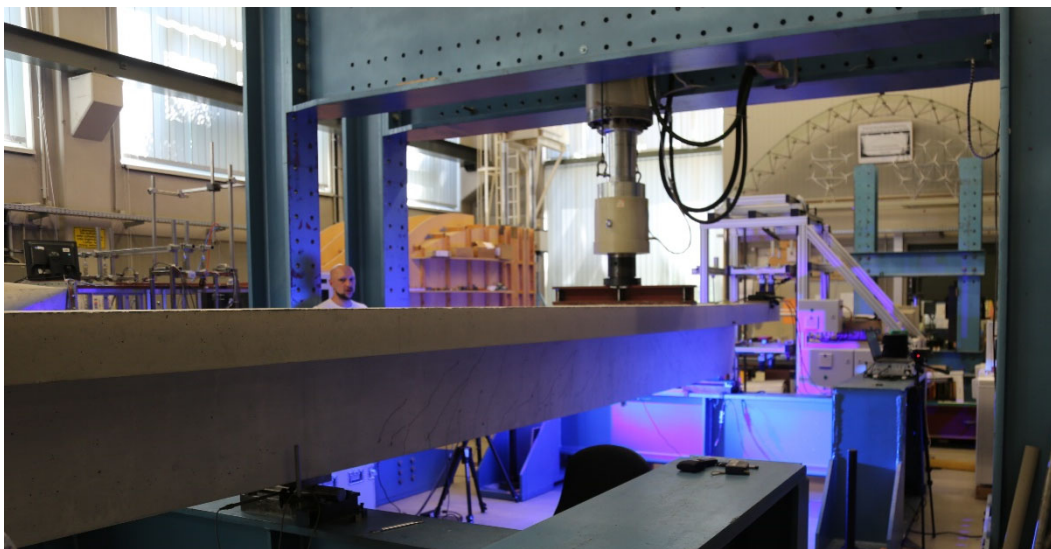


## Untersuchungen zur Kraftübertragung in Rissen von Stahlbetonbalken infolge Querkraft- und Torsionsbeanspruchung -Versuchsbericht-



Institut für Massivbau  
Technische Universität Hamburg

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Günter A. Rombach  
Mitarbeiter: Vladimir Jauk, M. Sc.  
Versuchingenieur: Harald Finger

HAMBURG  
08.04.2022

## **Zusammenfassung**

Im Rahmen eines durch die DFG geförderten Forschungsprojektes wurden Versuche an 14 Stahlbetonbalken durchgeführt. Ziel war es die Kinematik von Querkraft- und Torsionsrissen zu untersuchen. Hierfür kam u.a. ein photogrammetrisches Messsystem zum Einsatz. Der vorliegende Bericht beschreibt die Versuchsreihe und stellt die wesentlichen Ergebnisse dar. Es wurden Querkraftversuche ohne und mit Bügel sowie Torsionsversuche durchgeführt.

Hamburg, den 08.04.2022

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b> .....  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Problemstellung .....  | 1         |
| 1.2      | Ziel der Versuche.....   | 1         |
| <b>2</b> | <b>Versuchskörper</b> .....  | <b>2</b>  |
| 2.1      | Schal- und Bewehrungspläne .....   | 5         |
| 2.2      | Herstellung der Versuchskörper .....   | 8         |
| 2.3      | Prüfung der Baustoffe.....   | 8         |
| 2.3.1    | Beton.....   | 8         |
| 2.3.2    | Bestimmung der Bruchenergie .....  | 9         |
| 2.3.3    | Kornvolumen der Betonmischungen .....  | 11        |
| 2.3.4    | Betonstahl .....   | 11        |
| <b>3</b> | <b>Versuchsstand</b> .....   | <b>12</b> |
| 3.1      | Querkraftversuche.....   | 12        |
| 3.2      | Torsionsversuche .....   | 15        |
| <b>4</b> | <b>Messtechnik</b> .....   | <b>17</b> |
| 4.1      | Wegaufnehmer und Kraftmessdosen.....   | 17        |
| 4.2      | Photogrammetrie.....   | 19        |
| 4.3      | Faseroptische Messung der Bewehrungsstäbe.....                                   | 22        |
| 4.4      | Dehnmessstreifen an der Betondruckzone (DMS) und Stahldehnungsmesser (DD1)<br>24 |           |
| <b>5</b> | <b>Versuchsbeschreibung</b> .....  | <b>26</b> |
| 5.1      | Versuchsablauf .....   | 26        |
| 5.2      | Aufzeichnung der Messdaten .....   | 26        |
| <b>6</b> | <b>Ergebnisse der Risskinematik</b> .....  | <b>28</b> |
| 6.1      | Auswertung der photogrammetrischen Aufnahme .....                                | 28        |
| 6.1.1    | Einstellungen zur Bestimmung der risskinematischen Größen .....                  | 28        |
| 6.1.2    | Ermittlung der risskinematischen Größen .....                                    | 28        |
| 6.1.3    | Ermittlung der Schub- und Normalspannungen im Riss .....                         | 29        |
| 6.1.4    | Ermittlung der Verdrillung der Torsionsversuche .....                            | 32        |
| 6.1.5    | Ermittlung der Spannungsübertragung bei den Torsionsversuche .....               | 32        |
| 6.2      | Versuchsergebnisse und Ergebnisse der photogrammetrischen Messung.....           | 33        |
| 6.2.1    | B1.1.....  | 34        |
| 6.2.2    | B1.2.....  | 38        |
| 6.2.3    | B2.1.....  | 43        |
| 6.2.4    | B2.2.....  | 48        |

|          |                                  |            |
|----------|----------------------------------|------------|
| 6.2.5    | B3.1                             | 52         |
| 6.2.6    | B3.2                             | 57         |
| 6.2.7    | B4.1                             | 62         |
| 6.2.8    | B4.2                             | 67         |
| 6.2.9    | B5.1                             | 72         |
| 6.2.10   | B5.2                             | 77         |
| 6.2.11   | B6.1                             | 82         |
| 6.2.12   | B6.2                             | 88         |
| 6.2.13   | B7.1                             | 94         |
| 6.2.14   | B7.1.2 (Wiederbelastung)         | 99         |
| 6.2.15   | B7.2                             | 104        |
| 6.2.16   | B7.2.2 (Wiederbelastung)         | 110        |
| 6.2.17   | B8.1                             | 114        |
| 6.2.18   | B8.2                             | 120        |
| 6.2.19   | B9.1                             | 126        |
| 6.2.20   | B9.2                             | 131        |
| 6.2.21   | B10                              | 136        |
| 6.2.22   | B11                              | 141        |
| 6.2.23   | B12                              | 145        |
| 6.2.24   | B13                              | 149        |
| 6.2.25   | B14                              | 154        |
| 6.3      | Untersuchung der Rissoberflächen | 159        |
| 6.3.1    | B1.1                             | 159        |
| 6.3.2    | B1.2                             | 164        |
| 6.3.3    | B2.1                             | 167        |
| 6.3.4    | B2.2                             | 171        |
| 6.3.5    | B3.1                             | 174        |
| 6.3.6    | B3.2                             | 180        |
| 6.3.7    | B5.1                             | 184        |
| 6.3.8    | B7.1.2                           | 188        |
| 6.3.9    | B7.2.2                           | 190        |
| 6.4      | Daten zu Versuchsdurchführungen  | 191        |
| 6.5      | Zusammenfassung der Ergebnisse   | 192        |
| <b>7</b> | <b>Numerische Berechnungen</b>   | <b>195</b> |
| 7.1      | B1                               | 196        |
| 7.2      | B2                               | 197        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 7.3      | B3.....  | 198        |
| 7.4      | B4.....  | 199        |
| 7.5      | B5.....  | 200        |
| 7.6      | B6.....  | 201        |
| 7.7      | B7.....  | 202        |
| 7.8      | B8.....  | 203        |
| 7.9      | B9.....  | 204        |
| 7.10     | B10.....   | 205        |
| 7.11     | B11.....   | 206        |
| 7.12     | B12.....   | 207        |
| 7.13     | B13.....   | 208        |
| 7.14     | B14.....   | 209        |
| <b>8</b> | <b>Risskinematik .....</b>   | <b>210</b> |
| <b>9</b> | <b>Erkenntnisse / Beobachtungen.....</b>                                   | <b>211</b> |
|          | <b>Literatur .....</b>   | <b>212</b> |
|          | <b>Anlage A: Betonprüfungen (Druck, Zug, E-Modul, Bruchenergie).....</b>   | <b>1</b>   |
| 9.1      | A.1 – 1. Betonage: Transportbeton (=TB I) zu B3, B6 .....                  | 1          |
| 9.2      | 1. Betonage: Transportbeton (=TB I) zu B10, B14 .....                      | 2          |
| 9.3      | A.2 - 2. Betonage: Eigene Herstellung (EH I.I) zu B8 .....                 | 4          |
| 9.4      | 2. Betonage: Eigene Herstellung (EH I.I) zu B4 .....                       | 5          |
| 9.5      | A.3 – 3. Betonage: Eigene Herstellung (EH II) zu B5 .....                  | 7          |
| 9.6      | A.4 – 4. Betonage: Eigene Herstellung (EH III) zu B11 .....                | 9          |
| 9.7      | A.5 – 5. Betonage: Eigene Herstellung (EH I.II) zu B2 .....                | 11         |
| 9.8      | A.6 – 6. Betonage: Transportbeton (TB II) zu B1, B9 .....                  | 13         |
| 9.9      | 6. Betonage: Transportbeton (TB II) zu B12, B13 .....                      | 14         |
|          | <b>Anlage B: Siebversuche .....</b>  | <b>17</b>  |
| 9.10     | B.1 Transportbeton I zu B3, B6, B7, B10, B14.....                          | 17         |
|          | <b>Anlage C: Zugversuch des Bewehrungsstahls .....</b>                     | <b>18</b>  |
|          | <b>Anlage D: Rissgleitung und Rissöffnung an ausgewählten Punkten.....</b> | <b>20</b>  |

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Die Querkrafttragfähigkeit von Betonbauteilen ist trotz jahrzehntelanger Forschung bislang nicht zufriedenstellen geklärt. Dies zeigt sich unter anderem an der großen Anzahl von Publikationen zu diesem Themenkomplex. Bislang strittig ist der Einfluss der Rissreibung am Lastabtrag.

Untersuchungen zur Rissreibungsspannung in Abhängigkeit der Rissöffnung und der Rissgleitung auf Materialebene wurden unter anderem in den 70er und 80er Jahren des letzten Jahrhunderts von Paulay & Loeber (1974) sowie von Walraven (1981) an reinen Schubversuchen durchgeführt. Walraven und auch Bazant & Gambarova (1980) erstellten auf der Basis von Versuchen und theoretischen Betrachtungen Rechenmodelle zur Beschreibung der Spannungsübertragung an Rissufern. In neueren Versuchen z.B. von Maurer et al. (2014) ließ sich die für die Entstehung von Schubspannungen im Riss notwendige Rissgleitung bei Spannbetonbalken jedoch nicht beobachten. Im Gegensatz dazu wurden aus anderen Versuchsserien überwiegend gegenteilige Schlussfolgerungen gezogen, wie beispielsweise von Huber et al. (2020), Tasevski et al. (2020) und auch Cavagnis et al. (2018b). Bei diesen trat die für die Spannungsübertragung notwendige Rissgleitung und -öffnung auf.

Eine Spannungsübertragung in Rissen ist nur möglich, wenn die Rissöffnung bestimmte Grenzen nicht überschreitet und vor allem eine Rissgleitung auftritt. Die quantitative Ermittlung dieser beiden Größen ist daher entscheidend für die Übertragung von Spannungen in Rissen.

## 1.2 Ziel der Versuche

Ziel der Versuchsserie ist die genaue Bestimmung der risskinematischen Größen von Stahlbetonbalken unter Querkraft- und Torsionsbelastung. Die Versuche sollen zeigen, ob bzw. unter welchen Bedingungen die Rissreibung einen nennenswerten Beitrag am Abtrag von Querkraften oder Torsionsmomenten liefert. Die resultierenden Schubspannungen im Riss werden auf Grundlage der photogrammetrischen Messungen mit verschiedenen Rechenmodellen ermittelt.

## 2 Versuchskörper

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden 14 Versuchskörper hergestellt. 9 Stahlbetonbalken dienen zur Untersuchung des Querkraftabtrags. Es werden sowohl Balken mit Rechteckquerschnitt ohne Bügelbewehrung als auch querkraftbewehrte Plattenbalken getestet (Bild 1). An den querkraftbelasteten Balken werden jeweils zwei Versuche durchgeführt, da diese hierfür eine ausreichende Länge aufweisen, so dass der Versuch mit einem Querkraftversagen im Bereich des linken Auflagers den folgenden Versuch am rechten Balkenende nicht beeinflusst.

Die übrigen 5 Versuchskörper dienen zur Untersuchung des Torsionstragverhaltens. Insgesamt ergeben sich  $9 \times 2 + 5 = 23$  Versuche.



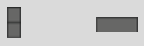
**Bild 1** Balken für die Querkraftversuche

Die Versuchskörper erhalten folgende Bezeichnung: BXX.Y. Dabei steht ‚B‘ für Balken, XX ist die Balkennummer (1 - 14) und Y kennzeichnet den ersten oder zweiten Querkraftversuch an einem Balken (1 oder 2). Bei den Torsionsversuchen entfällt ‚Y‘, da mit diesen Stahlbetonbalken nur ein Versuch durchgeführt wurde.

Die angestrebte Betongüte von  $f_c = 30$  MPa sowie der Größtkorndurchmesser  $a_g$  von 16 mm ist für 9 der 14 Versuchskörper identisch. Die übrigen 5 Versuchskörper weisen andere Werte auf. Weiterhin wird der Längs- und Bügelbewehrungsgrad variiert.

Die Versuchskörper weisen 6 unterschiedliche Querschnitte auf. Dabei handelt es sich um 5 Rechteckbalken ohne Bügelbewehrung, 4 Plattenbalken und 5 Rechteckbalken mit Bügelbewehrung (Torsion). In Tabelle 1 sind die Querschnittstypen und -abmessungen, die wesentlichen Betonparameter und die Bewehrungsgehalte zusammengefasst.

Tabelle 1 Zusammenfassung der geplanten Versuchsreihe

|                     |                      |   |                  |                  |                              |                |                |
|---------------------|----------------------|---|------------------|------------------|------------------------------|----------------|----------------|
| Balken              |                      | Balken ohne<br>Querkraft-<br>bewehrung<br> | B1               | B2               | B3                           | B4             | B5             |
| Typ                 |                      |   | I                | I                | II                           | II             | II             |
| Beton <sup>1)</sup> |                      |   | TB II            | EH I.II          | TB I                         | EH I.I         | EH II          |
| $b_w$               | [m]                  |   | 0,15             | 0,15             | 0,45                         | 0,45           | 0,45           |
| $h$                 | [m]                  |   | 0,4              | 0,4              | 0,2                          | 0,2            | 0,2            |
| $d$                 | [m]                  |   | 0,37             | 0,37             | 0,17                         | 0,17           | 0,17           |
| $a$                 | [m]                  |   | 1,215            | 1,215            | 0,615                        | 0,615          | 0,615          |
| $a/d$               | [-]                  |   | 3,28             | 3,28             | 3,62                         | 3,62           | 3,62           |
| $a_v$               | [m]                  |   | 1,09             | 1,09             | 0,49                         | 0,49           | 0,49           |
| $a_v/d$             | [-]                  |   | 2,95             | 2,95             | 2,88                         | 2,88           | 2,88           |
| $f_{cm}^{2)}$       | [N/mm <sup>2</sup> ] |   | 30               | 30               | 30                           | 30             | 50             |
| $a_g$               | [mm]                 |   | 16               | 8                | 16                           | 8              | 16             |
| $A_{sw}$            | [cm <sup>2</sup> /m] |   | -                | -                | -                            | -              | -              |
| $\rho_l$            | [10 <sup>-3</sup> ]  |   | 16,97            | 16,97            | 24,58                        | 20,52          | 20,52          |
| $\omega_{sl}$       | [-]                  |   | 0,28             | 0,28             | 0,41                         | 0,34           | 0,21           |
| $A_{sl}$            | [cm <sup>2</sup> ]   |   | 3Ø20<br>= 9,42   | 3Ø20<br>= 9,42   | 6Ø20<br>= 18,8               | 5Ø20<br>= 15,7 | 5Ø20<br>= 15,7 |
| Nr.                 |                      | B6  | B7               | B8               | B9                           |                |                |
| Typ                 |                      | III   | III              | III              | IV                           |                |                |
| Beton <sup>1)</sup> |                      | TB I  | TB I             | EH I.I           | TB II                        |                |                |
| $b_w$               | [m]                  | 0,2   | 0,2              | 0,2              | 0,2                          |                |                |
| $h$                 | [m]                  | 0,4   | 0,4              | 0,4              | 0,6                          |                |                |
| $d$                 | [m]                  | 0,332   | 0,362            | 0,362            | 0,532                        |                |                |
| $a$                 | [m]                  | 1,115   | 1,215            | 1,215            | 1,71                         |                |                |
| $a/d$               | [-]                  | 3,36  | 3,36             | 3,36             | 3,21                         |                |                |
| $a_v$               | [m]                  | 0,99  | 1,09             | 1,09             | 1,585                        |                |                |
| $a_v/d$             | [-]                  | 2,98  | 3,01             | 3,01             | 2,98                         |                |                |
| $f_{cm}^{2)}$       | [N/mm <sup>2</sup> ] | 30  | 30               | 30               | 30                           |                |                |
| $a_g$               | [mm]                 | 16  | 16               | 8                | 16                           |                |                |
| $A_{sw}$            | [cm <sup>2</sup> /m] | Ø10-100<br>= 15,71  | Ø8-300<br>= 3,33 | Ø8-300<br>= 3,33 | Ø10-180<br>= 8,78            |                |                |
| $\rho_w$            | [‰]                  | 7,86  | 1,67             | 1,67             | 4,39                         |                |                |
| $A_{sl}$            | [cm <sup>2</sup> ]   | 6Ø28 <sup>3)</sup><br>= 36,9  | 3Ø20<br>= 9,42   | 3Ø20<br>= 9,42   | 6Ø28 <sup>3)</sup><br>= 36,9 |                |                |
| $\rho_l$            | [‰]                  | 11,11   | 2,60             | 2,60             | 6,94                         |                |                |

1) TB – Transportbeton; EH – Eigene Herstellung  
3) Zweilagig

2) Angestrebte Betondruckfestigkeit  
4)  $\omega_{z,min} = 500\text{MPa} / 30\text{MPa} \cdot 3,33\text{cm}^2 / (1\text{m} \cdot 0,2\text{m}) = 0,0278$

| Nr.                 |                      |  | B10             | B11               | B12              | B13              | B14               |
|---------------------|----------------------|--|-----------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Typ                 |                      |  | V               | V                 | V                | V                | VI                |
| Beton <sup>1)</sup> |                      |  | TB I            | EH III            | TB II            | TB II            | TB I              |
| $b_w$               | [m]                  |  | 0,15            | 0,15              | 0,15             | 0,15             | 0,15              |
| $h$                 | [m]                  |  | 0,4             | 0,4               | 0,4              | 0,4              | 0,8               |
| $d_l$               | [cm]                 |  | 3,3             | 4,0               | 3,3              | 3,7              | 3,7               |
| $b_k$               | [cm]                 |  | 8,4             | 7,0               | 8,4              | 7,6              | 7,6               |
| $h_k$               | [cm]                 |  | 33,4            | 32,0              | 33,4             | 32,6             | 72,6              |
| $A_k$               | [cm <sup>2</sup> ]   |  | 280,6           | 224,0             | 280,6            | 247,8            | 551,8             |
| $u_k$               | [cm]                 |  | 83,6            | 78,0              | 83,6             | 80,4             | 160,4             |
| $d$                 | [m]                  |  | -               | -                 | -                | -                | -                 |
| $a$                 | [m]                  |  | -               | -                 | -                | -                | -                 |
| $a/d$               | [-]                  |  | -               | -                 | -                | -                | -                 |
| $a_v$               | [m]                  |  | -               | -                 | -                | -                | -                 |
| $a_v/d$             | [-]                  |  | -               | -                 | -                | -                | -                 |
| $f_{cm}^{2)}$       | [N/mm <sup>2</sup> ] |  | 30              | 60                | 30               | 30               | 30                |
| $a_g$               | [mm]                 |  | 16              | 16                | 16               | 16               | 16                |
| $A_{sw}$            | [cm <sup>2</sup> /m] |  | Ø8-90<br>= 5,56 | Ø12-90<br>= 12,56 | Ø8-120<br>= 4,17 | Ø10-80<br>= 9,88 | Ø10-120<br>= 6,58 |
| $\rho_w$            | [10 <sup>-3</sup> ]  |  | 7,75            | 16,33             | 5,81             | 13,24            | 8,80              |
| $A_{sl}$            | [cm <sup>2</sup> ]   |  | 6Ø10<br>= 4,71  | 6Ø16<br>= 12,1    | 6Ø10<br>= 4,71   | 6Ø14<br>= 9,24   | 8Ø14<br>= 12,3    |
| $\rho_l$            | [10 <sup>-3</sup> ]  |  | 7,85            | 20,17             | 7,85             | 15,4             | 10,25             |

Balken unter  
Torsions-  
beanspruchung



- 1) TB – Transportbeton; EH – Eigene Herstellung  
2) Angestrebte Festigkeit

Größe Bezeichnung

- $a$  Abstand zwischen dem Schwerpunkt der Last und Auflagerrand
- $a_v$  Abstand zwischen dem Rand der Lastplatte und dem Auflagerrand
- $a_g$  Größtkorndurchmesser
- $c_v$  Verlegemaß der Längsbewehrung = 20 mm
- $f_y$  = 500 MPa (Annahme, wird experimentell bestimmt)
- $h_k$  =  $h - 2 \cdot (c_v + \phi_{sw}) - \phi_l$  ( $b_k$  analog)
- $u_k$  Umfang der Kernfläche =  $2 \cdot (b_k + h_k)$
- $\omega_{sl}$  =  $\frac{A_{sl}}{b_{eff} \cdot d} \cdot \frac{f_y}{f_{cm}}$  (Querkraft)

## 2.1 Schal- und Bewehrungspläne

Im Folgenden sind die Schal- und Bewehrungspläne der 6 verschiedenen Balkentypen dargestellt.

