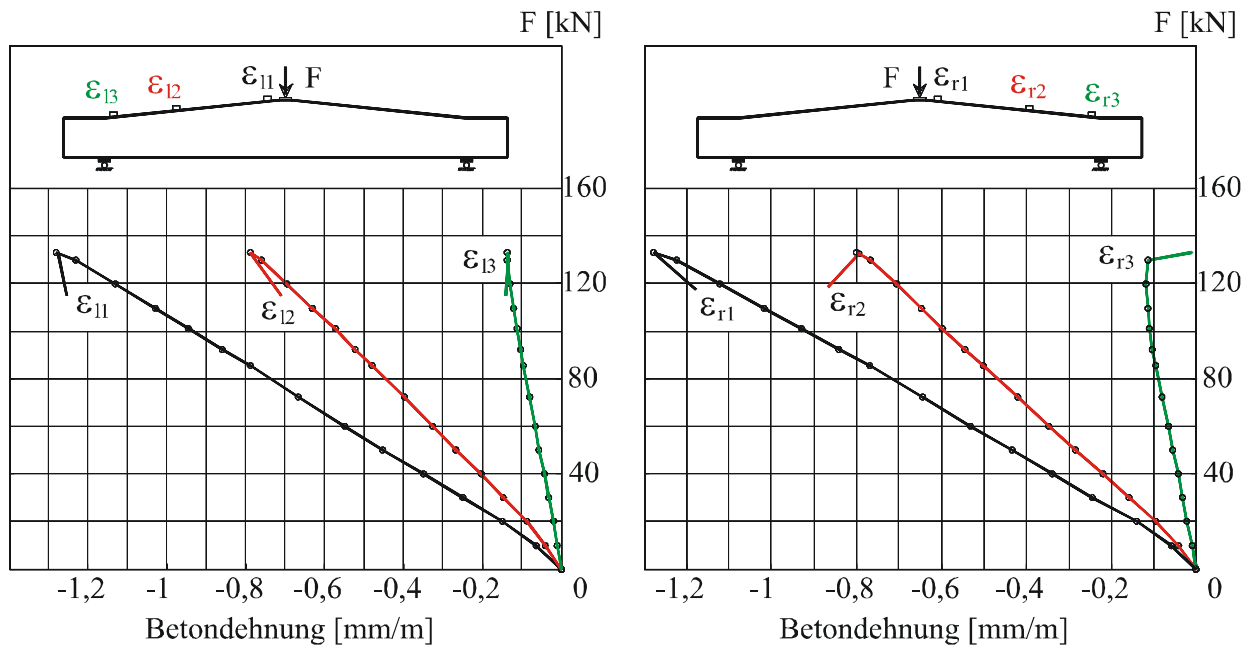


Bild B.3L1.5-Betondehnungen an der Trägeroberseite

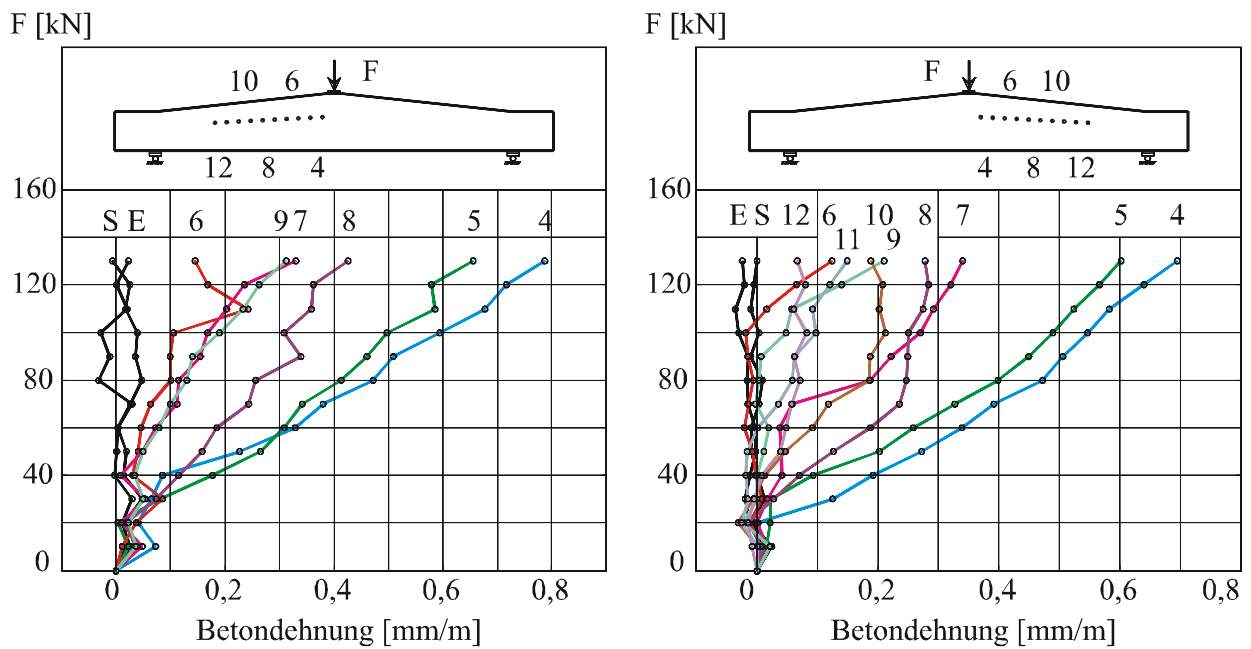


Bild B.3L1.6- Betondehnungen in der Schwerachse

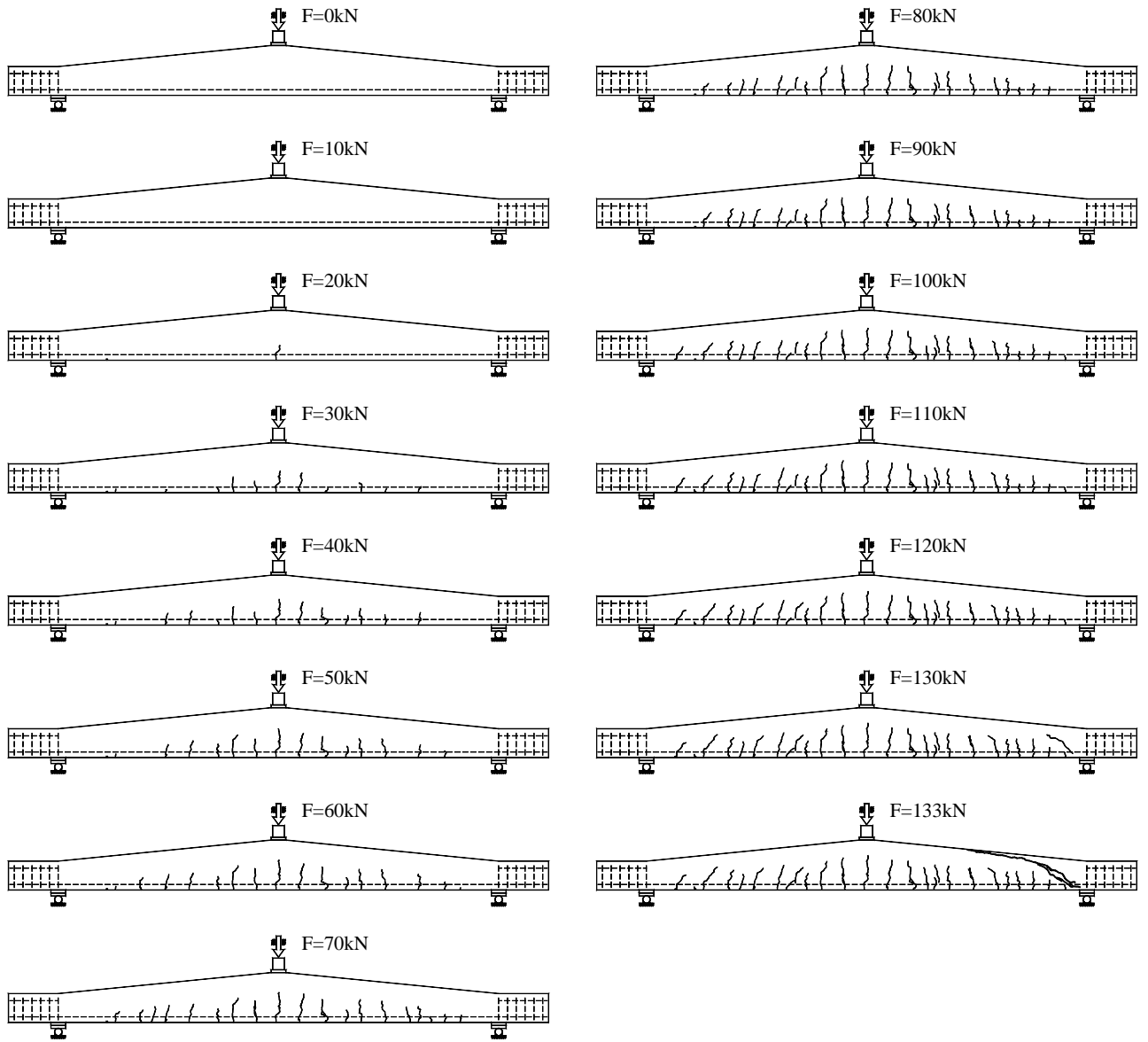


Bild B.3L1.7- Rissentwicklung für Balken 3L1

**VERSUCHSBALKEN 3L2**

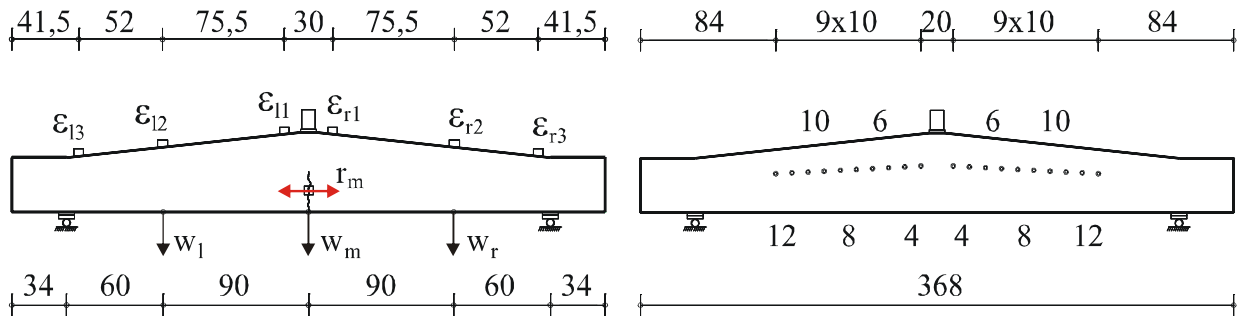


Bild B.3L2.1- Messstellen

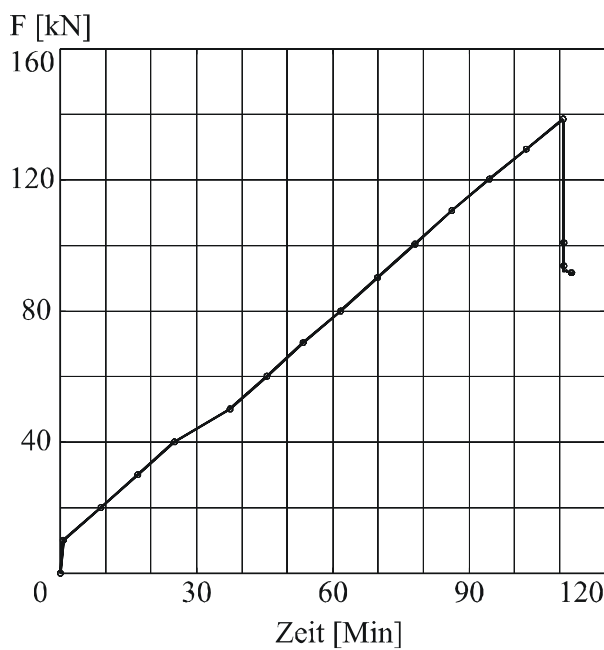


Bild B.3L2.2-Last-Zeit-Kurve

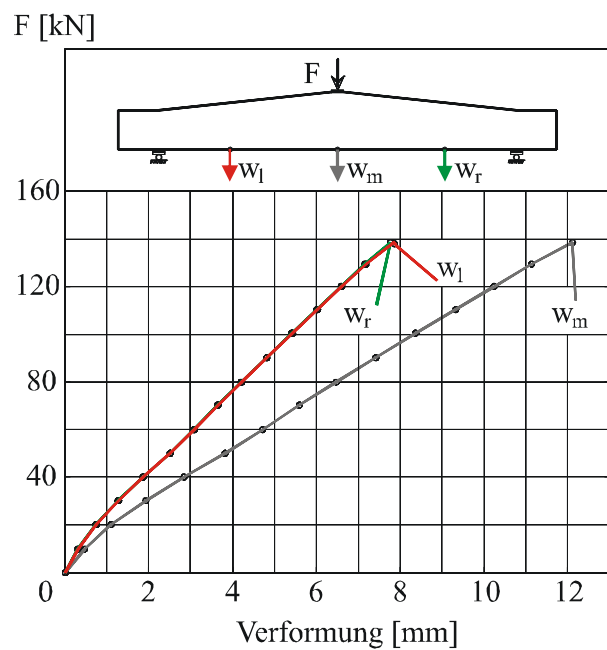


Bild B.3L2.3-Last-Verformungs-Kurve

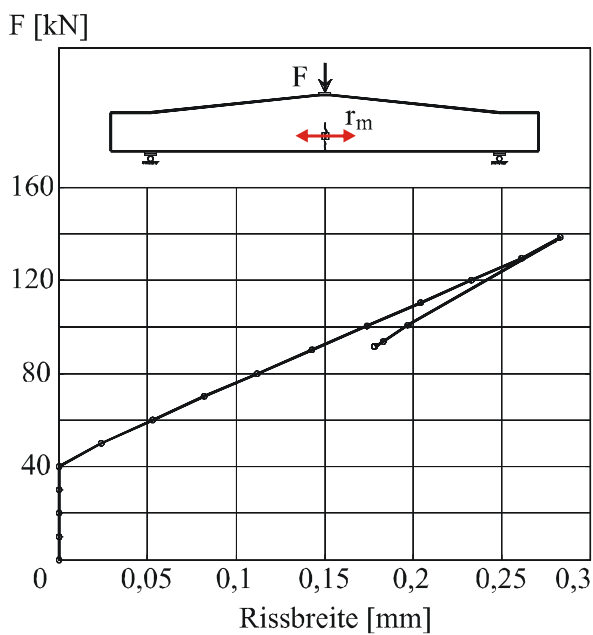


Bild B.3L2.4-Rissbreitenentwicklung

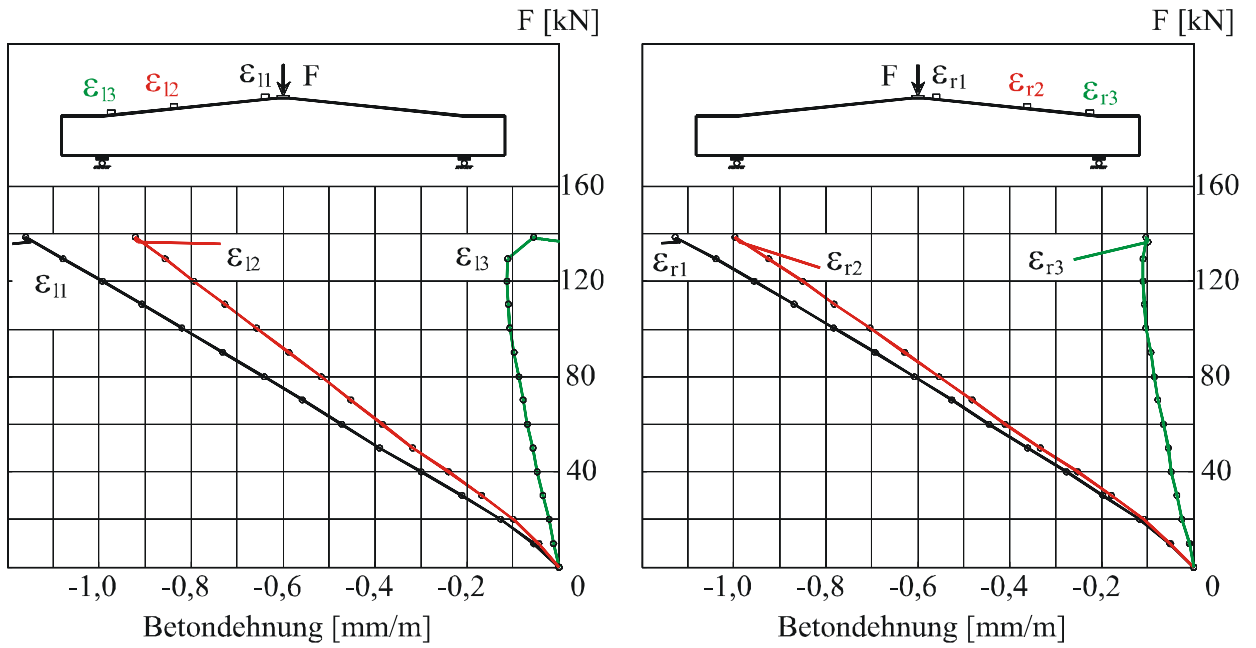


Bild B.3L2.5-Betondehnungen an der Trägeroberseite

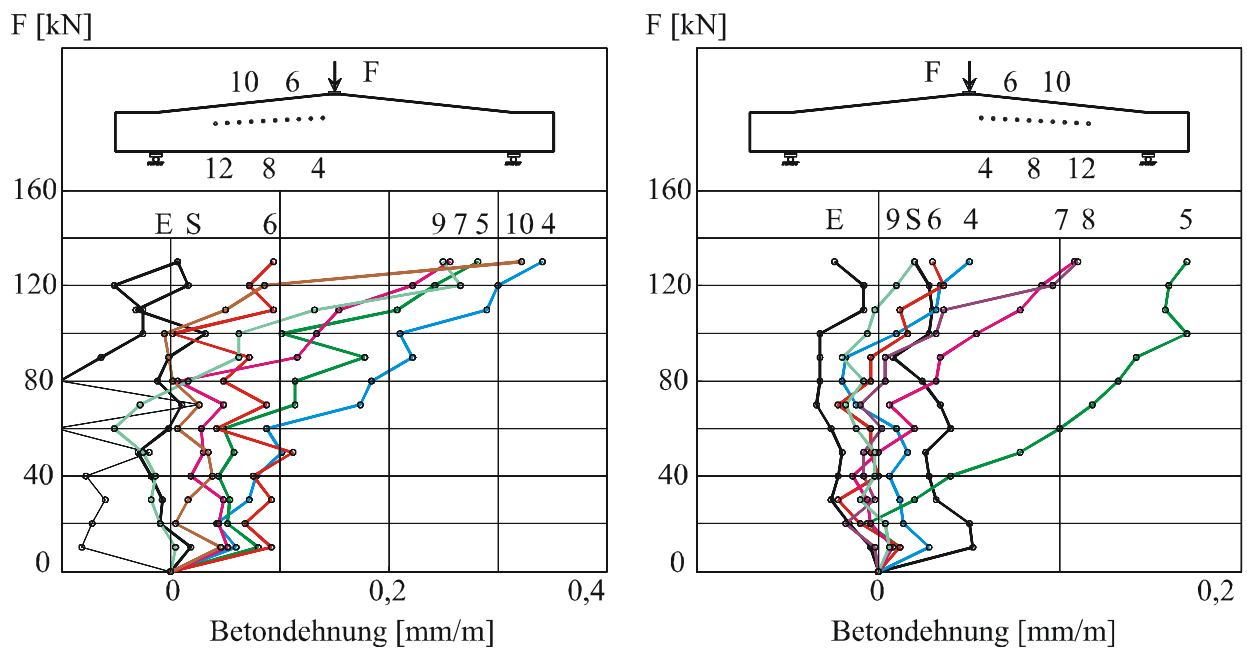


Bild B.3L2.6- Betondehnungen in der Schwerachse

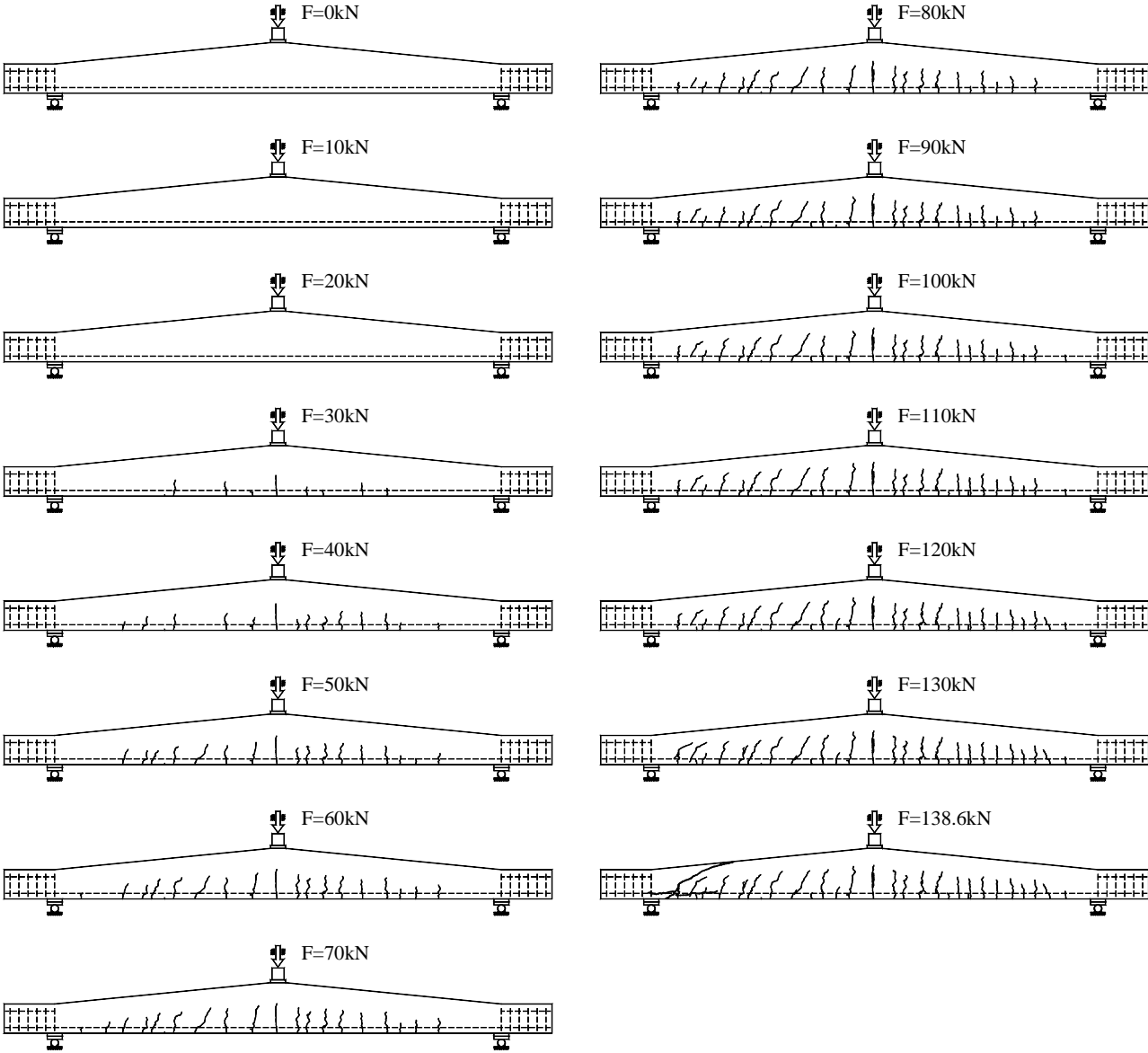


Bild B.3L2.7- Rissentwicklung 3L2

VERSUCHSBALKEN 4L1

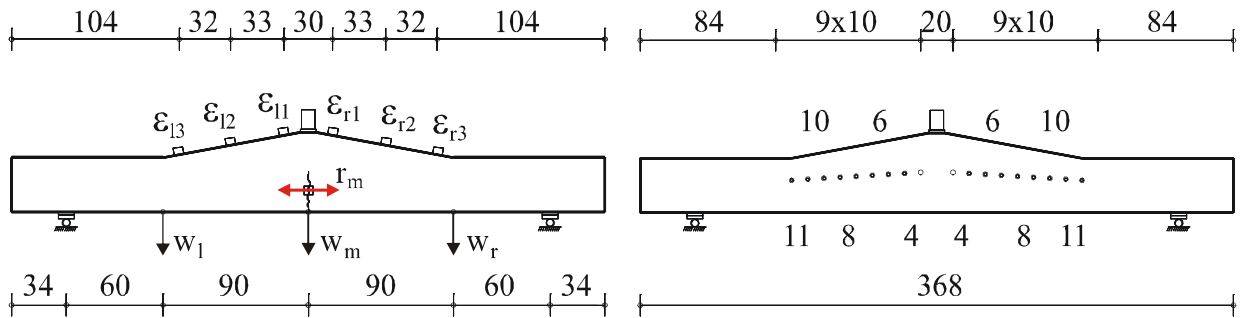


Bild B.4L1.1- Messstellen

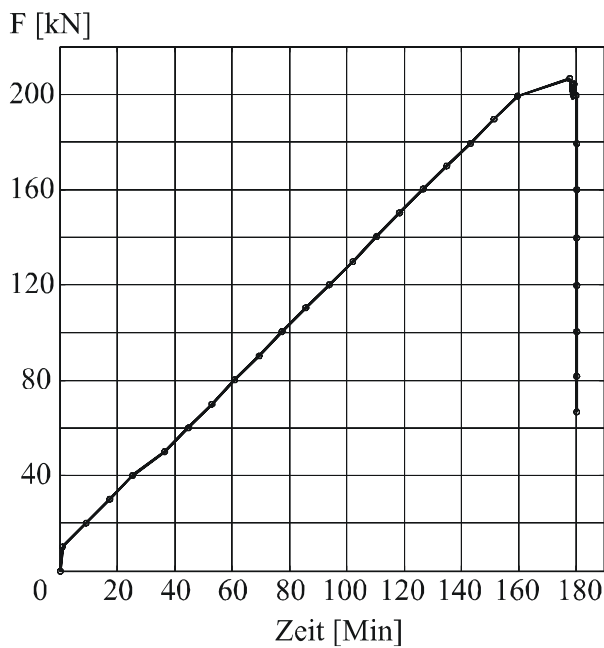


Bild B.4L1.2-Last-Zeit-Kurve

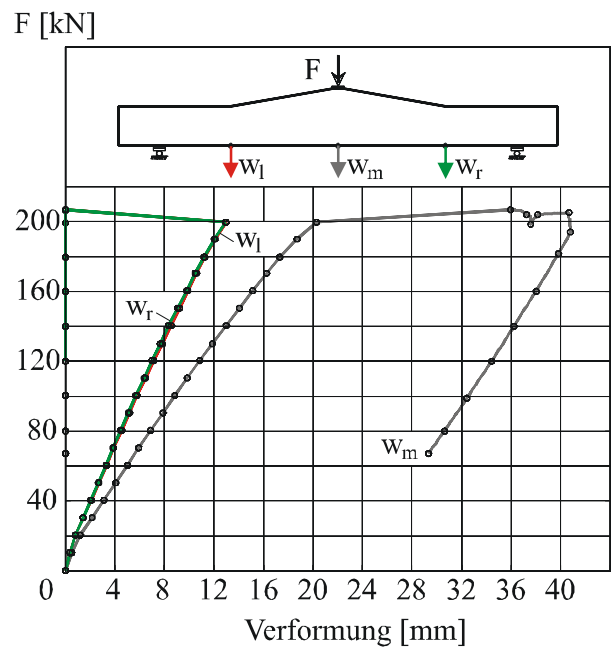


Bild B.4L1.3-Last-Verformungs-Kurve

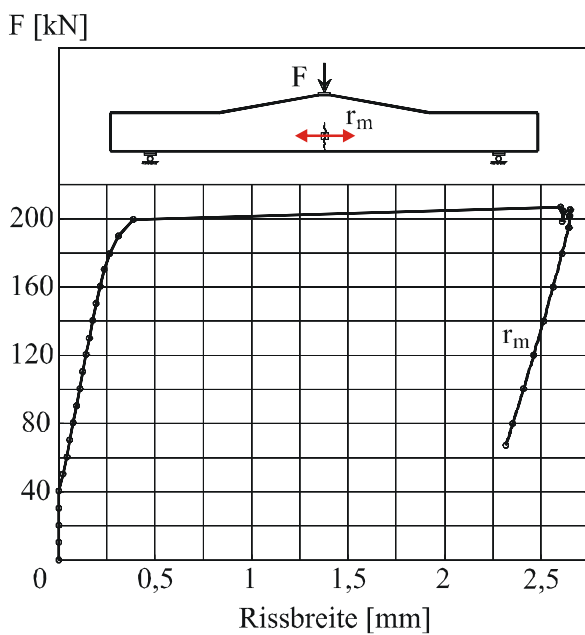


Bild B.4L1.4- Rissbreitenentwicklung

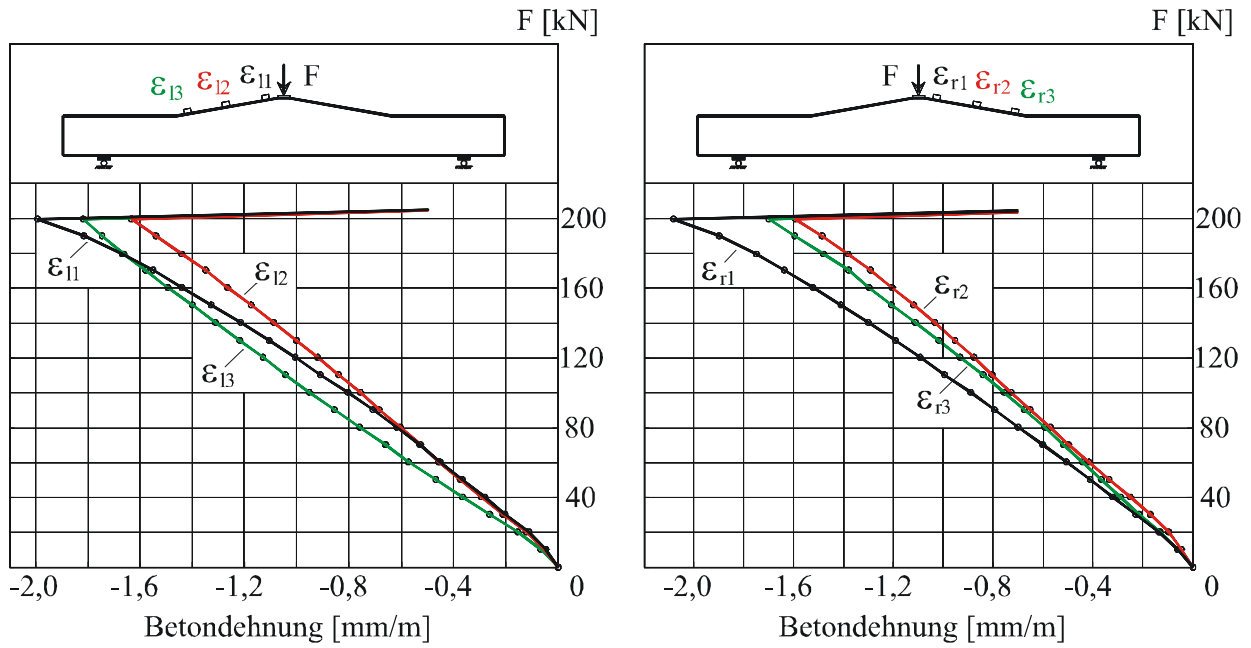


Bild B.4L1.5-Betondehnungen an der Trägeroberseite

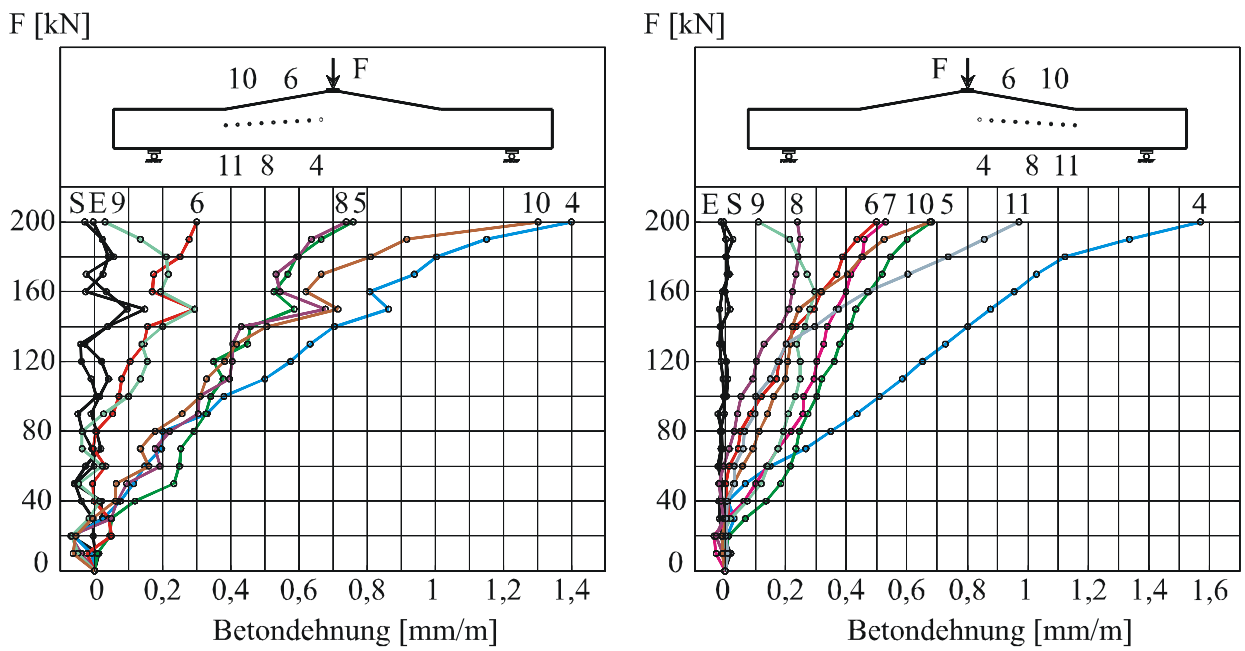


Bild B.4L1.6- Betondehnungen in der Schwerachse

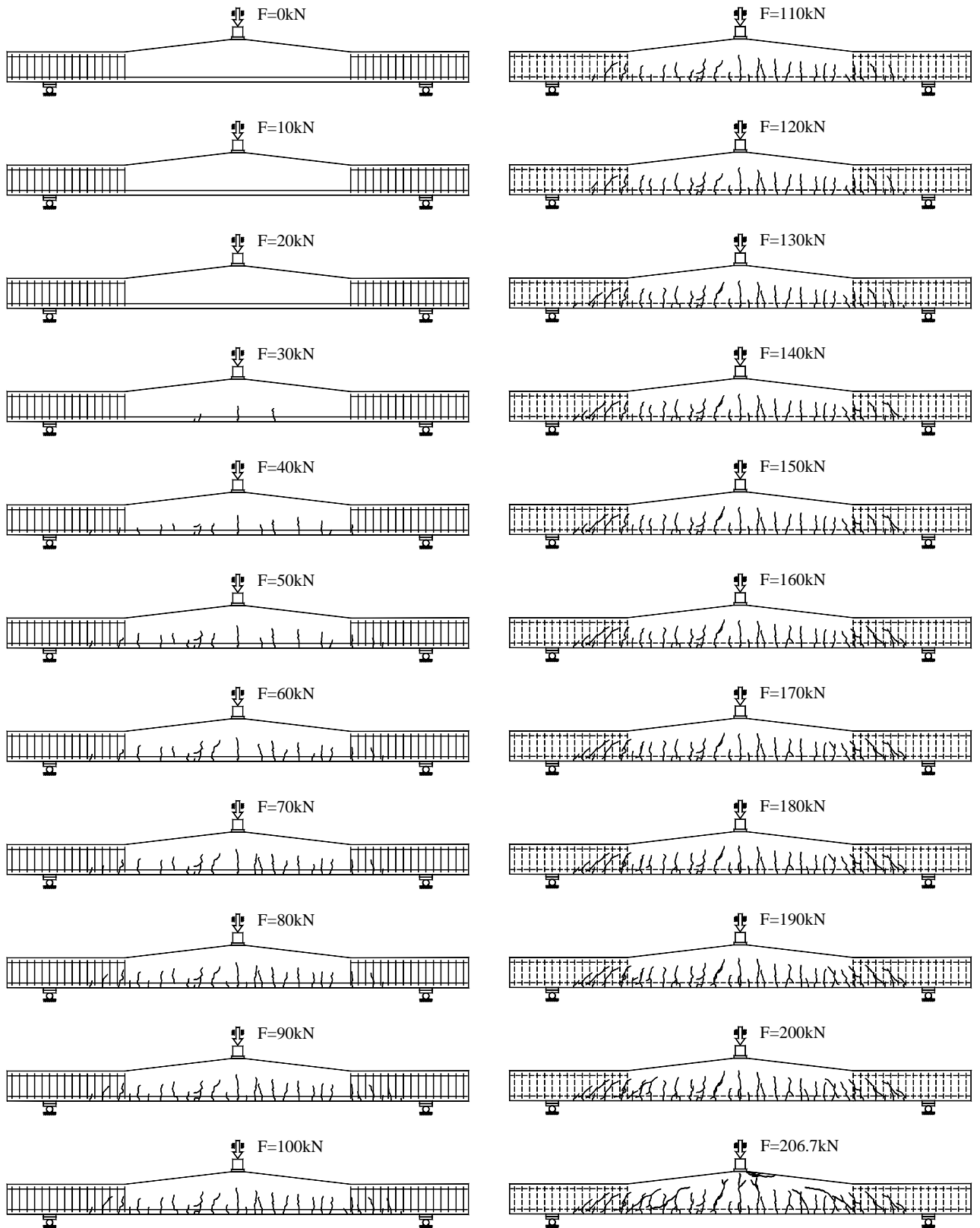


Bild B.4L1.7- Rissentwicklung 4L1

**VERSUCHSBALKEN 4L2**

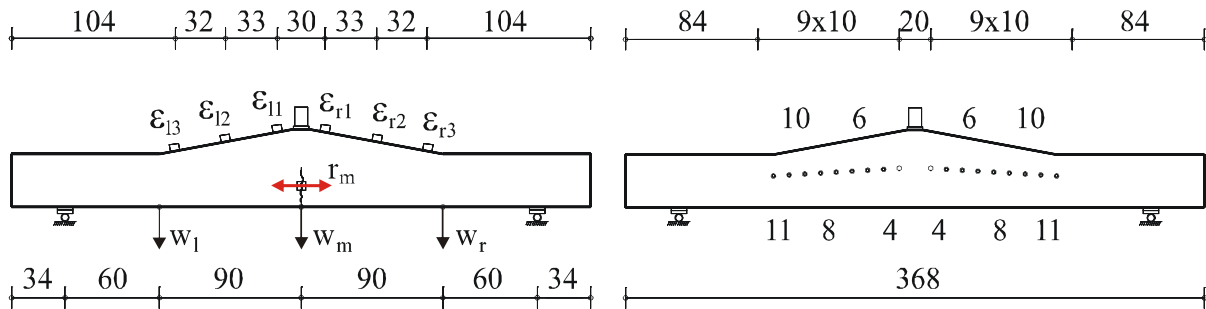


Bild B.4L2.1- Messstellen

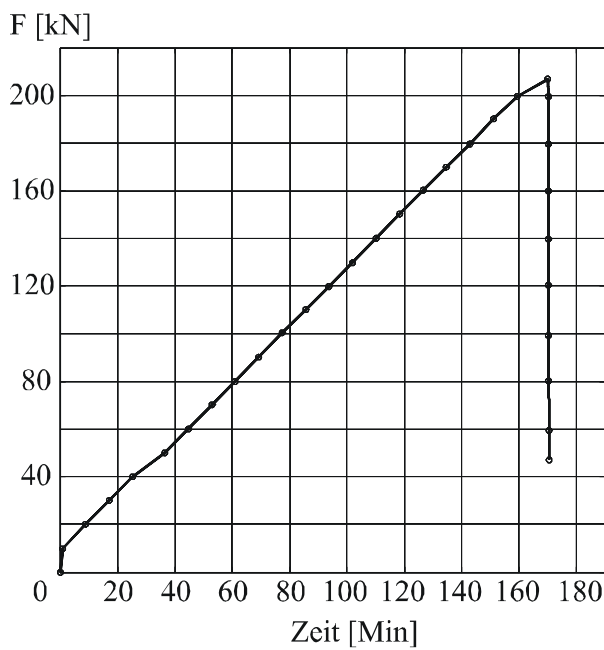


Bild B.4L2.2-Last-Zeit-Kurve

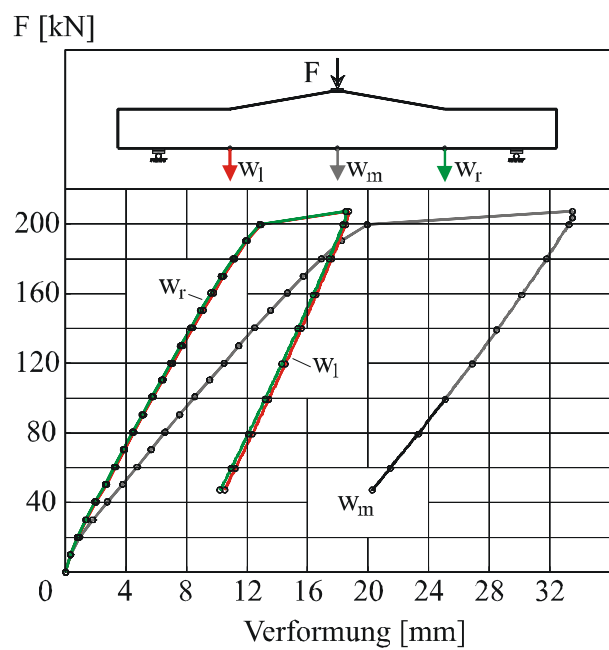


Bild B.4L2.3-Last-Verformungs-Kurve

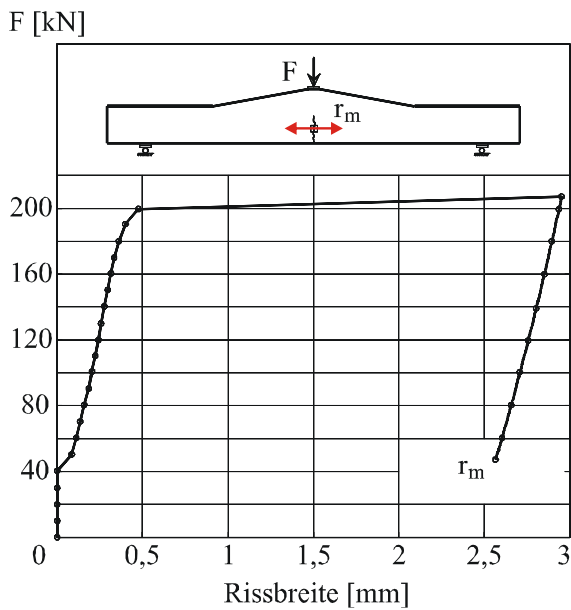


Bild B.4L2.4- Rissbreitenentwicklung

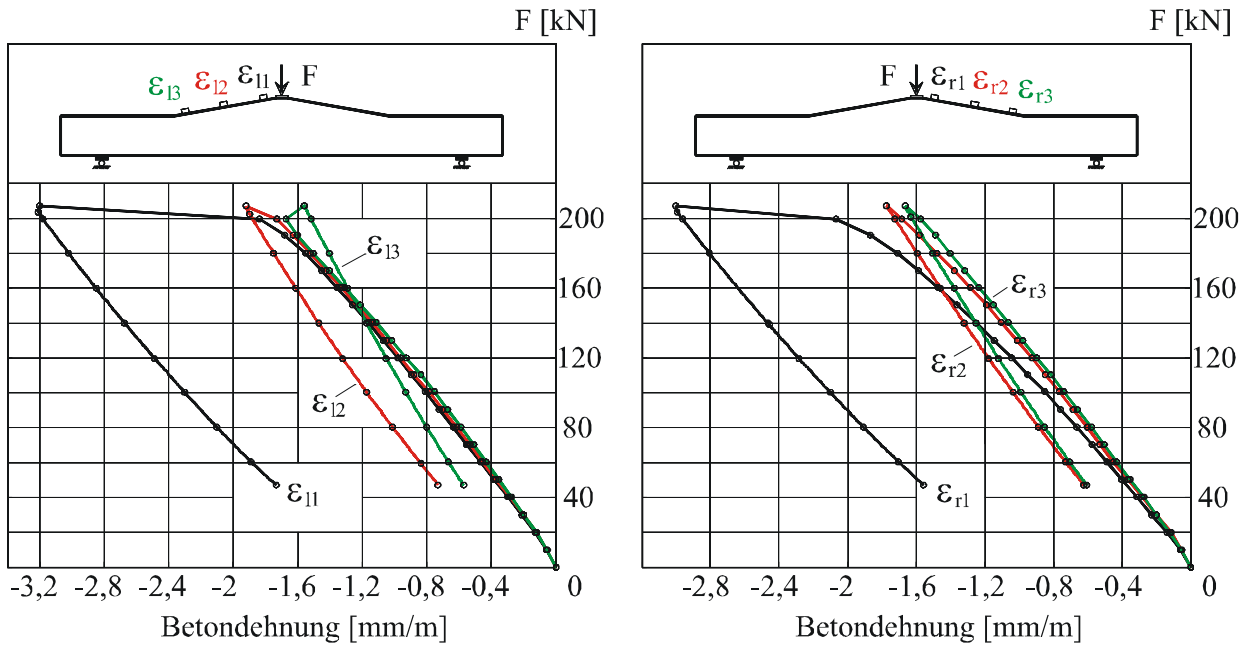


Bild B.4L2.5-Betondehnungen an der Trägeroberseite

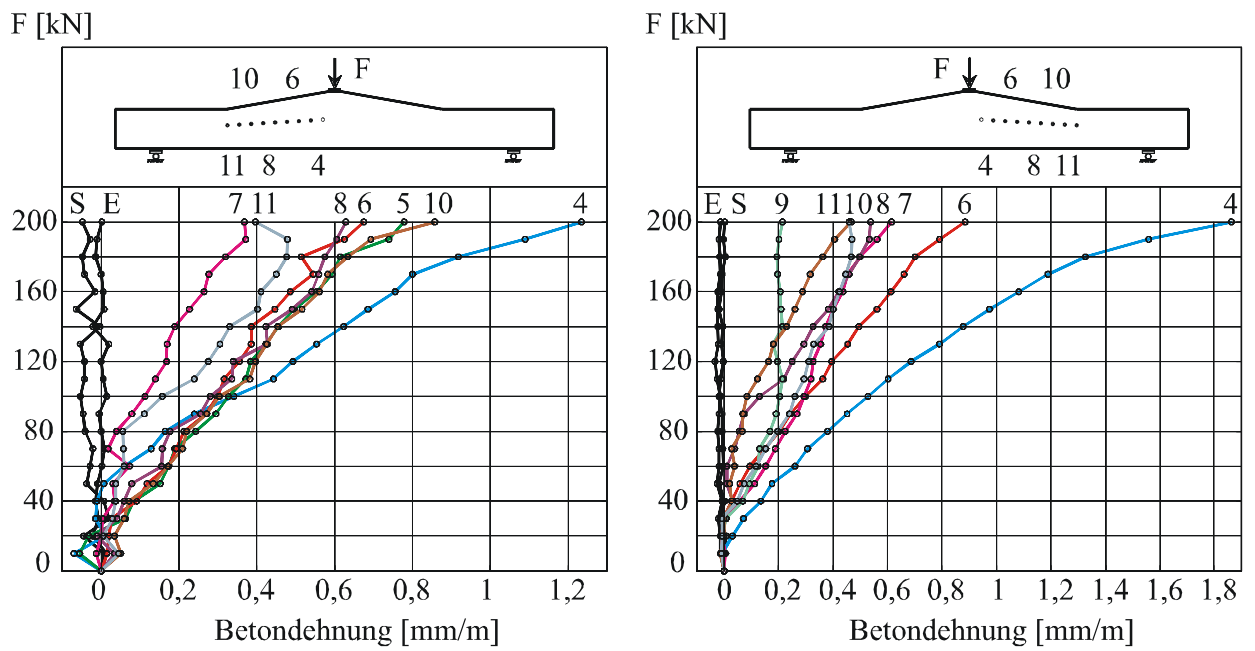


Bild B.4L2.6- Betondehnungen in der Schwerachse

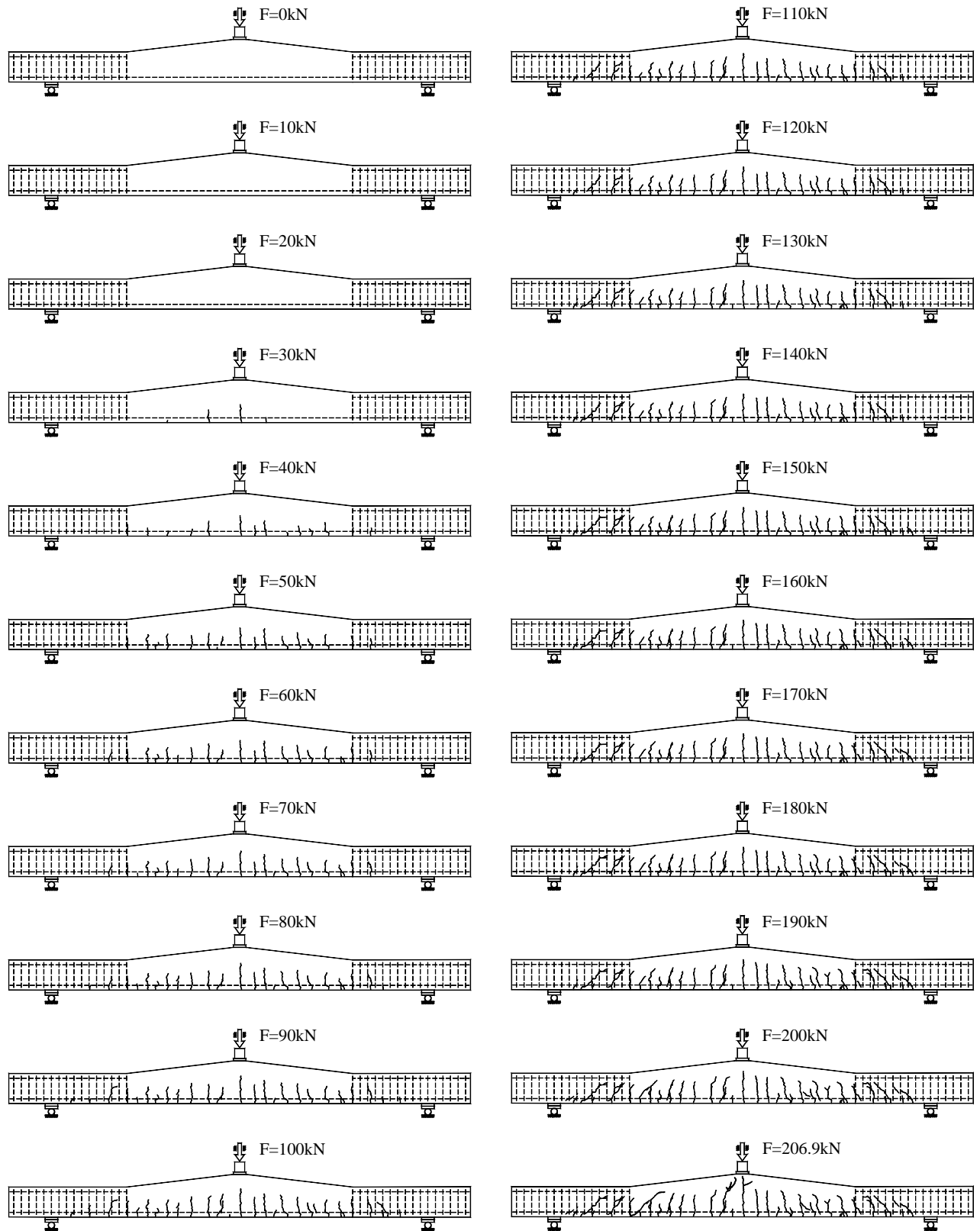


Bild B.4L2.7- Rissentwicklung 4L2

**VERSUCHSBALKEN 5L1**

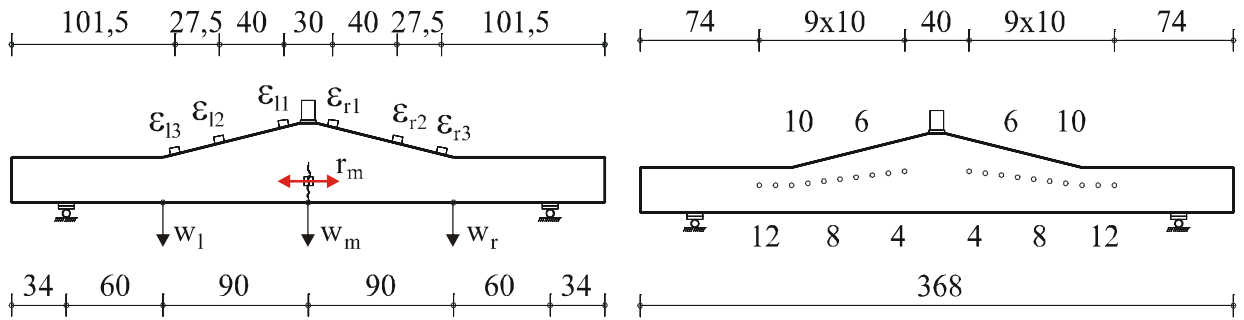


Bild B.5L1.1- Messstellen

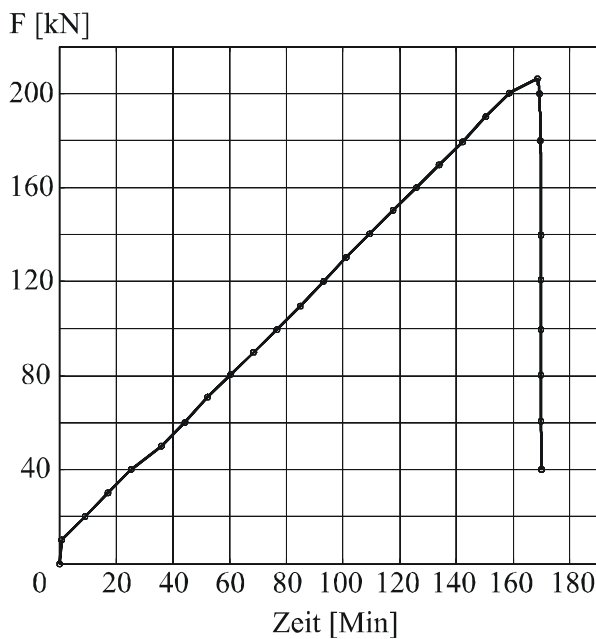


Bild B.5L1.2-Last-Zeit-Kurve

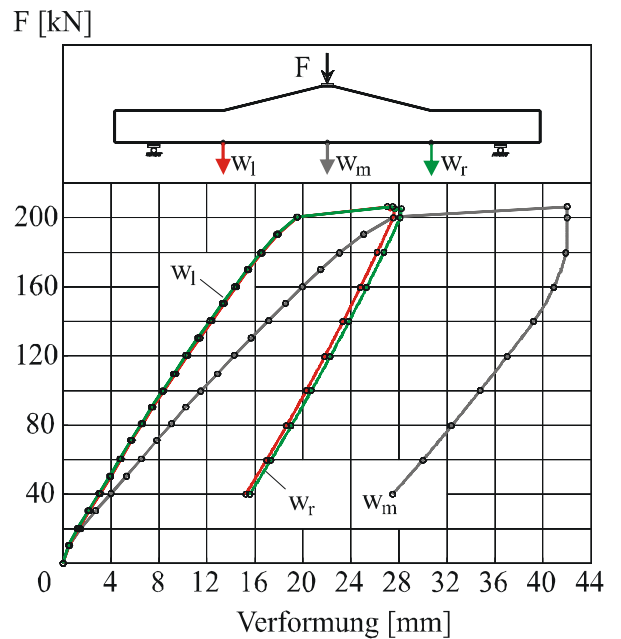


Bild B.5L1.3-Last-Verformungs-Kurve

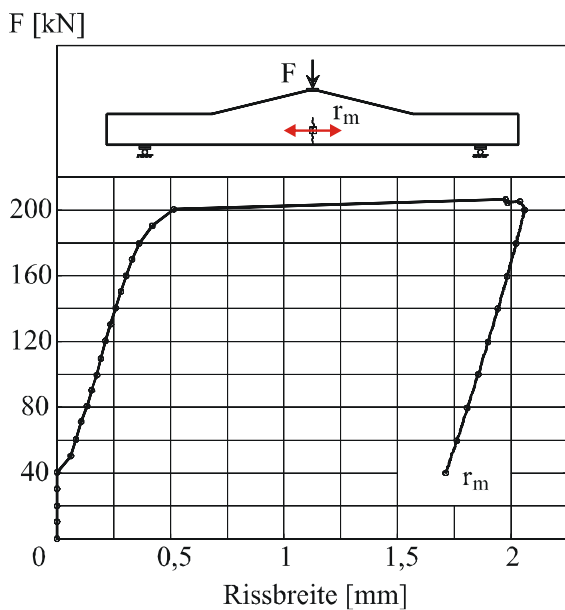


Bild B.5L1.4- Rissbreitenentwicklung

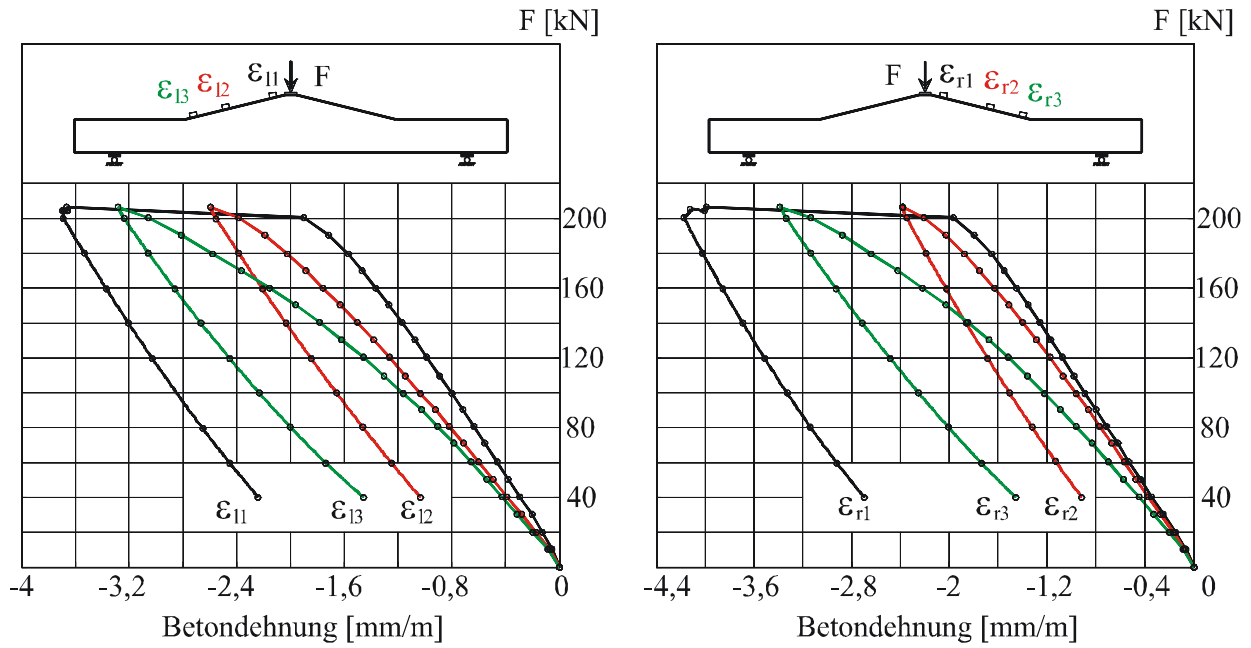


Bild B.5L1.5-Betondehnungen an der Trägeroberseite

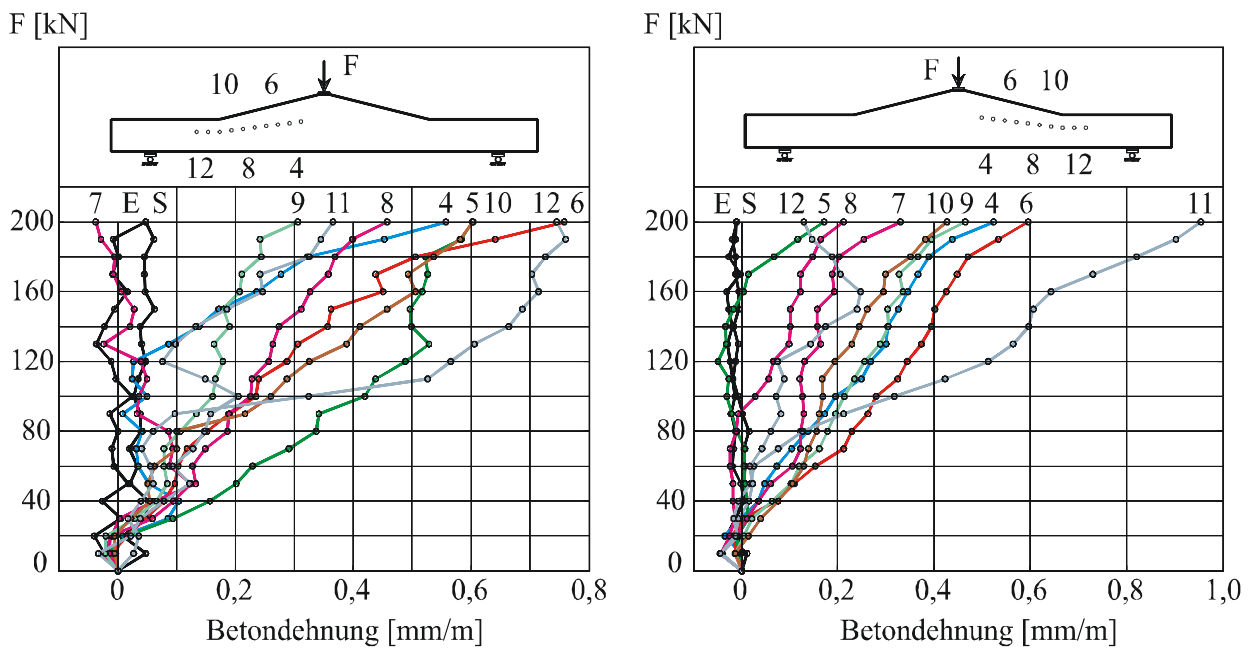


Bild B.5L1.6- Betondehnungen in der Schwerachse

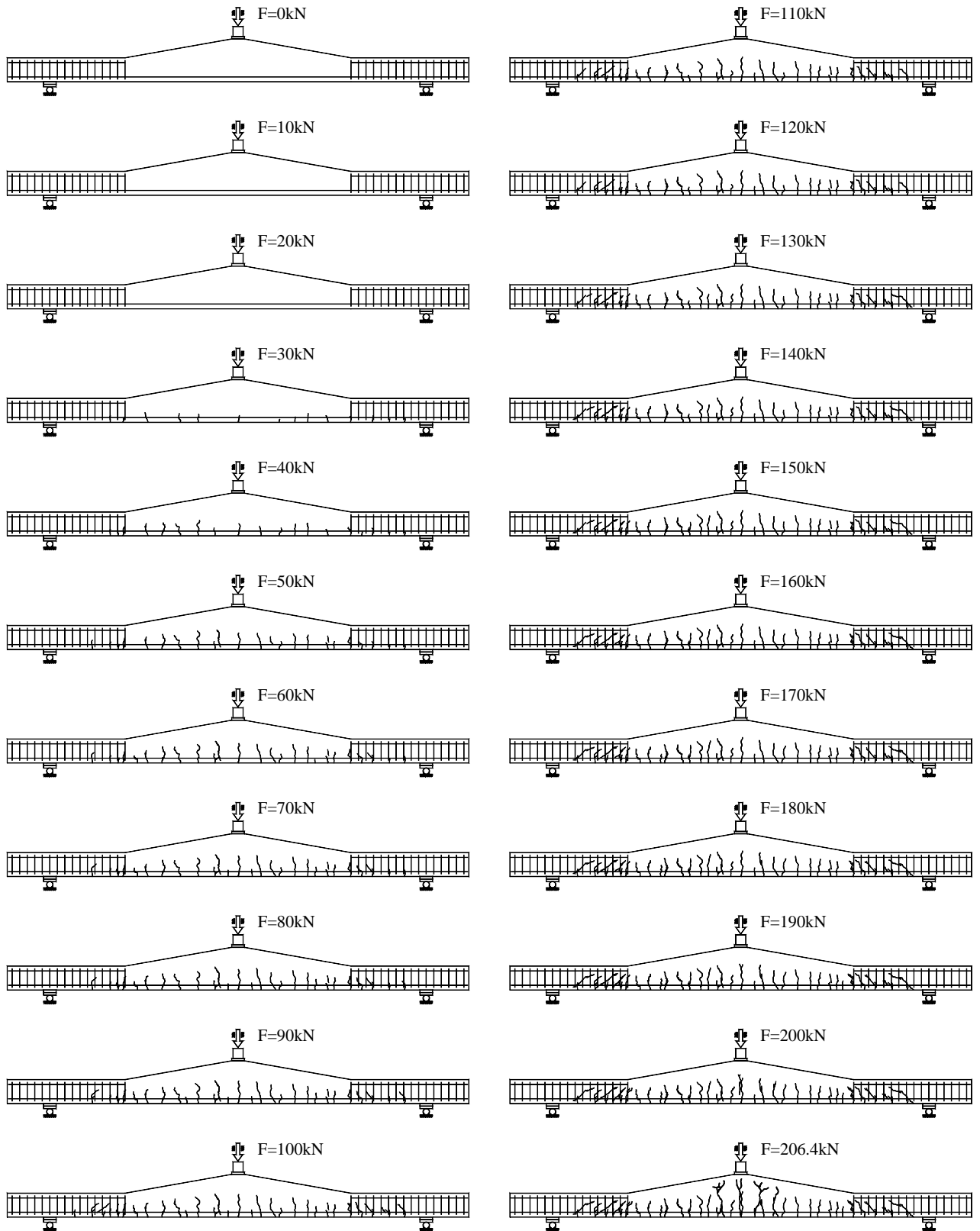


Bild B.5L1.7- Rissentwicklung 5L1

**VERSUCHSBALKEN 5L2**

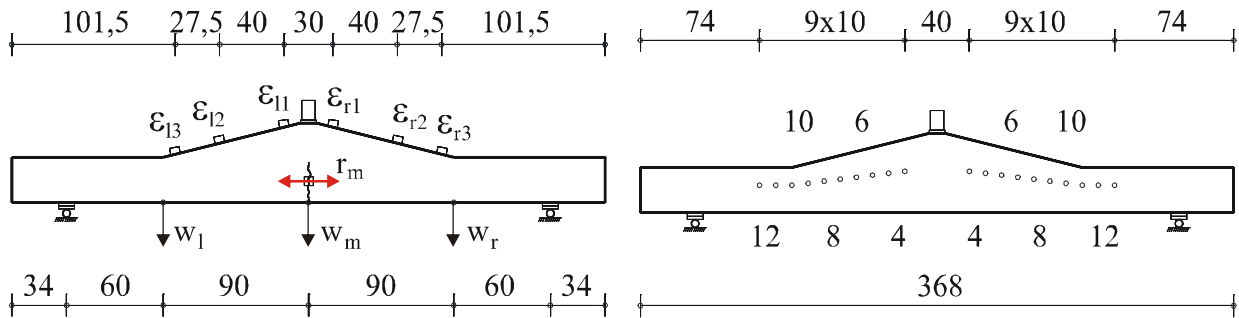


Bild B.5L2.1- Messstellen

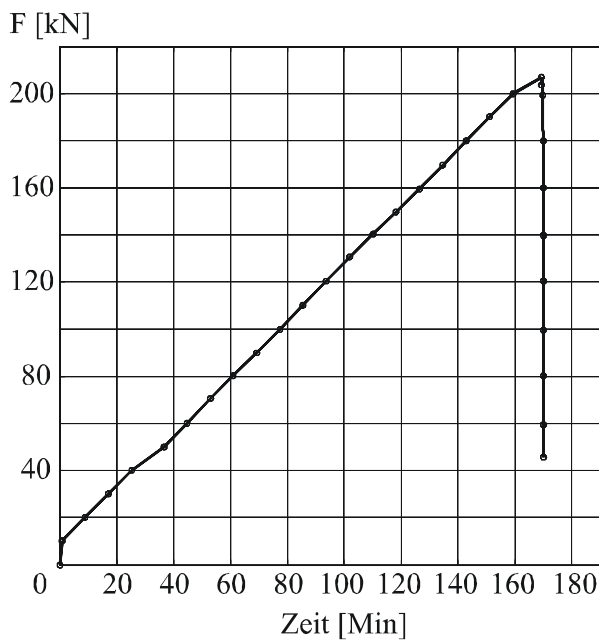


Bild B.5L2.2-Last-Zeit-Kurve

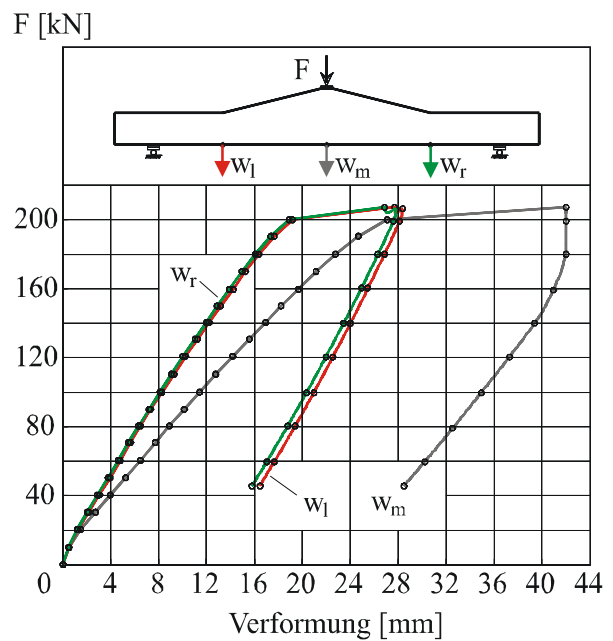