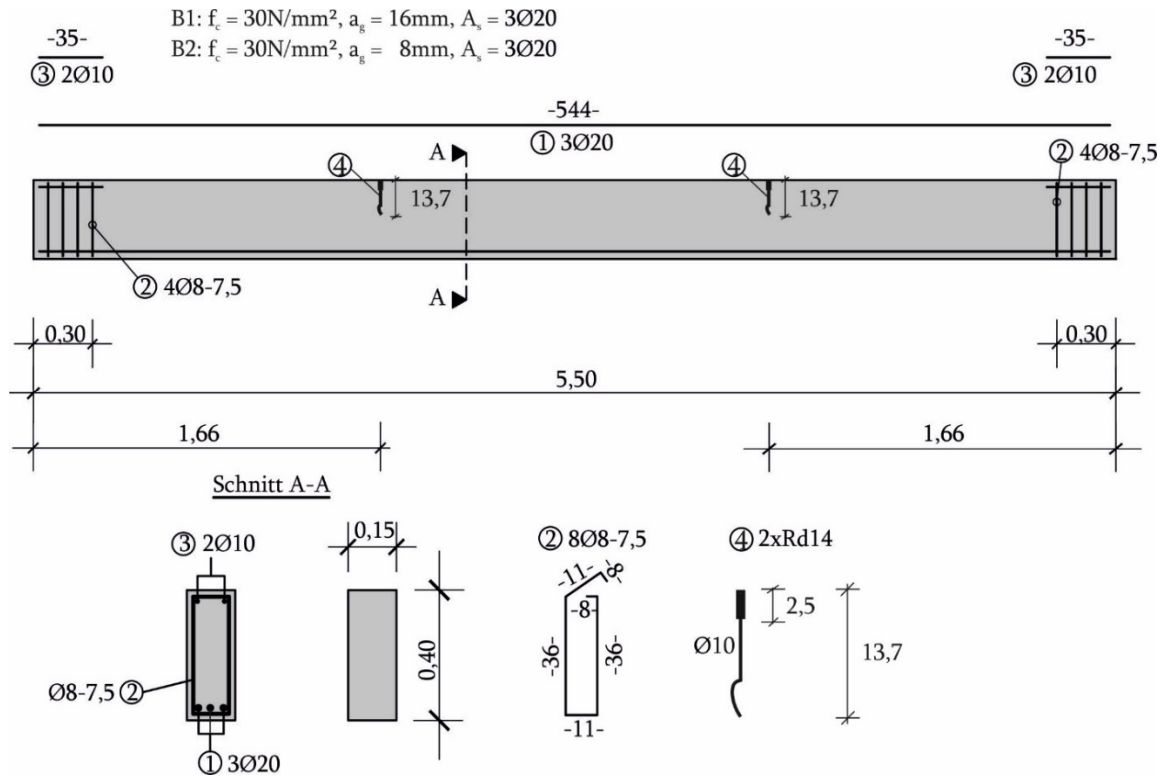


Bild 2 Schal- und Bewehrungsplan der Balken B1 und B2 (Balkentyp I)

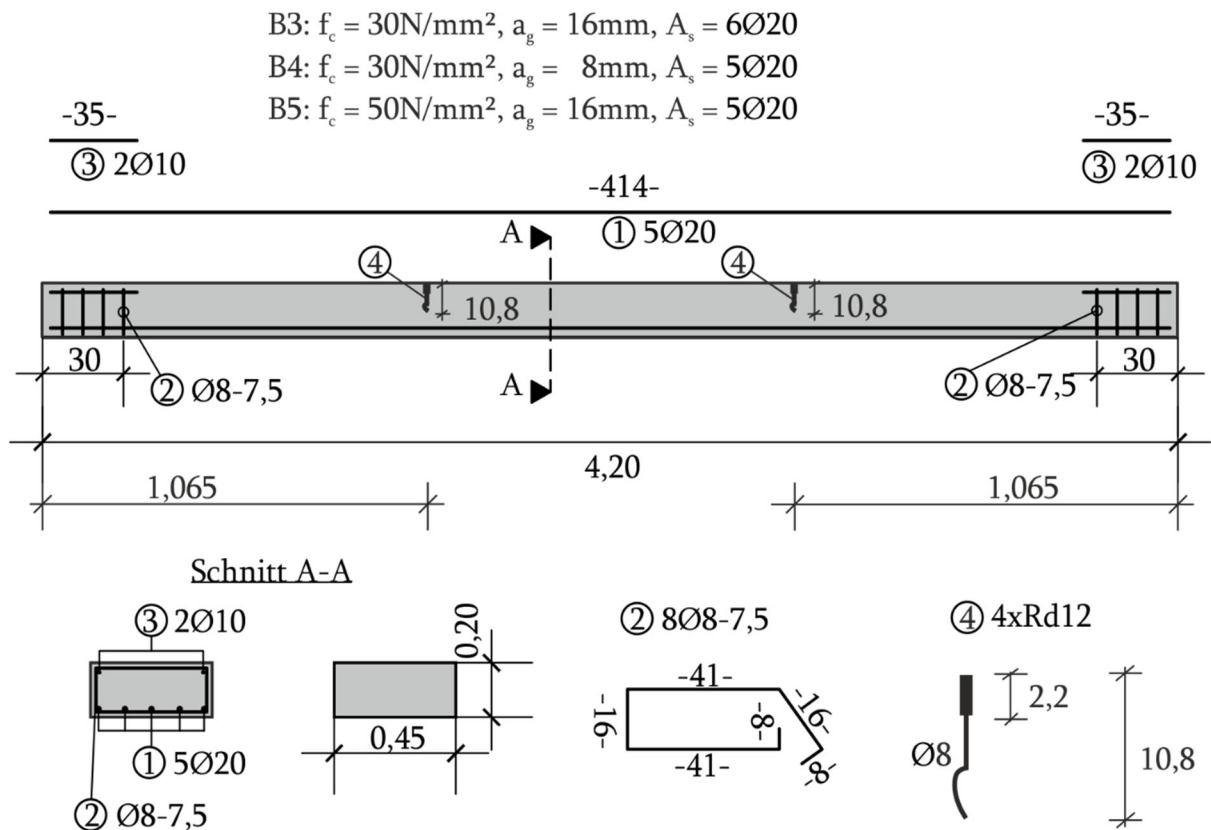
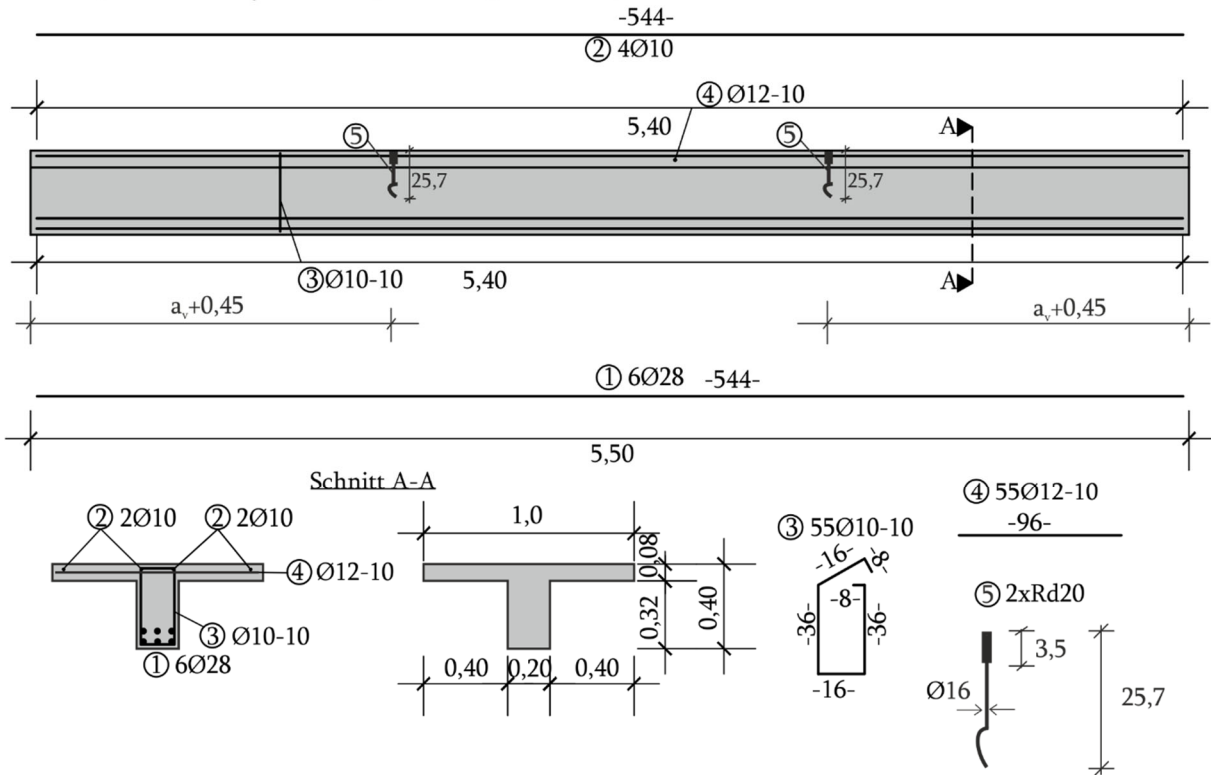


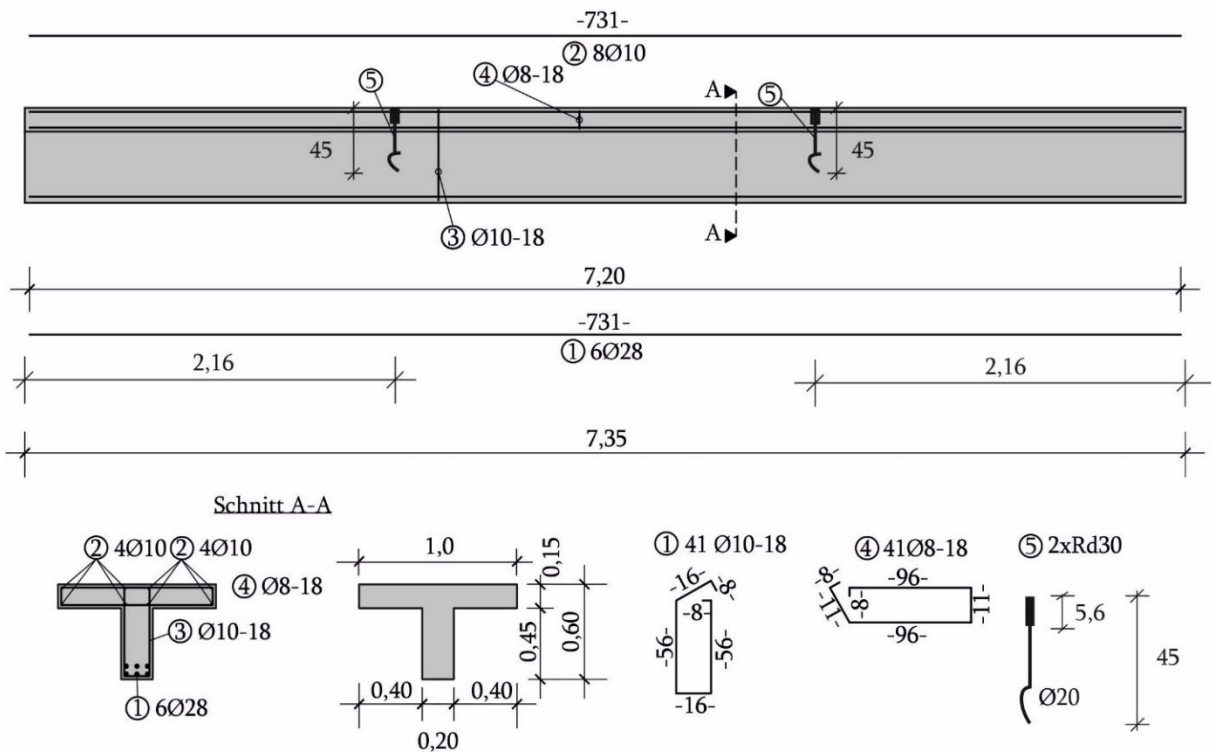
Bild 3 Schal- und Bewehrungsplan der Balken B3 – B5 (Balkentyps II)

B6:  $f_c = 30\text{N/mm}^2$ ,  $a_g = 16\text{mm}$ ,  $A_s = 6\text{Ø}28$ ,  $a_{sw} = \text{Ø}10-10$ ,  $a_v = 0,99\text{m}$   
 B7:  $f_c = 30\text{N/mm}^2$ ,  $a_g = 16\text{mm}$ ,  $A_s = 3\text{Ø}20$ ,  $a_{sw} = \text{Ø}8-30$ ,  $a_v = 1,09\text{m}$   
 B8:  $f_c = 30\text{N/mm}^2$ ,  $a_g = 8\text{mm}$ ,  $A_s = 3\text{Ø}20$ ,  $a_{sw} = \text{Ø}8-30$ ,  $a_v = 1,09\text{m}$



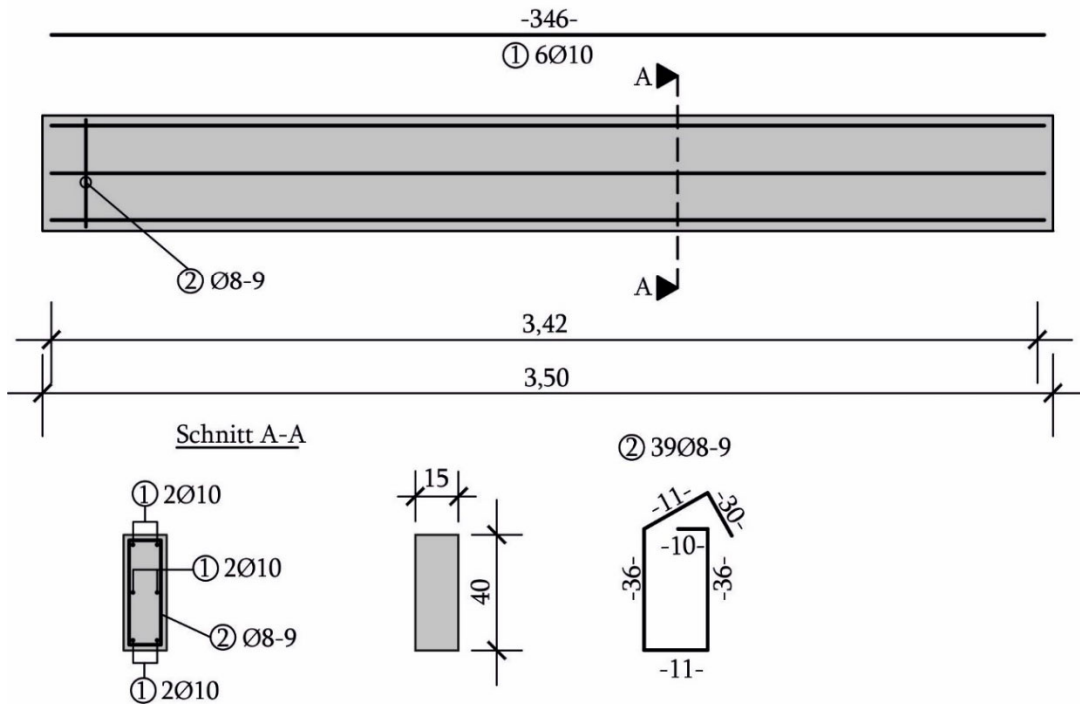
**Bild 4 Schal- und Bewehrungsplan der Balken B6 – B8 (Balkentyp III)**

B9:  $f_c = 30\text{N/mm}^2$ ,  $a_g = 16\text{mm}$ ,  $A_s = 6\text{Ø}28$ ,  $a_{sw} = \text{Ø}10-18$



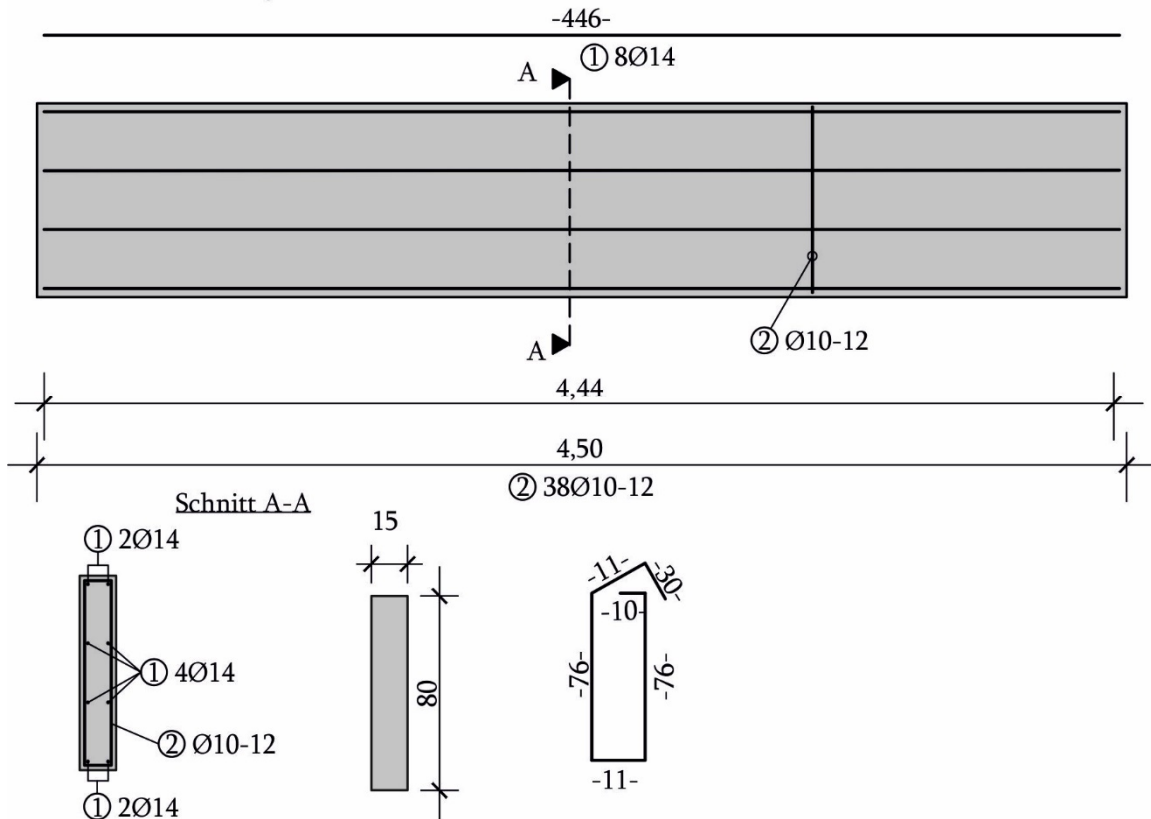
**Bild 5 Schal- und Bewehrungsplan des Balkens B9 (Balkentyp IV)**

B10:  $f_c = 30\text{N/mm}^2$ ,  $a_g = 16\text{mm}$ ,  $A_s = 6\text{Ø}10$ ,  $a_{sw} = \text{Ø}8-9$   
 B11:  $f_c = 60\text{N/mm}^2$ ,  $a_g = 16\text{mm}$ ,  $A_s = 6\text{Ø}16$ ,  $a_{sw} = \text{Ø}12-9$   
 B12:  $f_c = 30\text{N/mm}^2$ ,  $a_g = 16\text{mm}$ ,  $A_s = 6\text{Ø}10$ ,  $a_{sw} = \text{Ø}8-12$   
 B13:  $f_c = 30\text{N/mm}^2$ ,  $a_g = 16\text{mm}$ ,  $A_s = 6\text{Ø}14$ ,  $a_{sw} = \text{Ø}10-8$



**Bild 6 Schal- und Bewehrungsplan der Balken B10 – B13 (Balkentyp V)**

B14:  $f_c = 30\text{N/mm}^2$ ,  $a_g = 16\text{mm}$ ,  $A_s = 8\text{Ø}14$ ,  $a_{sw} = \text{Ø}10-12$



**Bild 7 Schal- und Bewehrungsplan des Balkens B14 (Balkentyp VI)**

## 2.2 Herstellung der Versuchskörper

Die Stahlbetonbalken werden in der Versuchshalle des Institutes für Massivbau der TUHH hergestellt. Vor der Betonage wird nochmals die genaue Lage der Bewehrungsstäbe kontrolliert sowie die Funktionsfähigkeit der faseroptischen Messtechnik überprüft. Bei der Betonage und beim Rüttelvorgang wird darauf geachtet, dass die Glasfasern unversehrt bleiben. Die Versuchskörper werden, ebenso wie die Betonzyylinder zur Bestimmung der Materialkennwerte, in der Versuchshalle des Instituts gelagert.

Eine Nachbehandlung findet in geringem Maße durch eine Folienabdeckung statt. Die schnelle Austrocknung der Betonoberfläche soll dadurch verringert werden.

## 2.3 Prüfung der Baustoffe

Im Rahmen der Baustoffprüfungen wird beim Beton die Druckfestigkeit  $f_c$ , die Spaltzugfestigkeit  $f_{ct,sp}$ , der E-Modul  $E_c$ , die Bruchenergie  $G_F$  und beim Betonstahl für jeden verwendeten Stabdurchmesser die  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Kurve bestimmt.

Die verwendeten Betone und Betonstähle sind in den nachstehenden Unterkapiteln beschrieben.

### 2.3.1 Beton

Die maßgebenden Parameter der Betonrezepte und die Zuordnung zu den Versuchsbalken sind in der Tabelle 2 angegeben.

In den Balkenversuchen sollte der Einfluss verschiedener Parameter untersucht werden. Es kamen daher unterschiedliche Betonrezepte zur Anwendung. Die Stahlbetonbalken aus Transportbeton (TB) besitzen dieselbe Zusammensetzung. Es wurde ein Zement CEM III/a-42,5 N verwendet. Die begrenzten Platzverhältnisse in der Versuchshalle machten zwei Betonagermine erforderlich.

Bei den Balken, deren Beton selbst hergestellt wurde, variierte der Größtkorndurchmesser  $a_g$  und die Betondruckfestigkeit  $f_c$ . Es kam ein Zement CEM II/A-LL 42,5 N zum Einsatz.

**Tabelle 2 Betonrezepturen je m<sup>3</sup> Einheitsvolumen**

| Balken                                  | 2, 4, 8           | 5        | 11       | 1, 3, 6, 7, 9, 10, 12, 13, 14 |
|---|-------------------|----------|----------|-------------------------------|
| Beton                                   | EH <sup>1</sup> I | EH II    | EH III   | TB <sup>2</sup> I, TB II      |
| Mittl. Zylinderdruckfestigkeit $f_{cm}$ | 30 MPa            | 50 MPa   | 60 MPa   | 30 MPa                        |
| Größtkorndurchmesser $a_g$              | 8 mm              | 16 mm    | 16 mm    | 16 mm                         |
| Wassergewicht                           | 214,0 kg          | 193,4 kg | 193,4 kg | 174 kg                        |
| CEM II/A-LL 42,5 N                      | 334,4 kg          | 362,6 kg | 600,7 kg | 300 kg                        |
| Sand 0/2                                | 898,3 kg          | 629,5 kg | 584,3 kg | 882,2 kg                      |
| Kies 2/8                                | 851,6 kg          | 96,5 kg  | 89,6 kg  | 367,6 kg                      |
| Kies 8/16                               | 0 kg              | 964,7 kg | 895,5 kg | 588,2 kg                      |
| Fließmittel                             | 1,59 l            | 2,2 l    | 4,0 l    | 1,35 l                        |

Die Materialprüfungen erfolgten gemäß den einschlägigen Normen bzw. Richtlinien:

- Betondruckfestigkeit nach DIN EN 12390-3:2009-07
- Spaltzugfestigkeit nach DIN EN 12390-6:2009

<sup>1</sup> Eigene Herstellung

<sup>2</sup> Transportbeton

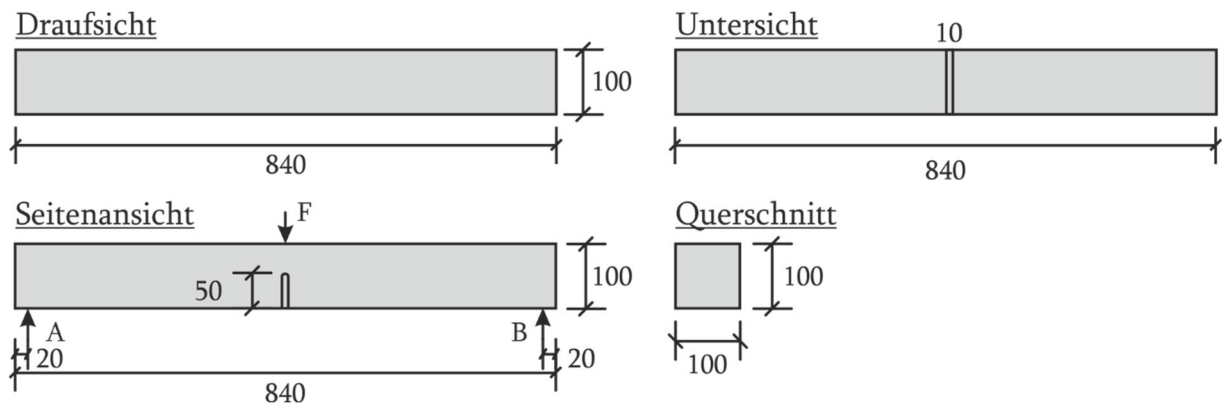
- E-Modul nach DIN EN 12390-13:2013
- Bruchenergie gemäß der RILEM Empfehlung (1985).