Bild B.5L2.3-Last-Verformungs-Kurve

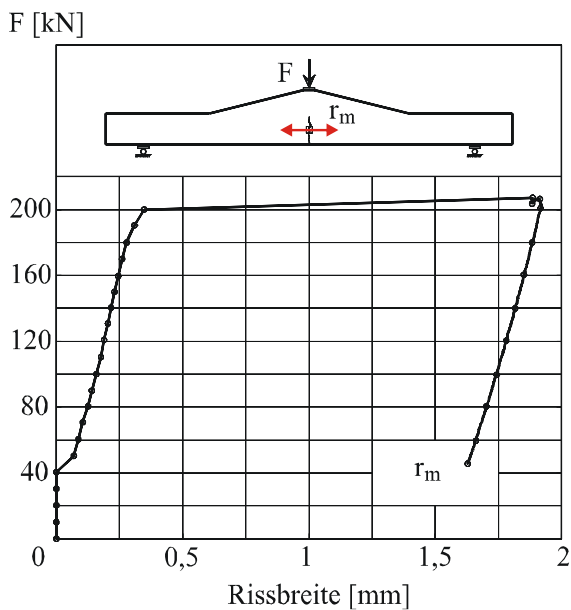


Bild B.5L2.4- Rissbreitenentwicklung

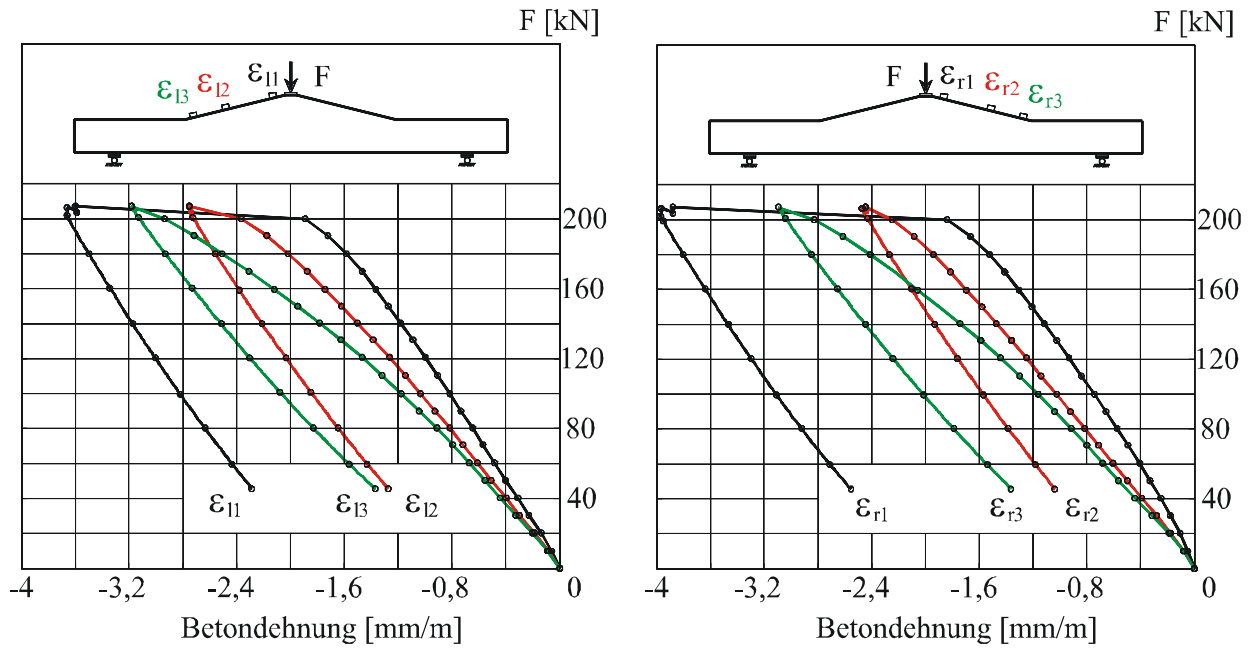


Bild B.5L2.5-Betondehnungen an der Trägeroberseite

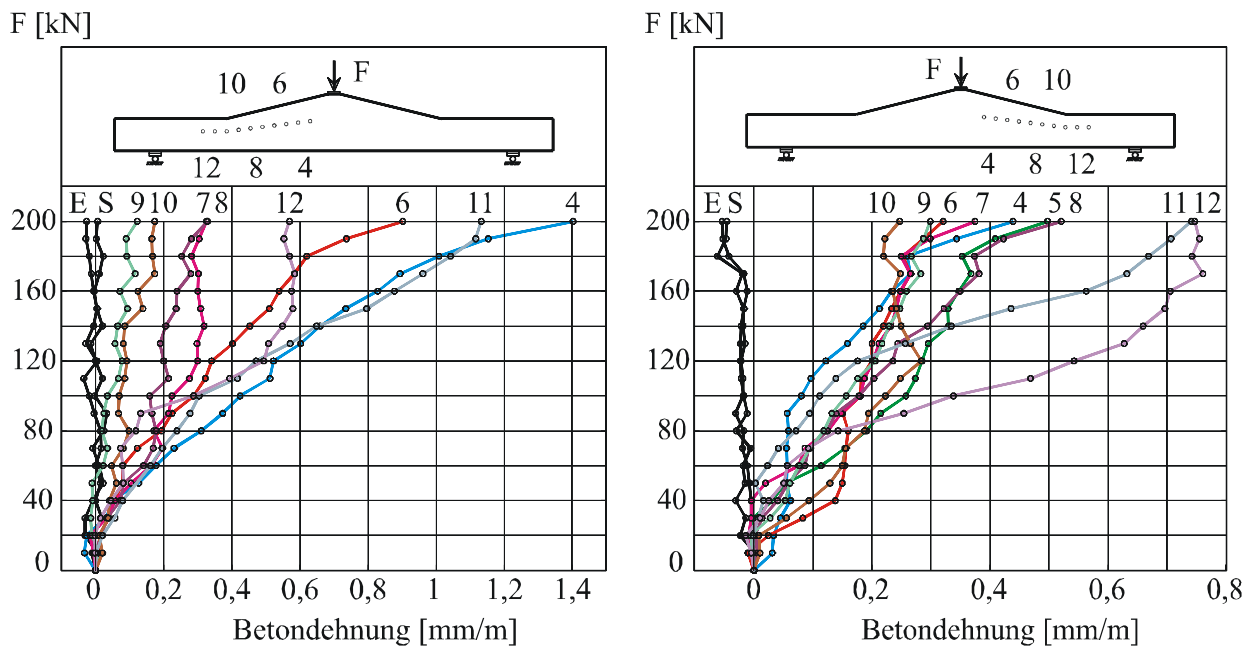


Bild B.5L2.6- Betondehnungen in der Schwerachse

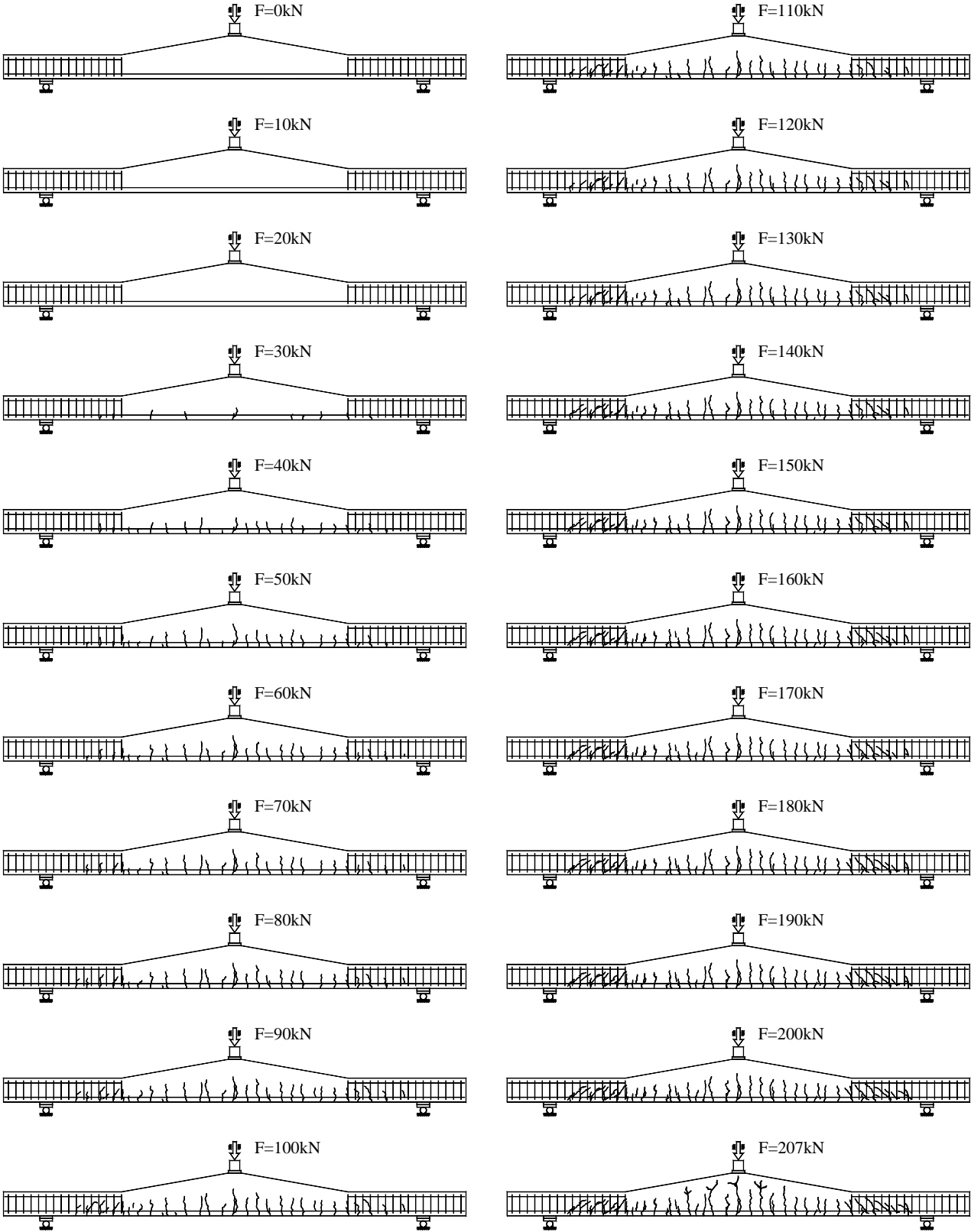


Bild B.5L2.7- Rissentwicklung 5L2

**VERSUCHSBALKEN 1K1**

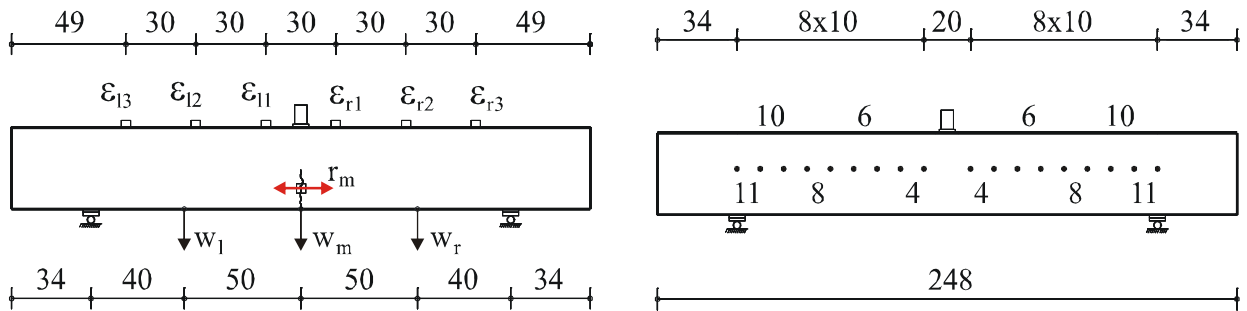


Bild B.1K1.1- Messstellen

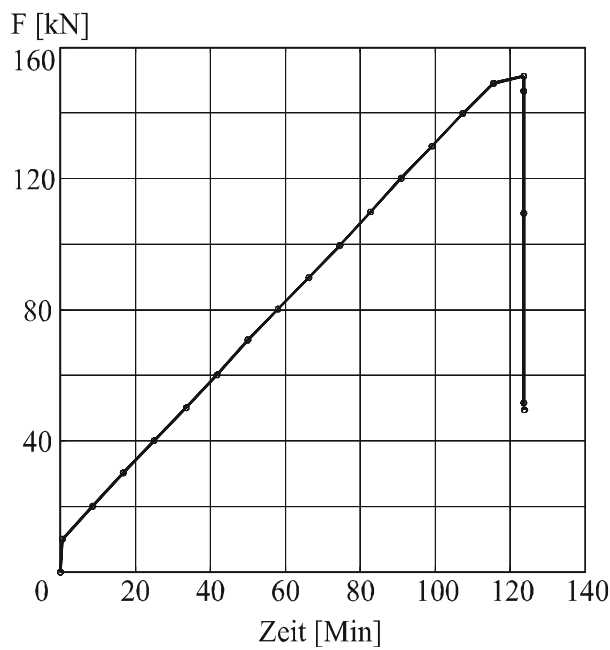


Bild B.1K1.2-Last-Zeit-Kurve

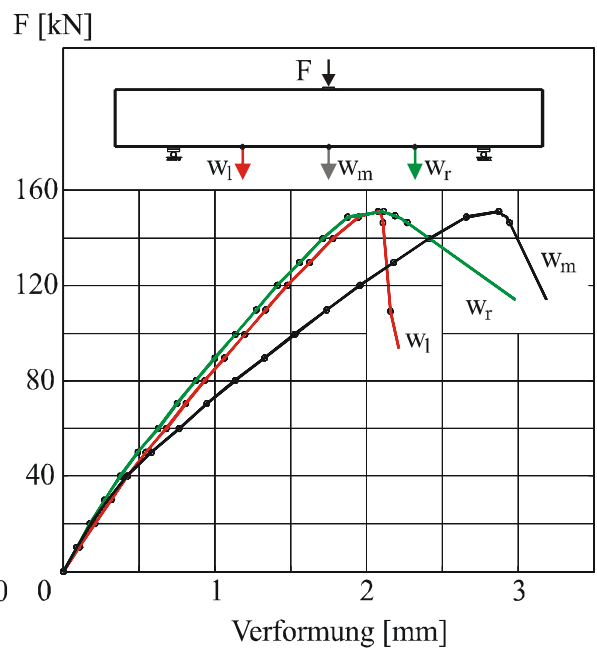


Bild B.1K1.3-Last-Verformungs-Kurve

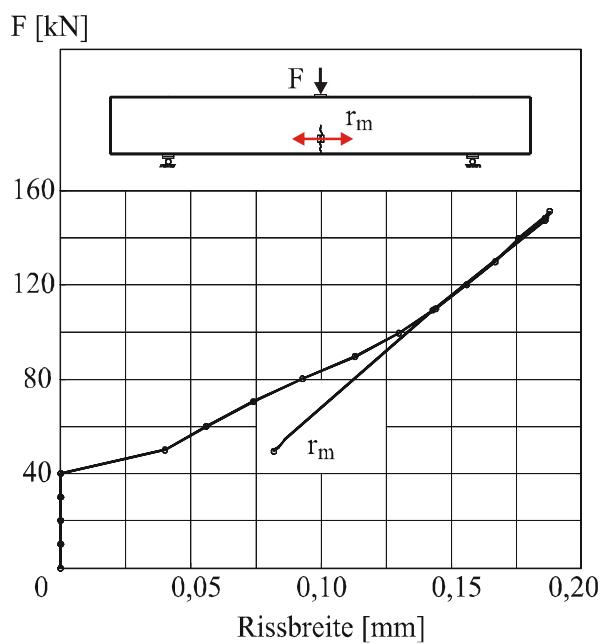


Bild B.1K1.4- Rissbreitenentwicklung

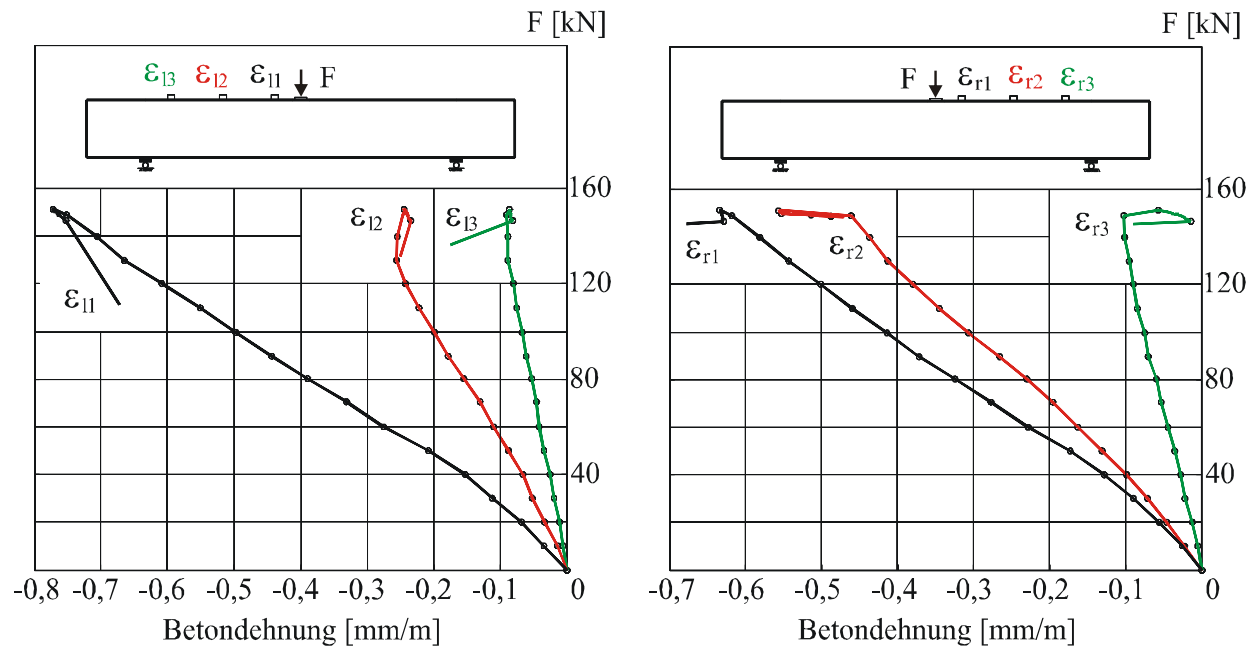


Bild B.1K1.5-Betondehnungen an der Trägeroberseite

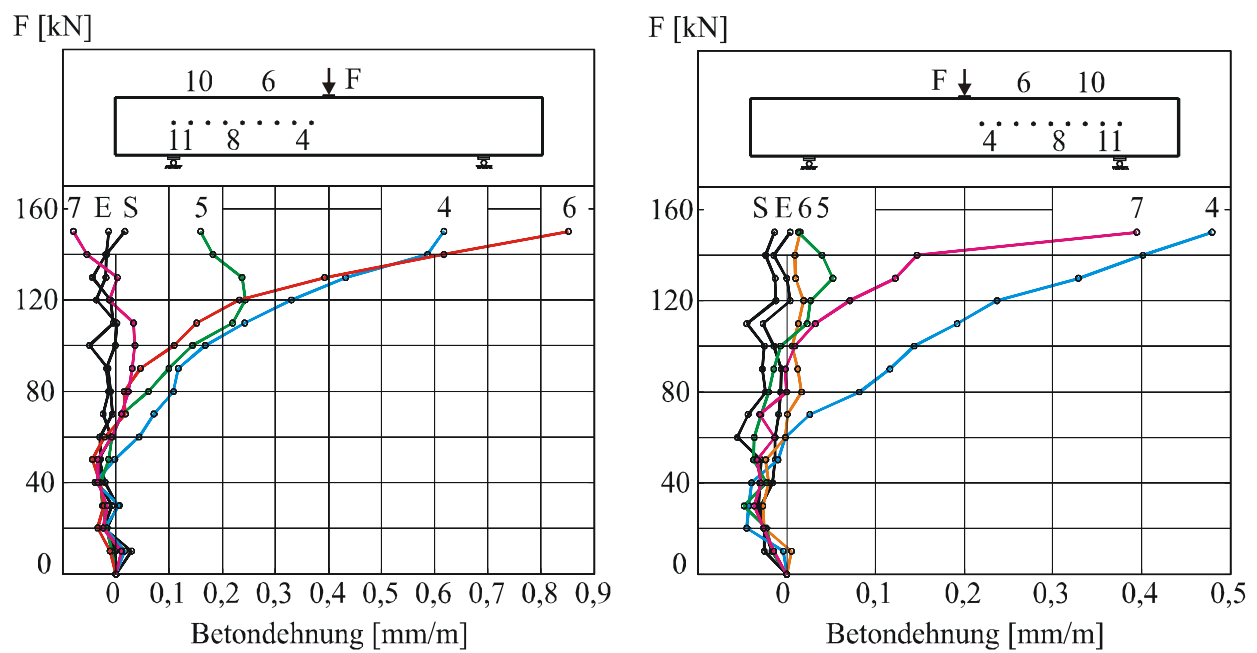


Bild B.1K1.6- Betondehnungen in der Schwerachse

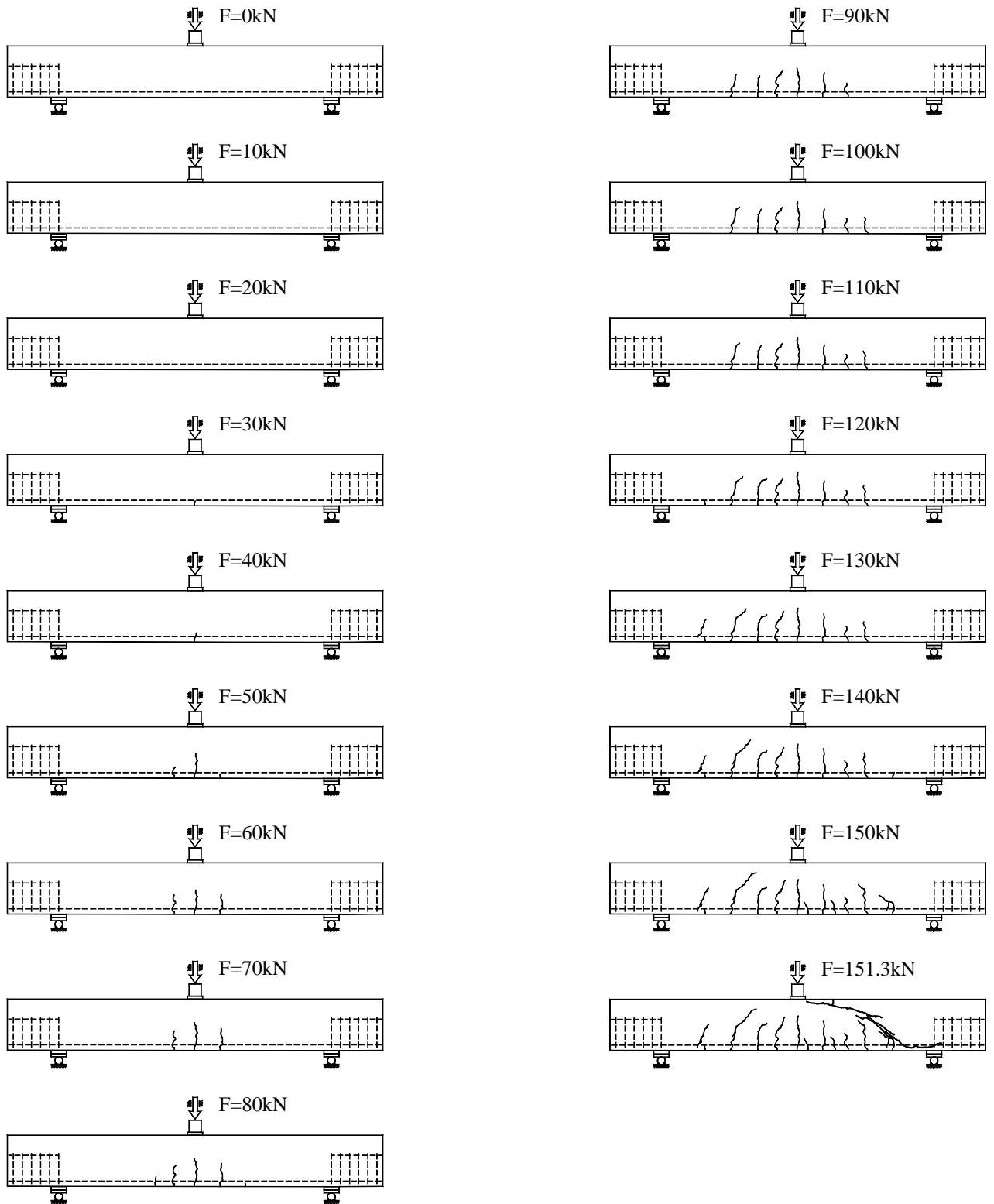


Bild B.1K1.7- Rissentwicklung 1K1

**VERSUCHSBALKEN 1K2**

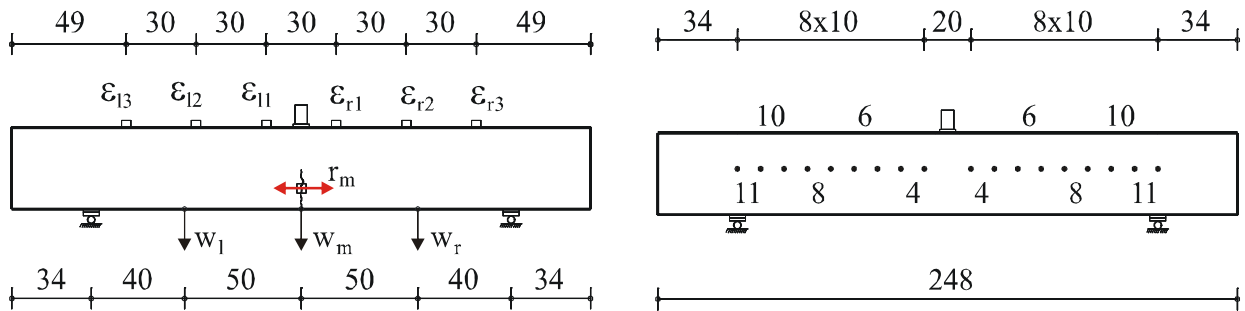


Bild B.1K2.1- Messstellen

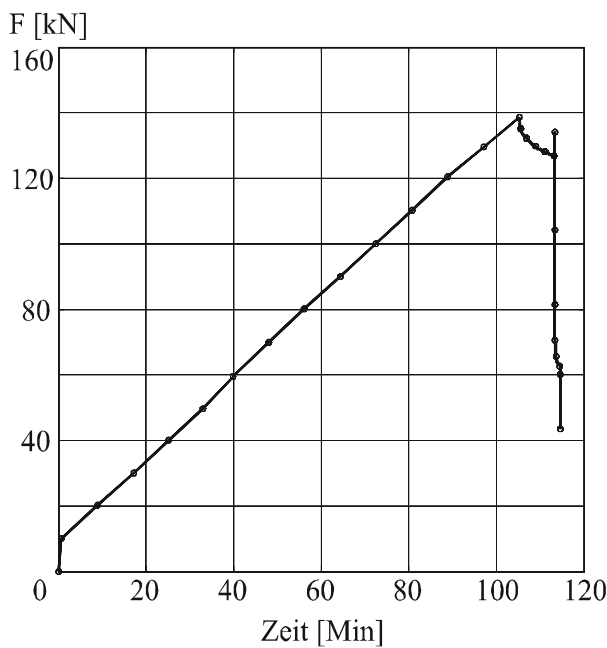


Bild B.1K2.2-Last-Zeit-Kurve

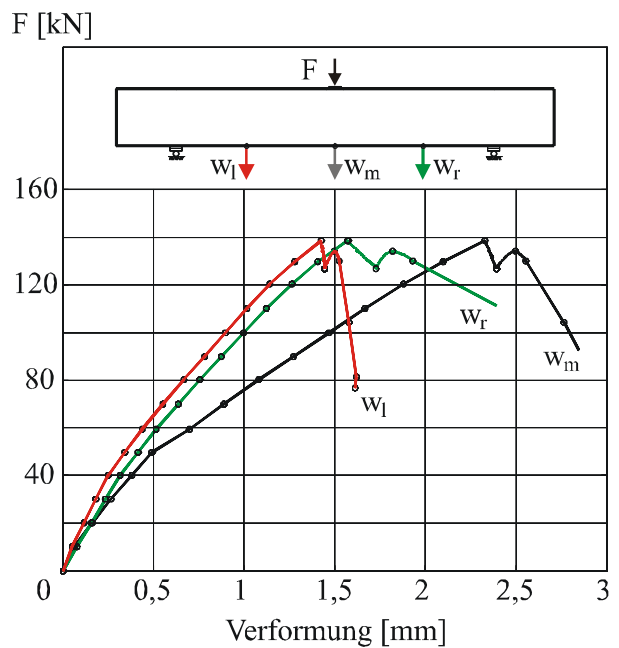


Bild B.1K2.3-Last-Verformungs-Kurve

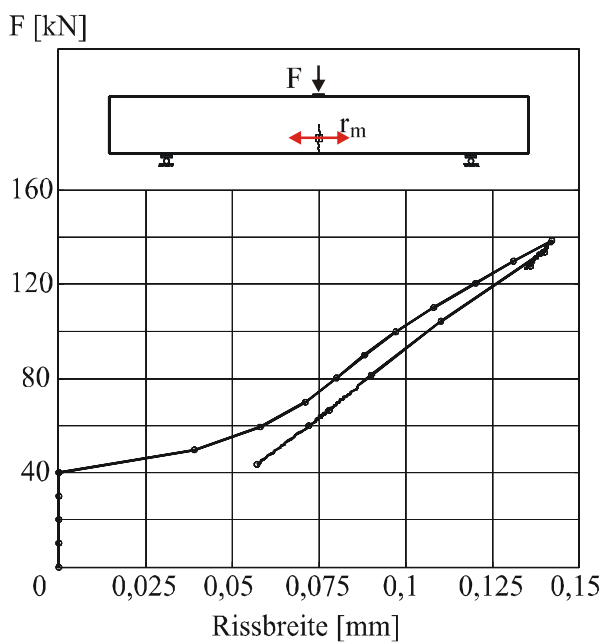


Bild B.1K2.4- Rissbreitenentwicklung

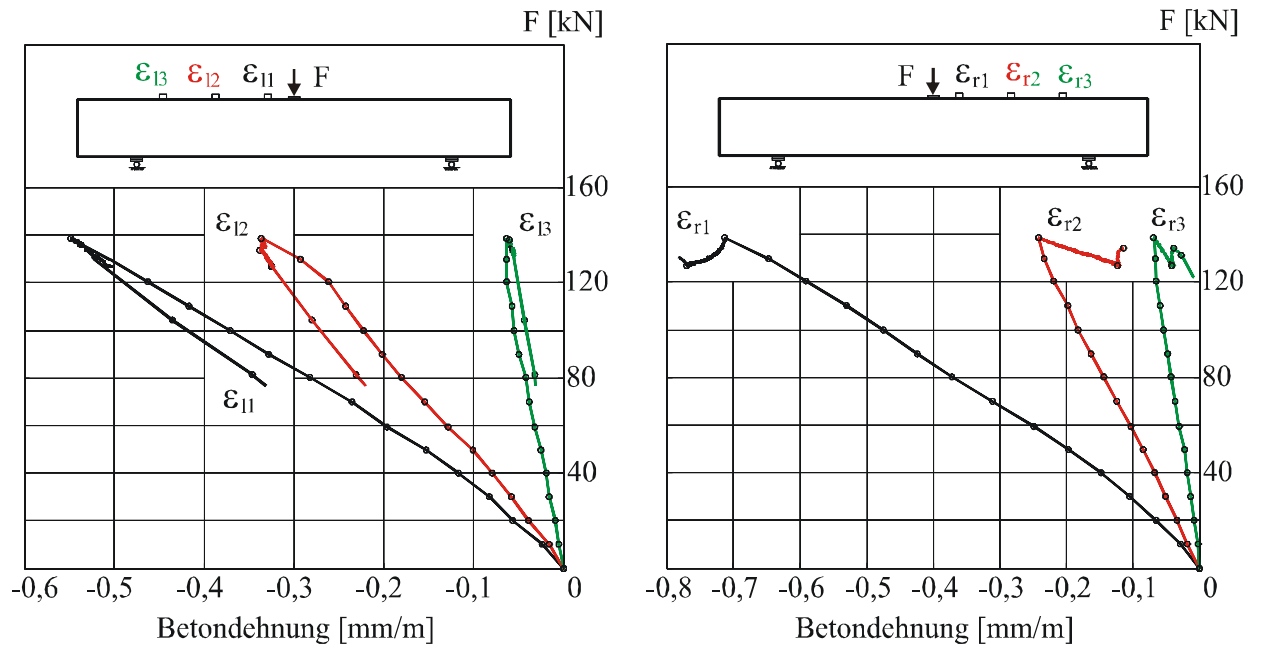


Bild B.1K2.5-Betondehnungen an der Trägeroberseite

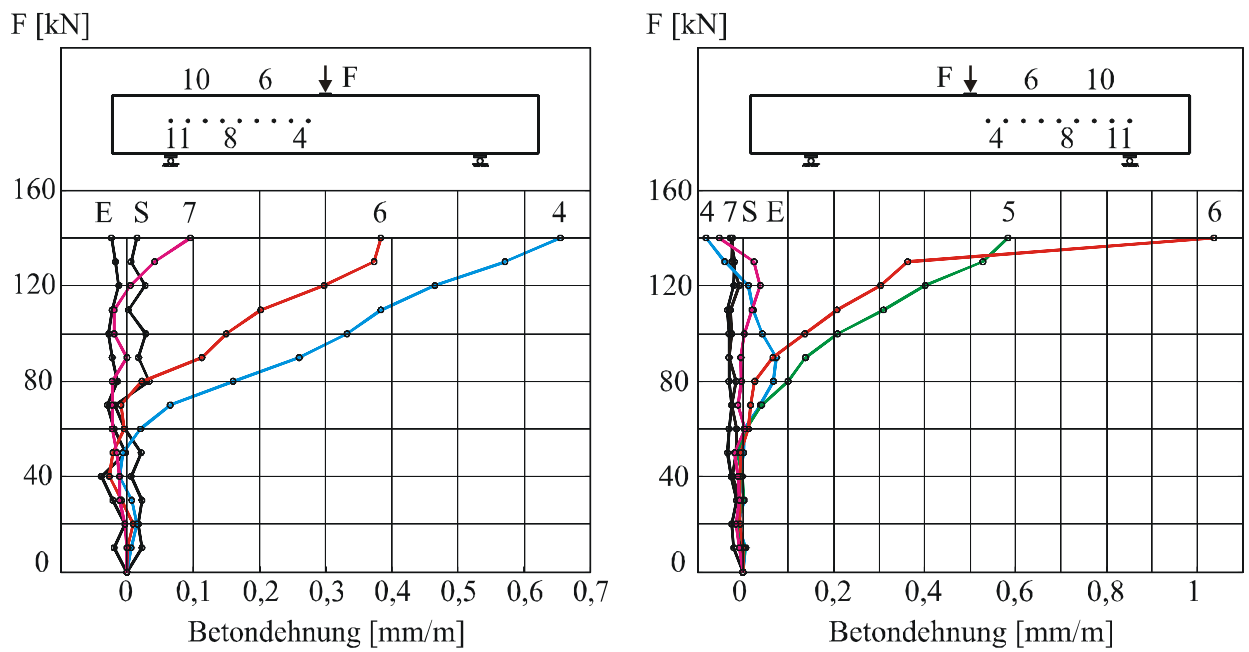