Es wurden je Materialparameter 3 Betonzylinder geprüft.

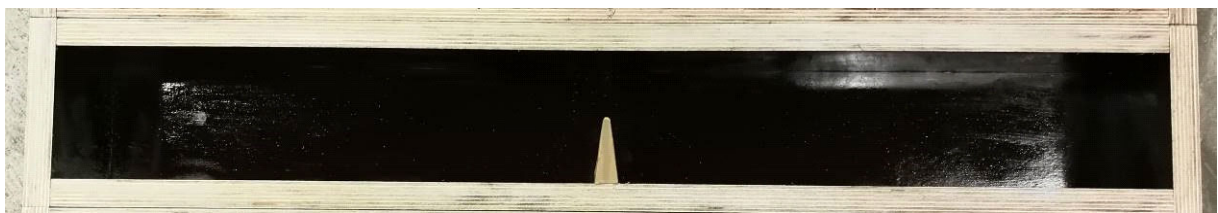
Die Materialprüfungen wurden am Institut für Massivbau der TUHH unmittelbar vor den Balkenversuchen durchgeführt. Die Lagerung der Betonzylinder und der Versuchskörper waren identisch. Eine detaillierte Zusammenstellung der Versuchswerte ist in Anlage A zu finden.

### 2.3.2 Bestimmung der Bruchenergie

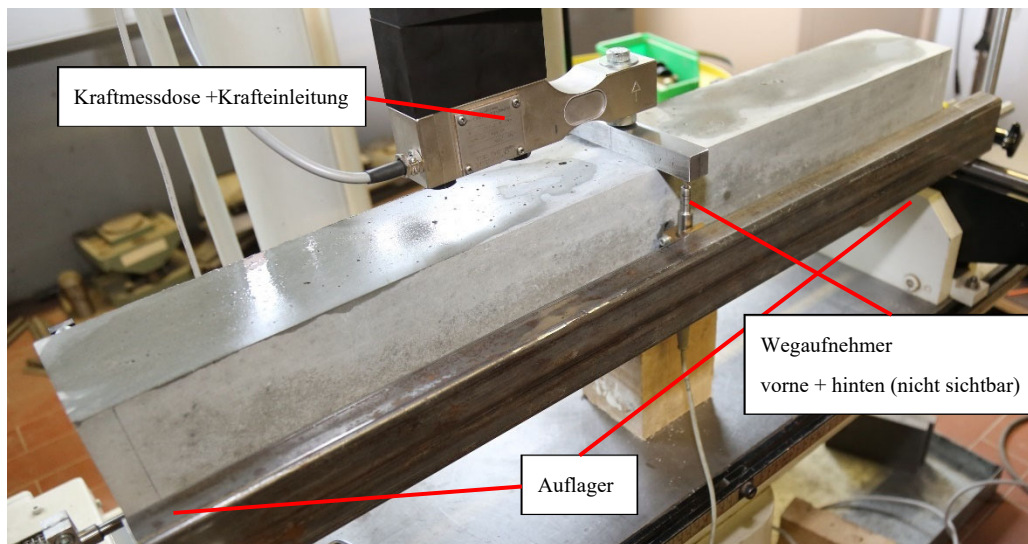
Die Ermittlung der Bruchenergie erfolgte an gekerbten Dreipunktbiegebalken gemäß der RILEM Recommendation (1985). Im Weiteren werden diese als ‚RILEM-Balken‘ bezeichnet. Die Abmessungen der Versuchskörper werden in Abhängigkeit des verwendeten Größtkorndurchmessers  $a_g$  gewählt. Bild 8 zeigt die Geometrie eines Balkens für  $a_g \leq 16$  mm. In Bild 9 ist die Schalung mit der Kerbung für einen RILEM-Balken dargestellt. Nach der Betonage der Versuchskörper werden die Balken für 28 Tage in Wasser gelagert und ca. 30 min vor Versuchsbeginn entnommen, sodass Schwindrisse möglichst vermieden werden. Der Versuchsaufbau ist Bild 10 zu entnehmen. Die feuchten Oberflächen des Balkens belegen die kürzliche Entnahme des Balkens aus dem Wasser.



**Bild 8** Abmessungen eines RILEM-Balkens für einen Dreipunktbiegeversuch [mm]



**Bild 9** Schalung für die RILEM-Balken (Draufsicht)



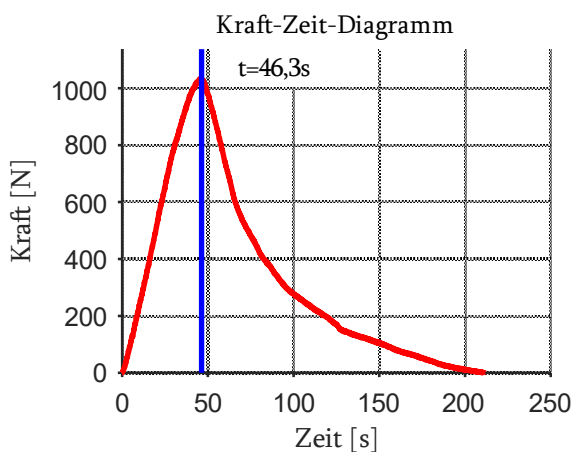
**Bild 10 Aufbau der RILEM-Versuche**

Die Versuche erfolgten weggesteuert. Die maximale Kraft wurde nach 30 s – 60 s erreicht. Exemplarisch wird er Versuch am Balken Nr. 5 aus Transportbeton TB I (s. Anlage A.1) erläutert. In Bild 11 ist das Kraft-Zeit-Diagramm dargestellt. Die Maximalkraft wurde nach 46,3 s erreicht und durch die blaue vertikale Linie gekennzeichnet. Damit ist die Voraussetzung für einen gültigen Versuch gegeben. Bild 12 stellt das Kraft-Verformungs-Diagramm dar. Bei einer Verformung von  $\delta_0 = 1,053 \text{ mm}$  trat das Versagen ein. Durch Integration des Kraft-Verformungs-Diagramms erhält man die verrichtete Arbeit  $W_0$ . Abschließend wird die Bruchenergie  $G_F$  mit folgender Formel ermittelt:

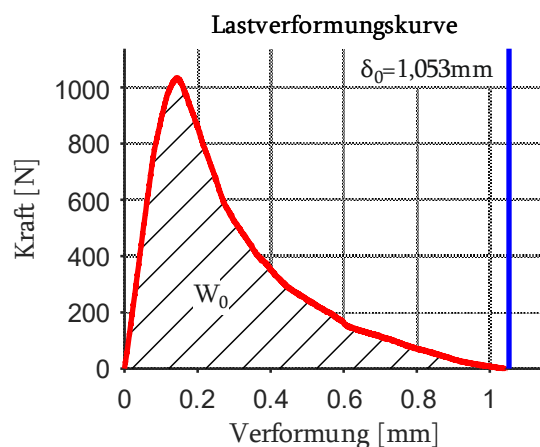
$$G_F = \frac{W_0 + m \cdot g \cdot \delta_0}{A_{\text{lig}}} \quad (1)$$

- mit:
- $W_0$  Fläche unter dem Lastverschiebungsdiagramm
  - $m \cdot g$  Eigengewicht des Balkens
  - $\delta_0$  Durchbiegung nach Versuchsende
  - $A_{\text{lig}}$  Ligamentfläche (Fläche des Ausgangsrestquerschnitts)

Die bestimmten Werte für die Bruchenergie  $G_F$  können der Anlage A entnommen werden.



**Bild 11 F-t-Diagramm TB I Balken Nr. 5**



**Bild 12 F-w-Diagramm TB I Balken Nr. 5**

### 2.3.3 Kornvolumen der Betonmischungen

Die Berechnung des Verhältnisses des Kornvolumens  $V_{s+k}$  zum Gesamtvolumen  $V_{ges}$  des Betons wird für die Berechnung der übertragenen Spannungen in Rissen nach Walraven (1981) benötigt.

**Tabelle 3 Dichten der Betonzusammensetzung**

|                    |                         |
|--------------------|-------------------------|
| Wasser             | 1.000 kg/m <sup>3</sup> |
| CEM II/A-LL 42,5 N | 3.000 kg/m <sup>3</sup> |
| Sand 0/2           | 1.500 kg/m <sup>3</sup> |
| Kies               | 1.700 kg/m <sup>3</sup> |

**Tabelle 4 Betonmischungen mit Volumenangaben und Kornanteil**

| Balken Nr.                | 2, 4, 8              | 5                    | 11                   | 1, 3, 6, 7, 9,<br>10, 12, 13, 14 |
|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|
| Wasser                    | 214,0 kg             | 193,4 kg             | 193,4 kg             | 174,0 kg                         |
|                           | 0,214 m <sup>3</sup> | 0,193 m <sup>3</sup> | 0,193 m <sup>3</sup> | 0,174 m <sup>3</sup>             |
| CEM II/A-LL 42,5 N        | 334,4 kg             | 362,6 kg             | 600,7 kg             | 300,0 kg                         |
|                           | 0,111 m <sup>3</sup> | 0,121 m <sup>3</sup> | 0,200 m <sup>3</sup> | 0,100 m <sup>3</sup>             |
| Sand 0/2                  | 898,3 kg             | 629,5 kg             | 584,3 kg             | 882,2 kg                         |
|                           | 0,599 m <sup>3</sup> | 0,420 m <sup>3</sup> | 0,390 m <sup>3</sup> | 0,588 m <sup>3</sup>             |
| Kies 2/8                  | 851,6 kg             | 96,5 kg              | 89,6 kg              | 367,6 kg                         |
|                           | 0,501 m <sup>3</sup> | 0,057 m <sup>3</sup> | 0,053 m <sup>3</sup> | 0,216 m <sup>3</sup>             |
| Kies 8/16                 | 0 kg                 | 964,7 kg             | 895,5 kg             | 588,2 kg                         |
|                           | 0 m <sup>3</sup>     | 0,567 m <sup>3</sup> | 0,527 m <sup>3</sup> | 0,346 m <sup>3</sup>             |
| Fließmittel               | 1,59 l               | 2,2 l                | 4,0 l                | 1,35 l                           |
|                           | 0,002 m <sup>3</sup> | 0,002 m <sup>3</sup> | 0,004 m <sup>3</sup> | 0,001 m <sup>3</sup>             |
| Kornvolumen $V_{s+k}$     | 1,1 m <sup>3</sup>   | 1,044 m <sup>3</sup> | 0,97 m <sup>3</sup>  | 1,15 m <sup>3</sup>              |
| Gesamtvolumen $V_{ges}$   | 1,427 m <sup>3</sup> | 1,36 m <sup>3</sup>  | 1,367 m <sup>3</sup> | 1,425 m <sup>3</sup>             |
| $p_k = V_{s+k} / V_{ges}$ | <b>0,771</b>         | <b>0,768</b>         | <b>0,710</b>         | <b>0,807</b>                     |

Für die Berechnung der übertragenen Spannungen im Riss wird vereinfachend  $p_k$  zu 0,8 gesetzt. Dieser Wert stellt nach Walraven (1981) eine Konstante für Standardbeton dar.

### 2.3.4 Betonstahl

Die mechanischen Eigenschaften des Betonstahls werden nach DIN EN ISO 15630-1: 2011-02 und DIN EN ISO 6892-1:2009 ermittelt. Für jeden Durchmesser werden mindestens drei Proben angefertigt und getestet. Die Bügel und Längsstäbe entsprechen der Güteklasse B500 mit der Duktilitätsklasse B. Die Versuche werden am Institut für Massivbau der TUHH durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Anlage C aufgeführt.

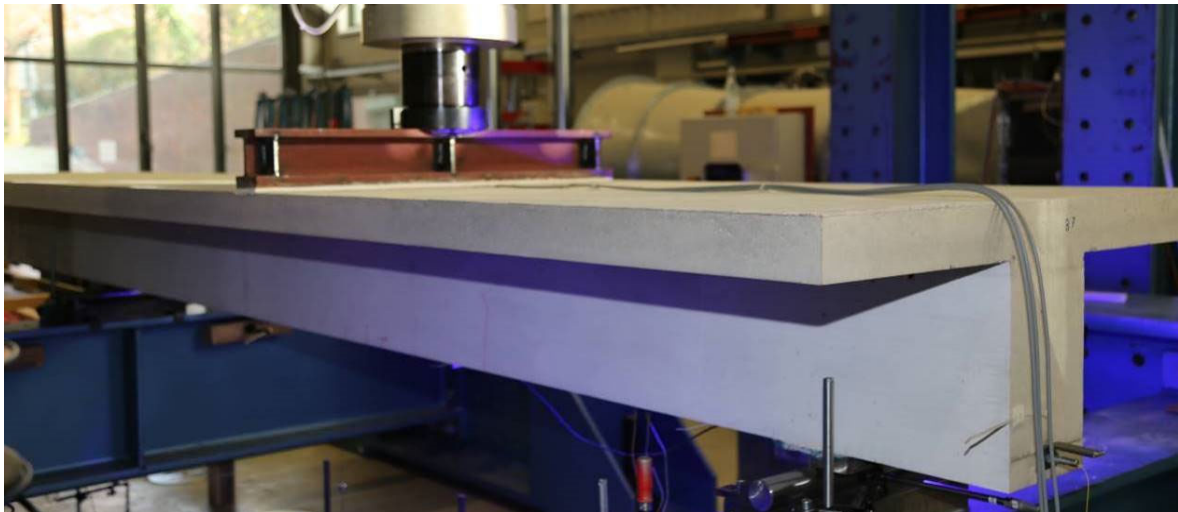
### 3 Versuchsstand

Nachstehend werden die Versuchsaufbauten für die Balken dargestellt und beschrieben.

#### 3.1 Querkraftversuche

Die wesentlichen Parameter der Querkraftversuche sind in Tabelle 1 zusammengefasst. die realen Baustoffkennwerte sind Anlage A zu entnehmen. Es liegt das statische System eines einfachen Einfeldträgers (Bild 13) vor, welcher zwängungsfrei über Stahlplatten auf Rollen (Bild 14) aufgelagert ist. Die Auflagerbreite beträgt 15 cm.

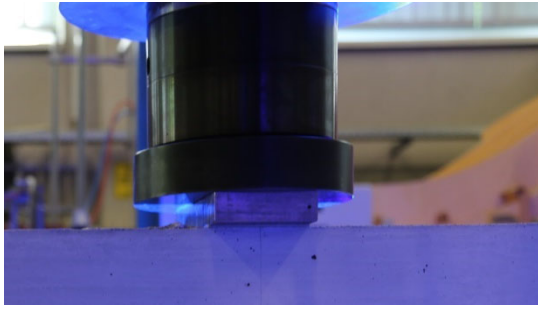
Die Belastung auf den Balken erfolgt durch eine hydraulische Presse über einen 10 cm breiter Flachstahl (Bild 15). Bei den breiteren Balken (B3 - B9) wurde zwischen Presse und Flachstahl ein Stahlträger HEM 100 mit eingeschweißten Steifen angeordnet (Bild 16), um eine konstante Last über die gesamte Breite einzuleiten. Des Weiteren erfolgt die Belastung nicht in Feldmitte, sondern exzentrisch mit einer Schubschlankheit  $a_v/d$  von näherungsweise 3.



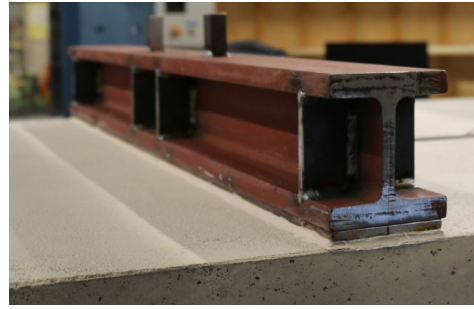
**Bild 13 Versuchsaufbau des Plattenbalkens B6**



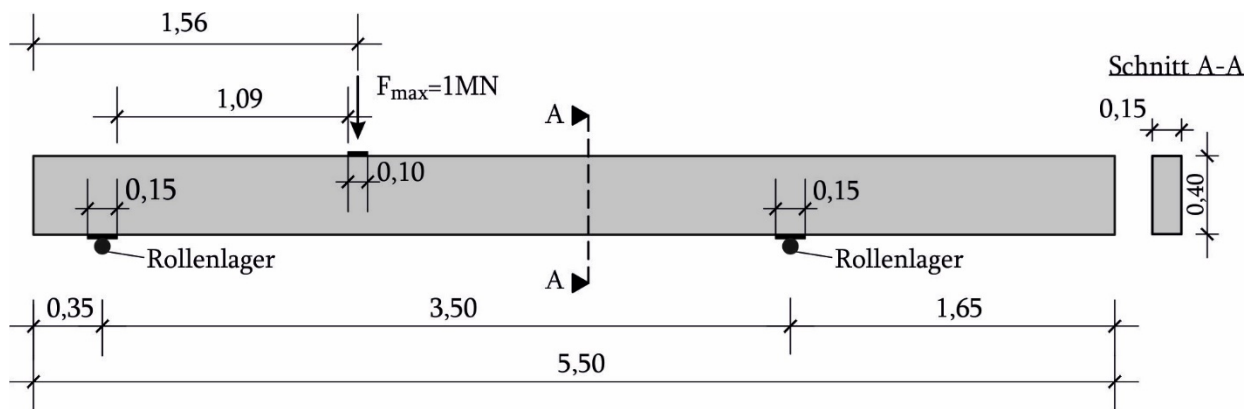
**Bild 14 Auflager der Querkraftversuche**



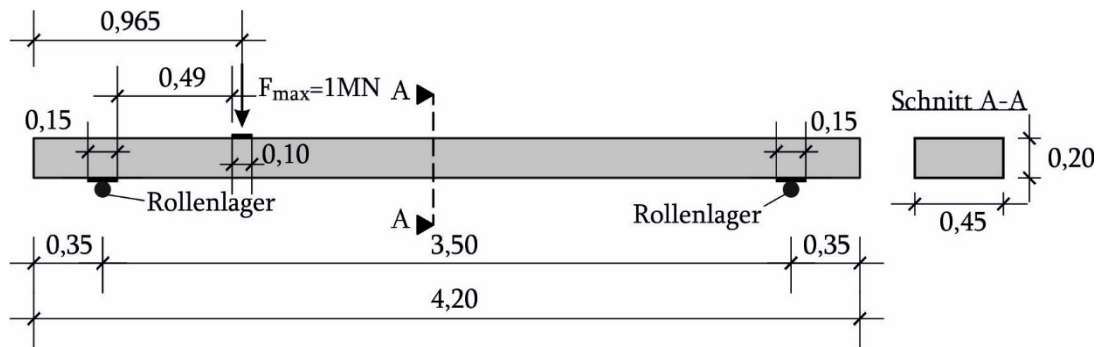
**Bild 15 Flachstahl zwischen Presse und Versuchskörper**



**Bild 16 Lasteinleitung der Querkraftversuche**



**Bild 17 Lastanordnung beim Balken B1-I und B2-I (Balkentyp I)**

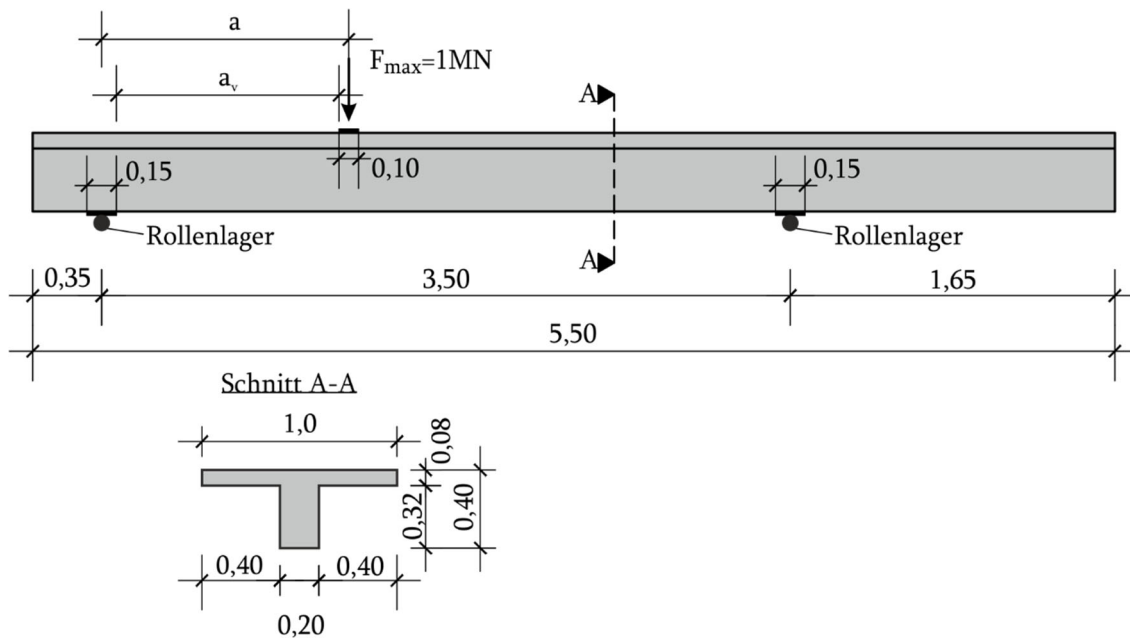


**Bild 18 Lastanordnung beim Balken B3-I bis B5-I (Balkentyp II)**

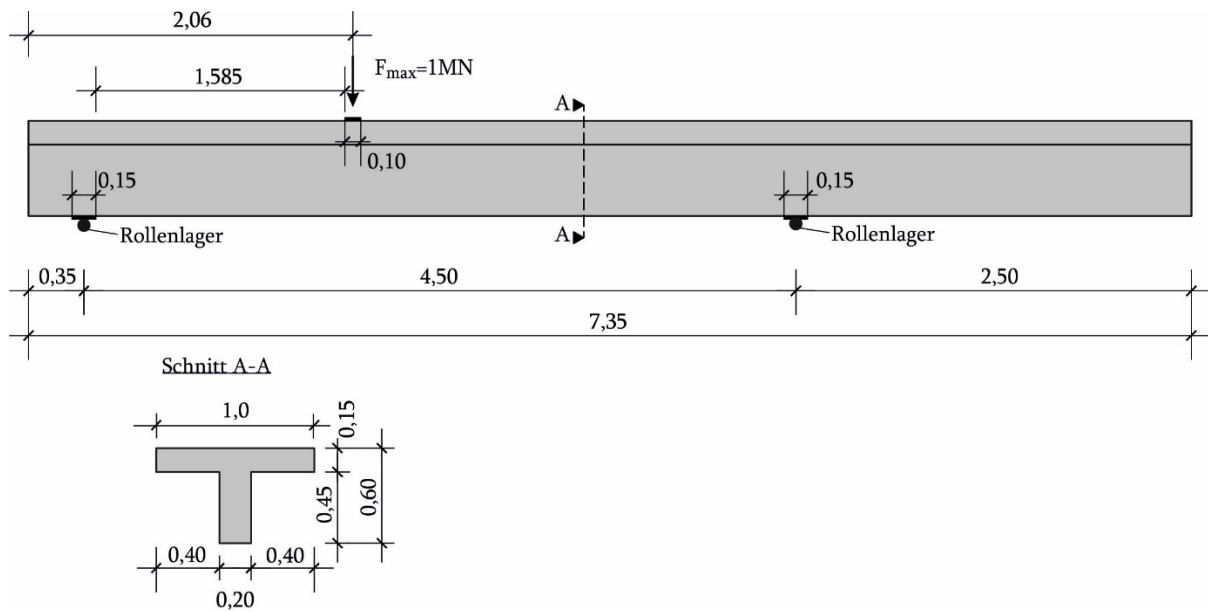
B6:  $a_v = 0,99\text{m}$ ,  $a = 1,115\text{m}$

B7:  $a_v = 1,09\text{m}$ ,  $a = 1,215\text{m}$

B8:  $a_v = 1,09\text{m}$ ,  $a = 1,215\text{m}$



**Bild 19 Lastanordnung beim Balken B6-I bis B8-I (Balkentyp III)**



**Bild 20 Lastanordnung beim Balken B9-I (Balkentyp IV)**

### 3.2 Torsionsversuche

Der Versuchsaufbau ist in Bild 21 dargestellt. Die Balken sind vertikal gelagert. Am Auflager A, welches sich ca. 50 cm vom Balkenende befindet, wird der Balken in einen starren Stahlrahmen eingespannt. Um Verdrehungen und Verschiebungen zu verhindern, erfolgt eine horizontale Festhaltung mittels einer Gewindestange (Bild 22). Am anderen Ende des Balkens wird das Torsionsmoment über einen Stahlrahmen eingeleitet. An diesem Stahlrahmen befinden sich auf beiden Seiten ein „Hebel“, an welchem 2 Pressen angeschlossen werden (Bild 23), welche immer betragsmäßig gleich große Kräfte aber in entgegengesetzten Richtungen aufweisen. Im Balkenschwerpunkt wird ein Festlager in Form eines Bolzens angeordnet, der in den Balken geführt wird und lediglich Verdrehungen in Achsrichtung zulässt. Zusätzlich wird an den Stahlrahmen zur Lasteinleitung eine Stirnplatte befestigt, durch die der Bolzen durchgeführt wird (Bild 24). Aufgrund dieses Versuchsaufbaus wird der Stahlbetonbalken planmäßig nur durch ein Torsionsmoment (keine Querkräfte) belastet.

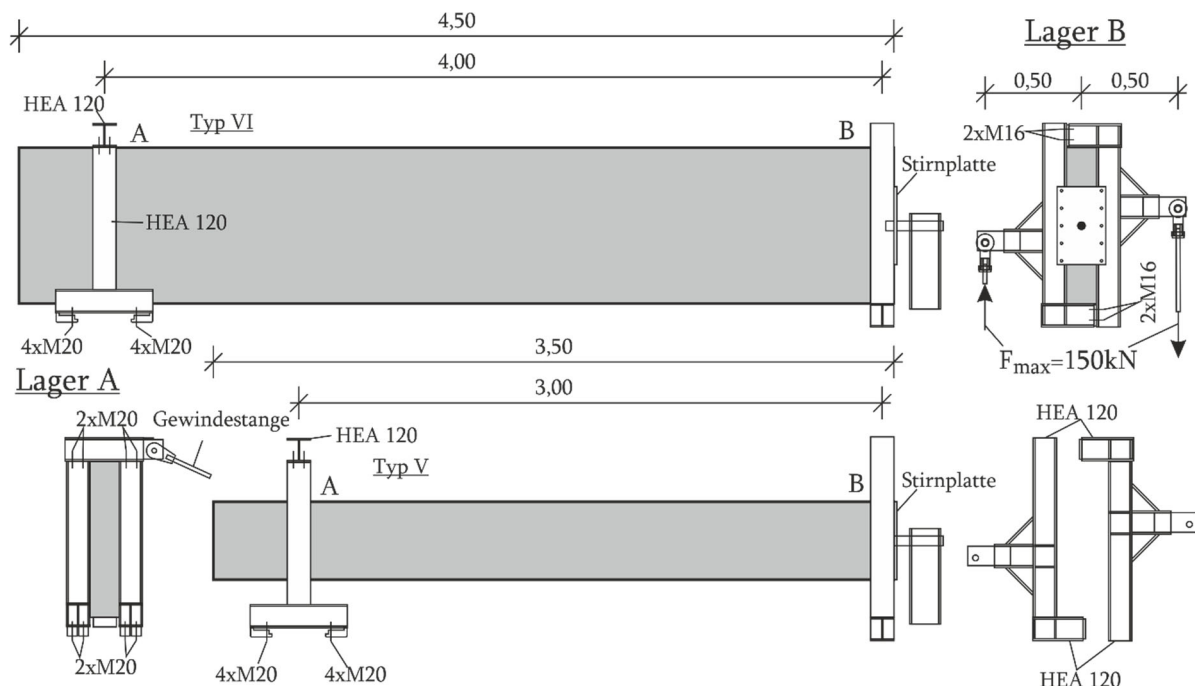
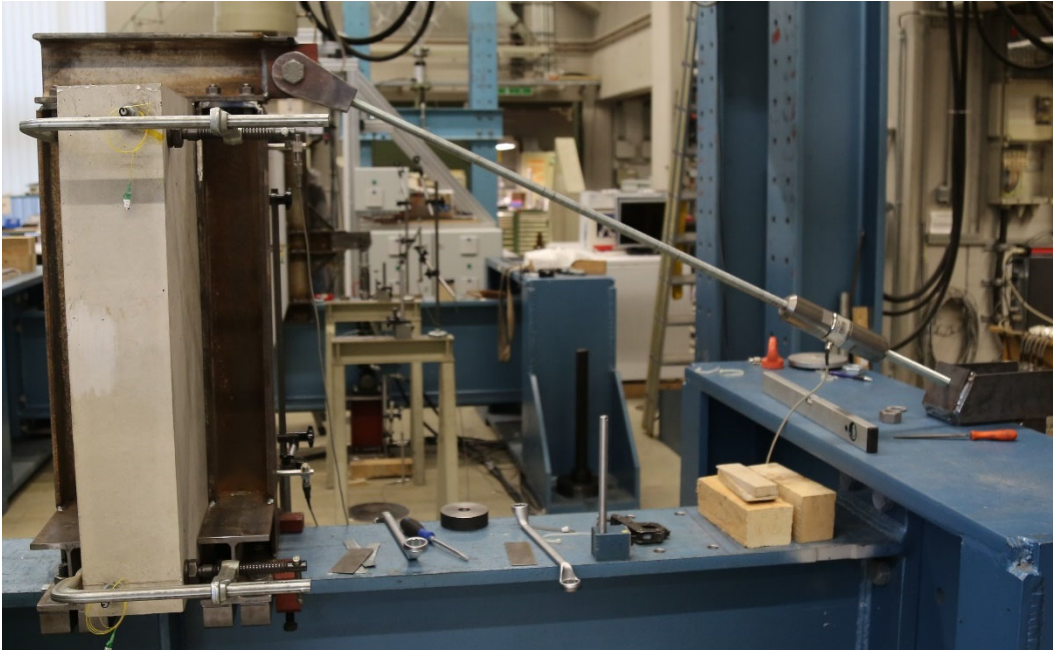
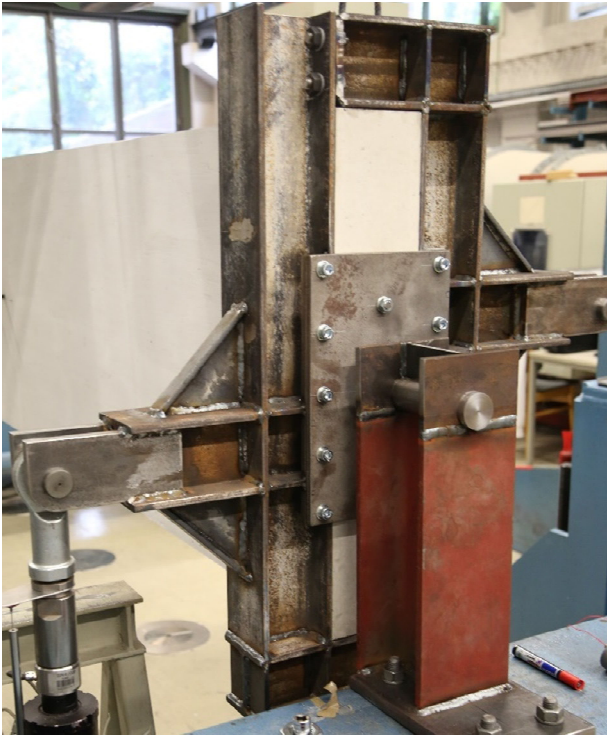


Bild 21 Versuchsanordnung für die Torsionsversuche (Balken B10-B14)



**Bild 22** Stahlrahmen mit horizontaler Festhaltung - Lager A



**Bild 23** Lager B - Drehlager



**Bild 24** Stirnplatte und Bolzen am Lager B

## 4 Messtechnik

In diesem Kapitel wird die verwendete Messtechnik beschrieben und beispielhaft dargestellt.

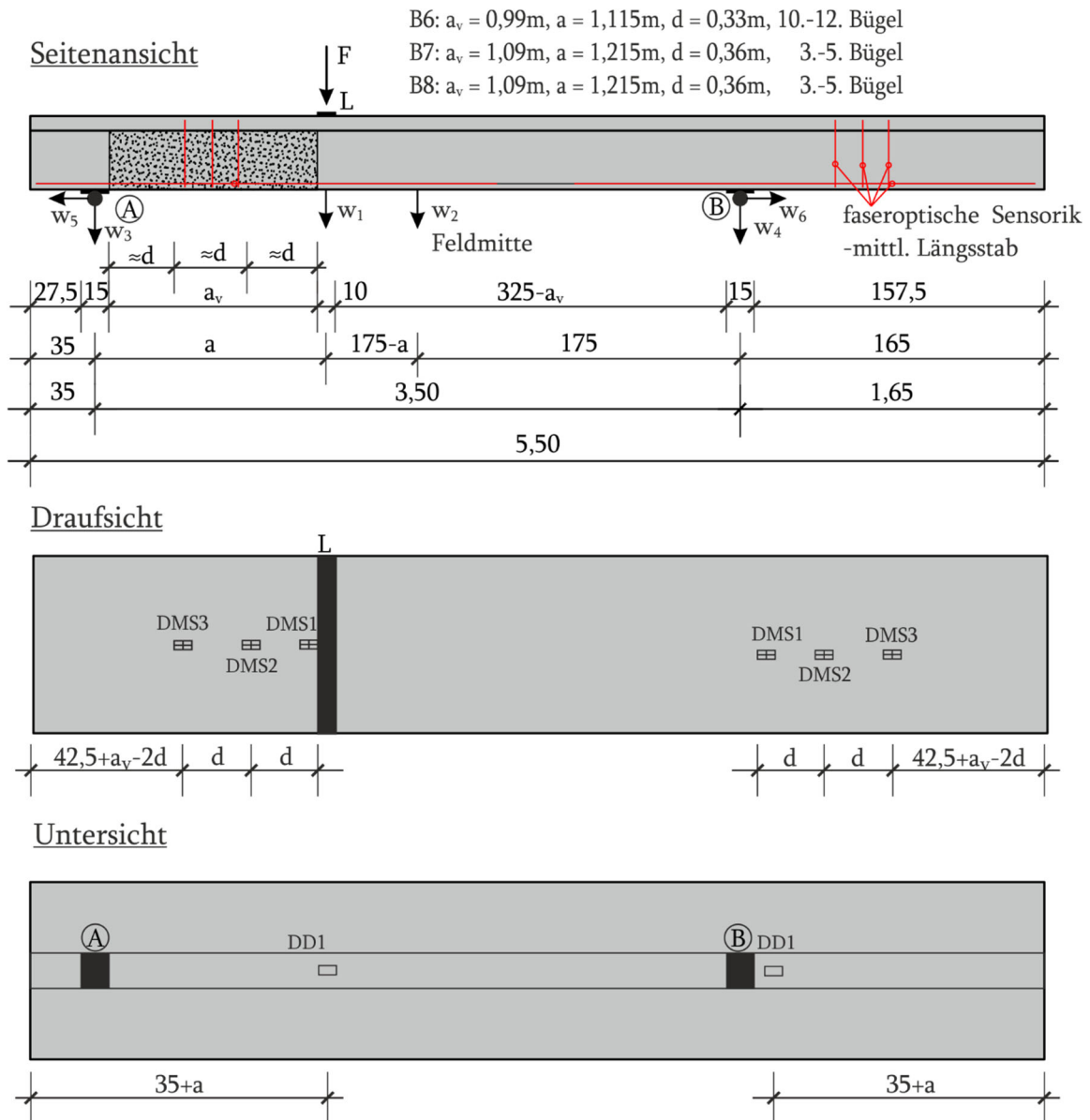
Das Verhalten der Versuchsbalken soll möglichst umfänglich aufgezeichnet werden. Dafür stehen moderne Messmethoden, wie die photogrammetrische Messung der Verformungen der Betonoberfläche und die faseroptische (kontinuierliche) Messung der Dehnungen in den Bewehrungsstäbe, zur Verfügung. Dem stehen die klassischen Messmethoden zur Seite, um die Ergebnisse zu ergänzen und zu validieren.

In den folgenden Bildern 24 und 25 ist der Messaufbau für die Querkraftversuche exemplarisch am Balkentyp III und für die Torsionsversuche am Balkentyp VI dargestellt. Die anschließenden Kapitel beschreiben die Positionen der Messelemente bei den jeweiligen Versuchen.

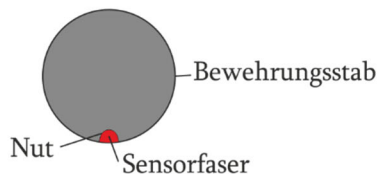
### 4.1 Wegaufnehmer und Kraftmessdosen

Die Durchbiegungen der Versuchskörper wird mittels induktive Wegaufnehmer unterhalb der Lasteinleitung  $w_1$  und in Balkenmitte  $w_2$  gemessen. Des Weiteren werden die Verformungen der Auflager A und B in vertikaler ( $w_3$ ,  $w_4$ ) und in horizontaler Richtung ( $w_5$ ,  $w_6$ ) kontinuierlich aufgenommen. Die Verdrehung der Balken wird ebenfalls mittels induktive Wegaufnehmer kontinuierlich aufgezeichnet. Außerdem werden die Pressenkraft und der Pressenweg gemessen.

Das am Balkenende eingeleitete Torsionsmoment ergibt sich aus den beiden Pressenkräften am Balkenende multipliziert mit dem jeweiligen Hebelarm. Die Aufzeichnung der Verdrillung des Balkens an den Positionen A, S und B (Bild 26) erfolgt mit je zwei Wegaufnehmern. Diese befinden sich 5 cm vom oberen und unteren Rand entfernt und messen kontinuierlich die horizontale Verformung des Balkens.



Faseroptische Messung (nicht maßstabsgetreu)



- PI-beschichtete SM-Faser in Nut einkleben.
- Zwischen Bügel und Längsbewehrung Schaumstoff o.ä. anrödeln
- Ausführung am Balkenende

**Bild 25 Anordnung von Messelementen bei Querkraftversuchen (Balken Nr. 6-8, Balkentyp III)**

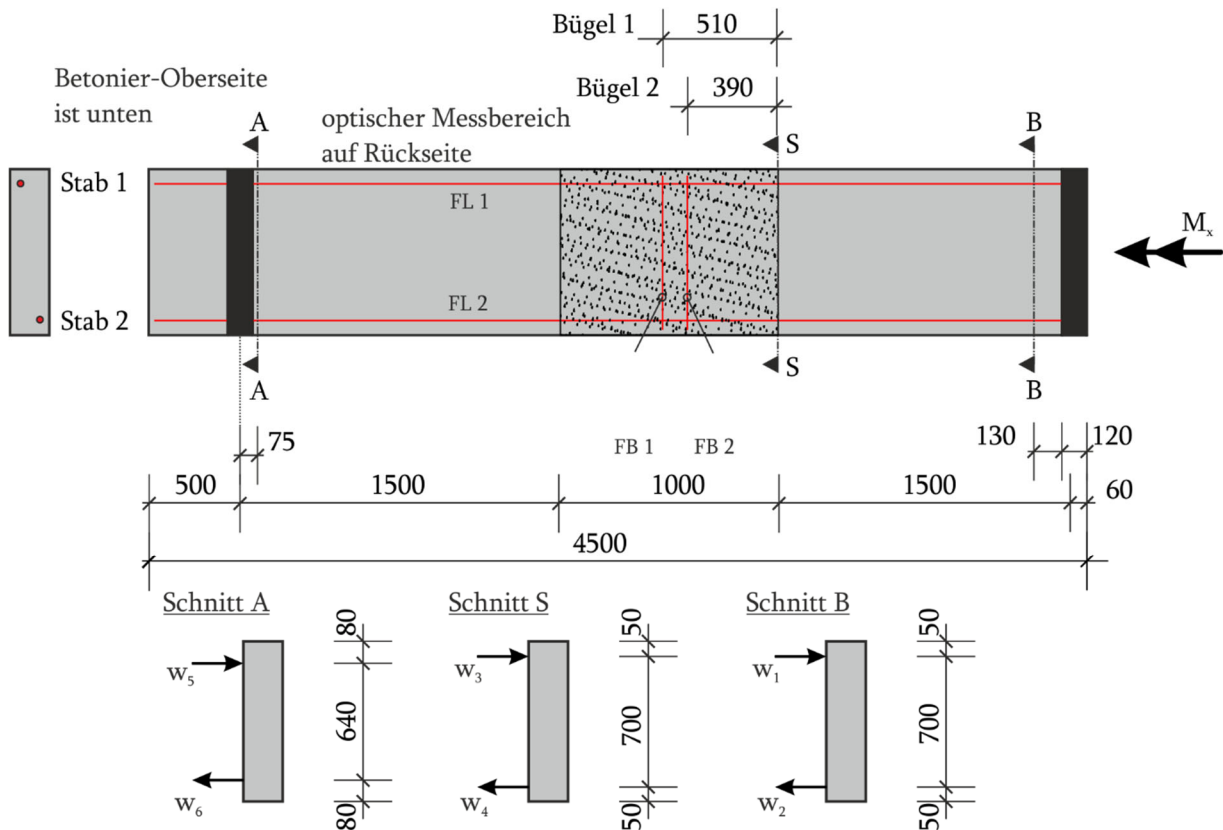


Bild 26 Anordnung von Messelementen bei Torsionsversuchen (Balken Nr. 14, Balkentyp VI)

#### 4.2 Photogrammetrie

Für die Messung des Verformungsstandes der Oberfläche der Stahlbetonbalken wird die Messmethode der Photogrammetrie verwendet. Es kommt das optische 3D-Messsystem ‚ARAMIS Adjustable‘ der Firma GOM zum Einsatz. Die Auswertung der Messdaten erfolgt mit der Software ‚ARAMIS Professional‘, Version 2020 (Hotfix 5, Rev. 139680).

Der schematische Aufbau des Messsystems kann Bild 27 entnommen werden. In dem darauffolgenden Bild 28 ist der reale Aufbau dargestellt. Der Messbereich wird gemäß der Erwartung eines Biegeschubversagens ausgewählt, der für die Querkraftversuche zwischen der Lasteinleitung und dem nächstgelegenen Auflager liegt (Bild 25). Bei den Torsionsversuchen wird der Bereich mittig zwischen der Lasteinleitung und dem Auflager gewählt, da eine Prognose über den Versagensort nicht getroffen werden kann (Bild 26).

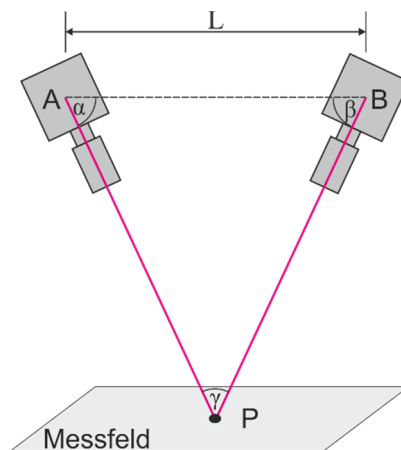
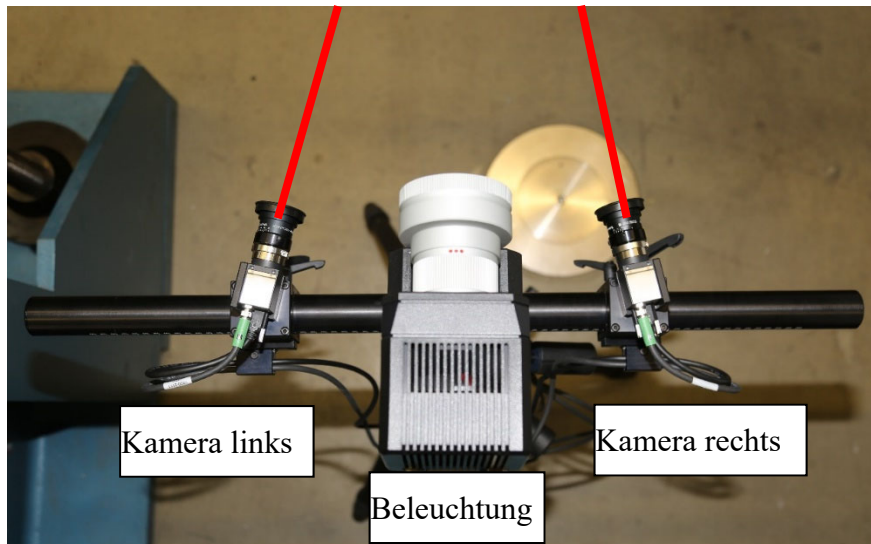


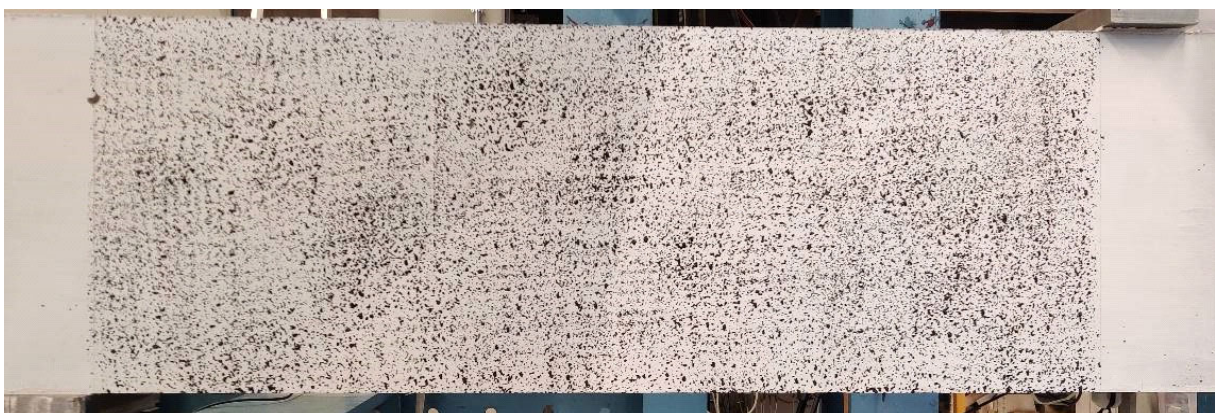
Bild 27 Anordnung/Aufbau des optischen Messsystems (GOM GmbH 2020)



**Bild 28** Aufbau des photogrammetrischen Messsystems

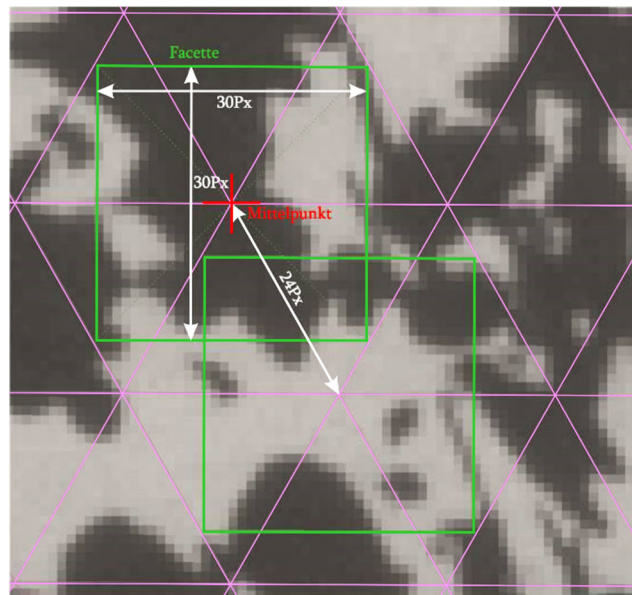
Vor der Messung erfolgt die Kalibrierung der beiden Kameras. Zum einen werden die intrinsischen Kameraparameter definiert. Darunter fallen das verwendete Kameramodell und das Objektiv. Diese Parameter werden angegeben und programmintern kalibriert, um beispielsweise Verzeichnungen zu berücksichtigen. Zum anderen müssen die extrinsischen Kameraparameter definiert werden. Dafür wird die Position der Kameras im Raum und untereinander kalibriert, wie in Bild 27 dargestellt, und des Weiteren die Blende als auch die Schärfte eingestellt.