Bild B.1K2.6- Betondehnungen in der Schwerachse

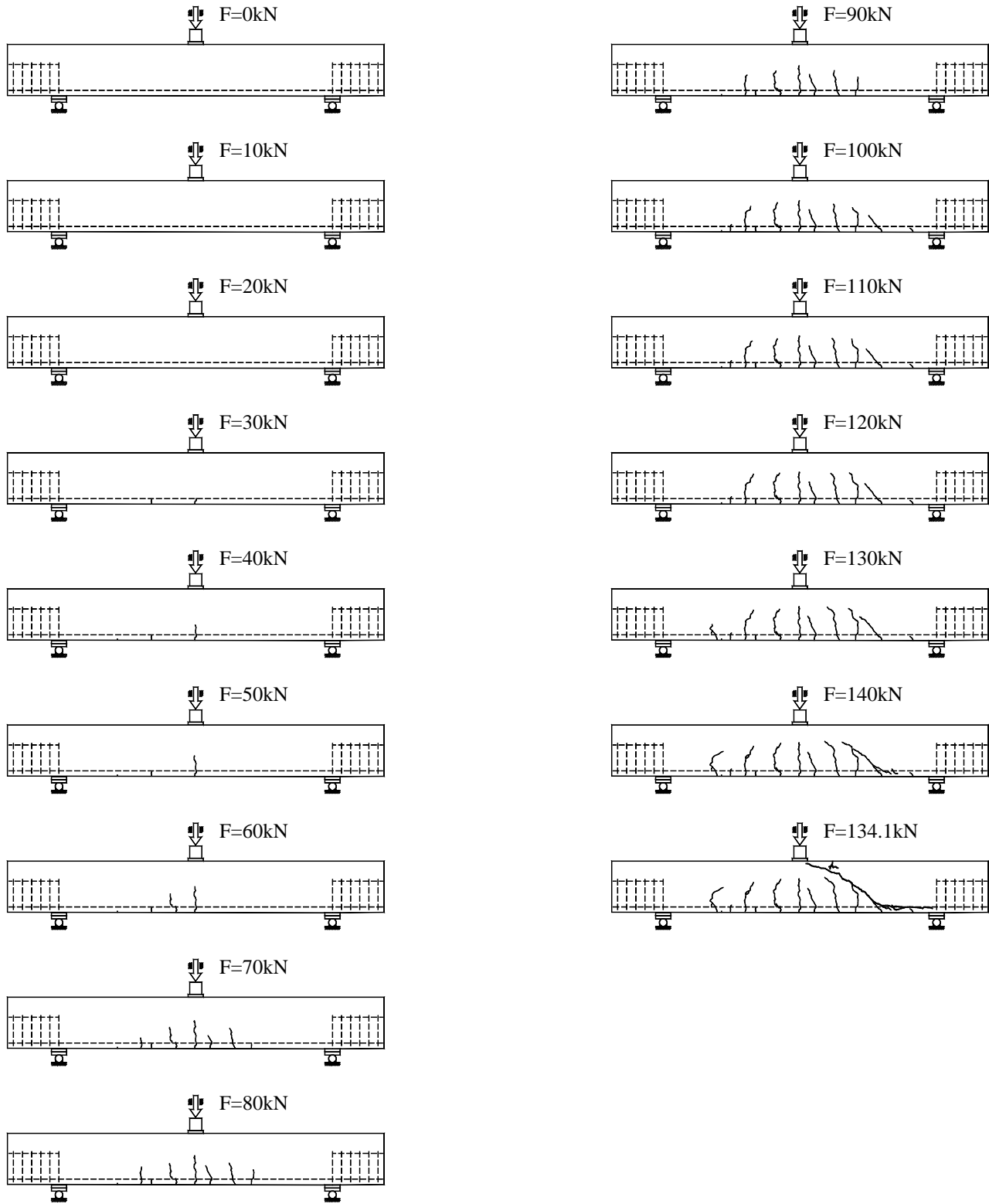


Bild B.1K2.7- Rissentwicklung 1K2

**VERSUCHSBALKEN 2K1**

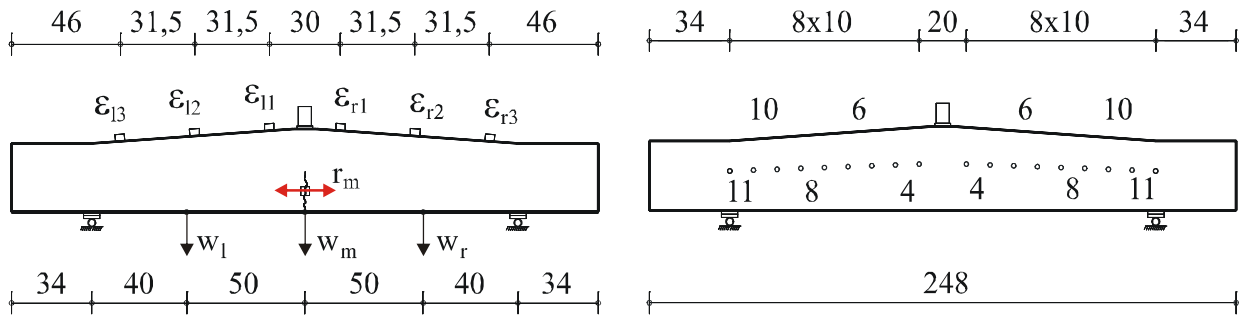


Bild B.2K1.1- Messstellen

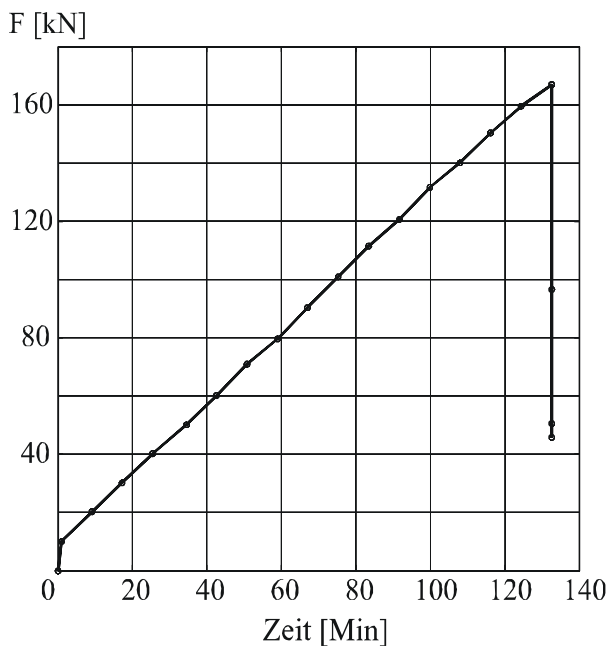


Bild B.2K1.2-Last-Zeit-Kurve

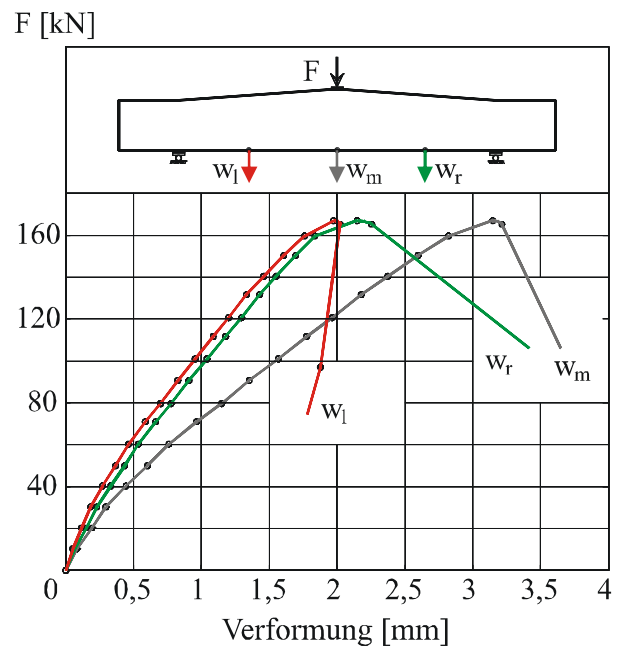


Bild B.2K1.3-Last-Verformungs-Kurve

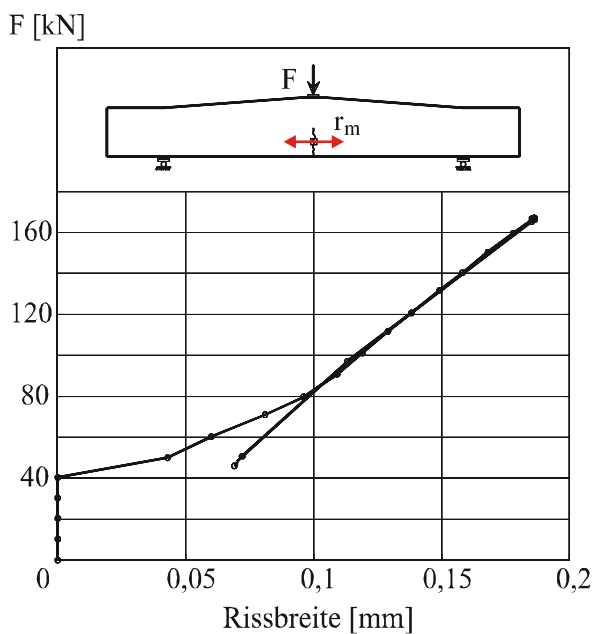


Bild B.2K1.4- Rissbreitenentwicklung

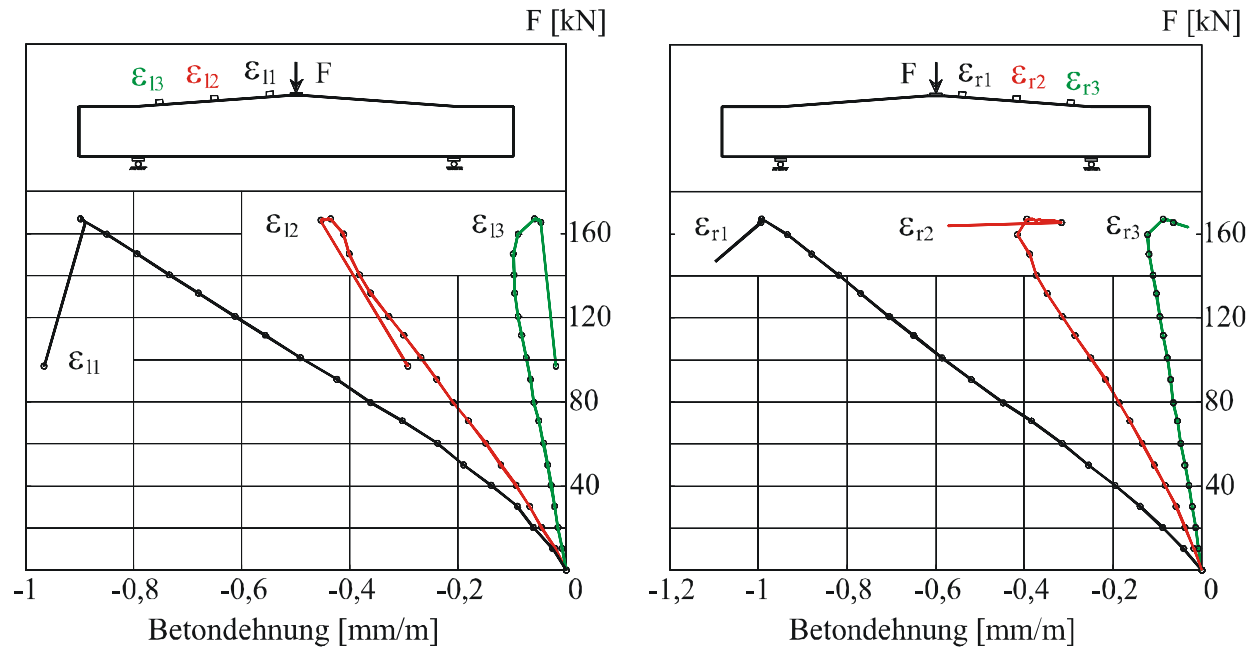


Bild B.2K1.5-Betondehnungen an der Trägeroberseite

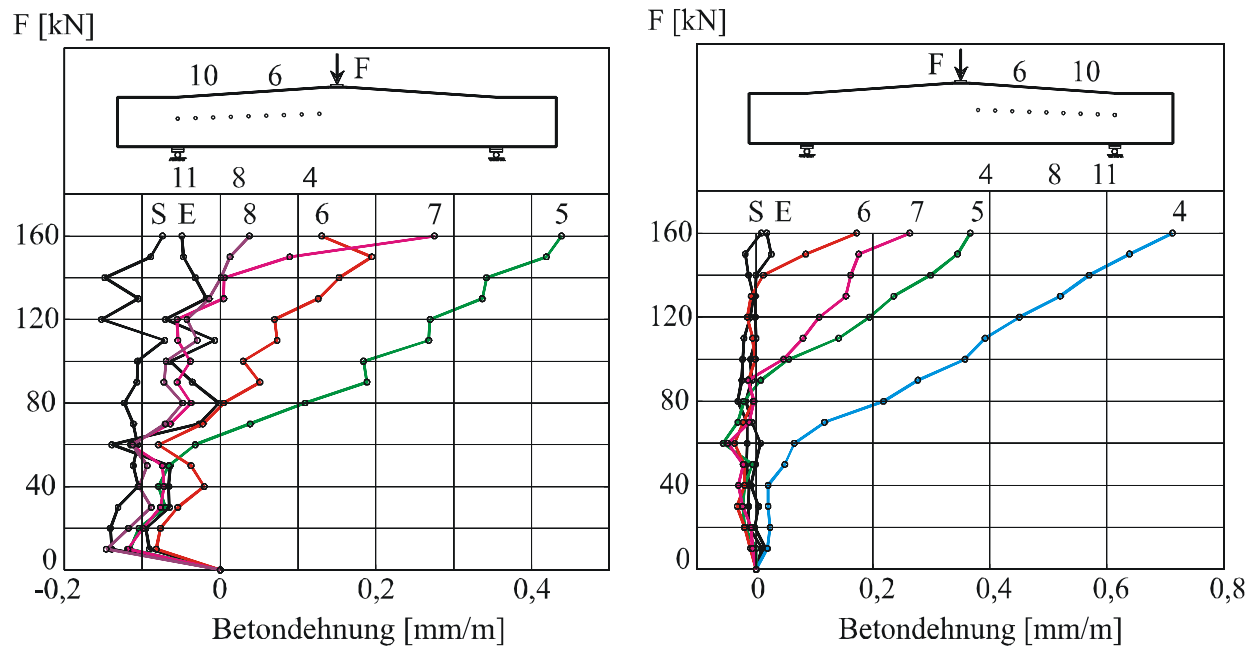


Bild B.2K1.6- Betondehnungen in der Schwerachse

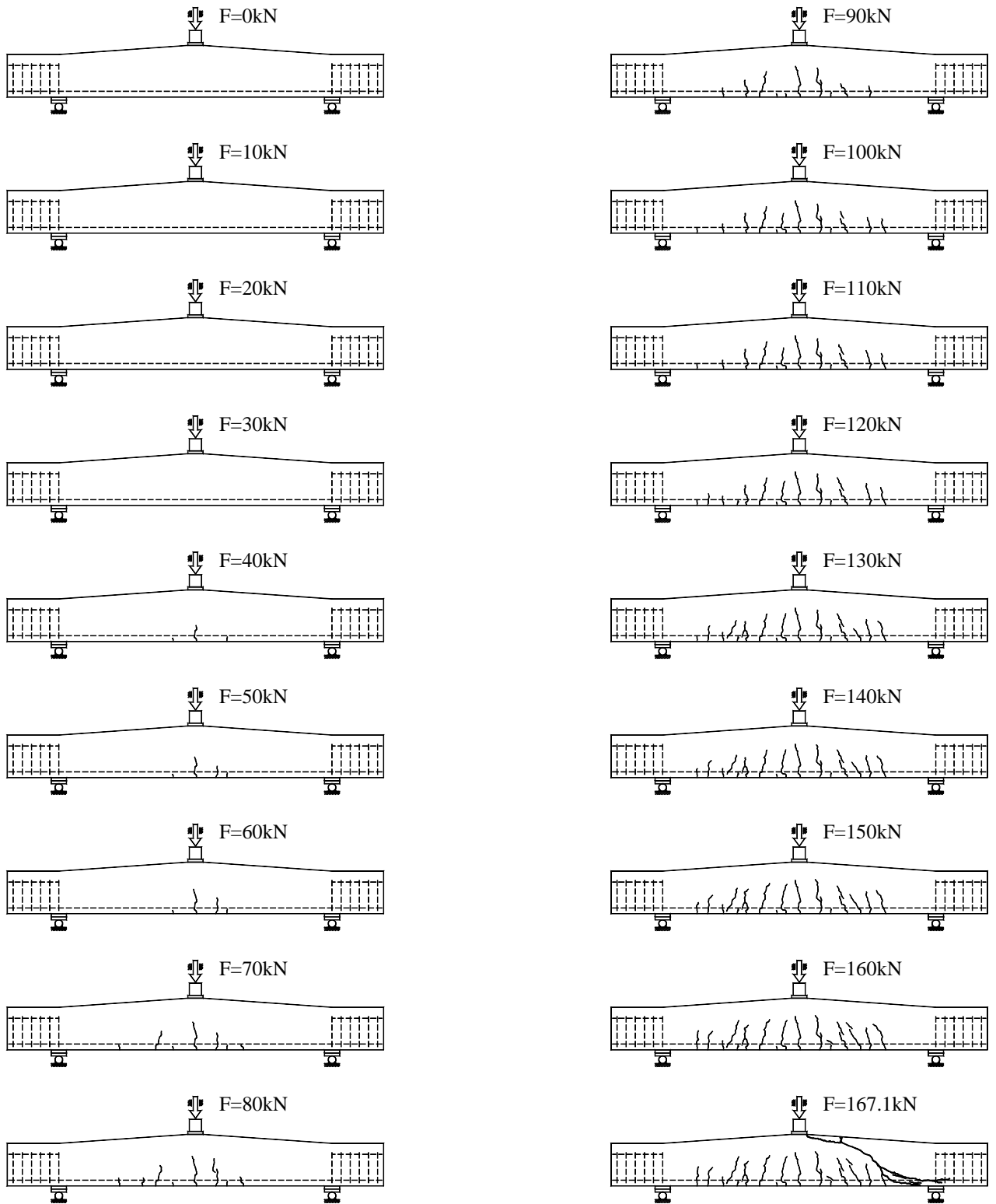


Bild B.2K1.7- Rissentwicklung 2K1

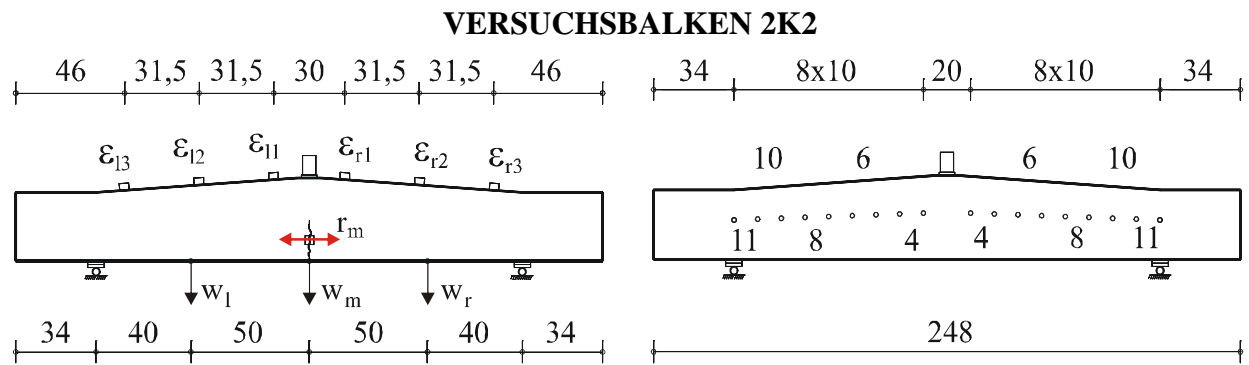


Bild B.2K2.1- Messstellen

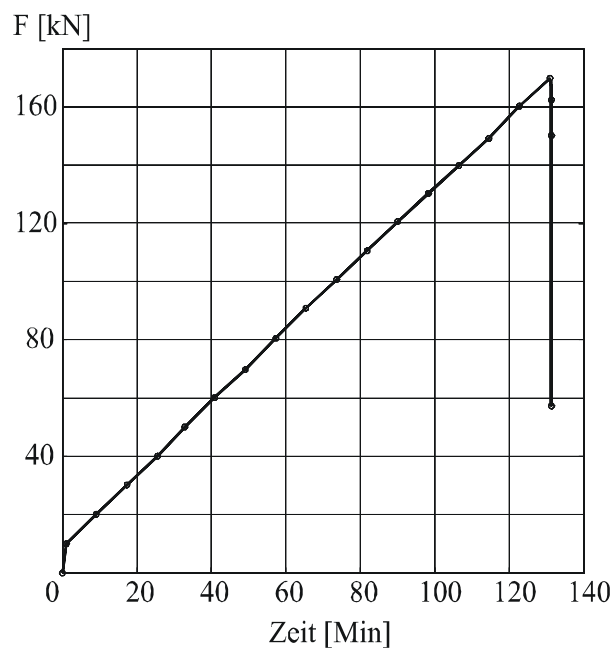


Bild B.2K2.2-Last-Zeit-Kurve

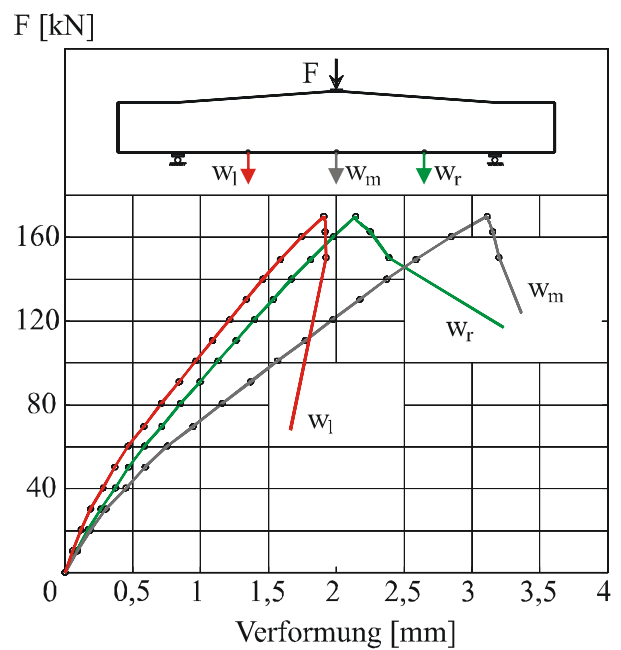


Bild B.2K2.3-Last-Verformungs-Kurve

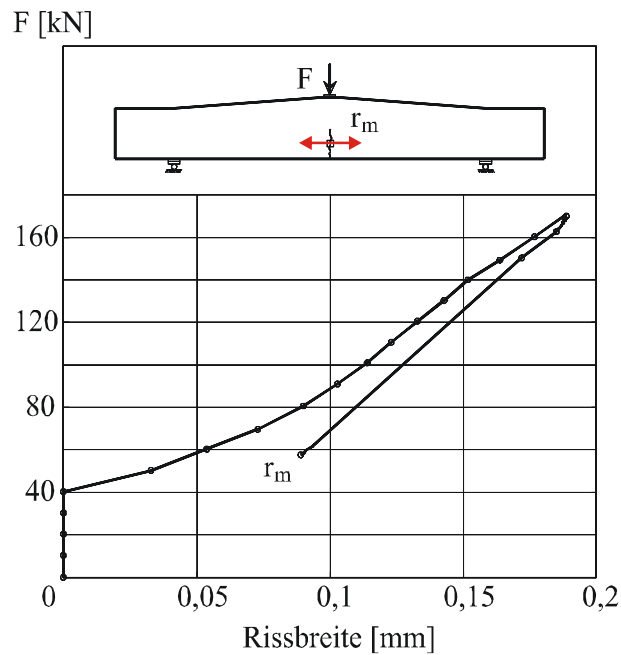


Bild B.2K2.4- Rissbreitenentwicklung

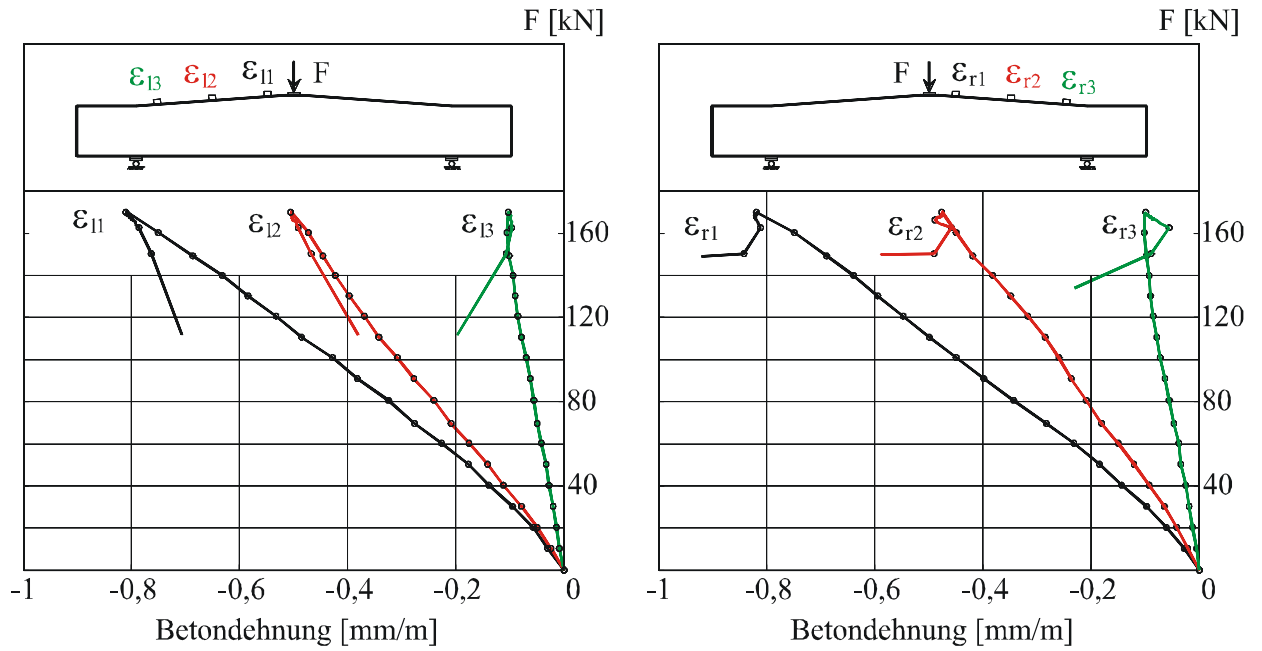


Bild B.2K2.5-Betondehnungen an der Trägeroberseite

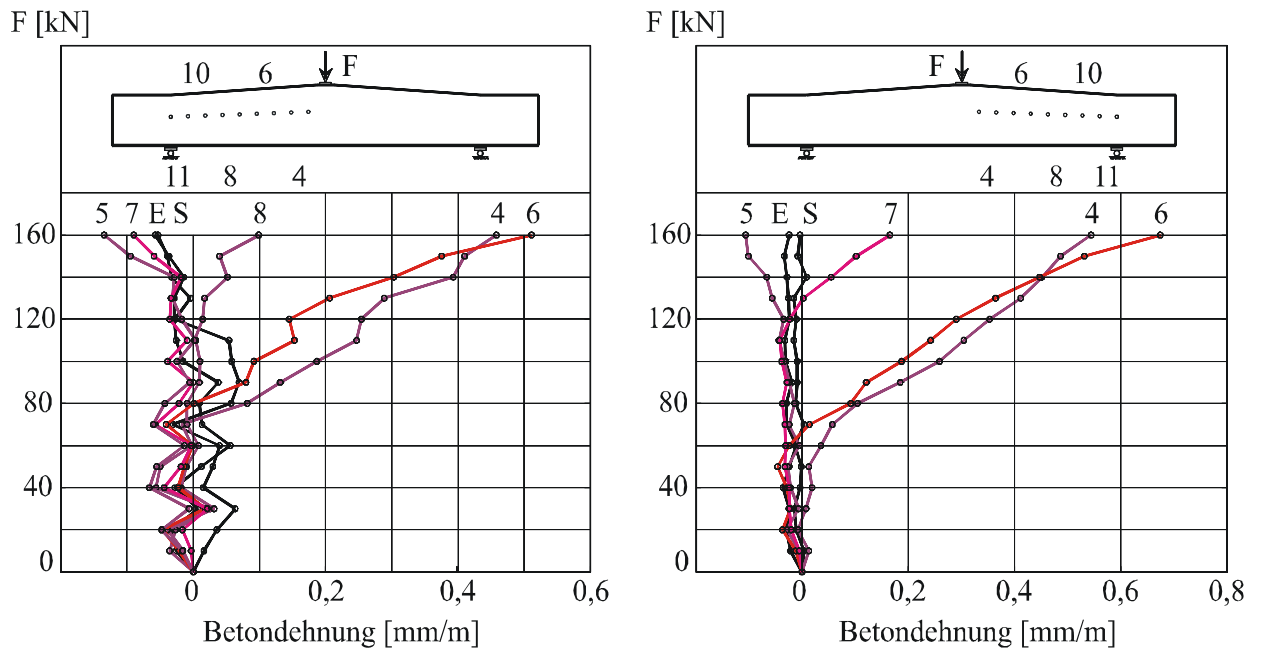


Bild B.2K2.6- Betondehnungen in der Schwerachse

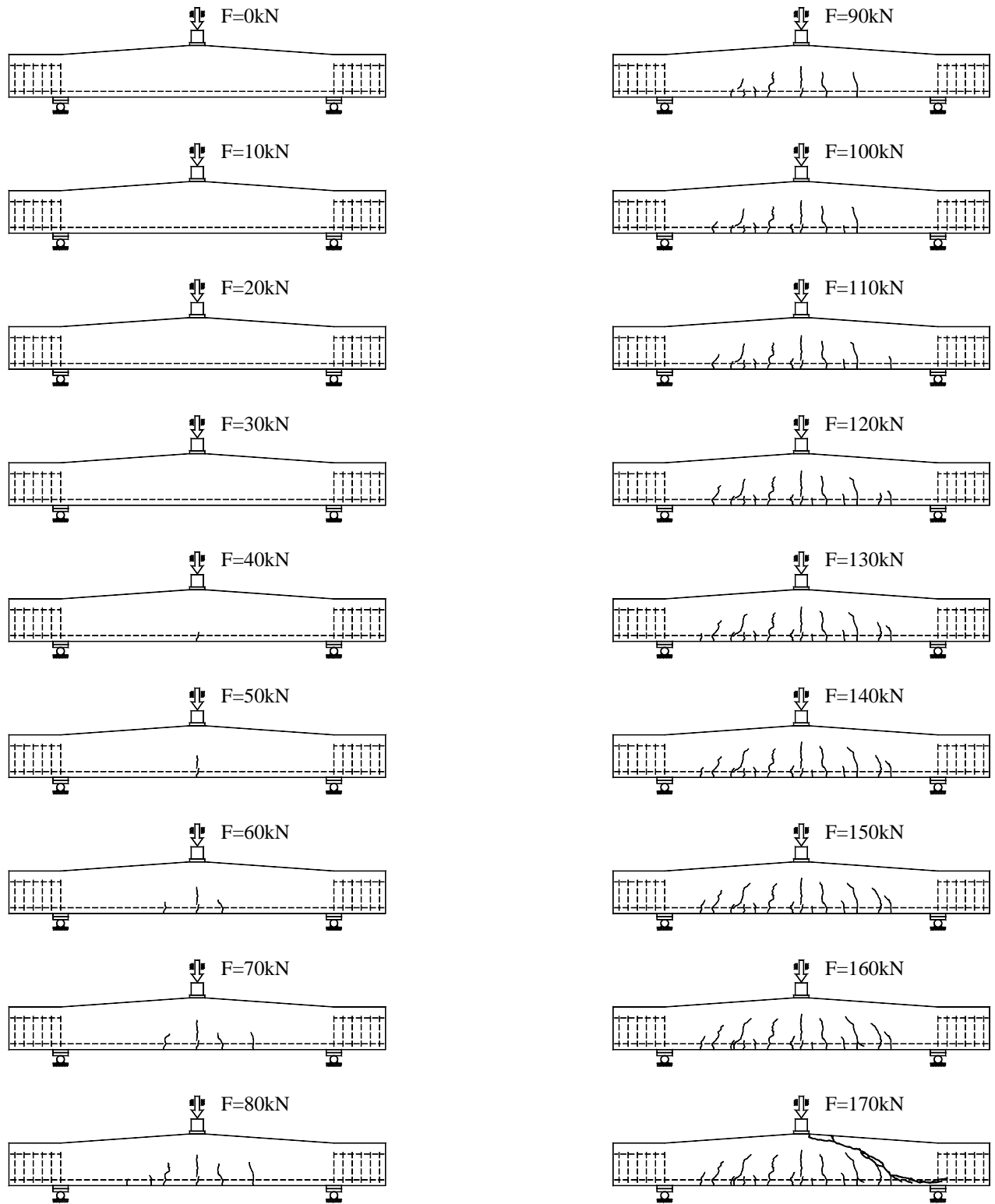


Bild B.2K2.7- Rissentwicklung 2K2

**VERSUCHSBALKEN 3K1**

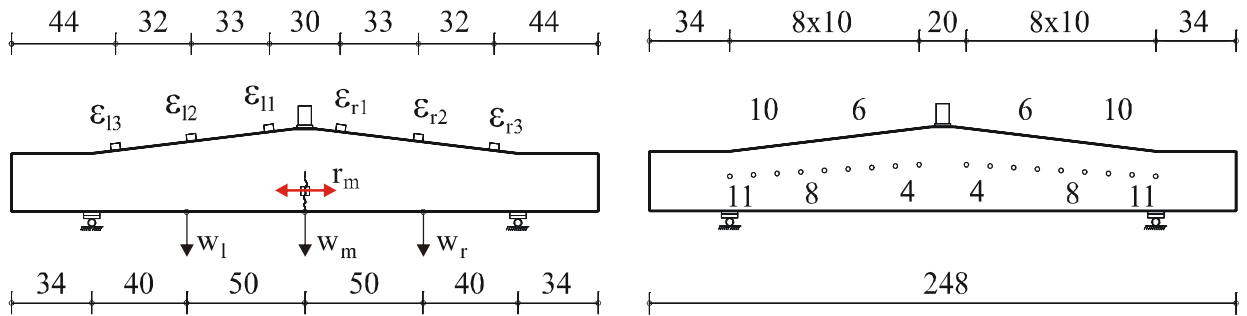


Bild B.3K1.1- Messstellen

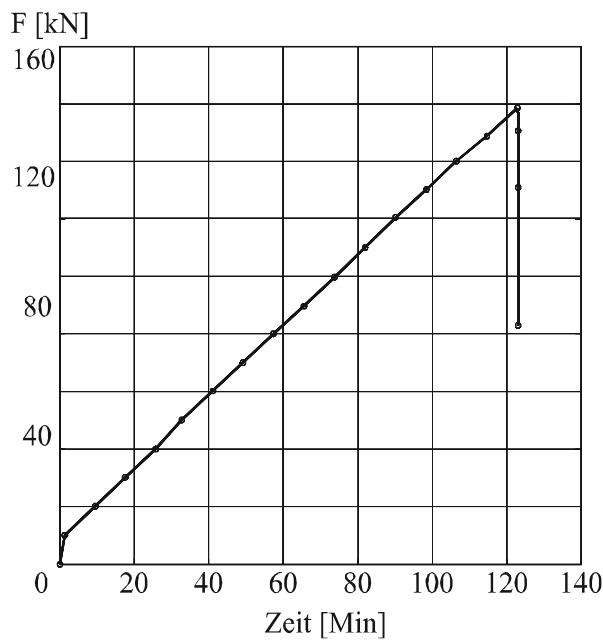


Bild B.3K1.2-Last-Zeit-Kurve

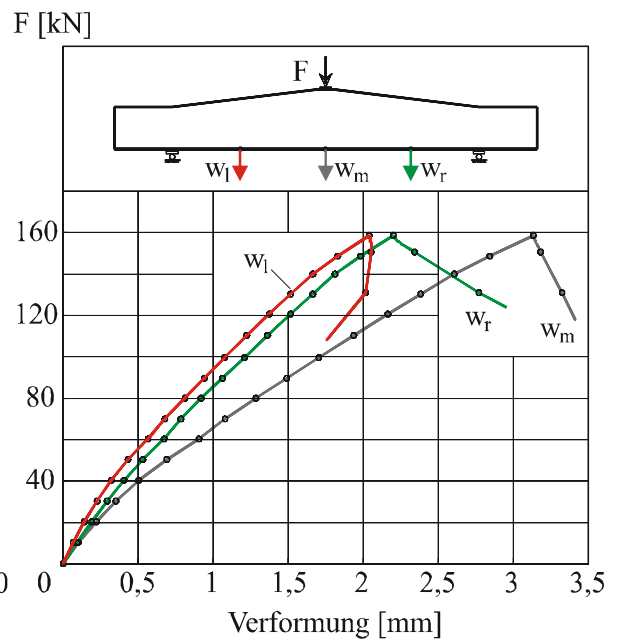


Bild B.3K1.3-Last-Verformungs-Kurve

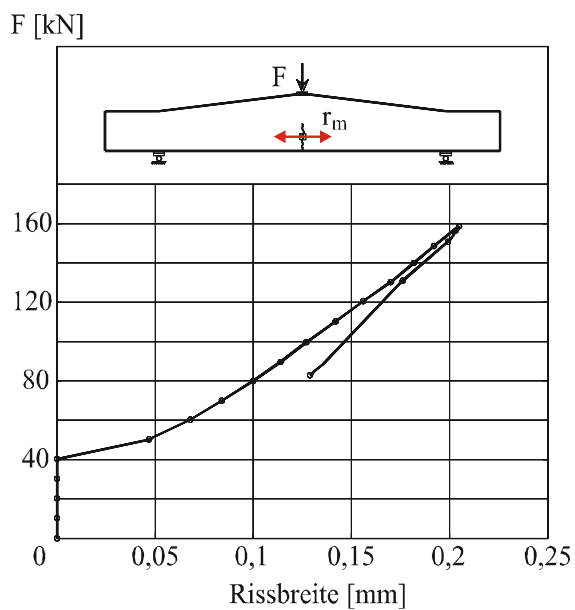


Bild B.3K1.4- Rissbreitenentwicklung

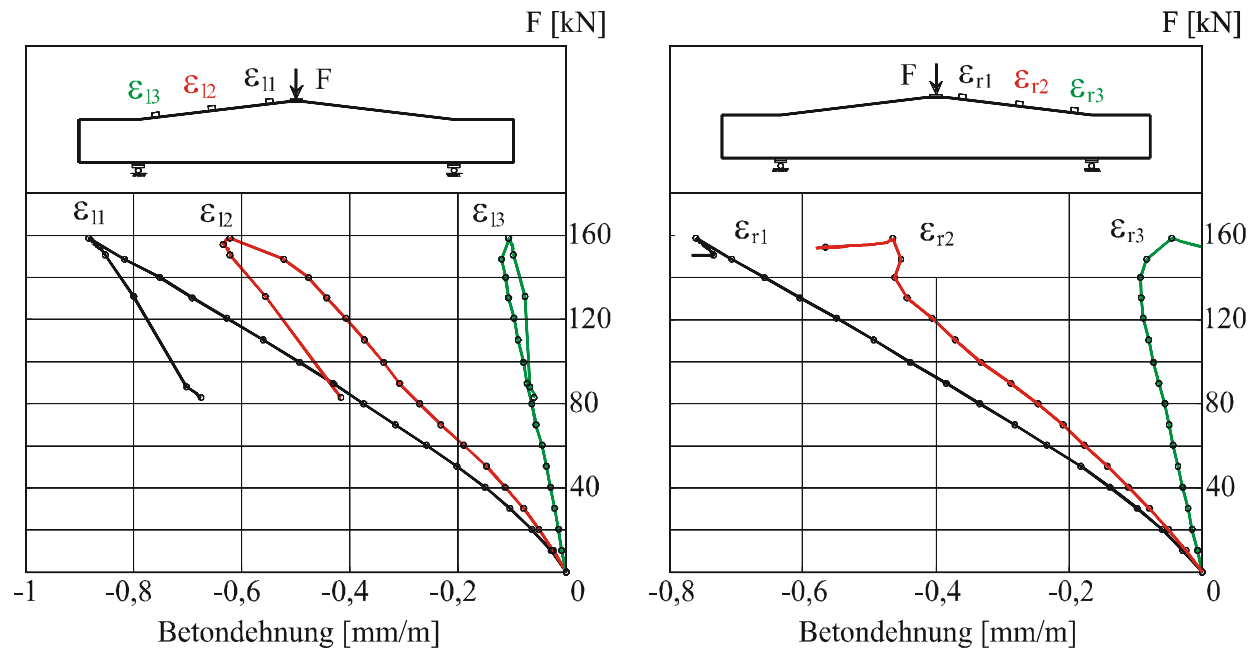


Bild B.3K1.5-Betondehnungen an der Trägeroberseite

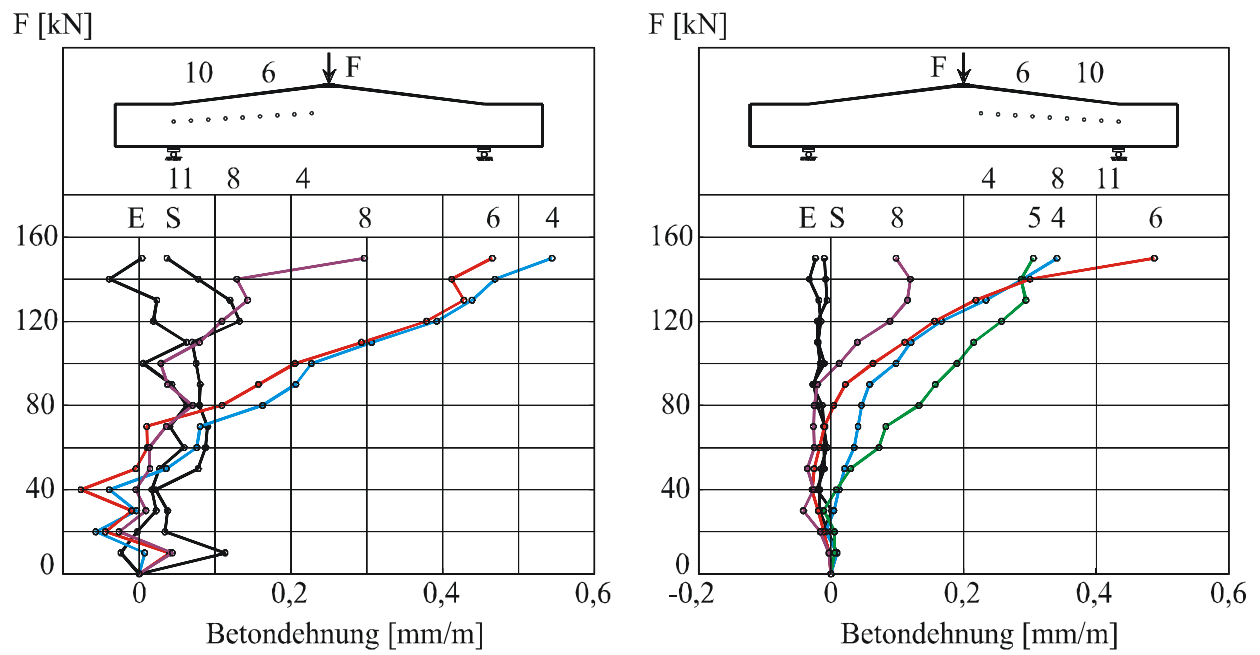


Bild B.3K1.6- Betondehnungen in der Schwerachse

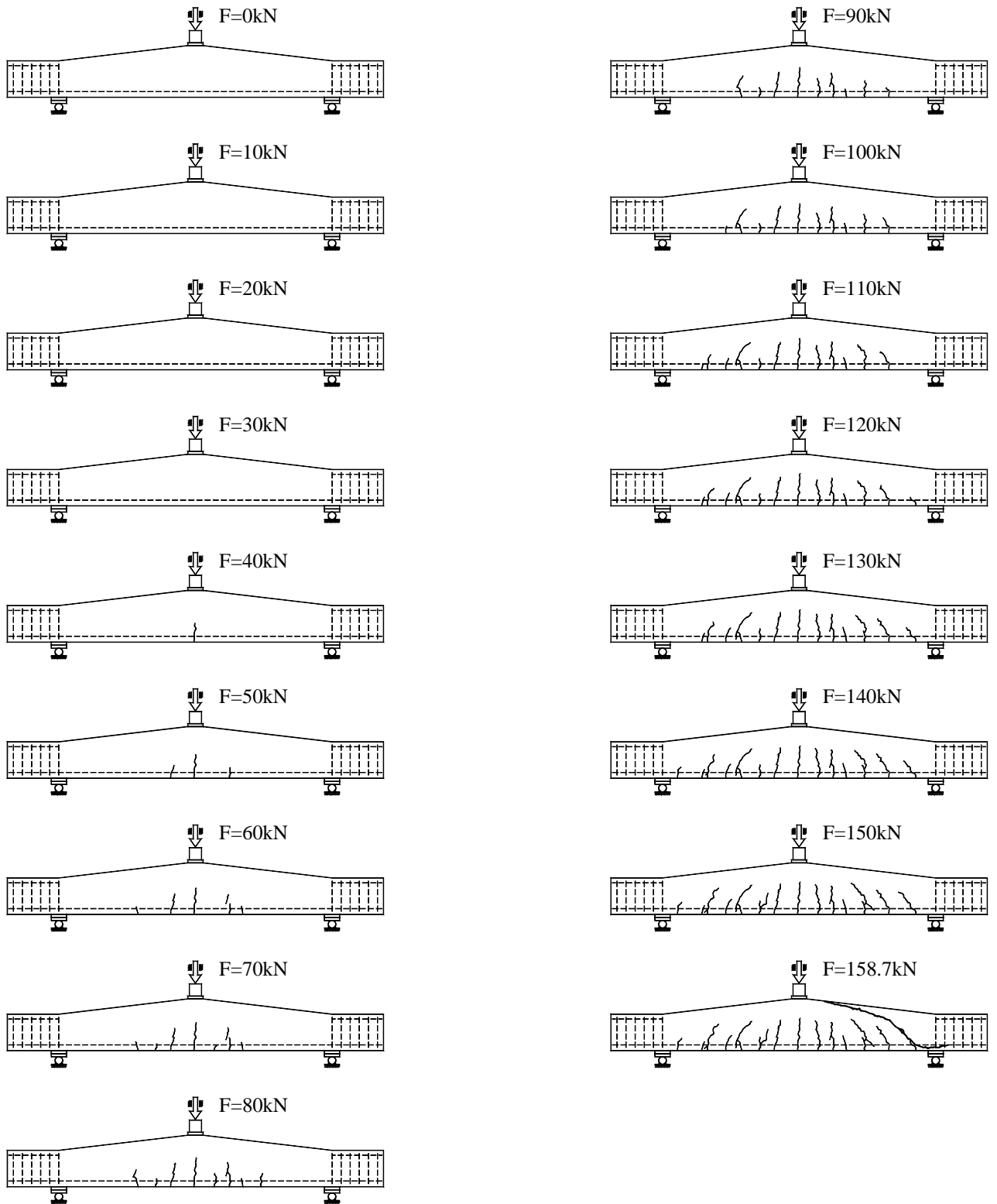


Bild B.3K1.7- Rissentwicklung 3K1

**VERSUCHSBALKEN 3K2**

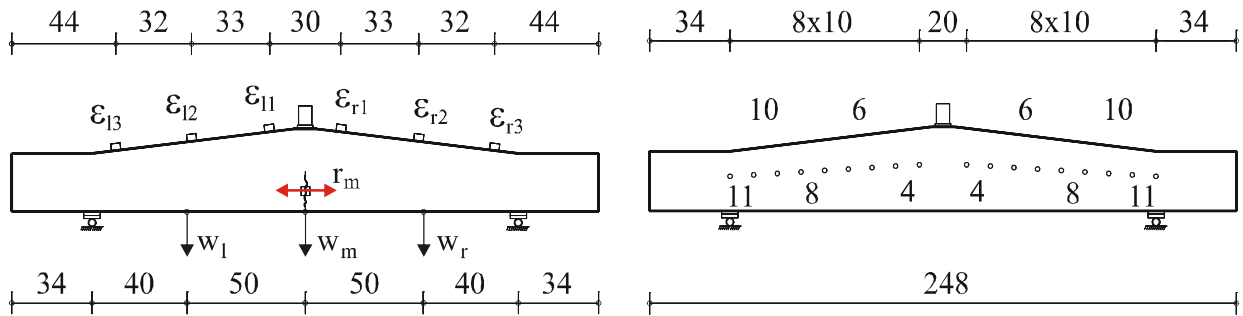


Bild B.3K2.1- Messstellen

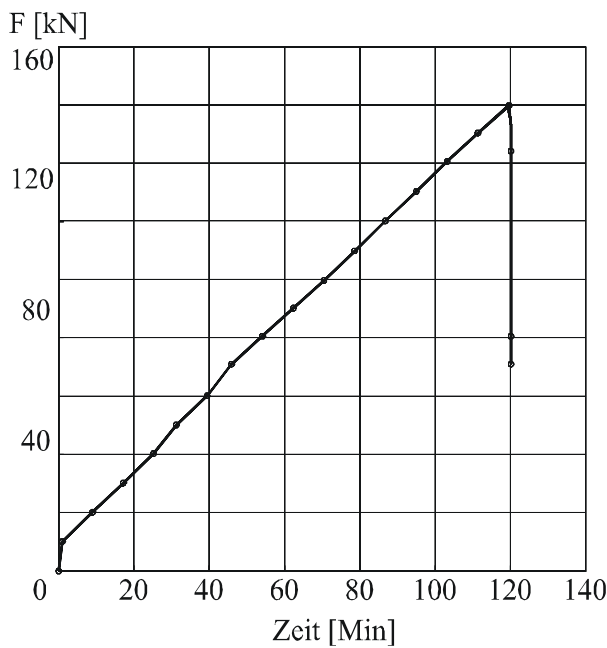


Bild B.3K2.2-Last-Zeit-Kurve

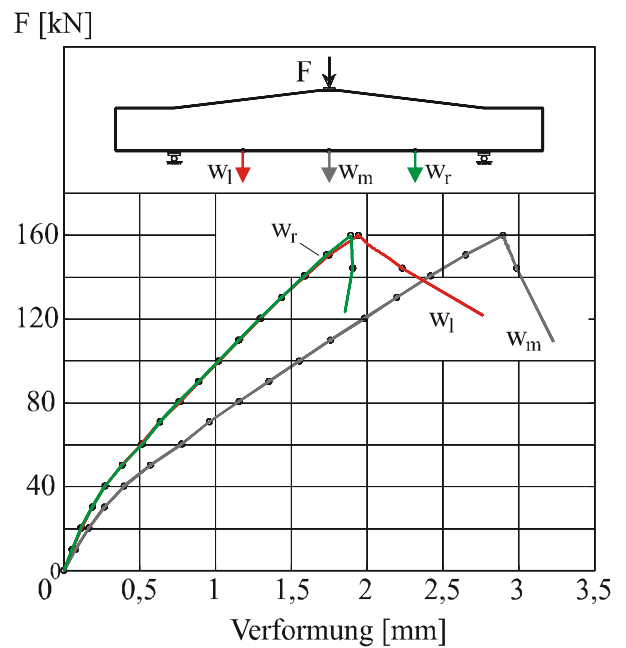


Bild B.3K2.3-Last-Verformungs-Kurve

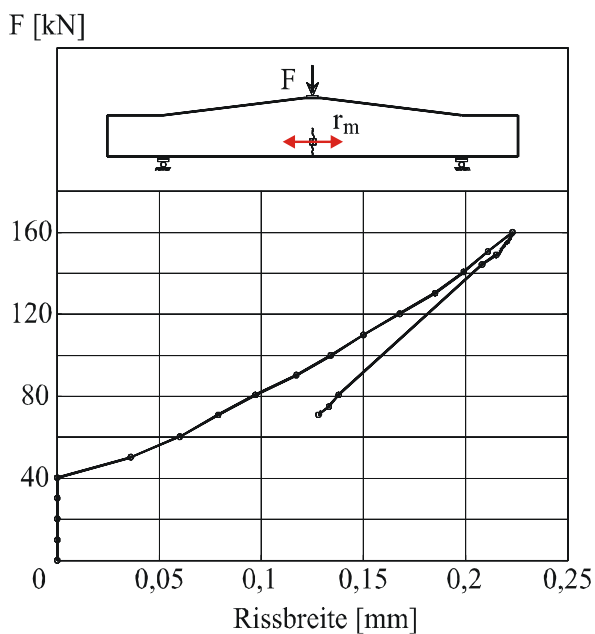


Bild B.3K2.4- Rissbreitenentwicklung

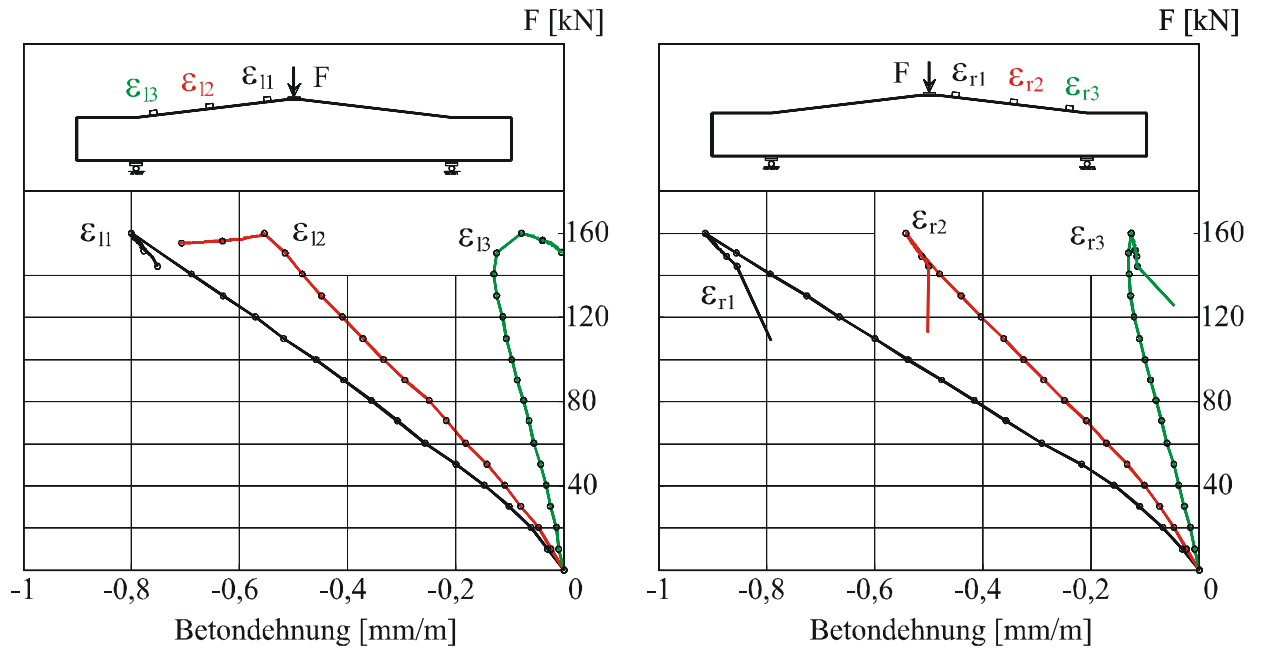


Bild B.3K2.5-Betondehnungen an der Trägeroberseite

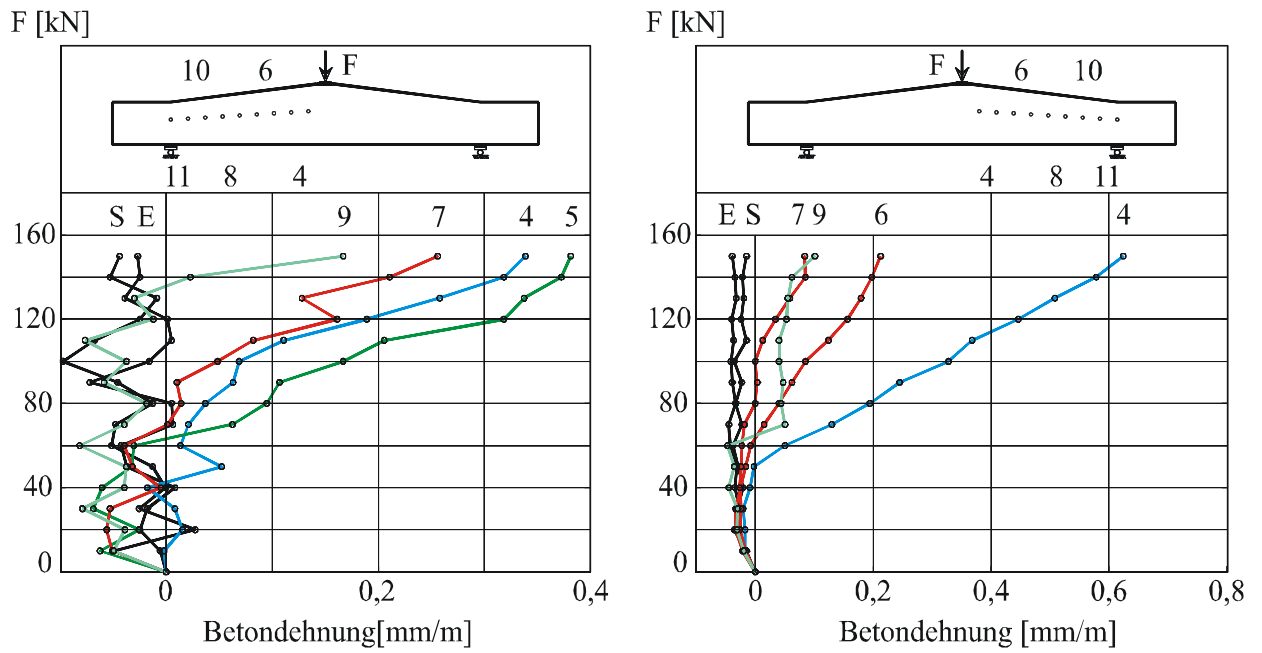


Bild B.3K2.6- Betondehnungen in der Schwerachse

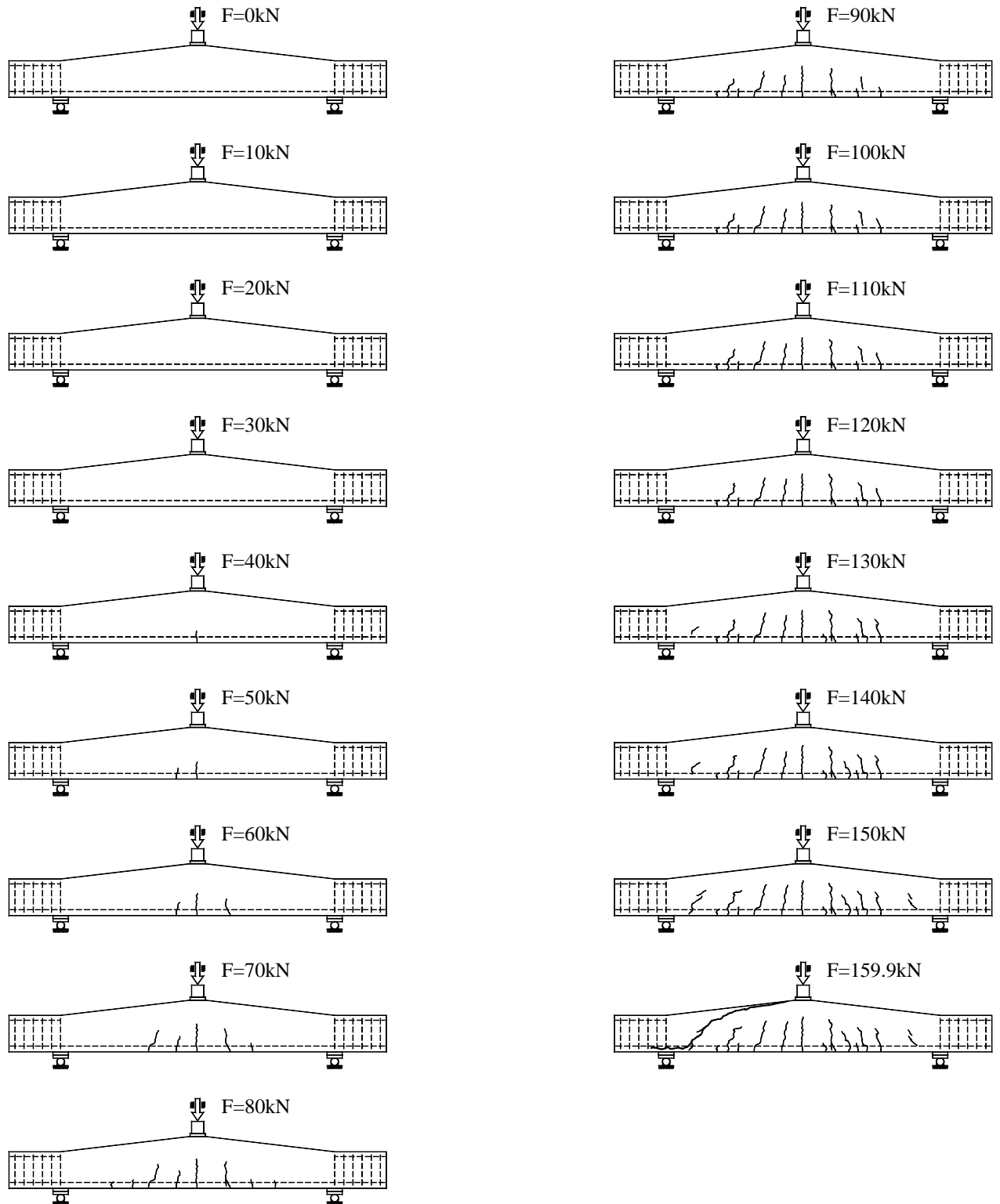


Bild B.3K2.7- Rissentwicklung 3K2

**VERSUCHSBALKEN 4K1**

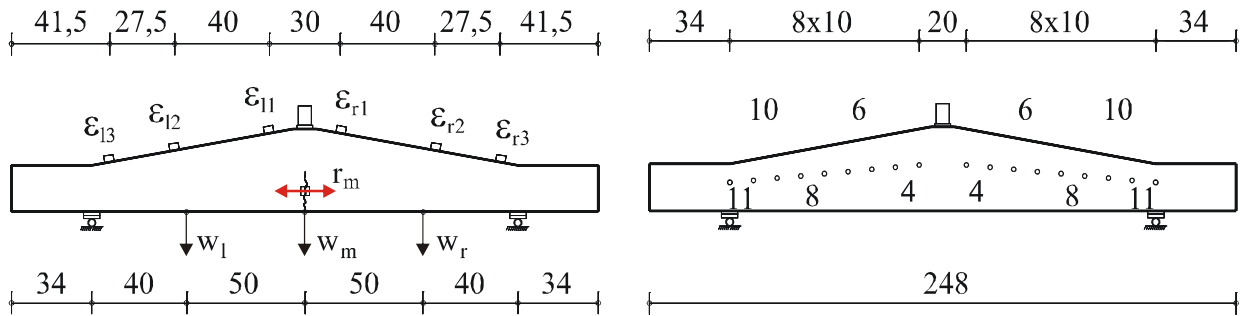


Bild B.4K1.1- Messstellen

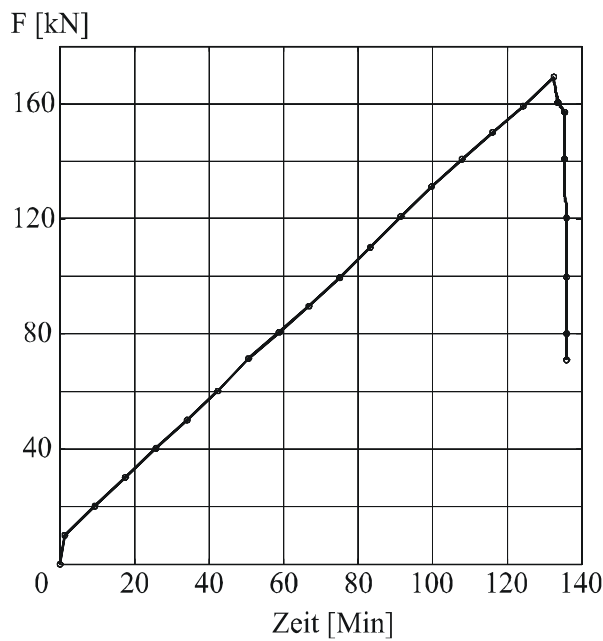


Bild B.4K1.2-Last-Zeit-Kurve

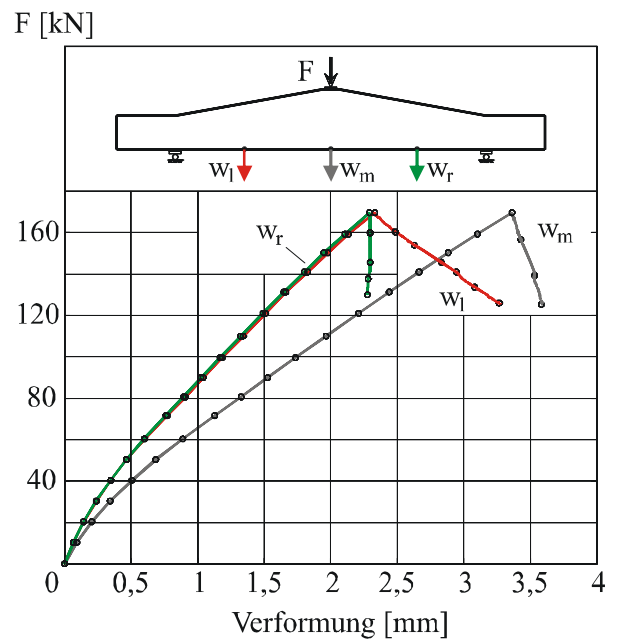


Bild B.4K1.3-Last-Verformungs-Kurve

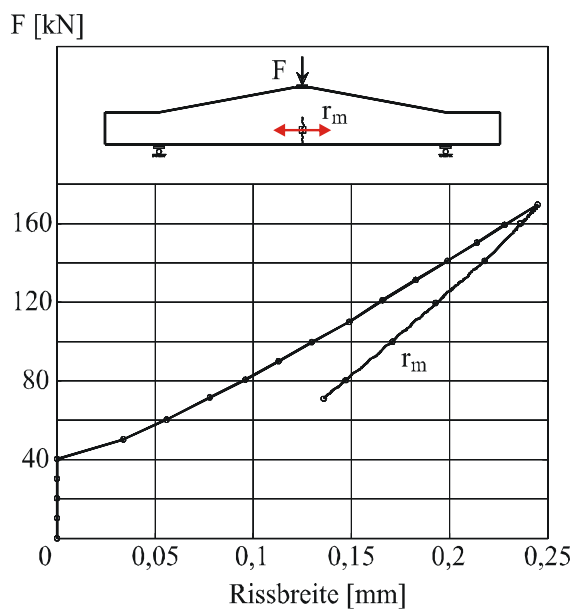


Bild B.4K1.4- Rissbreitenentwicklung

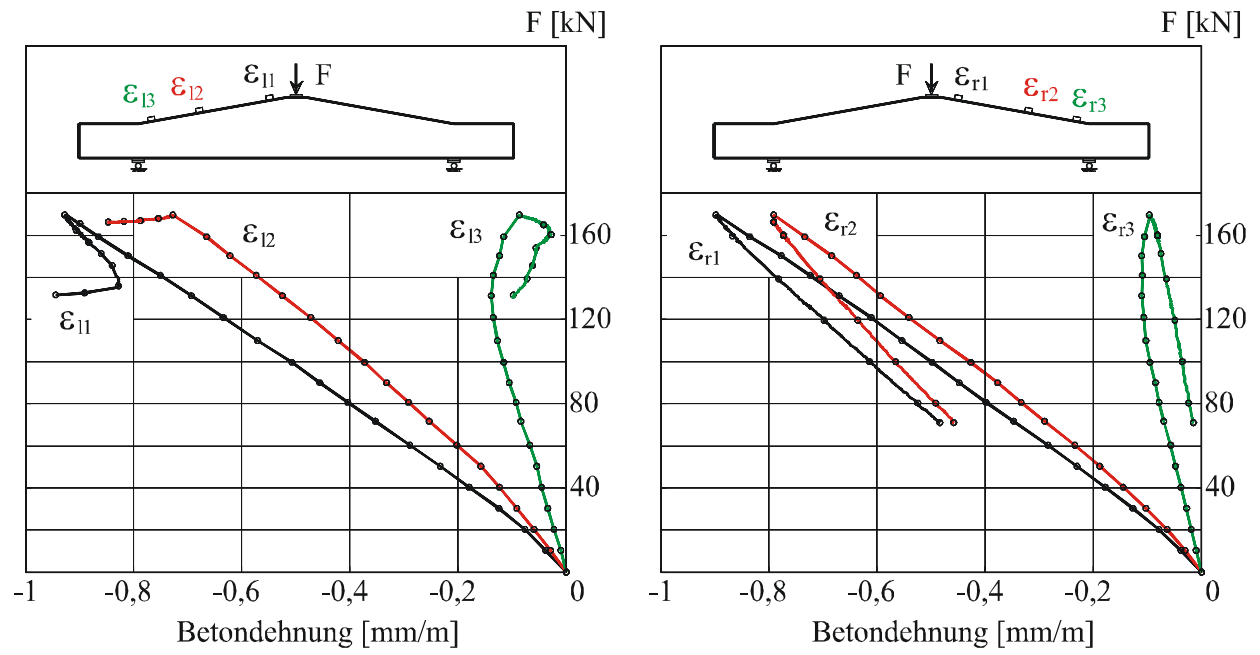