Um eine optische Messung durchzuführen, in der eine Fläche untersucht werden soll, ist es notwendig ein eindeutiges optisches Signal zu erzeugen. Dies geschieht in Form eines stochastischen Musters (= zufälliges Muster) auf der Balkenoberfläche, wie im Messbereich in Bild 25 oder im Realen in Bild 29 zu sehen ist. Durch das Aufbringen eines stochastischen Musters sollen Messpunkte, genannt Facetten, erzeugt werden, welche nur einmal in dem Messfeld auftreten. Dies wird bei den einzelnen Facetten durch das Zusammenfassen von Pixeln zu Gruppen erreicht (Bild 30, grünes Quadrat). Die Grauwertverteilung des Musters erzeugt ein Signal zur weiteren Verarbeitung. Für eine optimale Aufnahme werden die maximale Amplitude und eine gewisse Anzahl von Amplituden benötigt, die gleichbedeutend mit maximalem Kontrast und mehreren Schwarz-Weiß-Übergängen sind.



**Bild 29** Stochastisches Muster auf der Betonoberfläche

Die Auswertung erfolgt jeweils im Mittelpunkt der Facetten. Während einer Referenzmessung im unbelasteten Zustand werden die Facetten erzeugt und daraufhin deren 3D-Koordinaten berechnet. Wird der Versuchskörper belastet, werden die Facetten verschoben und verzerrt. Die Identifikation der Facetten erfolgt durch die digitale Bildkorrelation. Dieser Prozess wird als Matching bezeichnet. Die Grundannahme ist, dass ein Zusammenhang zwischen der unverformten und verformten Facette besteht. Dies wird durch die Korrelationsfunktion angegeben, die die Ähnlichkeit der beiden Signale angibt, also der Facetten im unbelasteten sowie im belasteten Zustand. Durch die Definition der Facettengröße und des Suchbereichs ist der Software das Wiederfinden einer Facette möglich. Dabei erreicht die Korrelationsfunktion ihr Maximum.



**Bild 30 Facette mit einer Größe von 30x30 Pixeln und einem Punktabstand von 24 Pixeln**

Für die spätere Auswertung ist es sinnvoll, vor dem Versuch eine Messung durchzuführen. Damit kann das Messrauschen aufgezeichnet und in der späteren Auswertung berücksichtigt werden. Denn mit abnehmender Größe und vor allem Abstand der Facetten nimmt das Messrauschen aber auch die Genauigkeit der Messung zu.

Der Standardwert für die Facettengröße beträgt 19 Pixel und für den Punktabstand 16 Pixel. Abweichungen zu diesen Größen haben Auswirkungen auf die Berechnungen und Ergebnisse, welche in der Tabelle 5 und 6 stichwortartig zusammengefasst sind.

**Tabelle 5 Auswirkungen der Facettengröße (GOM GmbH 2020)**

| Facettengröße                | Standard: 19 Pixel   |
|------------------------------|--|
| Facette größer als Standard  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Längere Berechnungszeit</li> <li>• Schlechtere Erfassung lokaler Effekte</li> <li>• Bessere Koordinatenmessgenauigkeit</li> </ul> |
| Facette kleiner als Standard | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kürzere Berechnungszeit</li> <li>• Bessere Erfassung lokaler Effekte</li> <li>• Schlechtere Koordinatenmessgenauigkeit</li> </ul> |

**Tabelle 6 Auswirkungen des Punktabstands (GOM GmbH 2020)**

| Punktabstand                      | Standard: 16 Pixel   |
|-----------------------------------|--|
| Punktabstand kleiner als Standard | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhere Messpunktdichte</li> <li>• Längere Berechnungszeit</li> <li>• Bessere Erfassung lokaler Effekte</li> </ul>         |
| Punktabstand größer als Standard  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Niedrigere Messpunktdichte</li> <li>• Kürzere Berechnungszeit</li> <li>• Schlechtere Erfassung lokaler Effekte</li> </ul> |

Durch das vollflächige stochastische Muster kann der Verformungszustand des Bauteils detailliert und mit einer hohen Auflösung analysiert werden. Somit ist die frühzeitige Lokalisierung von Rissen während der Belastungsphase möglich. Die photogrammetrische Messung entspricht daher vieler lokaler richtungsunabhängiger Dehnungsmessstreifen, identisch zu Rosetten-Dehnungsmessstreifen (DMS).

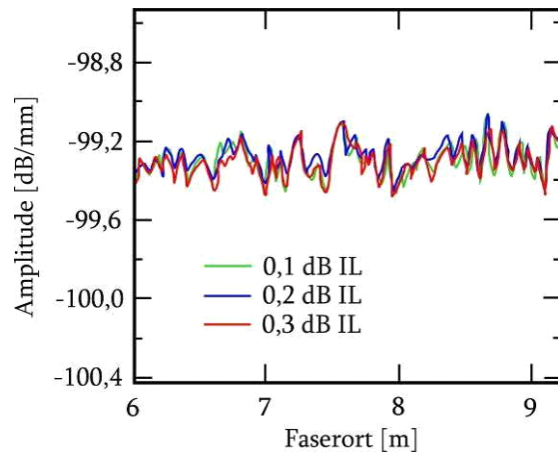
Das Ergebnis der optischen Messung sind Isoflächen der Verschiebungen, woraus sich Dehnungen ableiten lassen. Außerdem können die Linien einer numerischen Berechnung gegenübergestellt werden. Damit stellt die optische Messung eine vielversprechende Methode für die Untersuchung der Risskinematik dar (GOM GmbH 2020).

#### **4.3 Faseroptische Messung der Bewehrungsstäbe**

Das Dehnungsverhalten der Längs- und Bügelbewehrung wurde mithilfe faseroptischer Sensorik während des gesamten Belastungsablaufs kontinuierlich gemessen. Hierzu wurde eine Glasfaser auf dem mittleren Längsbewehrungsstab appliziert. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass die Dehnungen des höchst belasteten Stabes aufgenommen werden. Die Glasfasern sind zur Balkenunterseite orientiert, da die Belastung in der äußeren Faser der Längsbewehrung maximal wird (Bild 25 unten). Außerdem waren die empfindlichen Glasfasern so vor Beschädigungen beim Betonieren besser geschützt. Zusätzlich wurden bei den querkraftbewehrten Plattenbalken auf drei Bügeln zwischen der Lasteinleitung und dem Auflager Glasfasern appliziert.

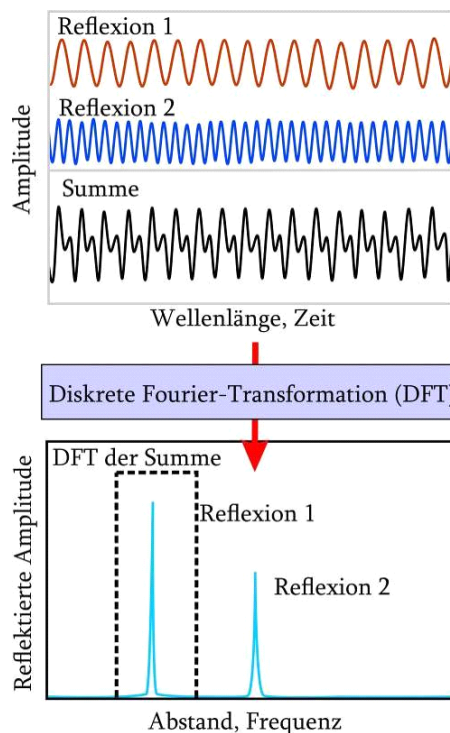
Bei den Torsionsversuchen wurden zwei Bügel im Bereich des photogrammetrischen Messfeldes mit Glasfasern bestückt. Weiterhin wurden von zwei Längsstäben die Stahldehnungen gemessen. Letztere lagen am Rand, da in diesem Bereich die Dehnungsänderungen infolge der Verdrillung am größten sind (Bild 26) (Zedler 2011).

Es wurden Glasfasern mit einem Durchmesser von 9 µm geschützt durch eine Polyimid-Beschichtung in eine eingefräste Nut des Bewehrungsstabes geklebt. Dadurch ließen sich die Längenänderung der Bewehrung messen. Die „Sensoren“ der Glasfaser bestehen aus einzelnen Segmenten. Diese besitzen bestimmte Charakteristika beim reflektieren des Laserstrahls, die auf Inhomogenitäten des Glases zurückzuführen sind. Bei einer Messung der Glasfaser ergibt sich, bei konstanten Bedingungen, ein Referenzmuster, das als Rayleigh-Muster bezeichnet wird (Bild 31).



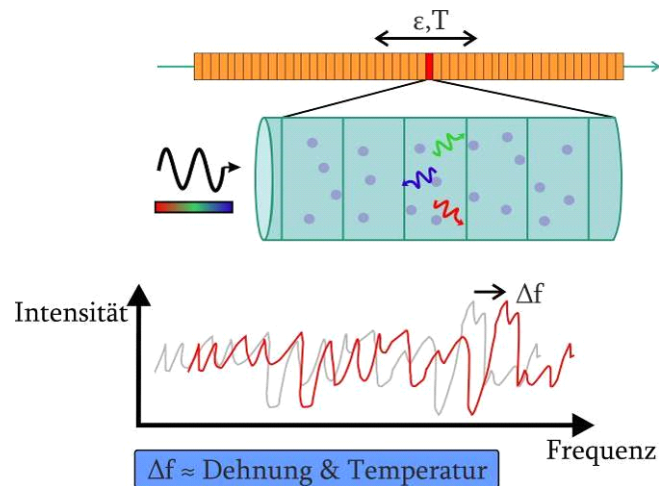
**Bild 31 Verlauf des Rayleigh Rückstreuungssignals (Samiec 2011)**

Für die Bestimmung des Faserortes, bzw. Segmentes, wird ein kohärentes Frequenzbereichs-reflektometer (engl. Coherent Optical Frequency Domain Reflectometer = cOFDR) verwendet, welches einen Laserstrahl in die Glasfaser abgibt. Dieses Licht wird von den Segmenten reflektiert und die Summe aller Reflexionen wird aufgezeichnet. Mit Hilfe einer Fourier-Transformation besteht die Möglichkeit die Reflexionen der einzelnen Segmente zu bestimmen, wobei mit zunehmendem Abstand des Segmentes zum „Sensor“ die Frequenz der Reflexion zunimmt. Dadurch ist es möglich den Ort eines Segmentes einer Frequenz zuzuordnen (Bild 32).



**Bild 32 Fourier Transformation der Messdaten (Samiec 2011)**

Die Segmente entsprechen Auswertefenstern von  $\geq 1$  mm, in denen die Signale, bzw. das Muster, mittels einer diskreten Fourier-Transformation in den Frequenzbereich transformiert wird. Liegt nun eine Dehnungsänderung vor, so wird das Frequenzmuster proportional zur Dehnung verschoben (Bild 33). Dadurch lässt sich die Frequenzänderung in eine Dehnungsänderung umrechnen.

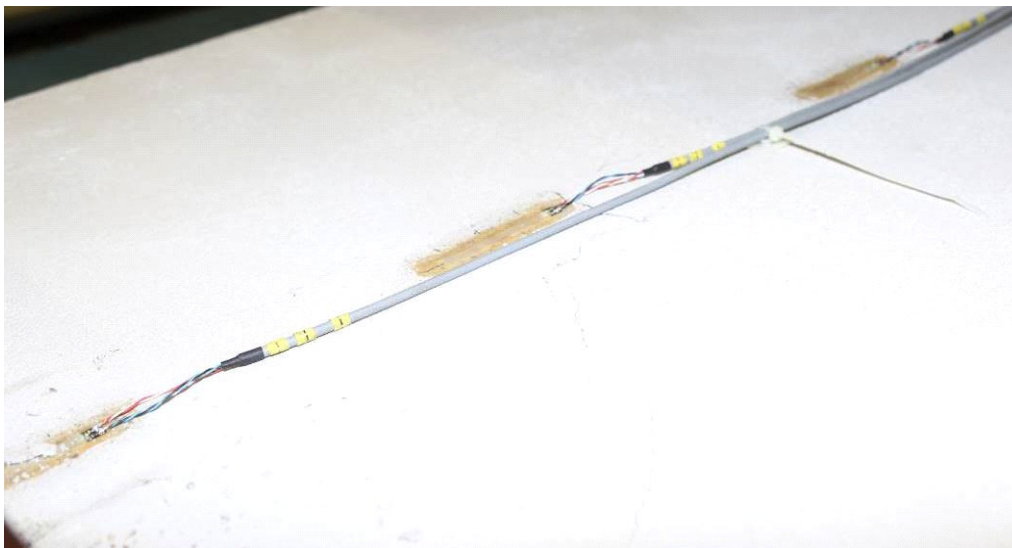


**Bild 33 Frequenzverschiebung im Auswertefenster durch äußere Einflüsse (Samiec 2011)**

Mit der Glasfaser ist es möglich durch Überlappung der Auswertefenster eine Auflösung von 0,65 mm zu erreichen und somit quasi-kontinuierlich zu messen (Konertz et al. (2019)). Die Standardglasfaser kann eine Dehnung von bis zu 30 % ertragen und reagiert bereits ab einer Dehnung von  $1 \mu\text{m/m}$  ( $\cong 0,001 \text{ ‰} = 1\mu\epsilon$ ). Des Weiteren ist es möglich alle Sensoren der Glasfaser simultan mit einer Rate von 5 Hz auszulesen (Samiec 2011).

#### **4.4 Dehnmessstreifen an der Betondruckzone (DMS) und Stahldehnungsmesser (DD1)**

Bei den Querkraftversuchen wurden im Bereich zwischen der Lasteinleitung und Auflager A drei Dehnmessstreifen (DMS1-DMS3) auf der Oberseite der Versuchskörper zur Messung der Betondruckdehnung angeordnet (Bild 34, Lage siehe Bild 25). Die erste DMS liegt direkt an der Lasteinleitung und dient zur Aufnahme der Dehnung im Bereich des maximalen Moments. Für die Aufzeichnung der Druckdehnung am Ort des möglichen Versagensrisses wurden im Abstand von  $d$  zwei weitere DMS angeordnet. Bei jedem Versuch wurde, wie auch bei der optischen Sensorik, die Längsbewehrung an der maximal belasteten Stelle, d.h. unterhalb der Lasteinleitung mit einem DD1 Dehnungsmesser bestückt (Bild 35).



**Bild 34 DMS auf der Oberseite eines Plattenbalkens**



**Bild 35 DD1 unterhalb der Lasteinleitung**

## 5 Versuchsbeschreibung

Im Folgenden wird die Versuchsdurchführung beschrieben.

Zur Bestimmung der Belastungsgeschwindigkeit muss vorab eine Abschätzung der Versagenslasten erfolgen. Hierfür wurden stofflich nichtlineare numerische Berechnungen mit der FE-Software „ATENA“ der Fa. Červenka Consulting durchgeführt.

### 5.1 Versuchsablauf

#### Querkraftversuche

Die Querkraftversuche wurden bis 50 – 75 % der theoretischen Maximallast mit 0,83 kN/s kraftgesteuert belastet. Anschließend folgte bis zum Versuchsende eine weggesteuerte Belastung mit 0,025 mm/s.

Zum Anzeichnen der Risse wurden Belastungspausen eingeplant, die in der Regel in den Viertelschritten in Bezug zur Maximallast lagen. Beispielhaft ist der Belastungsablauf im Versuch B7.1 in der Bild 36 dargestellt. Bis zu einer Last von 150 kN wurden drei kraftgesteuerte Lastintervalle ausgeführt mit entsprechenden Pausen zur Rissanzeichnung. Anschließend erfolgte die weggesteuerte Belastung bis zum Versagen des Balkens.

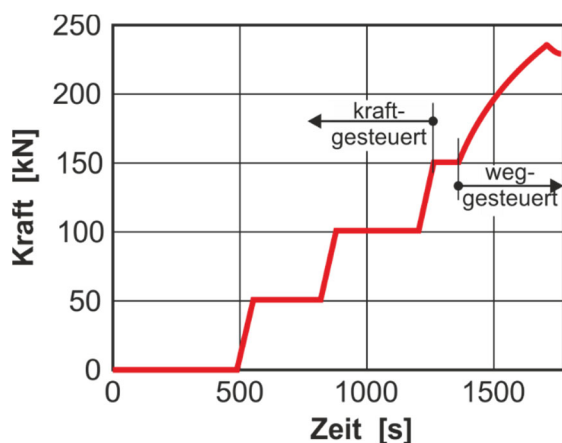


Bild 36 Kraft-Zeit-Diagramm zu B7.1

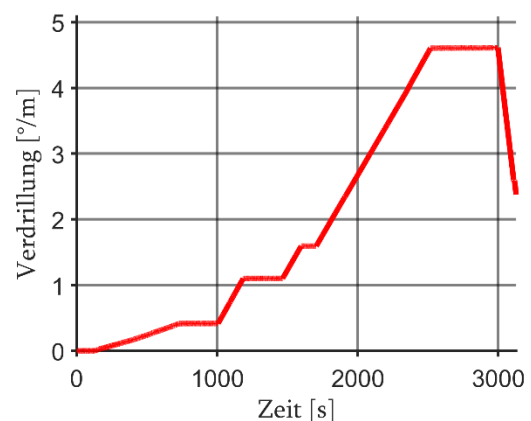


Bild 37 Verdrillungs-Zeit-Diagramm

#### Torsionsversuche

Die Torsionsversuche erfolgten rein verformungsgesteuert. Am Balken B10 wird dies beispielhaft erläutert. Es wurden zwei Geschwindigkeiten eingestellt. Der Zustand I und die Rissbildungsphase sollen, aufgrund des deutlich geringeren Anteils an der Gesamtverformung, langsamer verformt werden. Daher ist die Verformungsgeschwindigkeit anfangs sehr gering und liegt bei  $0,7 - 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ/\text{m}\cdot\text{s}$ . Nachdem die Rissbildung abgeschlossen war, wurde die Verformungsgeschwindigkeit deutlich auf  $3,75 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ/\text{m}\cdot\text{s}$  erhöht (Bild 37).

### 5.2 Aufzeichnung der Messdaten

Die analogen Messwerte, wie die Kraft, die Verformung, Beton-, sowie Stahldehnung wurden mit einer Frequenz von 200 Hz aufgezeichnet. Die anschließende Erstellung der Diagramme erfolgte mit gemittelten Werten von einem Hertz.

Die photogrammetrische Aufnahme erfolgte bei den Querkraftversuchen in kraftgesteuerten Lastintervallen von 1 Hz. In dem finalen weggesteuerten Lastintervall wurde ein Ringspeicher genutzt, der mit 20 Hz sehr genau zum Zeitpunkt des Versagens die Daten aufzeichnete. Nach der Grenzbelastung lag die Aufzeichnungsrate ebenfalls bei 1 Hz. Bei den Torsionsversuchen wurde eine konstante Aufzeichnungsrate von 1 Hz verwendet.

## 6 Ergebnisse der Risskinematik

In diesem Kapitel wird die Ermittlung der risskinematischen Größen und die sich hieraus ergebenden Rissspannungen beschrieben. Anschließend erfolgt die Darstellung der Ergebnisse der einzelnen Versuche.

### 6.1 Auswertung der photogrammetrischen Aufnahme

Für die Auswertung der photogrammetrischen Aufnahmen sind vorab programminterne Einstellungen festzulegen. Anschließend werden die Daten aus dem Programm „Aramis“ durch den Nutzer ausgewertet. Diese Schritte sollen im Folgenden kurz beschrieben werden.

#### 6.1.1 Einstellungen zur Bestimmung der risskinematischen Größen

Die wichtigsten programminternen Einstellungsparameter sind die Facettengröße sowie der Punktabstand. Die Auswirkungen einer Vergrößerung oder Verkleinerung dieser Parameter ist im Kapitel 4.2 in Tabelle 5 und Tabelle 6 zu finden.

Gemäß der Empfehlung der Fa. GOM werden mit den Standardeinstellungen optimale Ergebnisse erzielt. Aus diesem Grund wird diese Einstellung für die Auswertung der Versuche verwendet. Es ergibt sich somit eine Facettengröße von 19 Pixeln. Beim Punktabstand wird geringfügig von der Empfehlung abgewichen, indem dieser zu 14 Pixeln gesetzt wird.

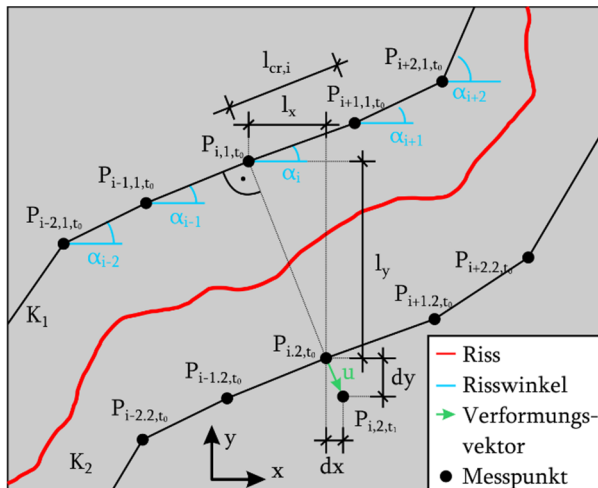
Ein weiterer Parameter ist die Interpolationsgröße. Werden im Messfeld einzelne Punkte nicht erkannt, so kann durch das Hochsetzen dieses Wertes eine Überbrückung an dieser „Fehlstelle“ erfolgen, sodass an diesem Punkt auch Daten abgelesen werden können. Diese werden aus den umliegenden Punkten interpoliert.

#### 6.1.2 Ermittlung der risskinematischen Größen

Im Folgenden wird die Berechnung der risskinematischen Größen beschrieben, welche außerhalb von „Aramis“ durch den Nutzer erfolgt. Entlang des Risses werden beidseitig Punkte angeordnet, die linear miteinander verbunden werden (Bild 38). Jede Teillinie besitzt eine Länge  $l_{cr,i}$  und eine Neigung  $\alpha_i$  zur Horizontalen. Die Abstände der Punkte zum Rissufer sind gering und liegen im Regelfall bei etwa 8 mm. Damit liegen sie außerhalb lokaler Deformationen. Die Berechnung der Rissneigung in einem Punkt erfolgt durch eine Mittelung der anliegenden Teillinien:

$$\alpha(P_{i,1,t_0}) = 0,5 \cdot (\alpha_i + \alpha_{i-1}) \quad (2)$$

Die Berechnung geht von den Punkten  $P_{i,1,t_0}$  und  $P_{i,2,t_0}$  zum Zeitpunkt  $t_0 = 0$  s, d.h. zu Versuchsbeginn, aus. Diese weisen in  $x$ -Richtung den Abstand  $l_x$  und in  $y$ -Richtung den Abstand  $l_y$  auf. Nachdem der Riss entsteht, verschiebt sich der Punkt  $P_{i,2}$  um  $dx$  in  $x$ -Richtung und  $dy$  in negative  $y$ -Richtung (Bild 38). Die Abstände  $dx$  und  $dy$  sind die relativen Verschiebungen der beiden Punkte, die für die weitere Auswertung verwendet werden.



**Bild 38 Ermittlung der risskinematischen Größen**

Für die Berechnung der Rissöffnung  $w$  sowie der Rissgleitung  $\delta$ , wird die Verformung des Punktes  $P_{i,2}$  mit der Rissneigung  $\alpha$  transformiert. Die Werte für  $w$  und  $\delta$  ergeben sich wie folgt:

$$\begin{pmatrix} \sin \alpha & -\cos \alpha \\ -\cos \alpha & -\sin \alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w \\ \delta \end{pmatrix} \quad (3)$$

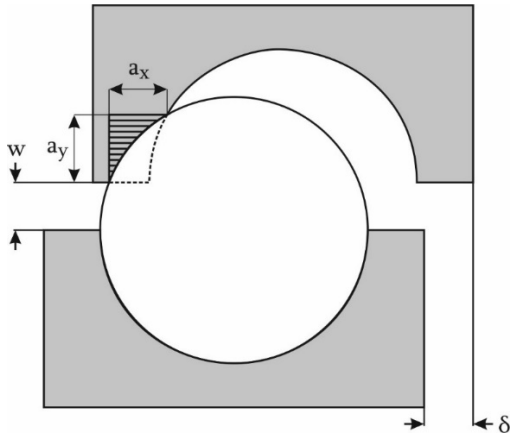
### 6.1.3 Ermittlung der Schub- und Normalspannungen im Riss

Nachdem die kinematischen Größen eines Risses bestimmt sind, ist es notwendig die Spannungen, welche über den Riss übertragen werden, zu quantifizieren. Hierfür wurden verschiedene Rissreibungsmodelle entwickelt, mit welchen sich übertragenden Schub- und Normalspannungen in Abhängigkeit von der Öffnung  $w$  und der Gleitung  $\delta$  des Risses ermitteln lassen. All dieses Modelle wurden an Push-Off-Tests (reine Schubversuche) validiert und lieferten für diese zufriedenstellende Ergebnisse. In der vorliegenden Versuchsreihe werden die Modelle auf Biegeschubrisse angewandt.

Im Folgenden werden die bekanntesten Modelle vorgestellt. Darunter fallen das Zwei-Phasen-Modell von Walraven (1981), das Rough Crack Model von Bazant & Gambarova (1980) und das Kontakt-Dichte-Modell von Li et al. (1989). Guidotti (2010) und Cavagnis et al. (2018a) modifizierten das Zwei-Phasen-Modell.

#### 6.1.3.1 Zwei-Phasen-Modell

Das von Walraven (1981) entwickelte Zwei-Phasen-Modell betrachtet einen zweidimensionalen Schnitt im Betongefüge und nimmt eine zufällige Verteilung von kugelrunden Körnern an. Nachdem eine Rissöffnung  $w$  in dem Querschnitt initiiert wird, kommt es zu einer Rissgleitung und zum Kontakt zwischen der Zementmatrix und den Körnern (Bild 39). Walraven entwickelte mit seinem Formelapparat die Kontaktflächen, die durch  $w$  und  $\delta$  entstehen, womit sich Normal- und Schubspannungen ableiten lassen.



**Bild 39 Zwei-Phasen-Modell nach Walraven (1981)**

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_{pu} \cdot (\bar{A}_x - \mu \cdot \bar{A}_y) \geq 0 \\ \tau &= \sigma_{pu} \cdot (\bar{A}_y + \mu \cdot \bar{A}_x)\end{aligned}\quad (4)$$

mit:  $\sigma_{pu} = 6,39 \cdot (f'_{c,cube})^{0,56}$  Fließspannung der Zementmatrix  
 $\mu = 0,4$  Reibungskoeffizient

Für die Berechnung der Kontaktfläche der Einheitsgröße  $\bar{A}_x$  und  $\bar{A}_y$  sei auf die Ausführungen in Walraven (1981) hingewiesen.

### 6.1.3.2 Rough Crack Model

Bazant & Gambarova (1980) nehmen für ihr Modell raue Rissoberflächen in Form von trapezförmigen Zähnen an. Durch die Öffnung eines Risses und die anschließende Rissgleitung kommt es zu einer Verzahnung der beiden Rissoberflächen, wodurch es möglich wird, Spannungen zu übertragen.

Als Verbesserung dieses Modells schlugen Gambarova & Karakoç (1983) eine Modifizierung für die Berechnung der Normalspannung vor, um die Versuchsergebnisse besser abbilden zu können. Daher werden diese neueren Formeln hier wiedergegeben.

$$\tau = \tau_0 \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{2w}{a_g}}\right) \cdot r \cdot \frac{a_3 + a_4 \cdot |r|^3}{1 + a_4 \cdot r}\quad (5)$$

$$\sigma = -a_1 \cdot a_2 \cdot \frac{\delta \cdot \tau}{(w^2 + \delta^2)^q}\quad (6)$$

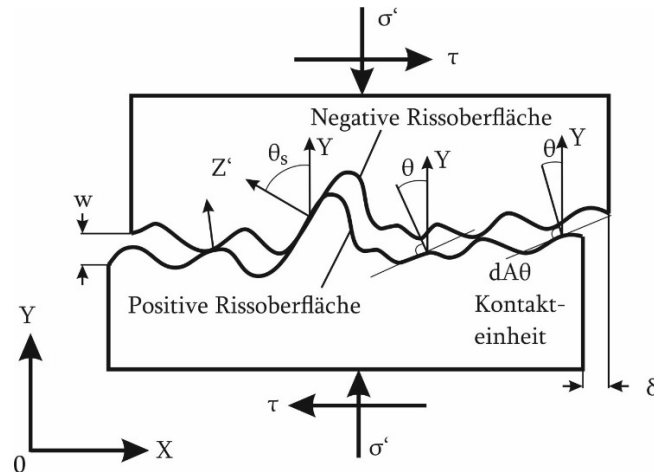
mit:  $\tau_0 = 0,25 \div 0,3 \cdot f_{cm}$ ;  $r = \frac{\delta}{w}$ ;  $a_1 a_2 = 0,62$ ;  $a_3 = \frac{2,45 \text{ MPa}}{\tau_0}$

$$a_4 = 2,44 \cdot \left(1 - \frac{4}{\tau_0}\right); \quad q = 0,25$$

$\tau_0$  Riss Schubspannung im Grenzfall eines geschlossenen Risses

### 6.1.3.3 Kontakt-Dichte-Modell

Li et al. (1989) entwickelten ein elastoplastisches Modell zur Beschreibung der Rissreibung auf Grundlage von Kontaktpunkten, die zwischen Rissoberflächen auftreten (Bild 40). Aufbauend auf der stochastischen Verteilung der Neigungen der Kontaktpunkte entwickelten sie eine Formel zur Berechnung der Kraftübertragung in diesen Punkten. Durch eine Integration der Kräfte über die Kontaktpunkte und einer trigonometrischen Umformung auf die Hauptachsen erhält man die Schub- und Normalspannung, die auf die Rissoberflächen wirken.



**Bild 40** Notation des Kontakt-Dichte-Modells nach Li et al. (1989)

$$\tau = g \left( \frac{\delta \cdot \sin^3(\beta) + w \cos^3(\beta)}{3} - \frac{\delta \cdot w}{3 \cdot \sqrt{\delta^2 + w^2}} + 0,5 \cdot w'_{\text{lim}} \cdot \cos^2(\beta) \right) \quad (7)$$

$$\sigma' = g \left( \frac{-\delta \cdot \sin^3(\beta) + w \cos^3(\beta)}{3} - w \cdot \sin(\beta) + \frac{\delta^2 + 2w^2}{3 \cdot \sqrt{\delta^2 + w^2}} + w'_{\text{lim}} \cdot \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} - \frac{\sin(2\beta)}{4} \right) \right) \quad (8)$$

mit:  $g = 0,5 \cdot A_t \cdot R_s \cdot K(w)$

$$\beta = \arcsin \left( \frac{w'_{\text{lim}} \cdot \delta + w \cdot \sqrt{w^2 + \delta^2} - w'_{\text{lim}}}{w^2 + \delta^2} \right), \text{ wenn } \delta \geq w'_{\text{lim}}$$

$$= \frac{\pi}{2}, \text{ wenn } \delta < w'_{\text{lim}}$$

- $w'_{\text{lim}}$  elastisches Rissöffnungslimit
- $A_t$  Mittlere Kontaktfläche
- $R_s$  linear-elastische Steifigkeit des Risses
- $K(w)$  Verhältnis der Kontaktfläche

### 6.1.3.4 Zwei-Phasen-Modell von Guidotti

Guidotti (2010) modifiziert das Zwei-Phasen-Modell. Die bedeutendste Änderung ist die Annahme, dass die Rissgleitung und -öffnung simultan auftreten und, bevor es zur Aktivierung der Rissspannungen kommt, eine initiale Rissöffnung  $w_0$  notwendig ist.

### 6.1.3.5 Zwei-Phasen-Modell von Cavagnis

Da zur Berechnung der Rissspannungen nach Walraven eine numerische Berechnung notwendig ist, hat Cavagnis et al. (2018a) die umfangreichen Formeln von Walraven vereinfacht, um diese analytisch lösbar zu machen.

$$\text{Schubspannung: } \tau = \tau_0 = \sqrt{f_{cm}} \cdot \frac{c_3 \cdot \bar{\delta}^{\frac{4}{3}}}{(c_2 \cdot \bar{w})^{1,8+c_2 \cdot \bar{\delta}}} \quad (9)$$

$$\sigma = \sigma_{res} - \sigma_0 = \sigma_{res} - \sqrt{f_{cm}} \cdot \frac{c_4 \cdot \bar{\delta}^{\frac{7}{3}}}{(c_2 \cdot \bar{w})^{3+c_2 \cdot \bar{\delta}}} \quad (10)$$

mit:  $c_2 = 40; c_3 = 35; c_4 = 400; \bar{\delta} = \frac{\delta}{d_{dg}}; \bar{w} = \frac{w}{d_{dg}}$

$$d_{dg} = \min(40 \text{ mm}; 16 \text{ mm} + a_g) \text{ für } f_{cm} \leq 60 \text{ MPa}$$

$\delta$  = Rissgleitung

$$\sigma_{res} = f_{ct} \cdot \left( 1 - \left( \frac{w}{w_{cr}} \right)^{c_1} \right) \geq 0 \quad (11)$$

mit:  $c_1 = 0,31; w_{cr} = \frac{G_F}{f_{ct}} \cdot \frac{1+c_1}{c_1}$

### 6.1.4 Ermittlung der Verdrillung der Torsionsversuche

Unter Abschnitt 4.1 wurde die Positionierung der Wegaufnehmer für die Torsionsbalken bereits erläutert. Diese werden an der Lasteinleitung, an der Einspannung, im photogrammetrischen Messfeld und durch die Pressenwege aufgezeichnet. Für die Berechnung der Verdrillung der Torsionsbalken werden die Verformungen der beiden Pressen in eine Verdrehung mit Bezug auf den Schwerpunkt des Balkens transformiert. Hiervon wird die sehr geringe horizontale Auflagerverformung subtrahiert. Abschließend dividiert man die Wirkungslänge des konstanten Torsionsmomentes durch die Balkenverdrehung und erhält damit die Verdrillung je Meter Einheitslänge. Es wird dabei angenommen, dass sich die Verdrillung nahezu konstant über den Balken verteilt.

### 6.1.5 Ermittlung der Spannungsübertragung bei den Torsionsversuche

Die Rissentwicklung findet bei Torsionsbalken dreidimensional statt, da sie näherungsweise in Form einer Spirale entlang der Längsachse verlaufen. Die Rissöffnung ist nicht wie bei Querkraftrissen über die Balkenbreite konstant. Somit kann aus den an der Betonoberfläche ermittelten Verformungen nicht auf die Spannungsübertragung im Inneren des Balkens

geschlossen werden. Trotzdem lässt sich mit der gemessenen Risskinematik an der Oberfläche die Quantität der theoretischen Spannungen überprüfen und klären, ob diese in relevanter Größe vorliegen.

## **6.2 Versuchsergebnisse und Ergebnisse der photogrammetrischen Messung**

Im folgenden Kapitel werden die Versuchsergebnisse dargestellt. Diese beinhalten die nachstehenden Versuchsdaten:

- Beschreibung der Rissbildung mit Rissbild,
- Fotos zum Zeitpunkt des Versagens des Versuchsbalkens,
- Aufbau der Messeinrichtung,
- Grafische Darstellung der Verformungskurve und der Dehnungen,
- Stahldehnung aus den faseroptischen Messungen (Torsion gemittelt),
- Hauptzugdehnungen der Betonoberfläche, photogrammetrisch ermittelt,
- Risskinematik unter Maximallast,
- Rissspannung entlang des Risses unter Maximallast,
- Anteil der Rissreibung am gesamten Querkraftabtrag gemäß der vorgestellten Rissreibungsmodelle in tabellarischer Form,
- Anteil der Rissreibung am Querkraftabtrag als Diagramm (nur für das Zwei-Phasen-Modell von Walraven).

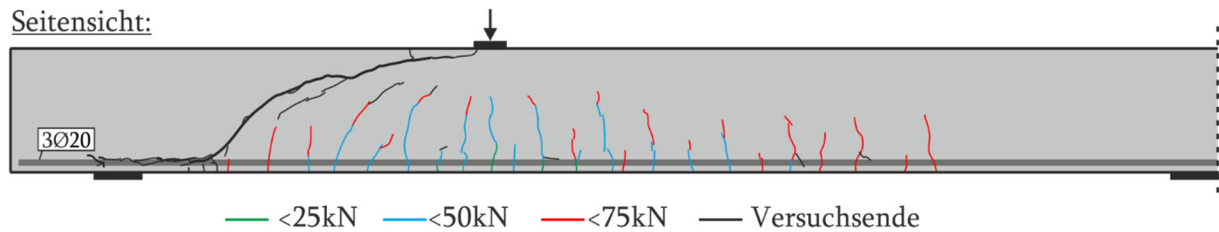
### Anmerkung zur Darstellung der faseroptischen Messung

Die Daten werden in manchen Fällen nicht für die Maximallast sondern für geringere Beanspruchungen dargestellt, da bei  $F_{\max}$  in einigen Versuchen die Glasfasern keine Daten mehr lieferten. Des Weiteren wurden die Dehnungskurven bei den Torsionsversuchen, aufgrund von Ausreißern gemittelt.

### 6.2.1 B1.1

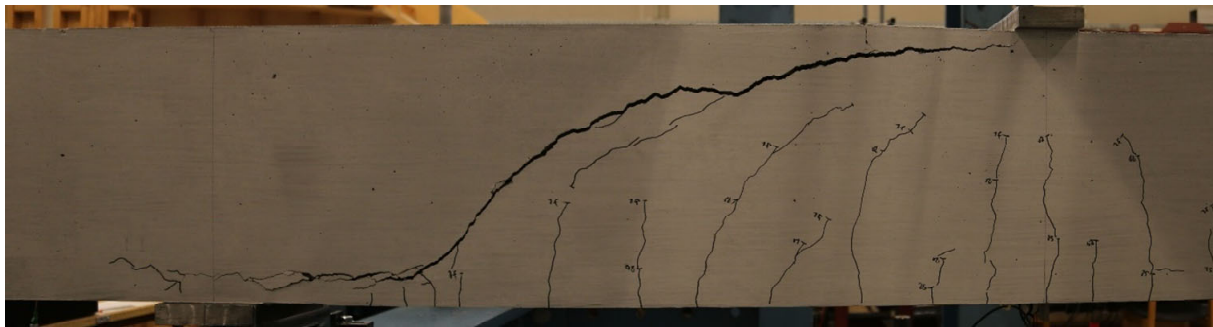
Der Versuchsbalken B1.1 beginnt bei ca. 10 kN in den Zustand II überzugehen. Die Rissbildung des Balkens ist für unterschiedliche Laststufen in Bild 41 dargestellt. Bis zu einer Belastung von 25 kN entstehen einige Biegerisse im Bereich der Lasteinleitung mit einer maximalen Länge von einem Drittel der Balkenhöhe. Die weitere Laststeigerung auf 50 kN führt zu weiteren Biegerissen, die sich bis über etwa die halbe Balkenhöhe ausbilden und neigen. Bis 75 kN entstehen weitere Biegerisse. Die anschließende Belastung bis zum Versagen erzeugt überwiegend zwischen der Lasteinleitung und dem nahen Auflager eine Verlängerung der Biegerisse.

Seitensicht:



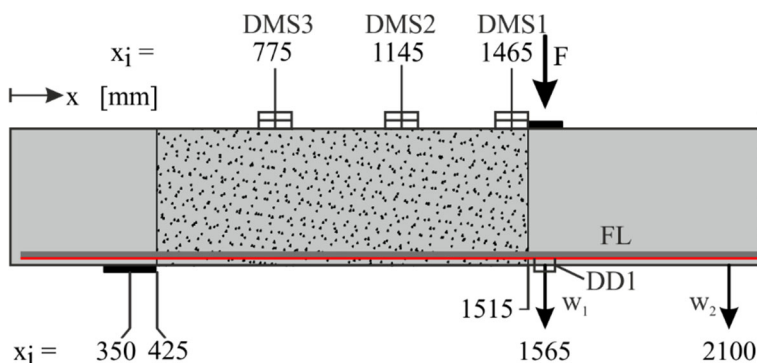
**Bild 41 B1.1 – Rissbild für verschiedene Laststufen**

Bei der Maximallast von **106,7 kN** und einer Durchbiegung von **6,35 mm** bildete sich schlagartig der maßgebende Biegeschubriss (Bild 42), wonach die Last auf 23 kN abfiel. Dabei brach die Betondruckzone aus. Der Biegeschubriss weist eine sehr große Rissöffnung auf.



**Bild 42 B1.1 -Maßgebender Biegeschubriss (gespiegelt)**

Bild 43 zeigt die Lage der Dehnungsmessstreifen (DMS) und der Dehnungsaufnehmer (DD1). Die aufgezeichneten Werte finden sich in den Bildern 43-46. Die Dehnungen des Längsbewehrung (FL), gemessen mit faseroptischen Sensoren, sind Bild 48 zu entnehmen. Es ergibt sich unter der Last eine sehr gute Übereinstimmung der Stahldehnung aus der faseroptischen Messung und dem Dehnungsaufnehmer Typ DD1.