Bild B.4K1.5-Betondehnungen an der Trägeroberseite

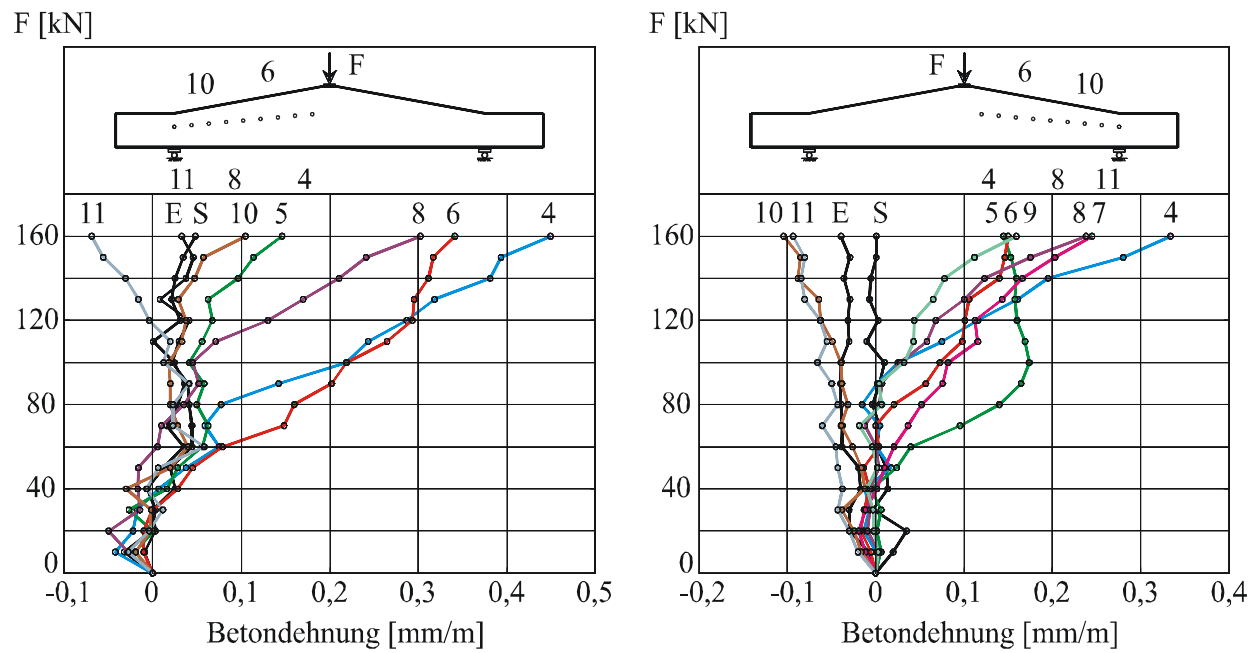


Bild B.4K1.6- Betondehnungen in der Schwerachse

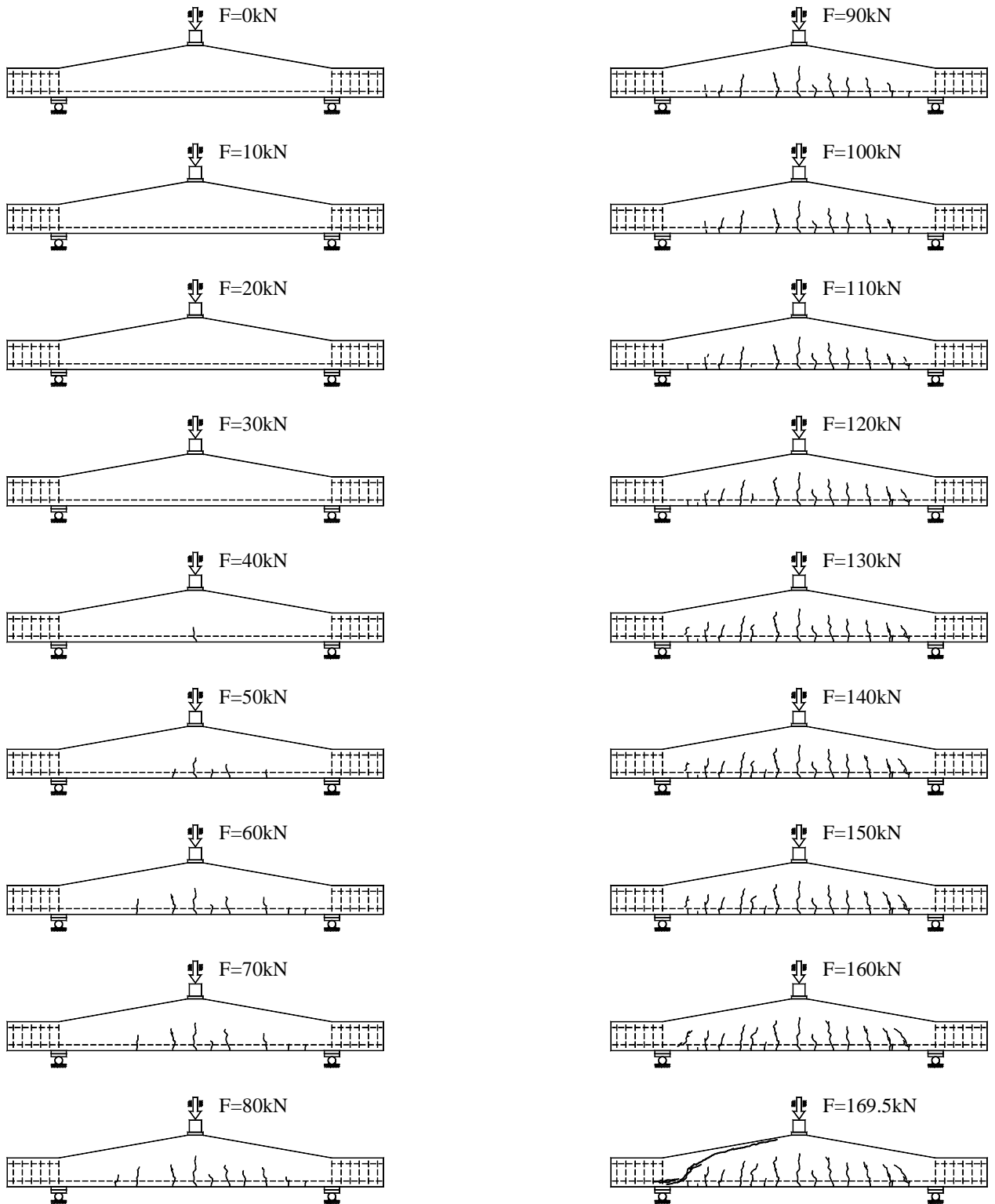


Bild B.4K1.7- Rissentwicklung 4K1

**VERSUCHSBALKEN 4K2**

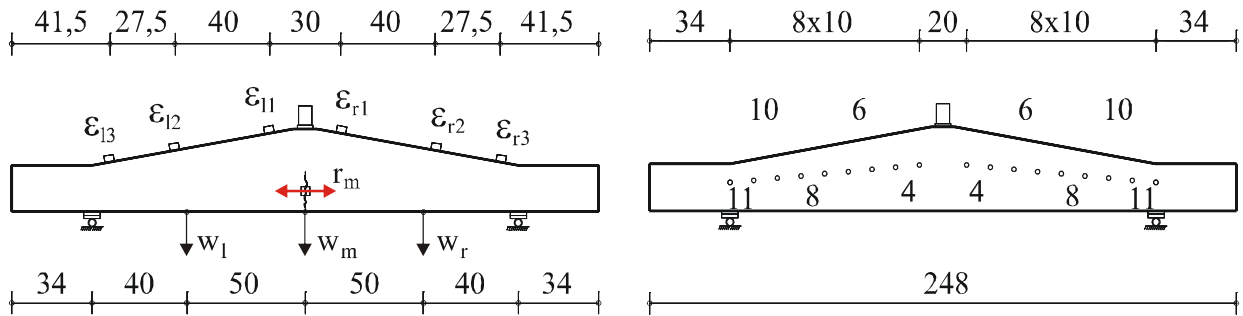


Bild B.4K2.1- Messstellen

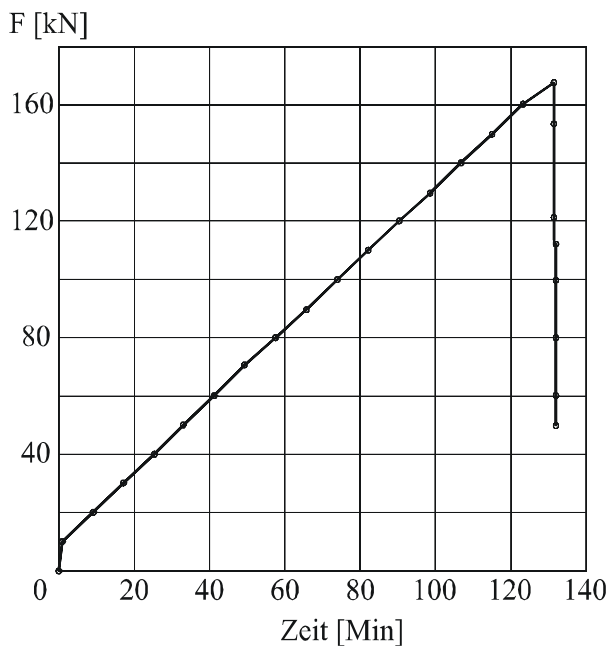


Bild B.4K2.2-Last-Zeit-Kurve

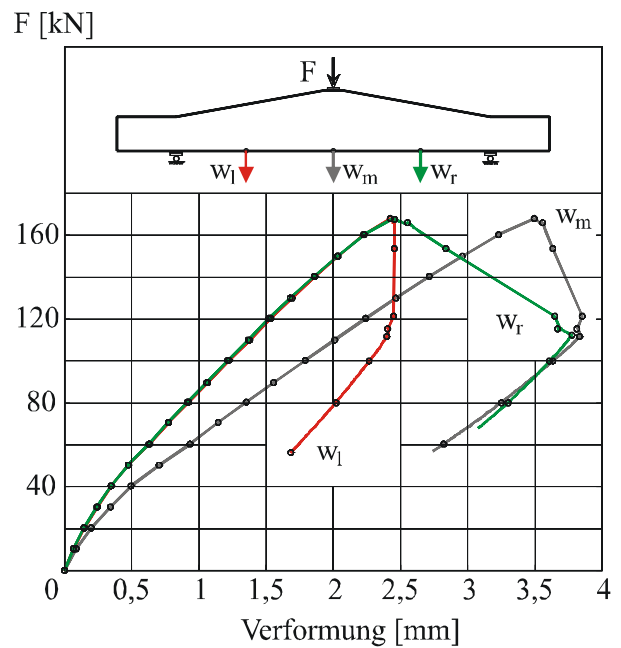


Bild B.4K2.3-Last-Verformungs-Kurve

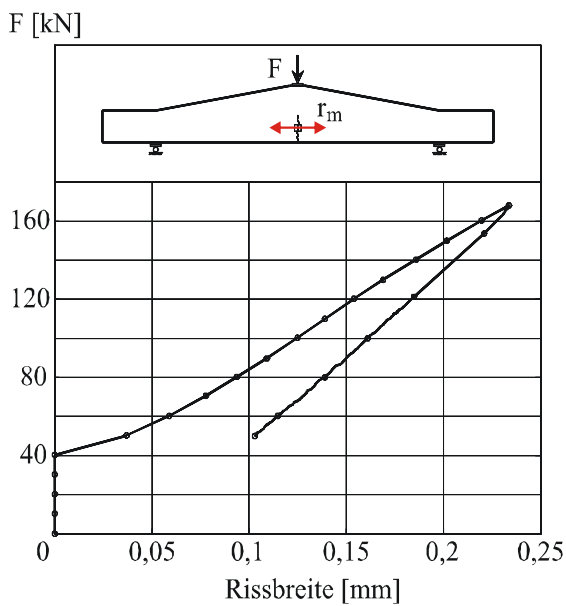


Bild B.4K2.4- Rissbreitenentwicklung

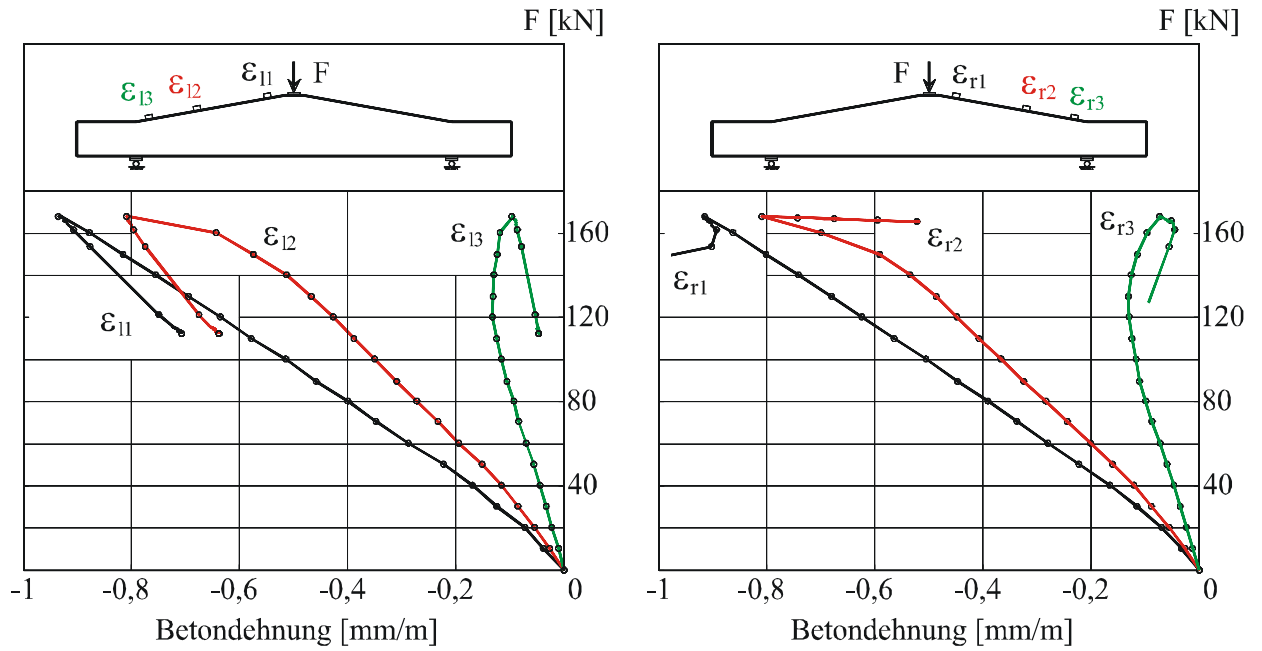


Bild B.4K2.5-Betondehnungen an der Trägeroberseite

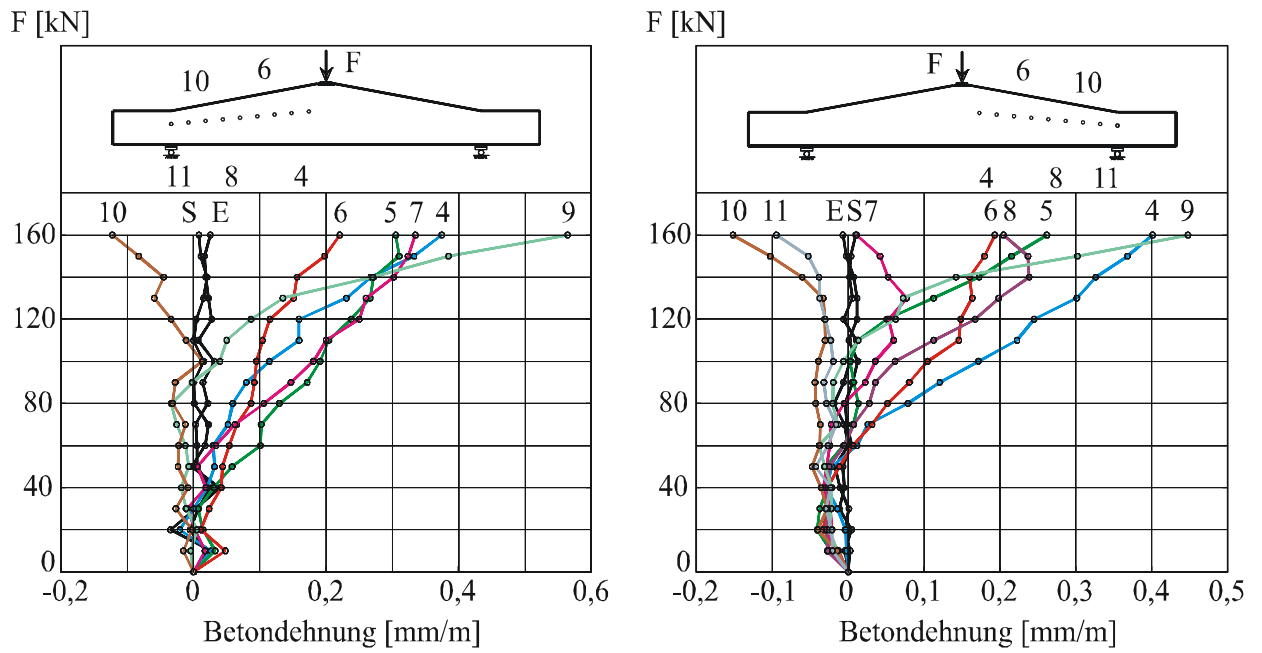


Bild B.4K2.6- Betondehnungen in der Schwerachse

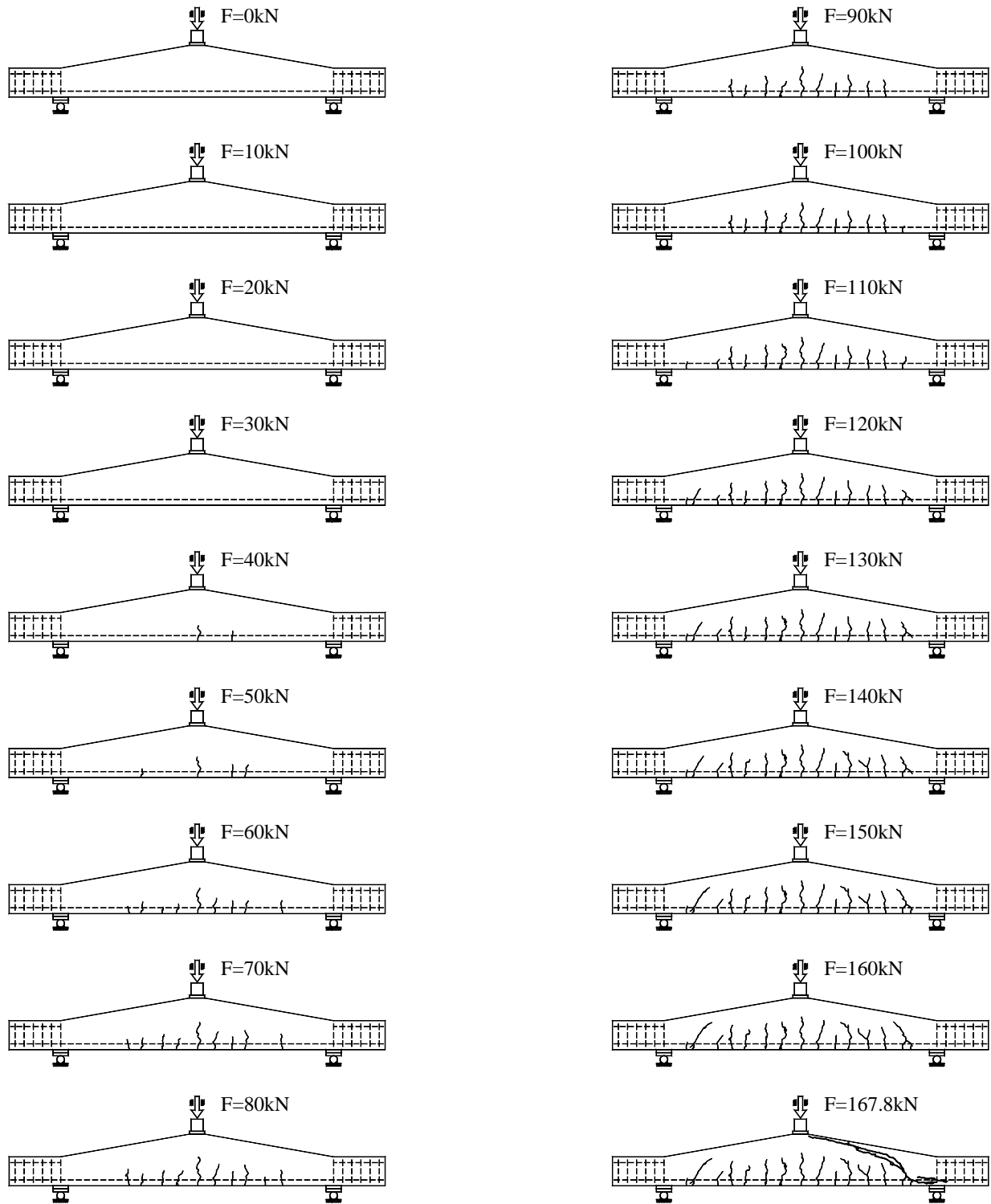


Bild B.4K2.7- Rissentwicklung Versuch Nr. 4K2.

Anhang C: Vergleich der Versuchswerte mit Normen

Querkrafttragfähigkeit V[kN]

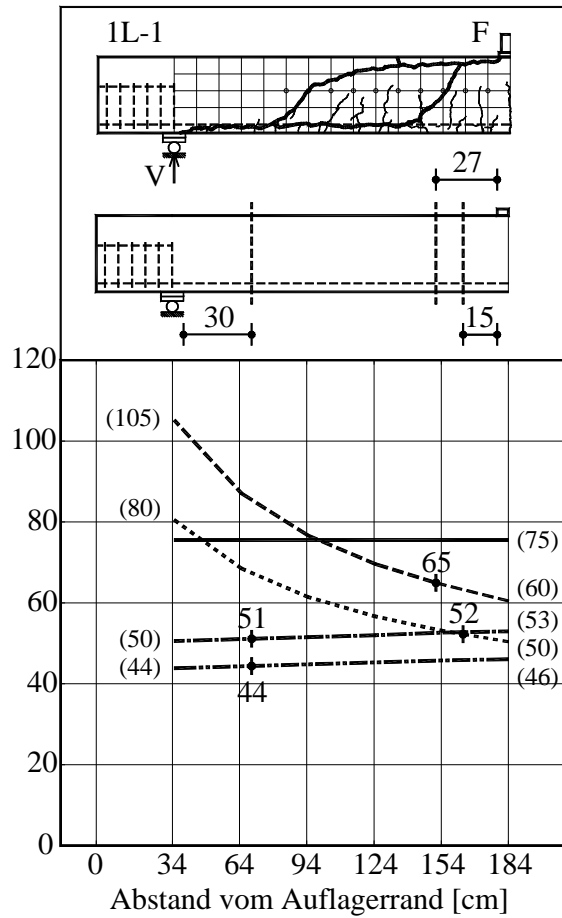


Bild C1– Tragfähigkeit Versuch Nr. 1L-1

Querkrafttragfähigkeit V[kN]

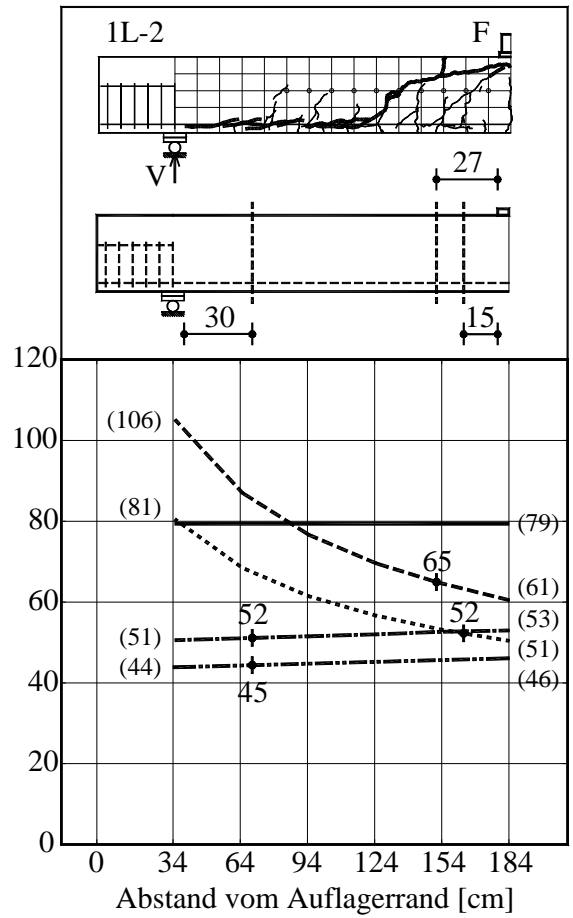


Bild C2– Tragfähigkeit Versuch Nr. 1L-2

$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$

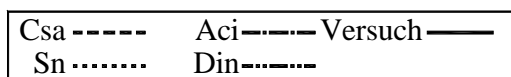
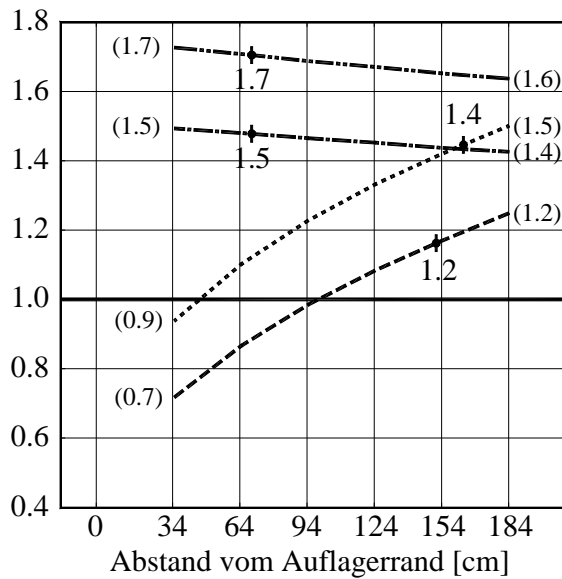


Bild C3– Sicherheitsfaktor 1L-1

$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$

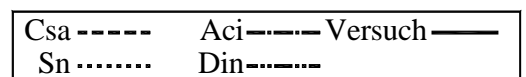
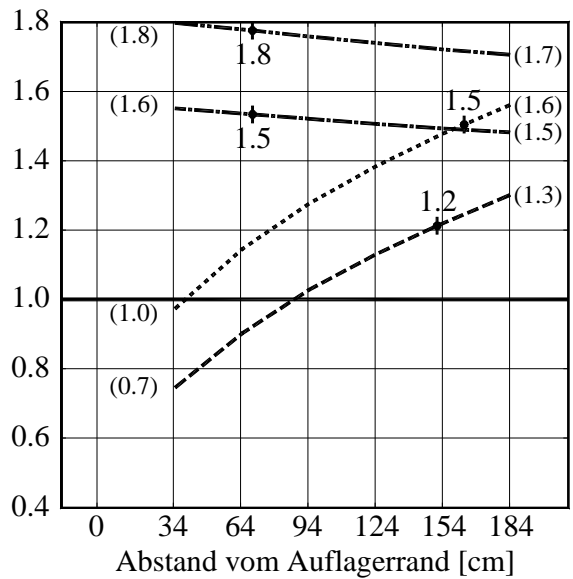