**Bild 43 B1.1 - Lage der DMS und des DD1 [mm]**

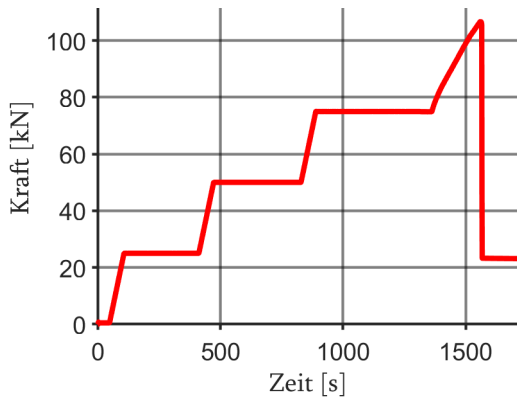


Bild 44 B 1.1 - Kraft-Zeit-Diagramm – B1.1

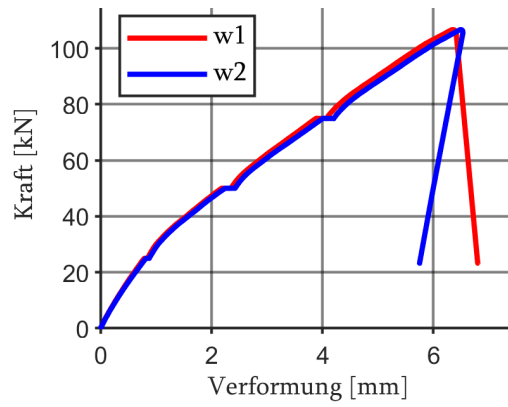


Bild 45 B1.1 - Kraft-Verformungs-Diagramm

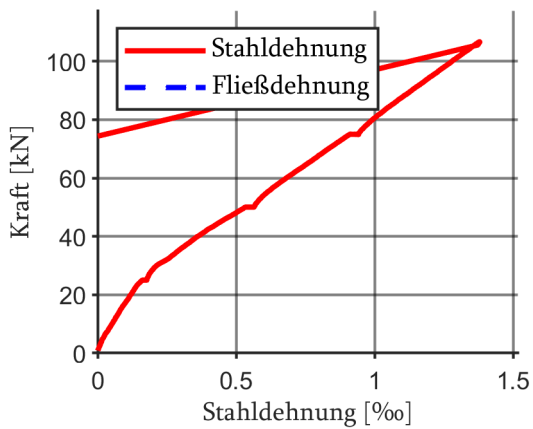


Bild 46 B1.1 - Kraft-Stahldehnungs-Diagramm

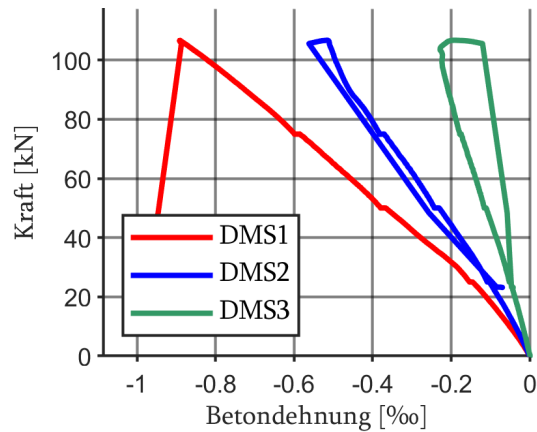


Bild 47 B1.1 - Kraft-Betondehnungs-Diagramm

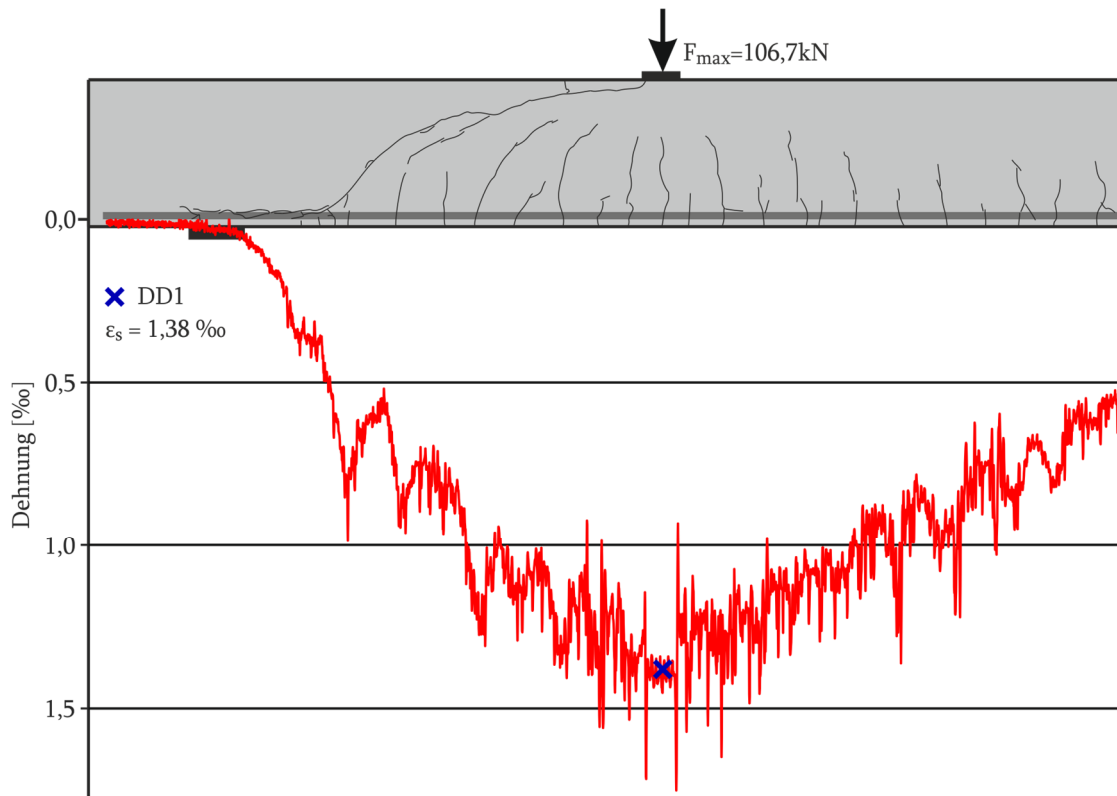
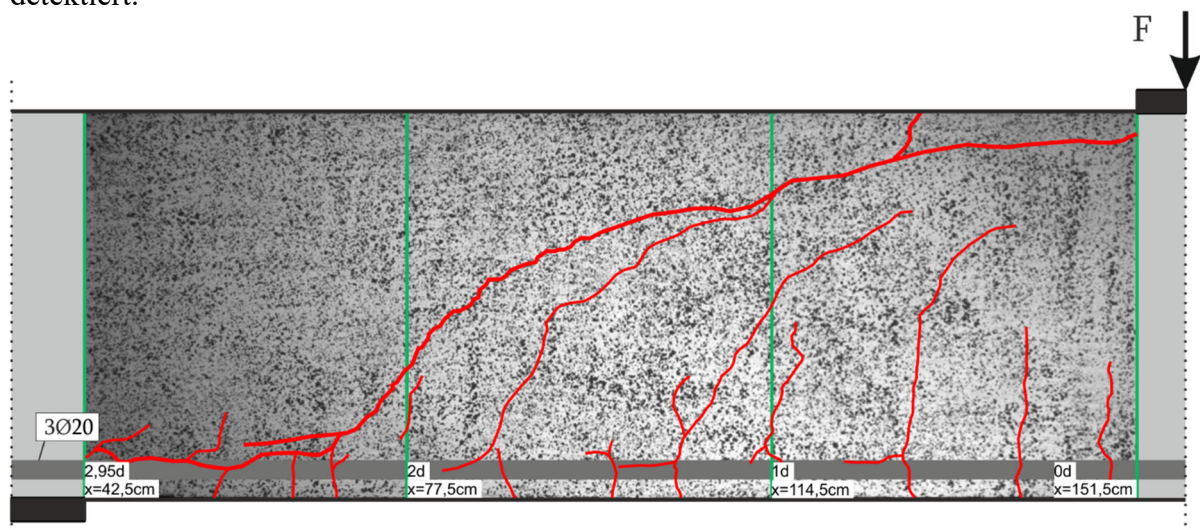
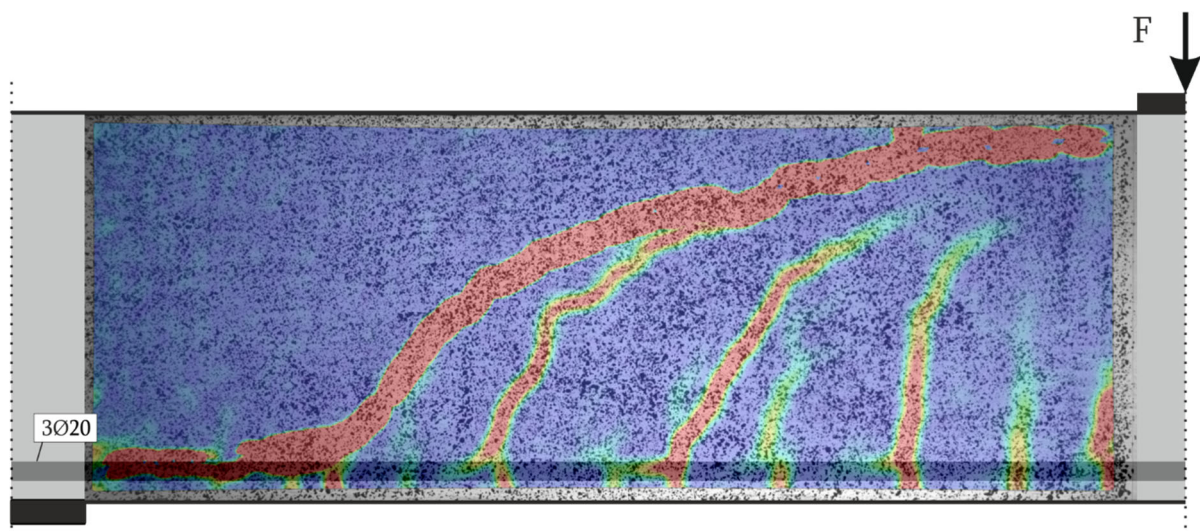


Bild 48 B1.1 – Faseroptisch und mit DD1 gemessene Stahldehnungen bei Maximallast  $F_{max}$

Die Bild 49 zeigt das photogrammetrische Messfeld mit dem ausgebildeten Rissbild. In Bild 50 sind die Hauptzugdehnungen im Messfeld zu sehen. Die aufgetretenen Risse wurden sehr gut detektiert.

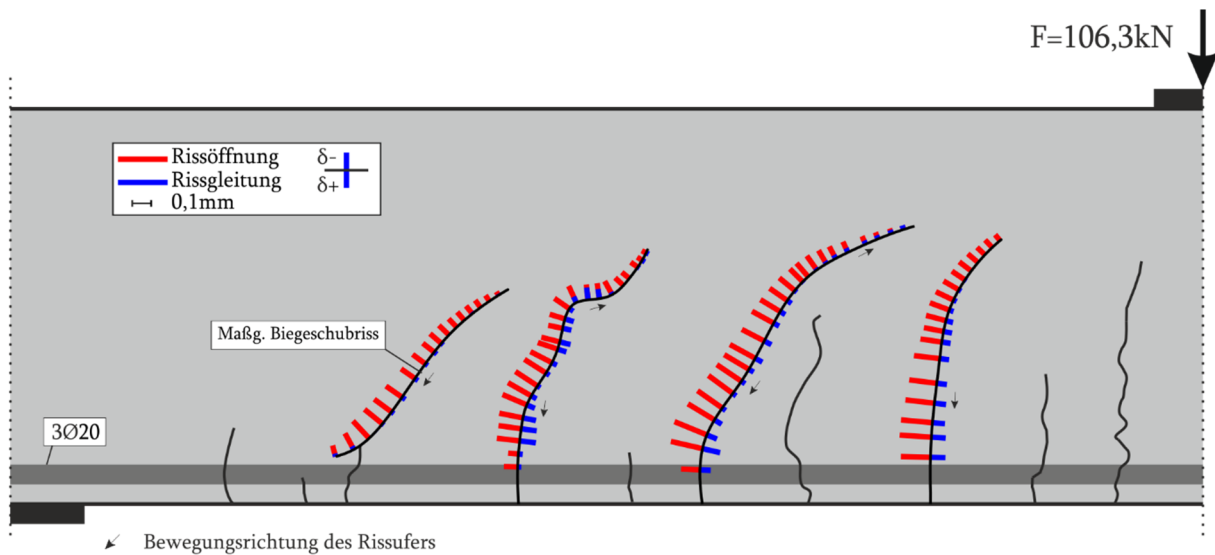


**Bild 49 B1.1 - Photogrammetrisches Messfeld mit Rissbildung anhand Dehnungsfeldes nach  $F_{\max}$**

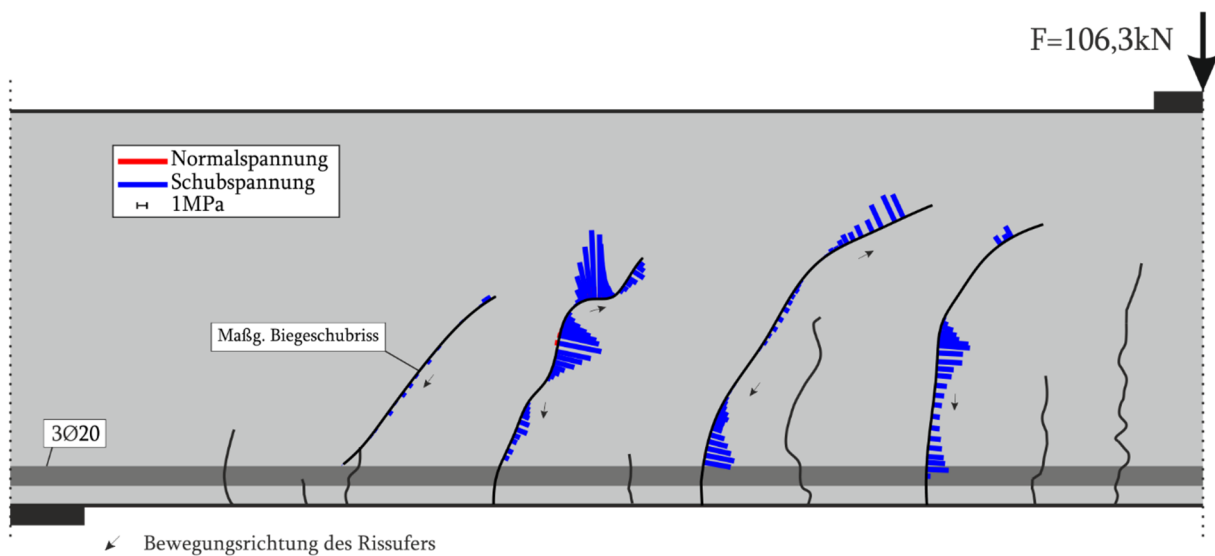


**Bild 50 B1.1 - Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen nach  $F_{\max} = 106,3 \text{ kN}$**

Die Risskinematik des Versuchs bei Maximallast ist in Bild 51 für mehrere Biegeschubriss dargestellt. Der maßgebende Biegeschubriss weist bei maximaler Belastung eine nahezu reine Rissöffnung auf. Es liegt somit keine nennenswerte Rissgleitung vor. Die übrigen drei Biegeschubriss besitzen Ähnlichkeiten zueinander. Zum einen nimmt die Rissneigung zur Risspitze ab und zum anderen findet die höchste Rissgleitung in den steilen Bereichen des Risses statt. In besonders flachen Rissabschnitten ist eine negative Rissgleitung möglich, wie beim zweiten und dritten Biegeschubriss durch den Richtungspfeil dargestellt wird.



**Bild 51 B1.1 - Rissskinematik bei  $F_{\max} = 106,3 \text{ kN}$**



**Bild 52 B1.1 - Rissspannung nach Walraven bei  $F_{\max} = 106,3 \text{ kN}$**

**Tabelle 7 B1.1 - Querkraftanteil der Rissreibung am gesamten Querkraftabtrag für den maßgebenden Biegeschubriss bei  $F_{\max}$**

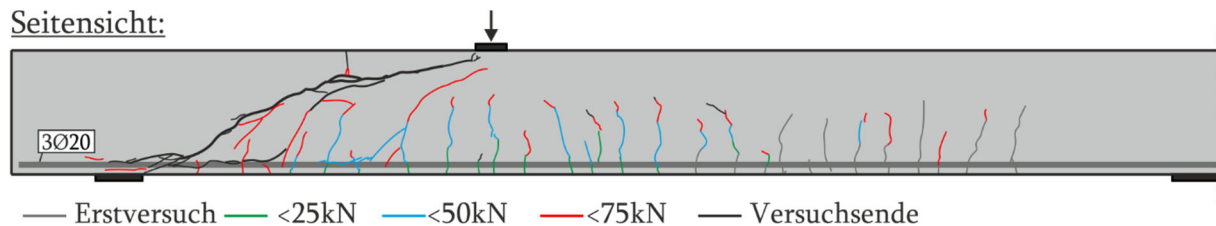
|                 | Gesamt | Walraven | Li  | Gambarova | Guidotti | Cavangis |
|-----------------|--------|----------|-----|-----------|----------|----------|
| Querkraft [kN]  | 69,4   | 0,8      | 0,4 | 3,1       | 0,8      | 14,3     |
| Kraftanteil [%] | 100    | 1,1      | 0,6 | 4,5       | 1,1      | 20,5     |

Es ergeben sich sehr große Unterschiede in den einzelnen Modellen. Bei der Grenzlaster wird nach Walraven nur 1,1% und nach Cavangis 20,5 % der gesamten Querkraft über Rissreibung abgetragen.

## 6.2.2 B1.2

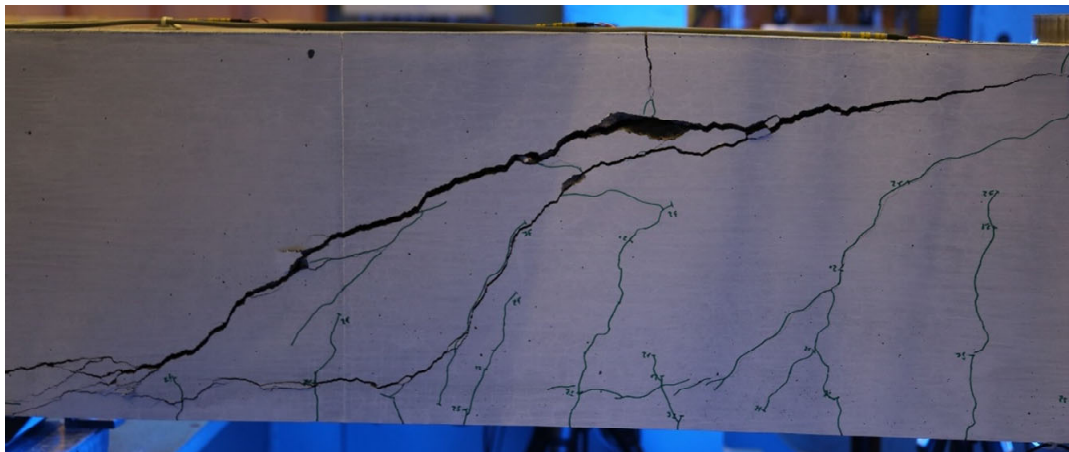
Beim Versuchsbalken B1.2 ist der Übergang des Balkens in den Zustand II nicht eindeutig definiert, aufgrund der Rissbildung des ersten Versuchs. Die Rissbildung des Balkens ist für unterschiedliche Laststufen in Bild 53 dargestellt. Bis zu einer Belastung von 25 kN entstehen einige Biegerisse im Bereich der Lasteinleitung mit einer maximalen Länge von einem Drittel der Balkenhöhe. Die weitere Laststeigerung auf 50 kN führt zu weiteren Biegerissen, die sich bis ungefähr über die halbe Balkenhöhe ausbilden und neigen. Unweit der Lasteinleitung entsteht bereits ein Riss entlang der Längsbewehrung. Bis 75 kN treten weitere Biegerisse auf. Außerdem bildet sich ein stark ausgeprägter Biegeschubriss aus dem vorhandenen Längsriss. Dieser führt jedoch nicht zum Versagen des Balkens. Die anschließende Belastung bis zum Bruch erzeugt überwiegend zwischen der Belastung und dem nahen Auflager eine Verlängerung der Biegerisse. Dabei entstehen Längsrisse und der maßgebende Biegeschubriss.

Seitensicht:



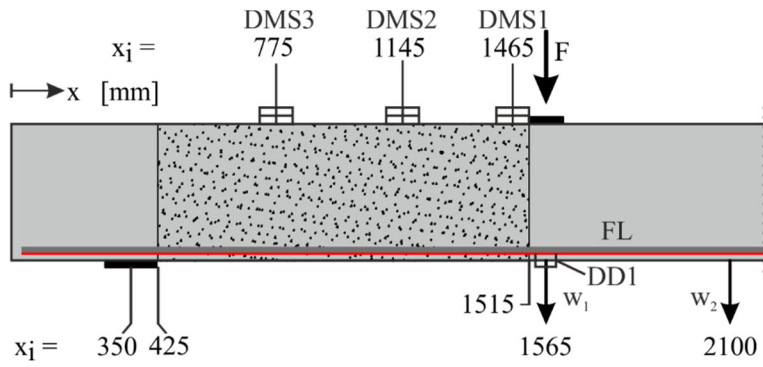
**Bild 53 B1.2 – Rissbild für verschiedene Laststufen**

Bei der Maximallast von  $F_{\max} = 109,0 \text{ kN}$  und einer Durchbiegung von  $6,67 \text{ mm}$  tritt der maßgebende Biegeschubriss schlagartig auf, wonach die Last auf  $47,0 \text{ kN}$  abfällt. Die Werte sind nahezu identisch zum Erstversuch. Im Anschluss ist noch eine geringe Laststeigerung möglich bis ein zweiter Biegeschubriss entsteht und die einwirkende Last wieder deutlich abfällt. Während der Bildung des ersten Biegeschubrisses bricht die Druckzone aus und der Biegeschubriss weist bereits zu diesem Zeitpunkt eine sehr große Rissöffnung auf (Bild 54).

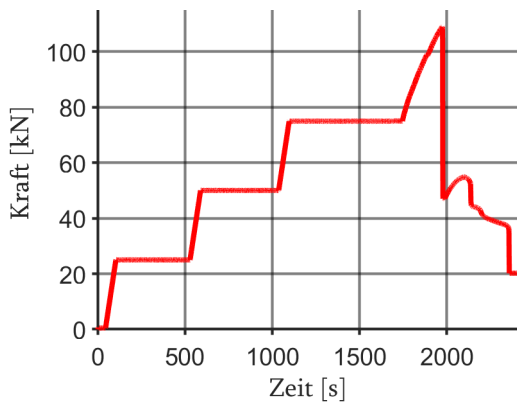


**Bild 54 B1.2 - Maßgebender Biegeschubriss (gespiegelt)**

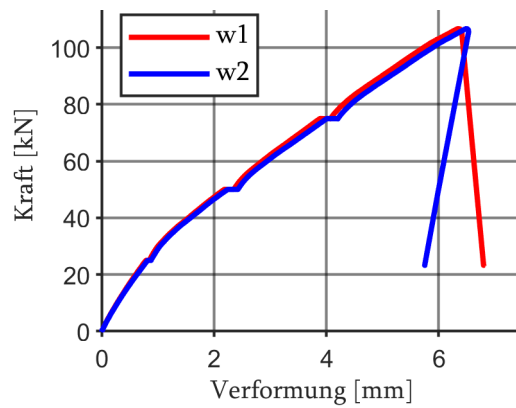
Im Bild 55 ist Lage der Dehnungsmessstreifen (DMS) und des Dehnungsaufnehmers (DD1) dargestellt. Die aufgezeichneten Messwerte finden sich in den Bildern 55-58. Die Dehnungen der Längsbewehrung (FL), gemessen mit faseroptischen Sensoren, sind Bild 60 zu entnehmen. Es ergibt sich unter der Last eine sehr gute Übereinstimmung der Stahldehnung aus der faseroptischen Messung und dem Dehnungsaufnehmer Typ DD1.