Bild C4– Sicherheitsfaktor 1L-2

Querkrafttragfähigkeit V[kN]-ohne Vccd

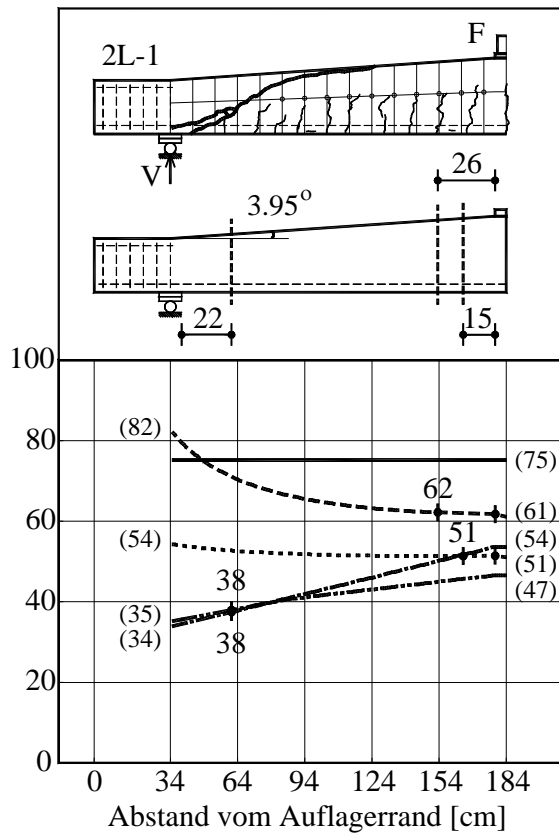


Bild C5– Traglast Versuch Nr. 2L-1 (ohne Vccd)

Querkrafttragfähigkeit V[kN]-mit Vccd

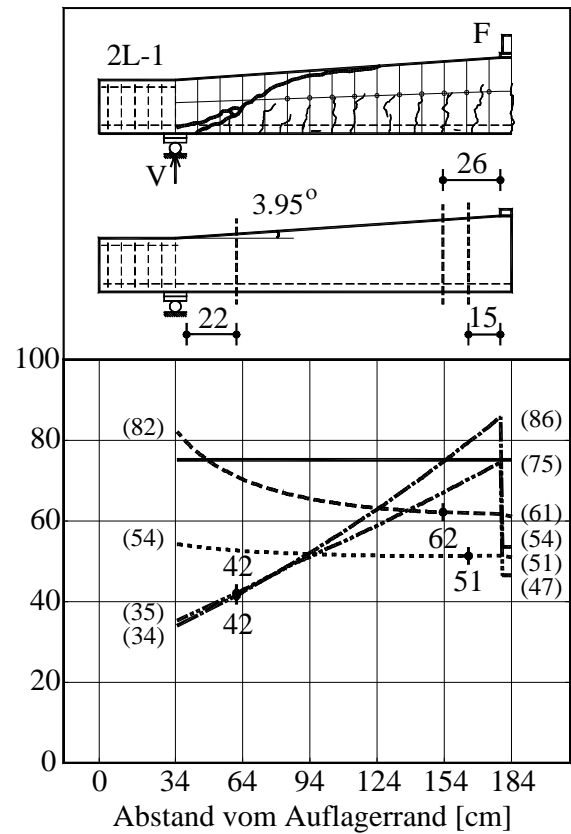


Bild C6– Traglast Versuch Nr. 2L-1 (mit Vccd)

$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$ -ohne Vccd

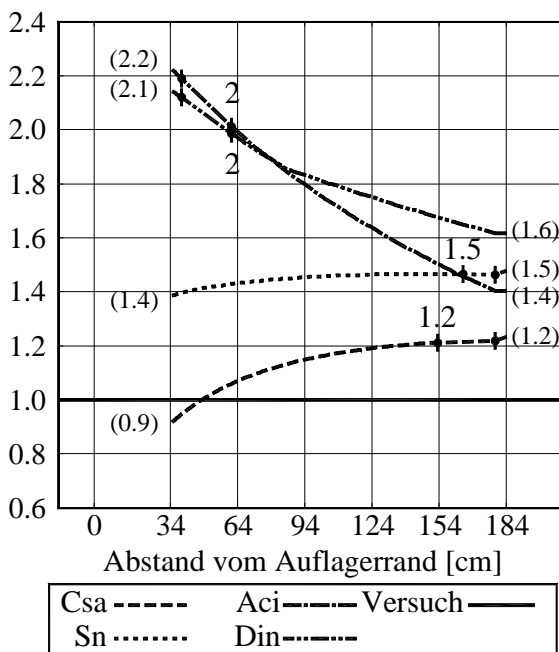


Bild C7– Sicherheitsfaktor 2L-1 (ohne Vccd)

$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$ -mit Vccd

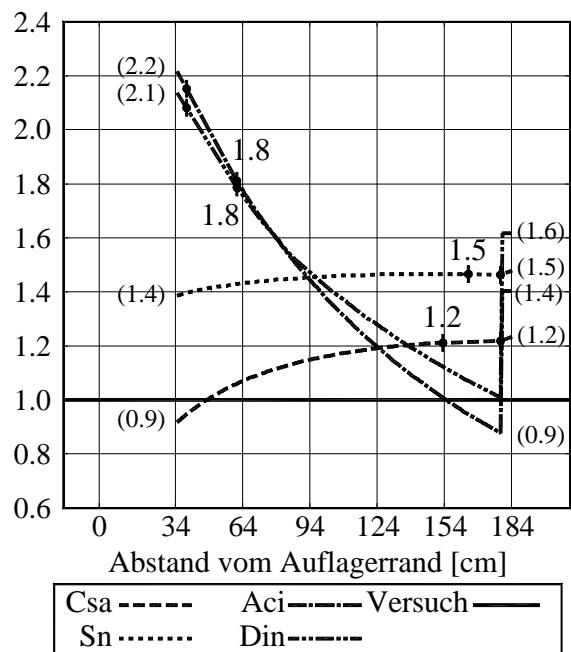


Bild C8– Sicherheitsfaktor 2L-1 (mit Vccd)

Csa - - - - -	Aci - - - - -	Versuch - - - - -
Sn ······	Din - - - - -	

Csa - - - - -	Aci - - - - -	Versuch - - - - -
Sn ······	Din - - - - -	

Querkrafttragfähigkeit V[kN]-ohne Vccd

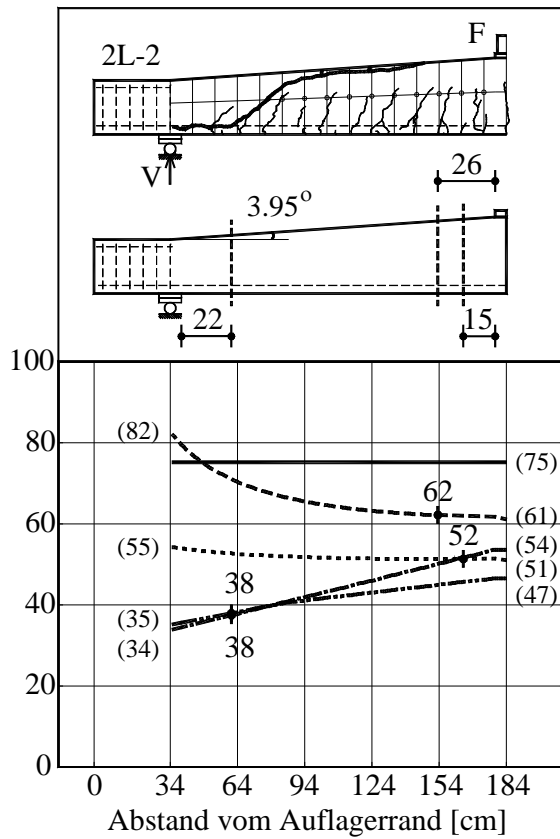


Bild C9– Traglast Versuch Nr. 2L–2 (ohne Vccd)

Querkrafttragfähigkeit V[kN]-mit Vccd

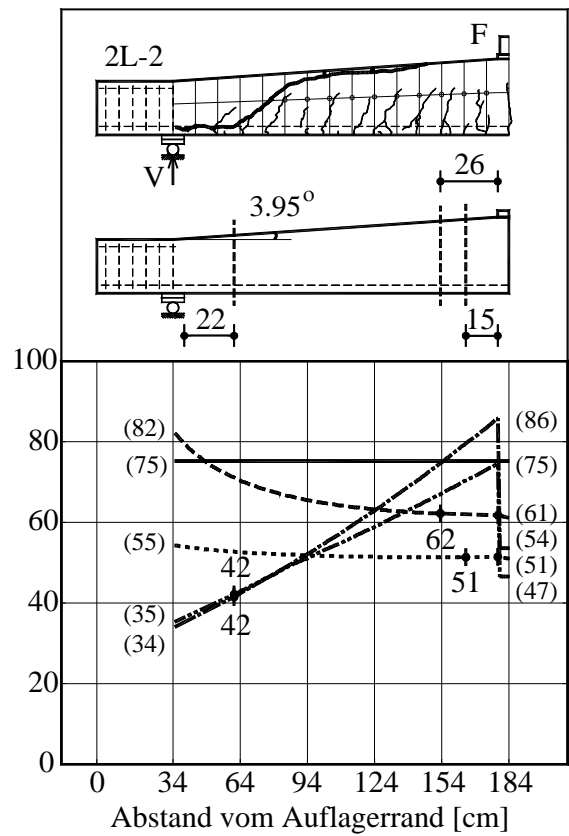


Bild C10– Traglast Versuch Nr. 2L–2 (mit Vccd)

$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$ -ohne Vccd

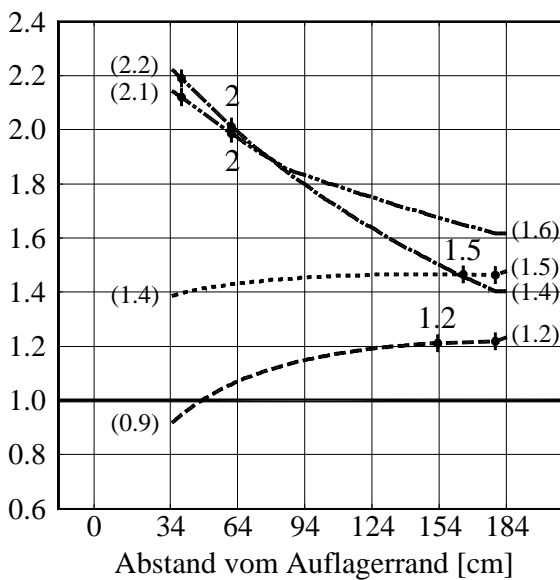


Bild C11– Sicherheitsfaktor 2L–2 (ohne Vccd)

$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$ -mit Vccd

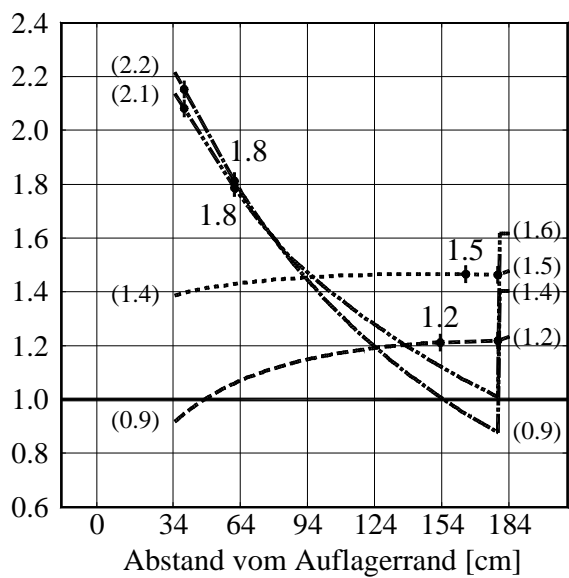
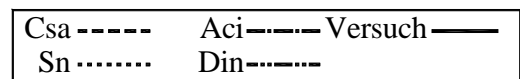
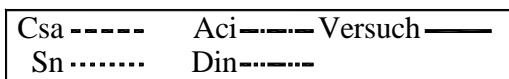


Bild C12– Sicherheitsfaktor 2L–2 (mit Vccd)



Querkrafttragfähigkeit V[kN]-ohne Vccd

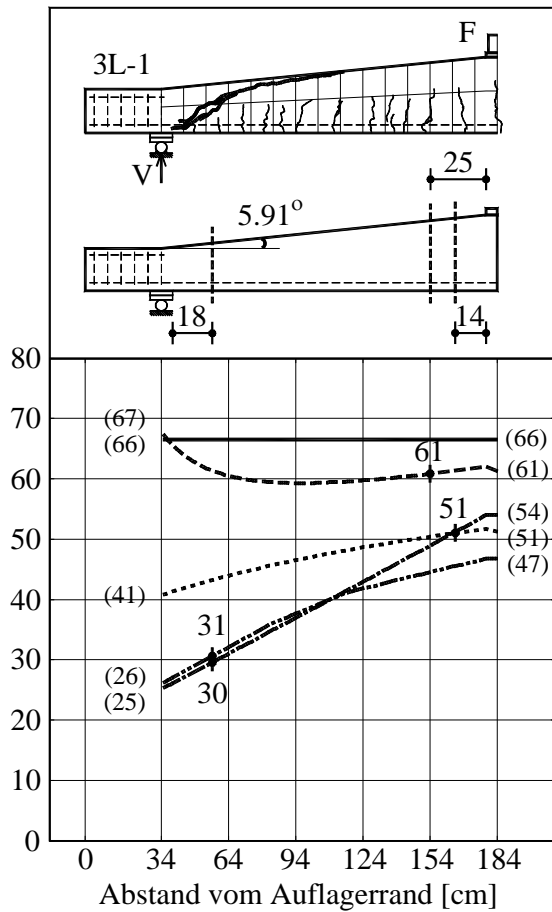


Bild C13– Traglast Versuch Nr. 3L–1 (ohne Vccd)

Querkrafttragfähigkeit V[kN]-mit Vccd

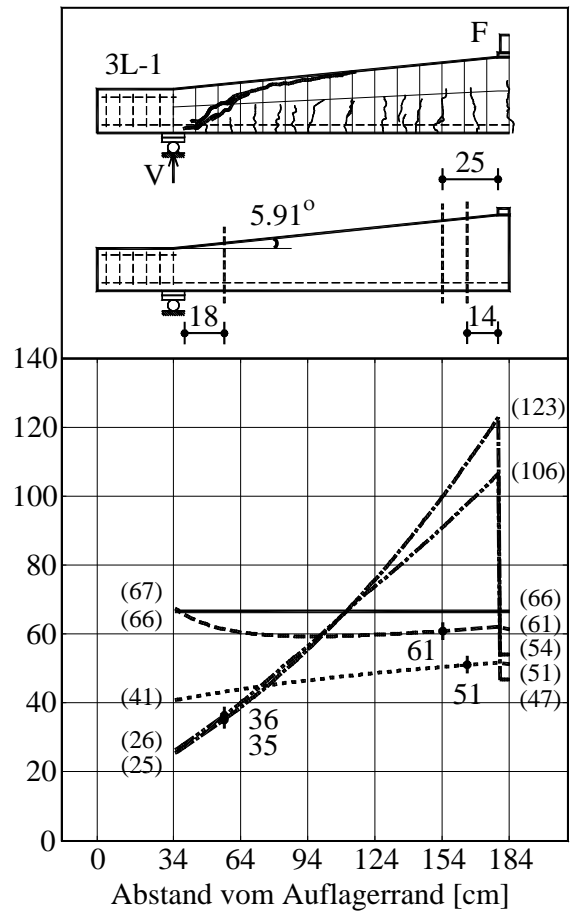


Bild C14– Traglast Versuch Nr. 3L–1 (mit Vccd)

$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$ -ohne Vccd

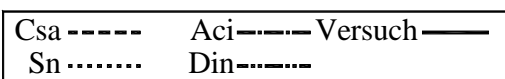
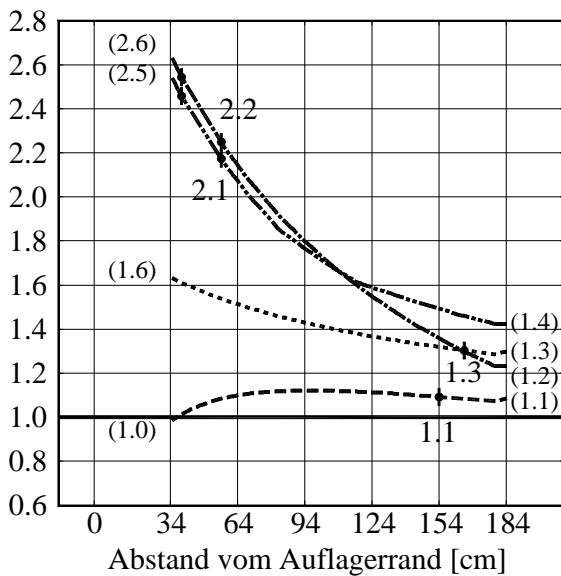


Bild C15– Sicherheitsfaktor 3L–1 (ohne Vccd)

$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$ -mit Vccd

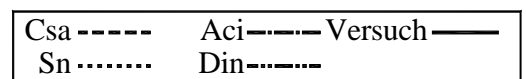
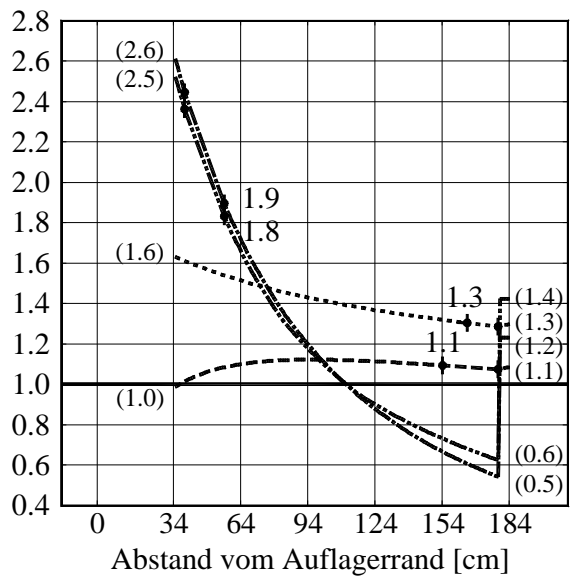


Bild C16– Sicherheitsfaktor 3L–1 (mit Vccd)

Querkrafttragfähigkeit V[kN]-ohne Vccd

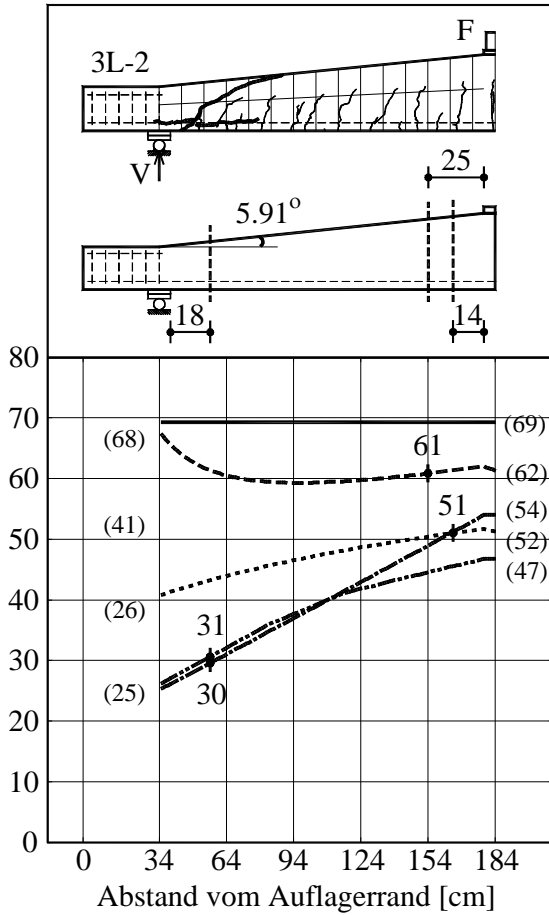


Bild C17– Traglast Versuch Nr. 3L–2 (ohne Vccd)

Querkrafttragfähigkeit V[kN]-mit Vccd

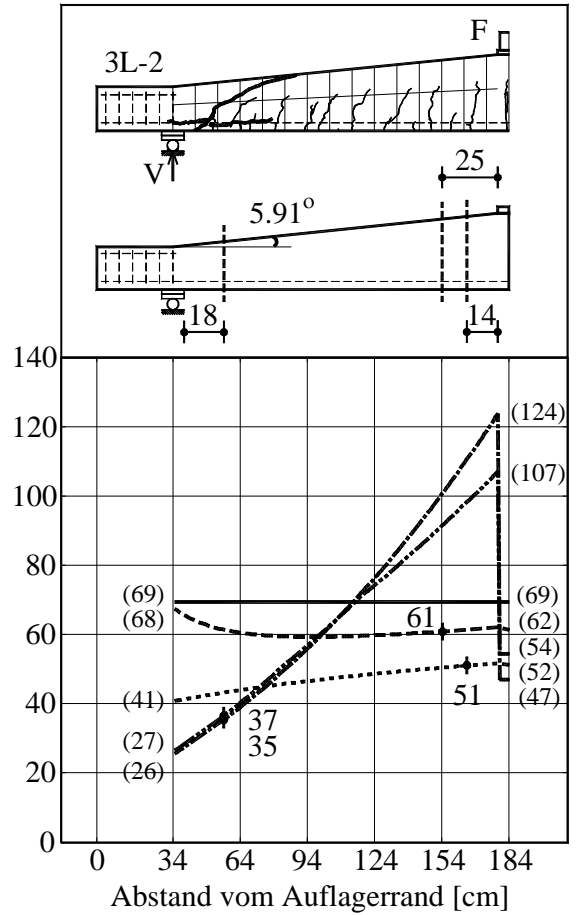


Bild C18– Traglast Versuch Nr. 3L–2 (mit Vccd)

$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$ -ohne Vccd

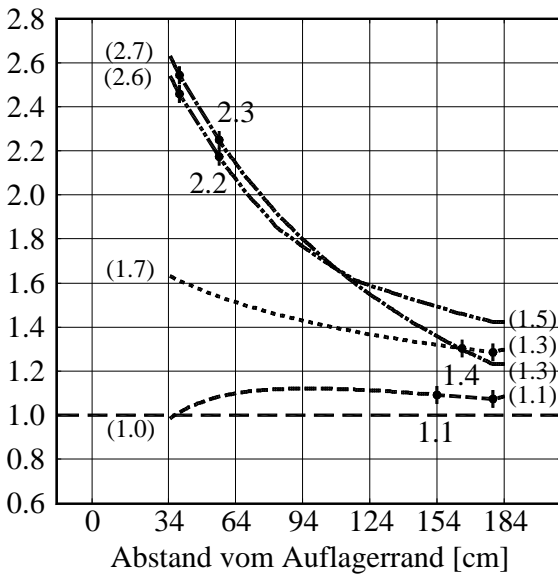


Bild C19– Sicherheitsfaktor 3L–2 (ohne Vccd)

$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$ -mit Vccd

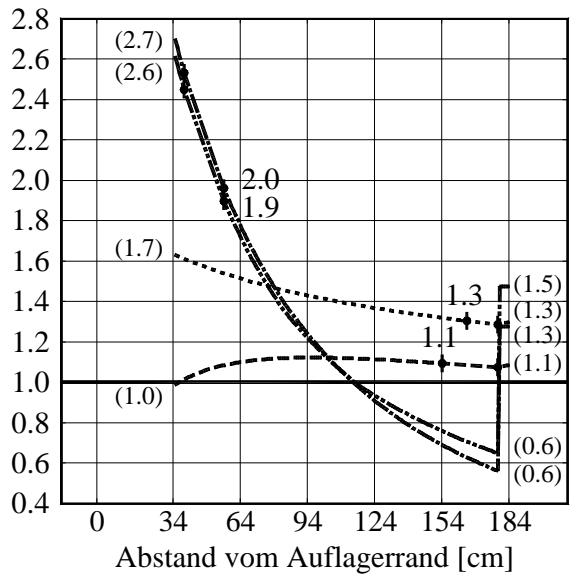
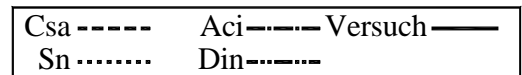
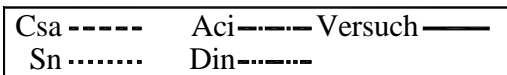


Bild C20– Sicherheitsfaktor 3L–2 (mit Vccd)



Querkrafttragfähigkeit V[kN]

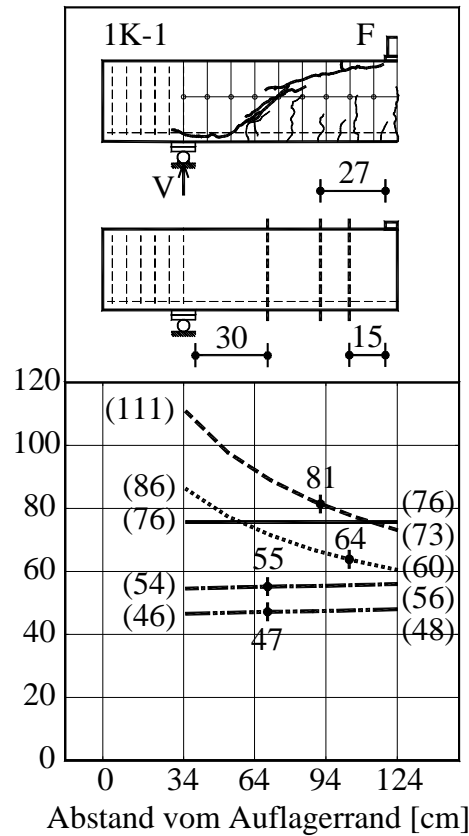


Bild C21– Traglast Versuch Nr. 1K-1

Querkrafttragfähigkeit V[kN]

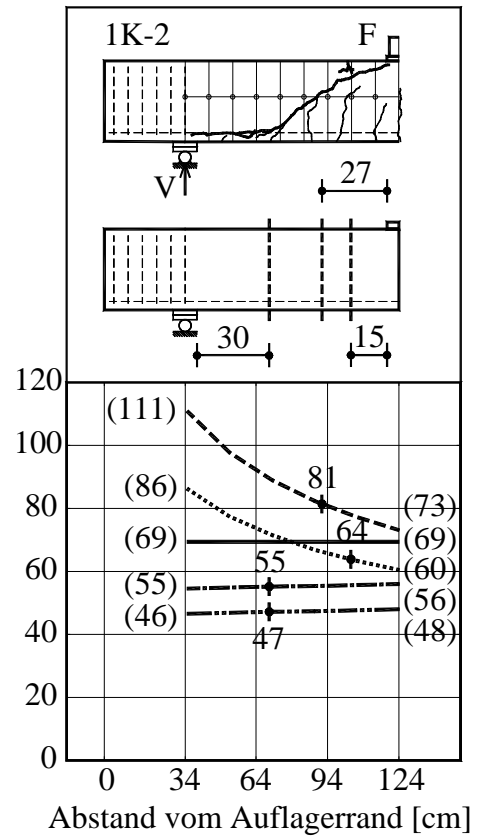
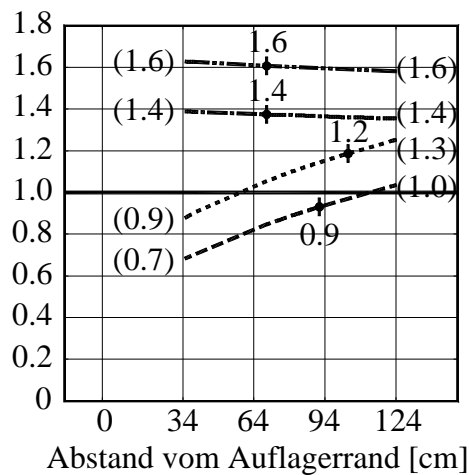


Bild C22– Traglast Versuch Nr. 1K-2

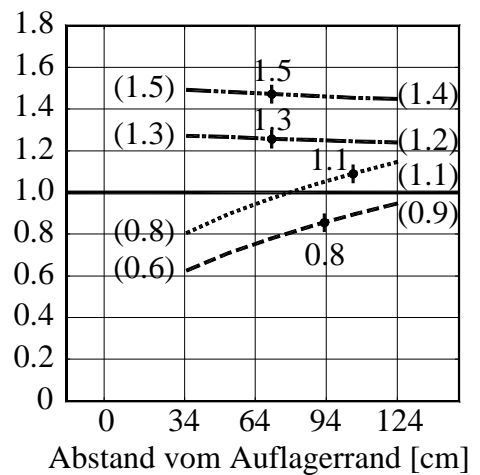
$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$



Csa----- Aci----- Versuch  
 Sn..... Din-----

Bild C23– Sicherheitsfaktor 1K-1

$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$



Csa----- Aci----- Versuch  
 Sn..... Din-----

Bild C24– Sicherheitsfaktor 1K-2

Querkrafttragfähigkeit V[kN]-ohne Vccd

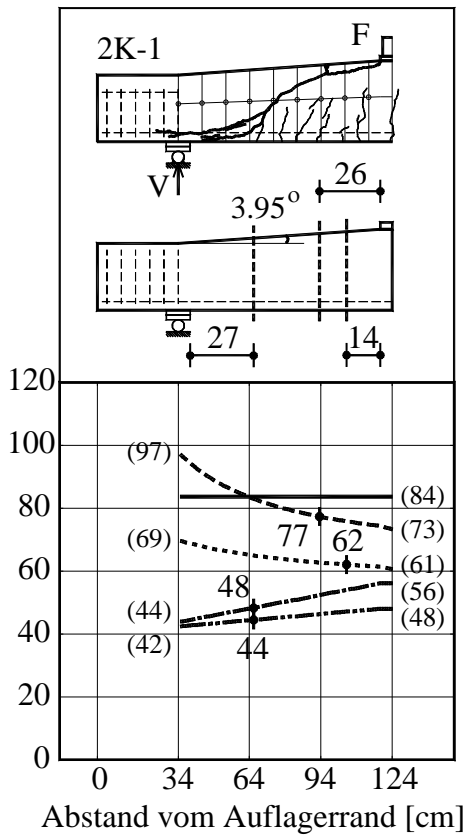


Bild C25– Traglast Versuch Nr. 2K–1 (ohne Vccd)

Querkrafttragfähigkeit V[kN]-mit Vccd

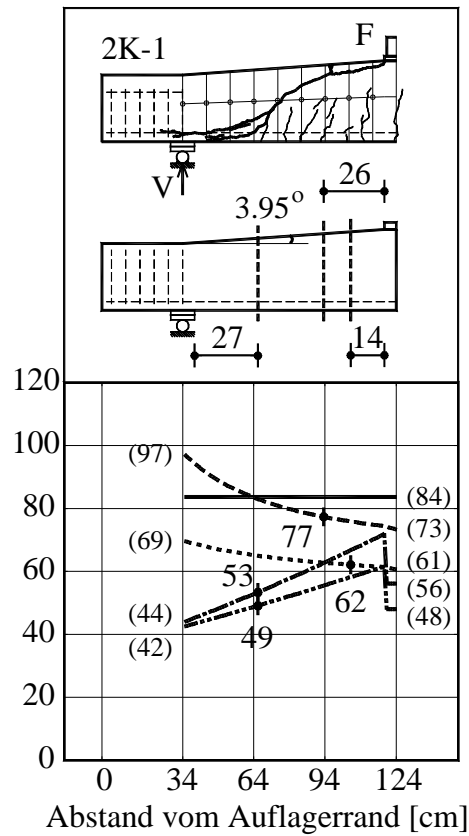


Bild C26– Traglast Versuch Nr. 2K–1 (mit Vccd)

$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$ -ohne Vccd

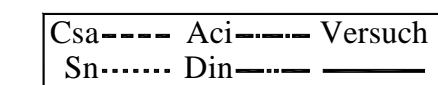
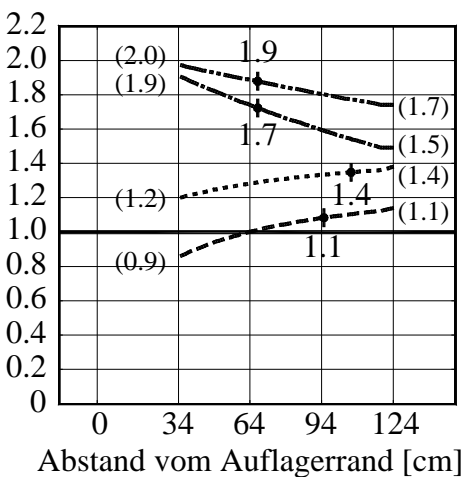


Bild C27– Sicherheitsfaktor 2K–1 (ohne Vccd)

$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$ -mit Vccd

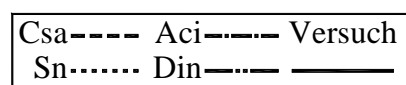
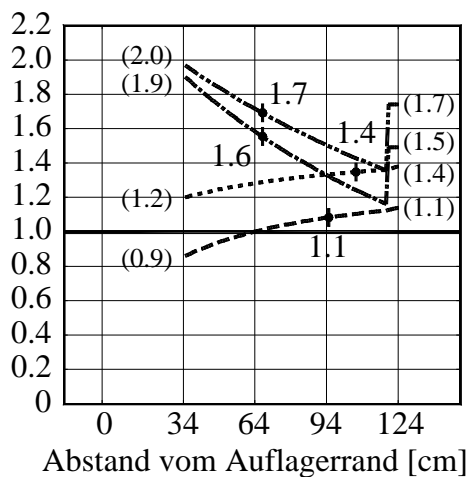


Bild C28– Sicherheitsfaktor 2K–1 (mit Vccd)

Querkrafttragfähigkeit V[kN]-ohne Vccd

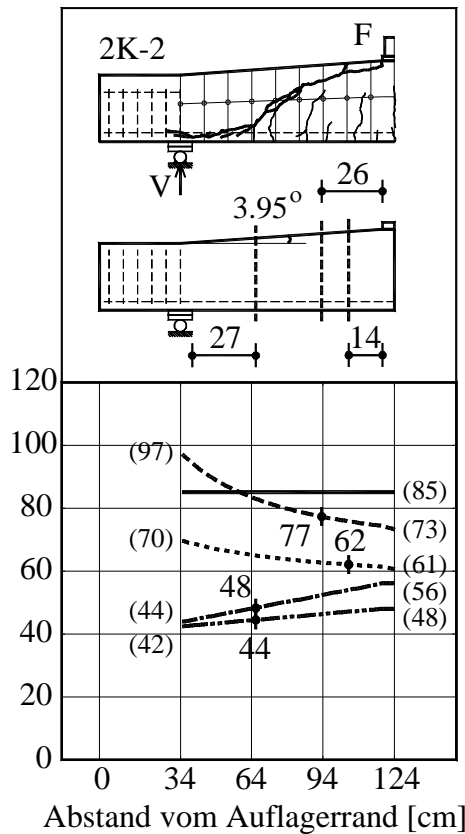


Bild C29– Traglast Versuch Nr. 2K–2 (ohne Vccd)

Querkrafttragfähigkeit V[kN]-mit Vccd

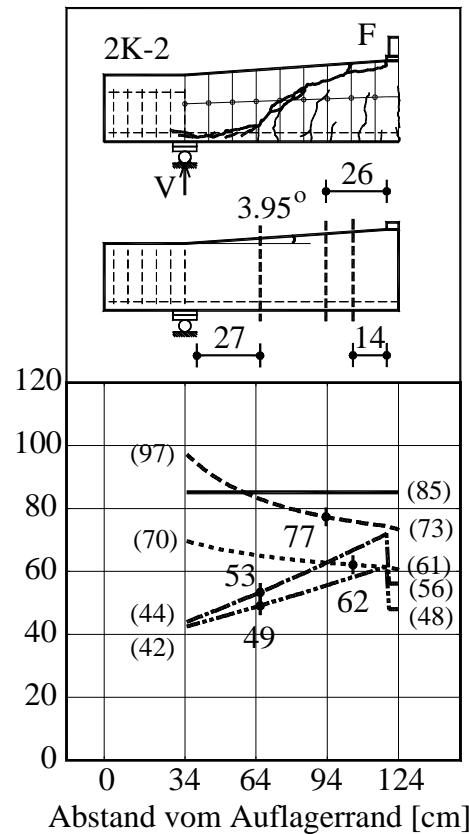
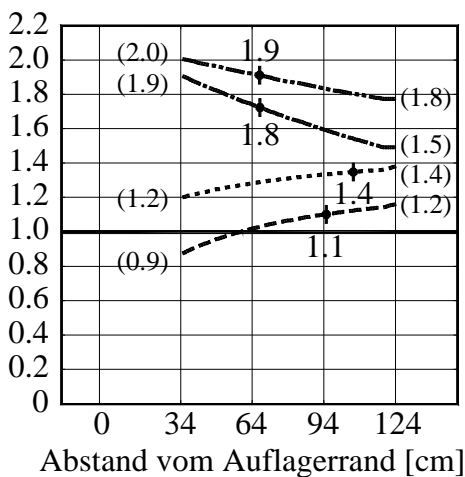


Bild C30– Traglast Versuch Nr. 2K–2 (mit Vccd)

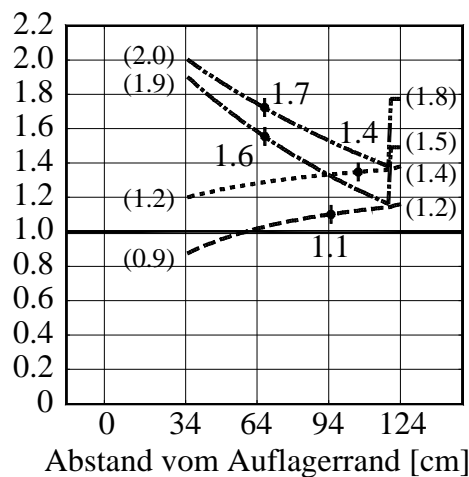
$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$ -ohne Vccd



Csa----- Aci----- Versuch  
 Sn..... Din-----

Bild C32– Sicherheitsfaktor 2K–2 (ohne Vccd)

$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$ -mit Vccd



Csa----- Aci----- Versuch  
 Sn..... Din-----

Bild C32– Sicherheitsfaktor 2K–2 (mit Vccd)

Querkrafttragfähigkeit V[kN]-ohne Vccd

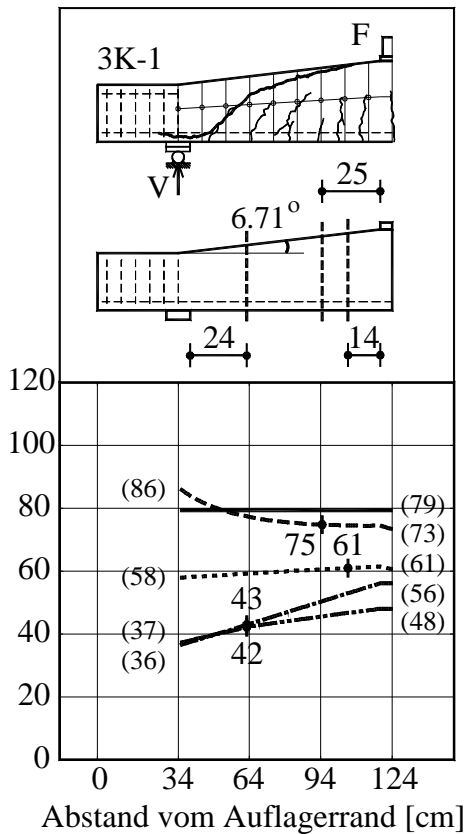


Bild C33– Traglast Versuch Nr. 3K–1 (ohne Vccd)

Querkrafttragfähigkeit V[kN]-mit Vccd

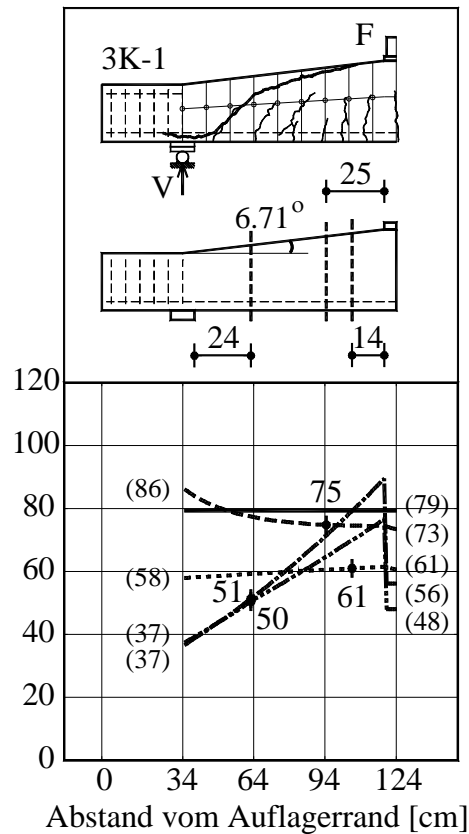


Bild C34– Traglast Versuch Nr. 3K–1 (mit Vccd)

$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$ -ohne Vccd

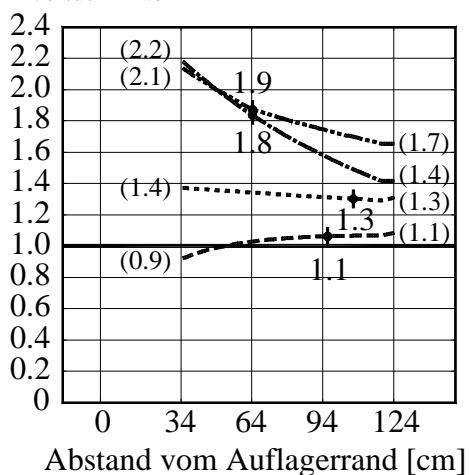


Bild C35– Sicherheitsfaktor 3K–1 (ohne Vccd)

$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$ -mit Vccd

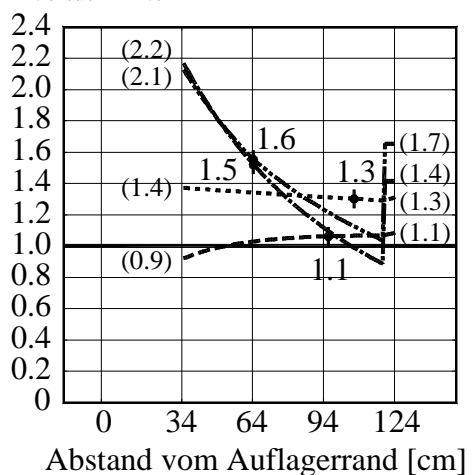
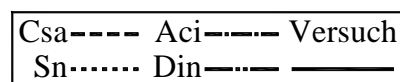
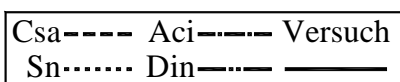


Bild C36– Sicherheitsfaktor 3K–1 (mit Vccd)



Querkrafttragfähigkeit V[kN]-ohne Vccd

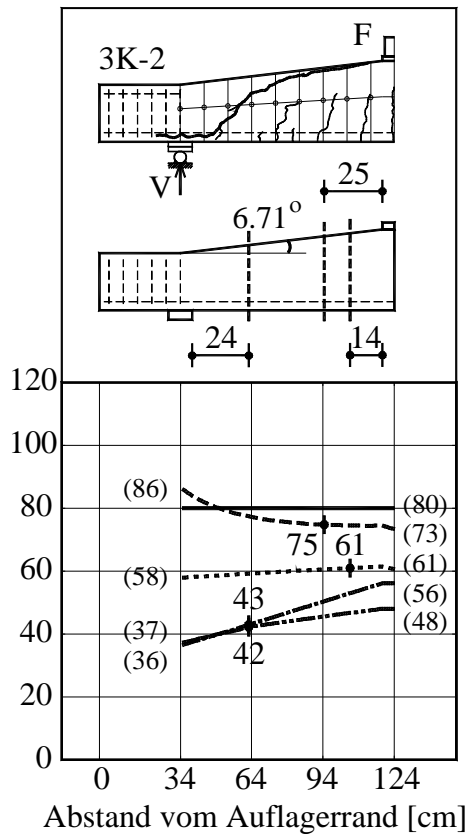


Bild C37– Traglast Versuch Nr. 3K–2 (ohne Vccd)

Querkrafttragfähigkeit V[kN]-mit Vccd

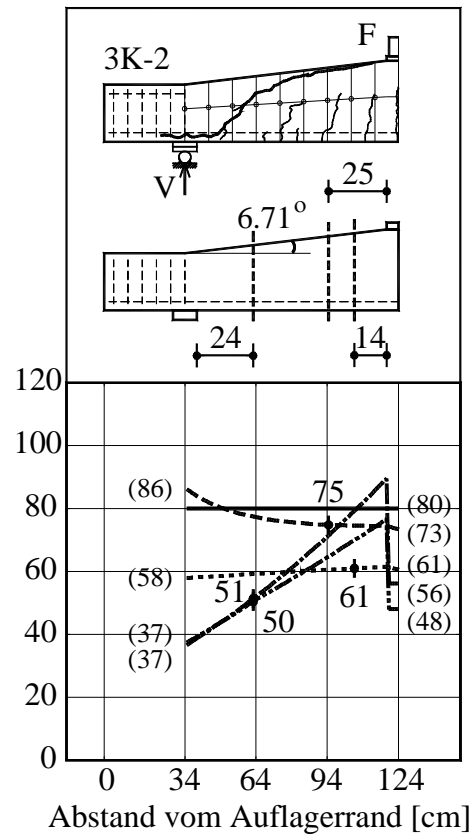
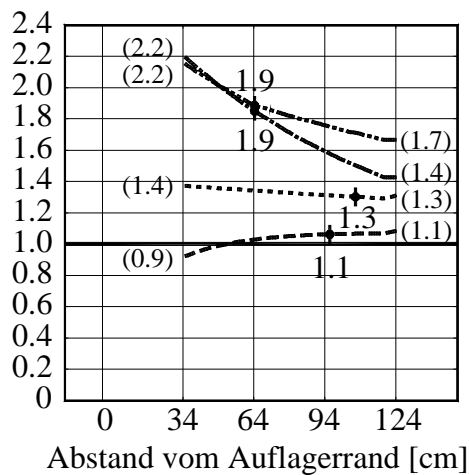


Bild C38– Traglast Versuch Nr. 3K–2 (mit Vccd)

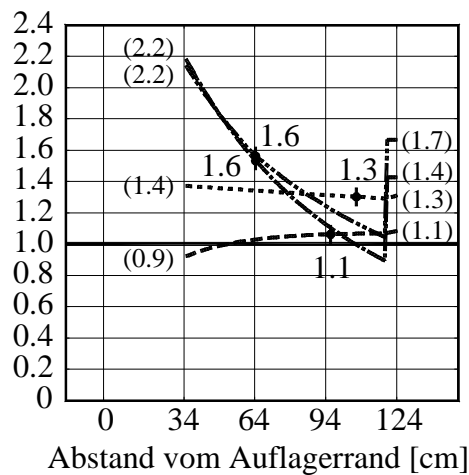
$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$ -ohne Vccd



Csa----- Aci----- Versuch  
Sn..... Din-----

Bild C39– Sicherheitsfaktor 3K–2 (ohne Vccd)

$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$ -mit Vccd



Csa----- Aci----- Versuch  
Sn..... Din-----

Bild C40– Sicherheitsfaktor 3K–2 (mit Vccd)

Querkrafttragfähigkeit V[kN]-ohne Vccd

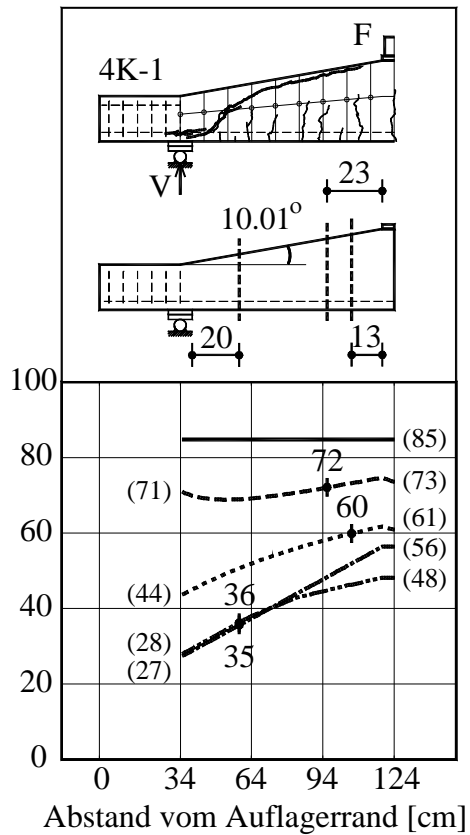


Bild C41– Traglast Versuch Nr. 4K-1 (ohne Vccd)

Querkrafttragfähigkeit V[kN]-mit Vccd

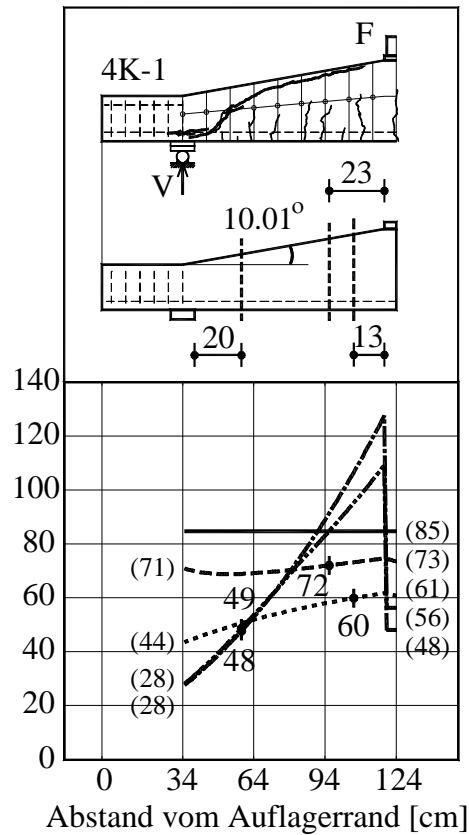


Bild C42– Traglast Versuch Nr. 4K-1 (mit Vccd)

$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$ -ohne Vccd

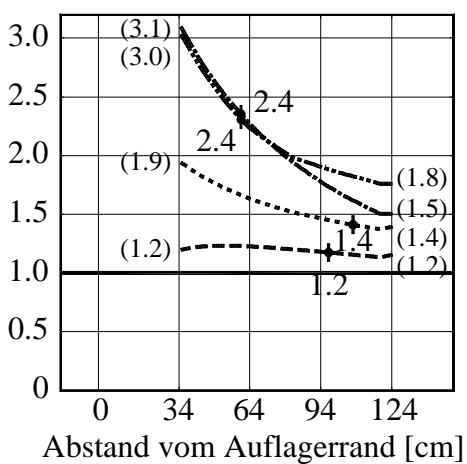


Bild C43– Sicherheitsfaktor 4K-1 (ohne Vccd)

$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$ -mit Vccd

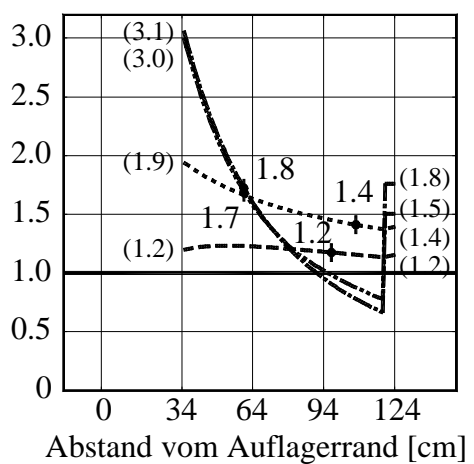


Bild C44– Sicherheitsfaktor 4K-1 (mit Vccd)

Csa----- Aci----- Versuch  
 Sn..... Din-----

Csa----- Aci----- Versuch  
 Sn..... Din-----

Querkrafttragfähigkeit V[kN]-ohne Vccd

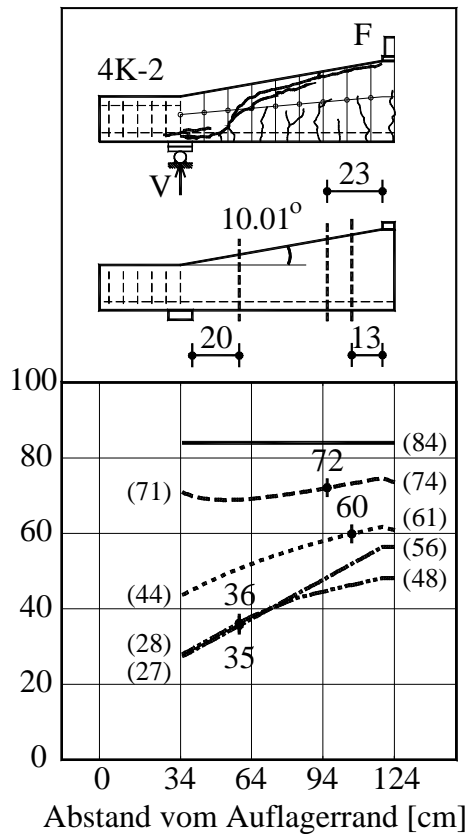


Bild C45– Traglast Versuch Nr. 4K–2 (ohne Vccd)

Querkrafttragfähigkeit V[kN]-mit Vccd

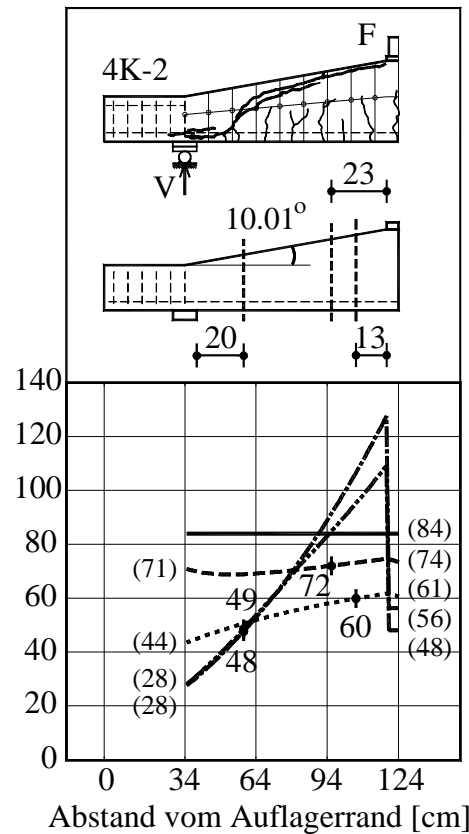
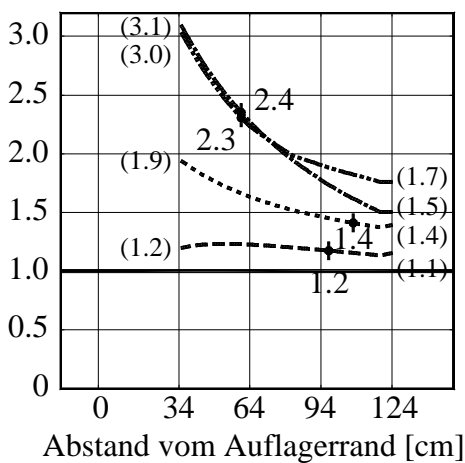


Bild C46– Traglast Versuch Nr. 4K–2 (mit Vccd)

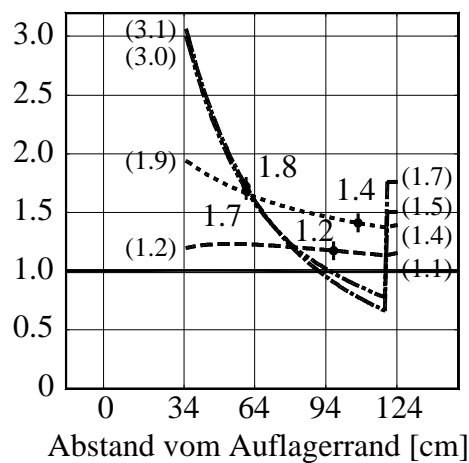
$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$ -ohne Vccd



Csa----- Aci----- Versuch  
Sn..... Din-----

Bild C47– Sicherheitsfaktor 4K–2 (ohne Vccd)

$V_{\text{Versuch}}/V_{\text{Norm}}$ -mit Vccd

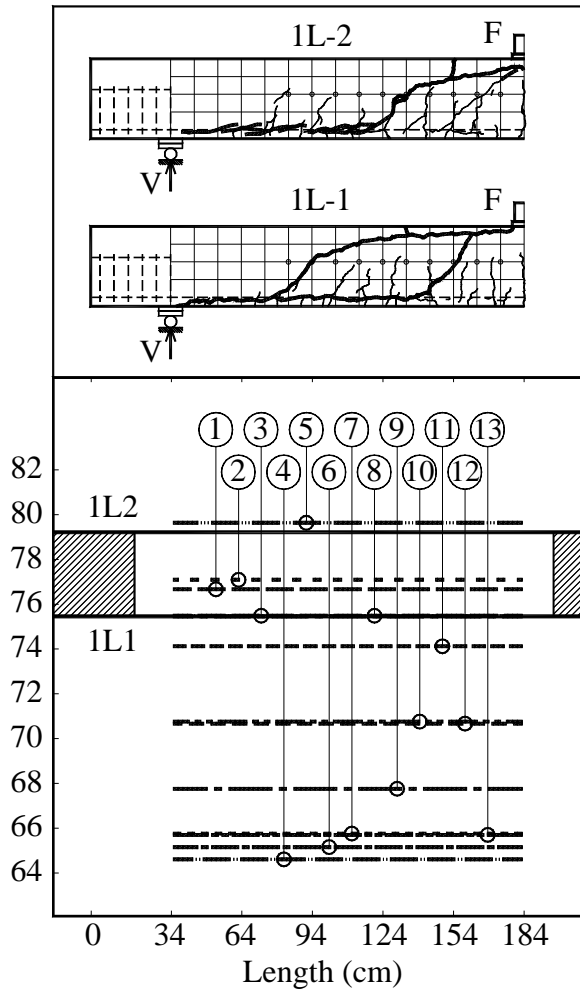


Csa----- Aci----- Versuch  
Sn..... Din-----

Bild C48– Sicherheitsfaktor 4K–2 (mit Vccd)

Anhang D Vergleich mit verschiedenen Modellen

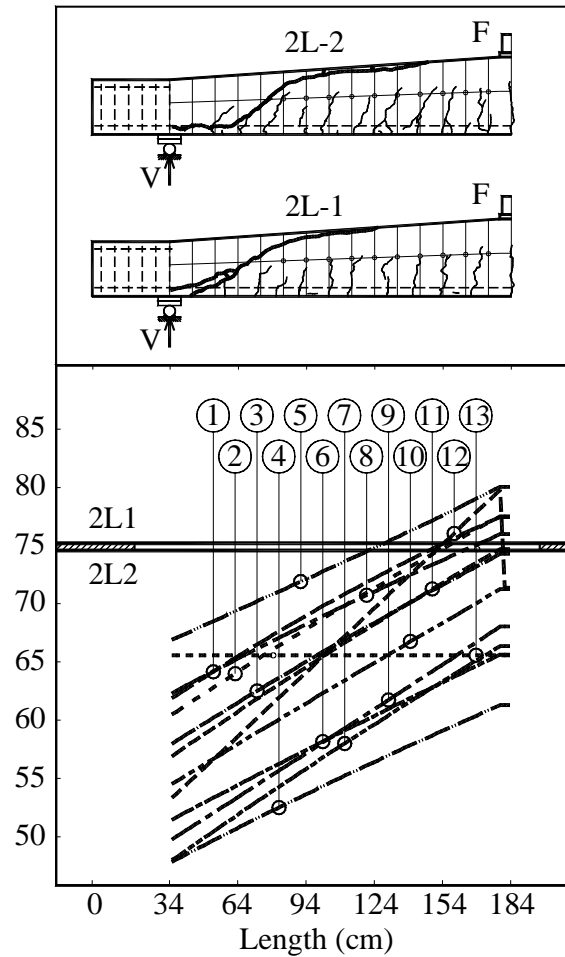
Shear Strength V(kN)



- |           |             |           |
|-----------|-------------|-----------|
| ① Reineck | ⑥ Gastebled | ⑪ Latte   |
| ② Zararis | ⑦ Bentz     | ⑫ Debaiky |
| ③ Zink    | ⑧ Bazant    | ⑬ Macleod |
| ④ Tureyen | ⑨ Kim D     |           |
| ⑤ Park    | ⑩ Kim JK    |           |

Bild D.1L– Rechn. Querkrafttragfähigkeit Versuch 1L

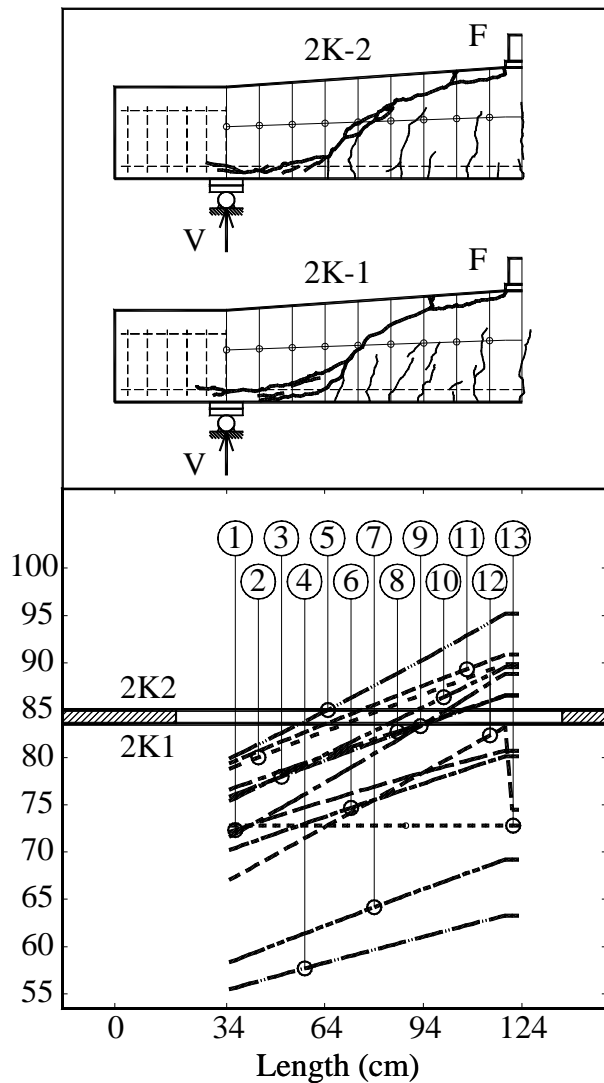
Shear Strength V(kN)



- |           |             |           |
|-----------|-------------|-----------|
| ① Reineck | ⑥ Gastebled | ⑪ Latte   |
| ② Zararis | ⑦ Bentz     | ⑫ Debaiky |
| ③ Zink    | ⑧ Bazant    | ⑬ Macleod |
| ④ Tureyen | ⑨ Kim D     |           |
| ⑤ Park    | ⑩ Kim JK    |           |

Bild D.2K– Rechn. Querkrafttragfähigkeit Versuch 2K

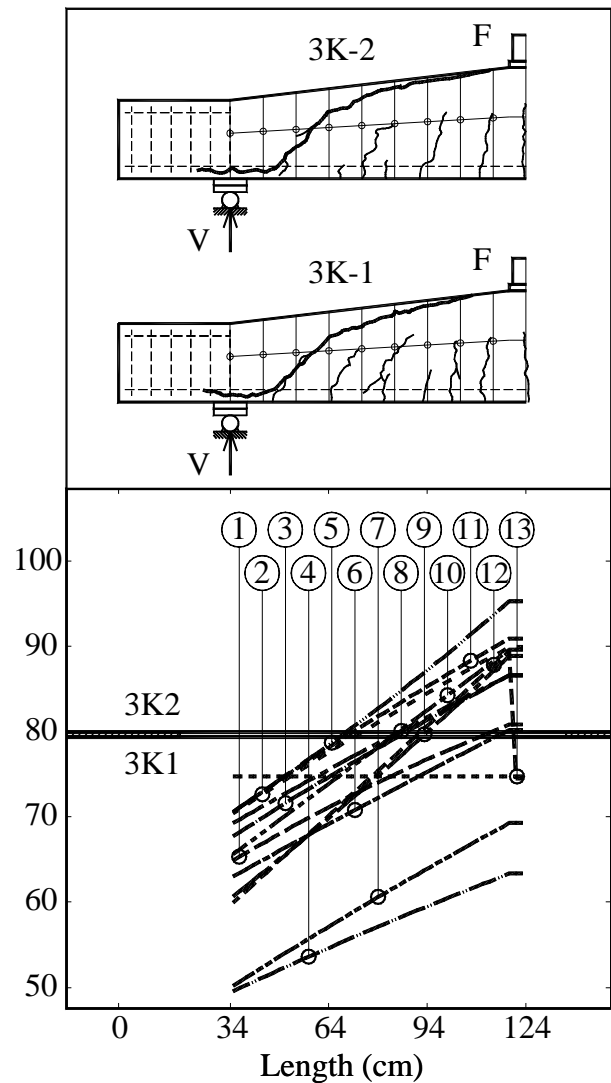
Shear Strength V(kN)



- |           |            |           |
|-----------|------------|-----------|
| ① Reineck | ⑥ Gastbled | ⑪ Latte   |
| ② Zararis | ⑦ Bentz    | ⑫ Debaiky |
| ③ Zink    | ⑧ Bazant   | ⑬ Macleod |
| ④ Tureyen | ⑨ Kim D    |           |
| ⑤ Park    | ⑩ Kim JK   |           |

Bild D.2K– Rechn. Querkrafttragfähigkeit Versuch 2K

Shear Strength V(kN)



- |           |            |           |
|-----------|------------|-----------|
| ① Reineck | ⑥ Gastbled | ⑪ Latte   |
| ② Zararis | ⑦ Bentz    | ⑫ Debaiky |
| ③ Zink    | ⑧ Bazant   | ⑬ Macleod |
| ④ Tureyen | ⑨ Kim D    |           |
| ⑤ Park    | ⑩ Kim JK   |           |

Bild D.3K– Rechn. Querkrafttragfähigkeit Versuch 3K

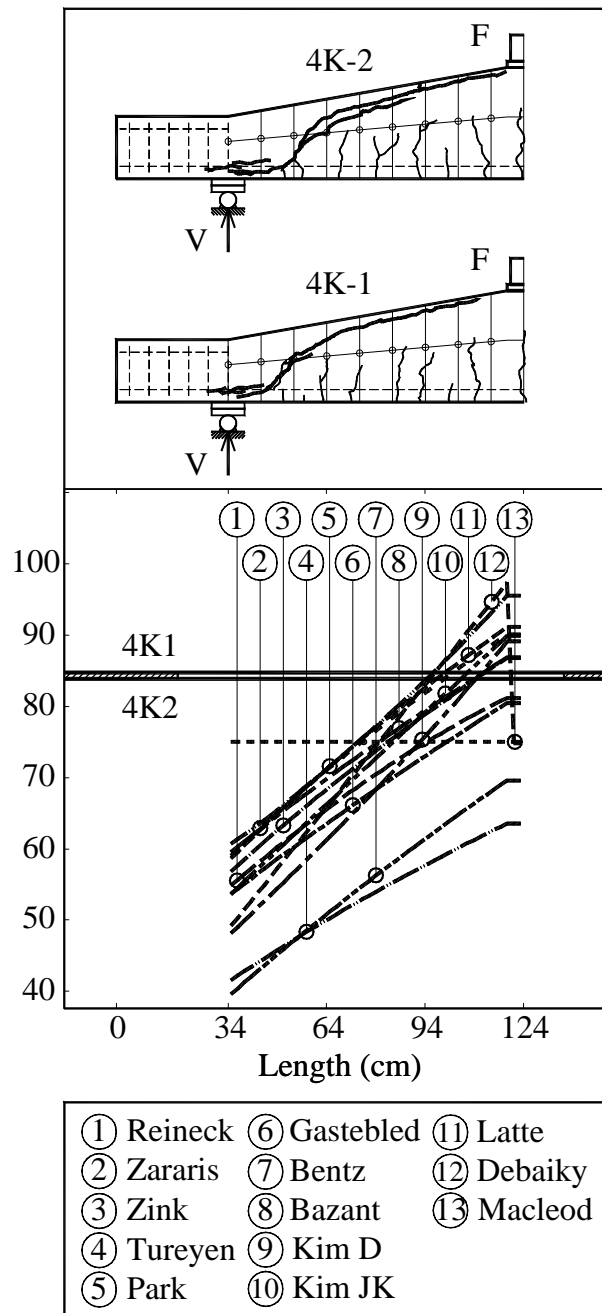
Shear Strength  $V$ (kN)

Bild D.4K– Rechn. Quertragfähigkeit Versuch 4K