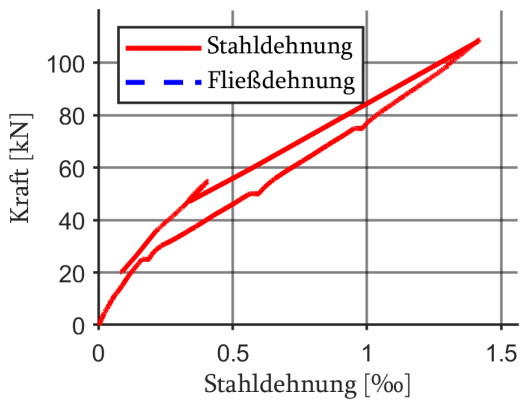
**Bild 55 B1.2 - Lage der DMS und des DD1 entlang der Längsachse**



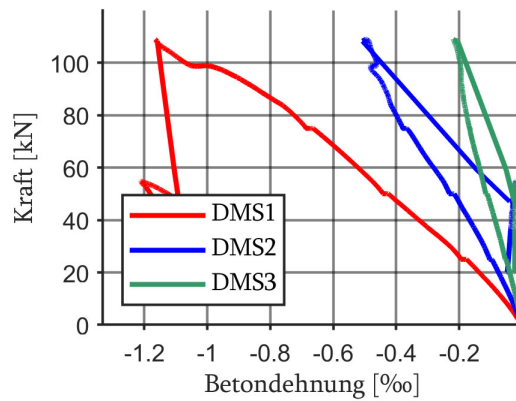
**Bild 56 B1.2 - Kraft-Zeit-Diagramm**



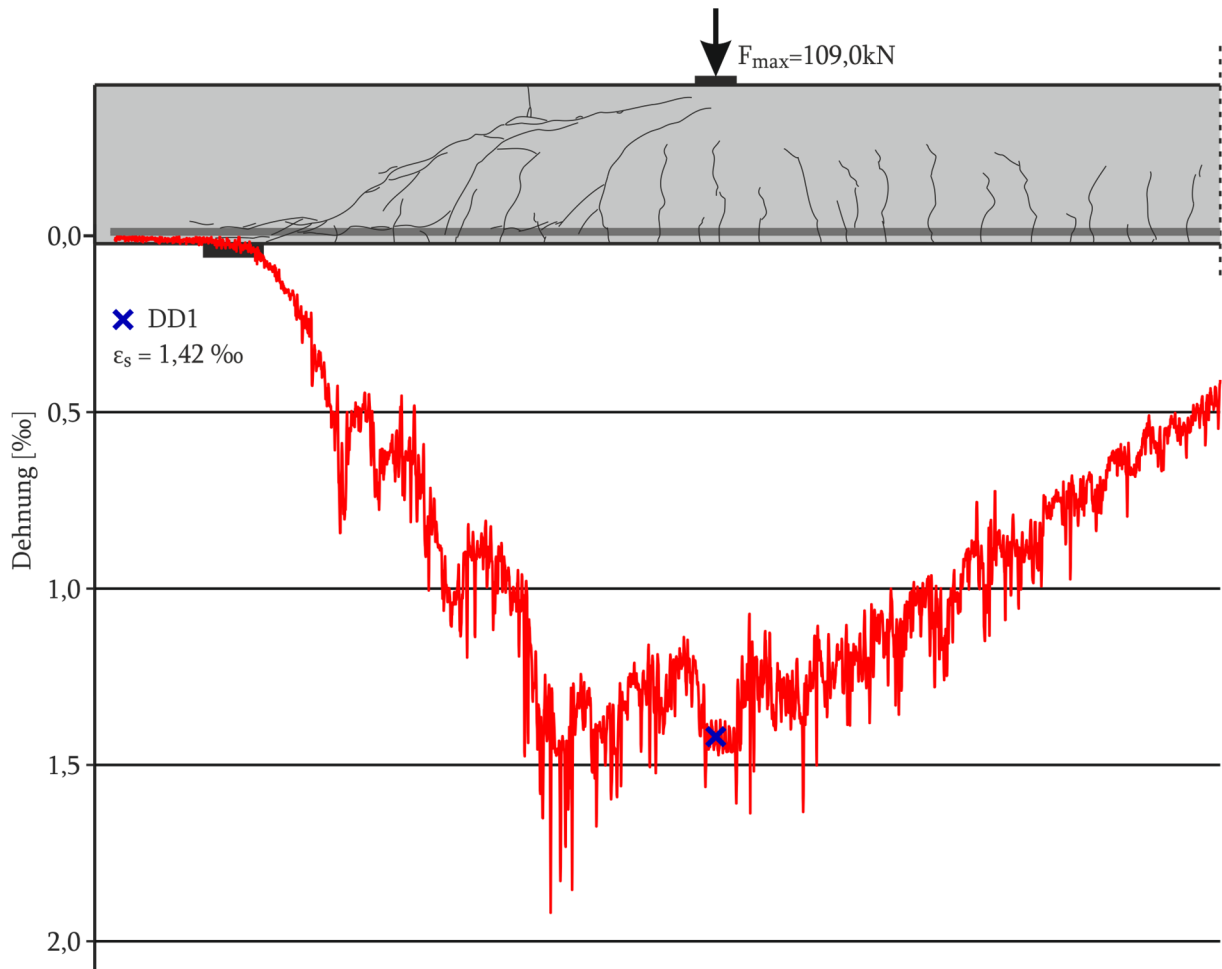
**Bild 57 B1.2 - Kraft-Verformungs-Diagramm**



**Bild 58 B1.2 - Kraft-Stahldehnungs-Diagramm**

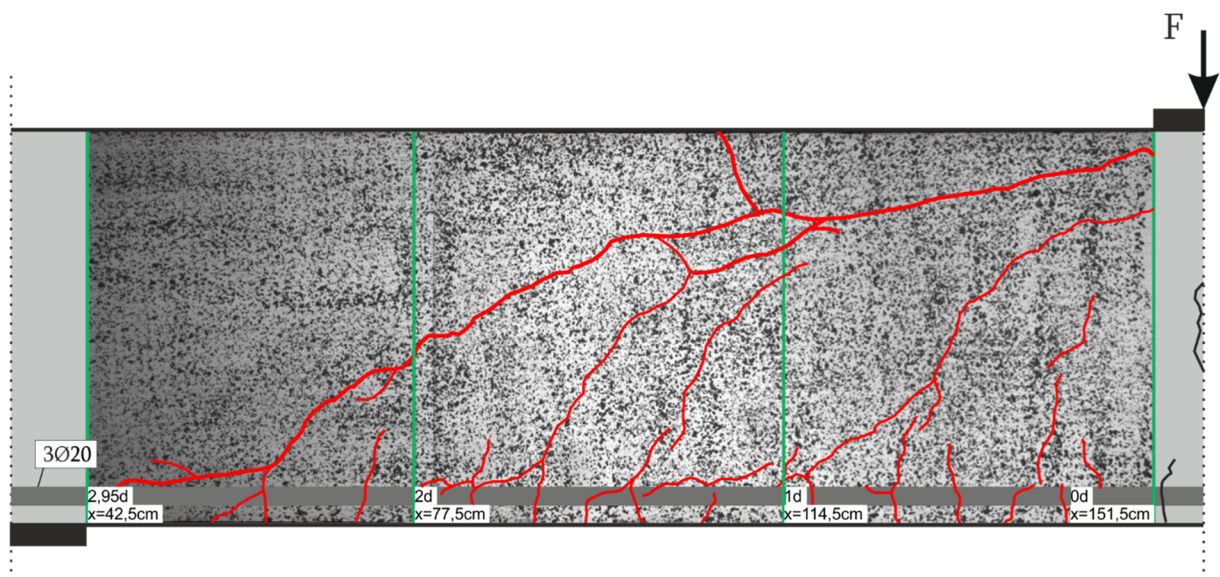


**Bild 59 B1.2 - Kraft-Betondehnungs-Diagramm**

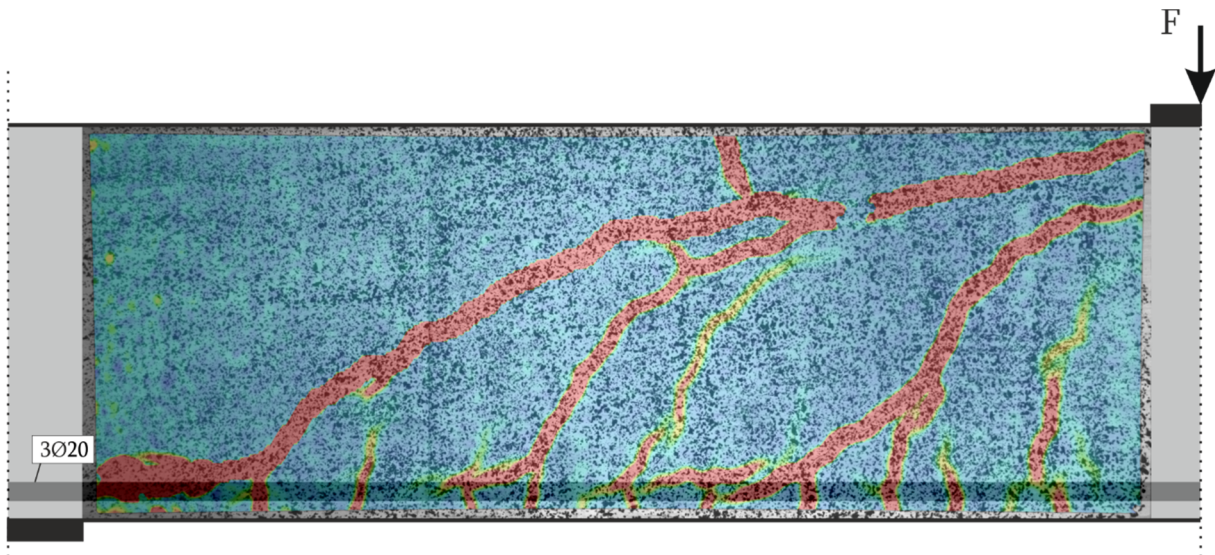


**Bild 60 B1.2 - Faseroptisch und mit DD1 gemessene Stahldehnungen bei Maximallast  $F_{\max} = 109,0 \text{ kN}$**

Die Bild 61 zeigt das photogrammetrische Messfeld mit dem ausgebildeten Rissbild. In Bild 62 sind die Hauptzugdehnungen im Messfeld zu sehen. Die aufgetretenen Risse wurden sehr gut detektiert.

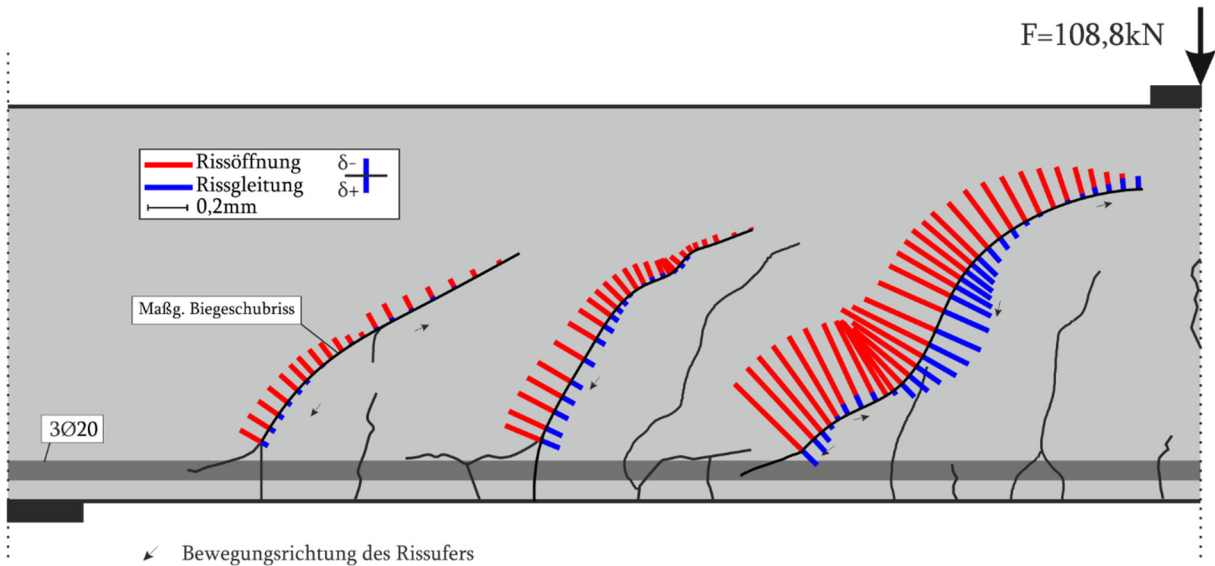


**Bild 61 B1.2 Photogrammetrisches Messfeld mit Rissbildung anhand Dehnungsfeld nach  $F_{\max} = 109,0 \text{ kN}$**

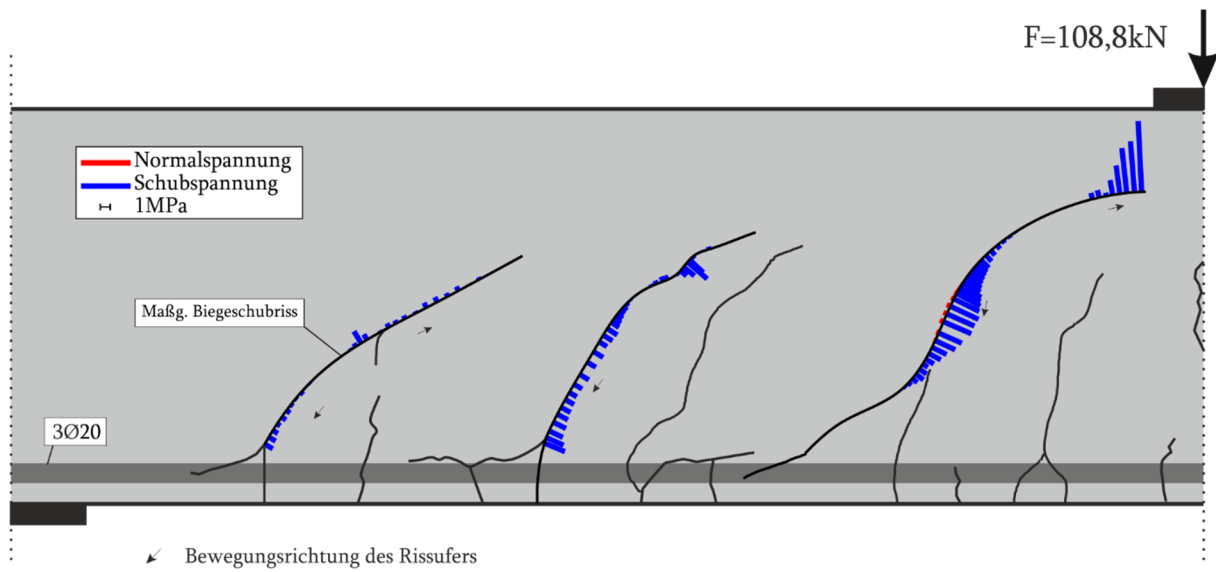


**Bild 62 B1.2 - Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen nach  $F_{\max} = 109,0 \text{ kN}$**

Die Risskinematik des Versuchs bei Maximallast ist in Bild 63 für mehrere Biegeschubriss dargestellt. Bei der maximalen Belastung weist der maßgebende Biegeschubriss nur geringe Öffnungen auf. Eine Rissgleitung liegt nicht vor. Während dieser Laststufe ist der Biegeschubriss an der Lasteinleitung bereits voll ausgebildet und weist eine große Öffnung von 0,5 mm und im steilen Rissabschnitt eine relativ hohe Rissgleitung von etwa 0,25 mm auf. Dieser Biegeschubriss führt aber nicht zum Versagen. Bei weiterer Verformung des Balkens beginnt der maßgebende Biegeschubriss schlagartig zu wachsen und führt zum Versagen des Balkens. Dabei kommt es zum simultanen Ausbrechen der Druckzone.



**Bild 63 B1.2 - Risskinematik bei  $F_{\max} = 108,8 \text{ kN}$**



**Bild 64 B1.2 - Rissspannung nach Walraven bei  $F_{\max} = 108,8$  kN**

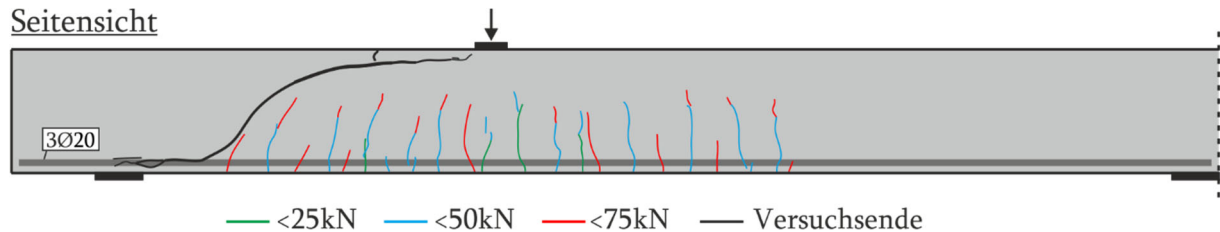
**Tabelle 8 B1.2 Querkraftanteil der Rissreibung am gesamten Querkraftabtrag für den maßgebenden Biegeschubriss bei  $F_{\max}$**

|                 | Gesamt | Walraven | Li  | Gambarova | Guidotti | Cavangis |
|-----------------|--------|----------|-----|-----------|----------|----------|
| Querkraft [kN]  | 71,0   | -0,9     | 0,9 | -1,2      | -1,1     | 15,1     |
| Kraftanteil [%] | 100    | -1,2     | 1,3 | -1,7      | -1,6     | 21,3     |

### 6.2.3 B2.1

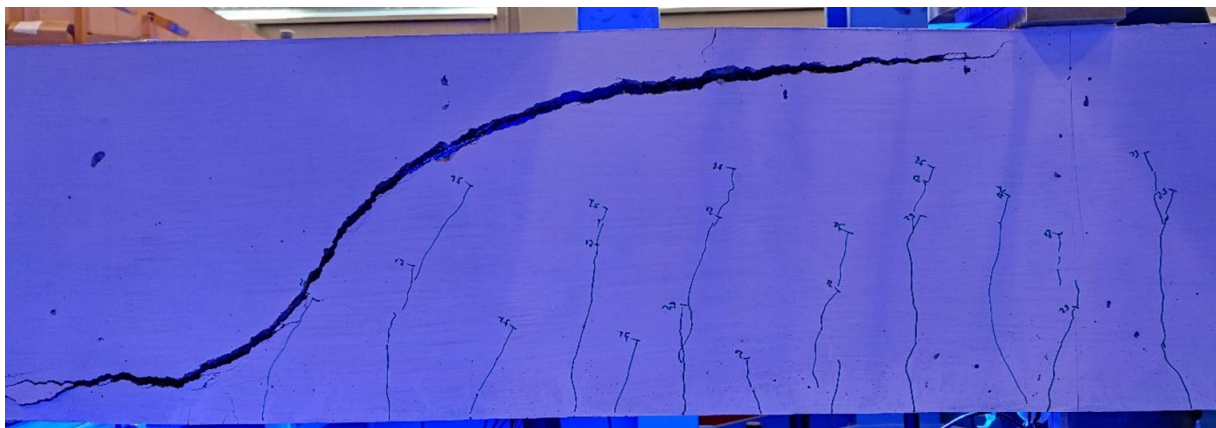
Der Versuchsbalken B2.1 geht bei etwa 10 kN in den Zustand II über. Die Rissbildung des Balkens ist für unterschiedliche Laststufen in Bild 65 dargestellt. Bis zu einer Belastung von 25 kN entstehen wenige Biegerisse im Bereich der Lasteinleitung mit einer maximalen Länge von ca. der halben Balkenhöhe. Die weitere Laststeigerung auf 50 kN führt zu weiteren Biegerissen, die sich bis über die halbe Balkenhöhe ausbilden und zur Lasteinleitung gering neigen. Bis 75 kN entstehen sekundäre Biegerisse und die Risslänge der bereits vorhandenen Risse nimmt zu. Zu diesem Zeitpunkt ist das Rissbild bereits abgeschlossen, da durch die anschließende Belastung bis zum Versagen nur noch der maßgebende Biegeschubriss entsteht.

#### Seitensicht



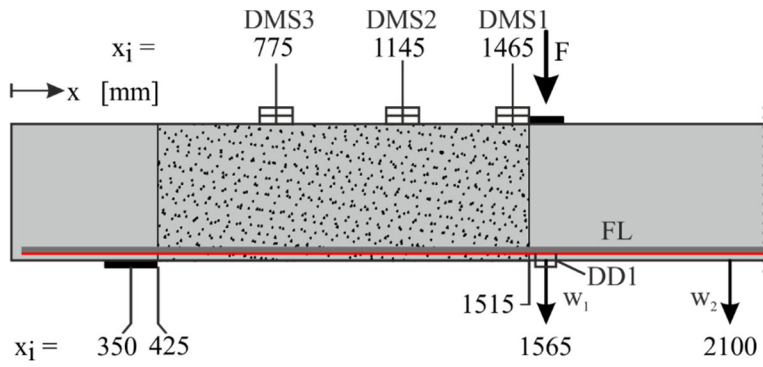
**Bild 65 B2.1 – Rissbild für verschiedene Laststufen**

Bei der Maximallast von  $F_{\max} = 108,4 \text{ kN}$  und einer Durchbiegung von **7,25 mm** entsteht der maßgebende Biegeschubriss schlagartig und die Belastung fällt daraufhin auf 19,4 kN ab. Während der Entstehung des ersten Biegeschubrisses bricht die Druckzone aus. Der Biegeschubriss weist bereits zu diesem Zeitpunkt eine sehr große Rissöffnung auf (Bild 66).

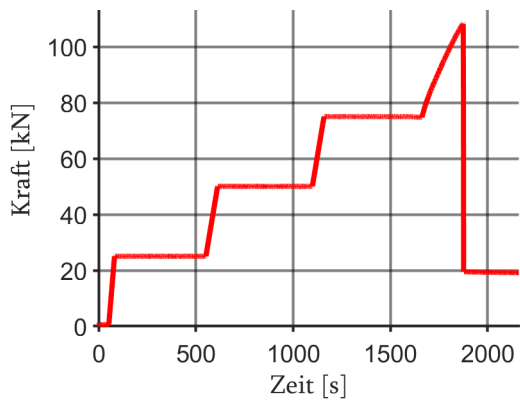


**Bild 66 B2.1 - Maßgebender Biegeschubriss (gespiegelt)**

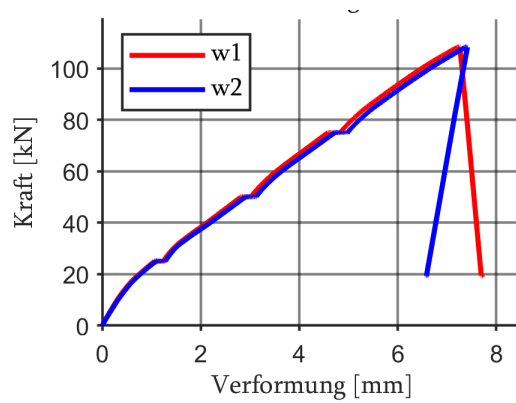
In der Bild 67 ist Lage der DMS und des Dehnungsaufnehmers DD1 dargestellt. Die aufgezeichneten Messwerte finden sich in Diagrammen in den Bildern 67-70. Die Dehnungen des Längsbewehrung (FL), gemessen mit faseroptischen Sensoren, sind Bild 72 zu entnehmen. Es ergibt sich unter der Last eine sehr gute Übereinstimmung der Stahldehnung aus der faseroptischen Messung und dem Dehnungsaufnehmer Typ DD1.



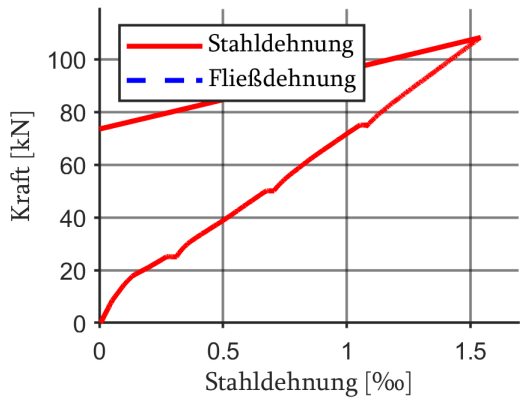
**Bild 67 B2.1: - Lage der DMS und des DD1 entlang der Längsachse**



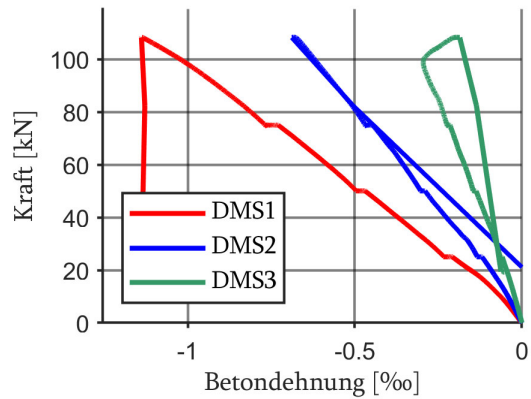
**Bild 68 B2.1 - Kraft-Zeit-Diagramm**



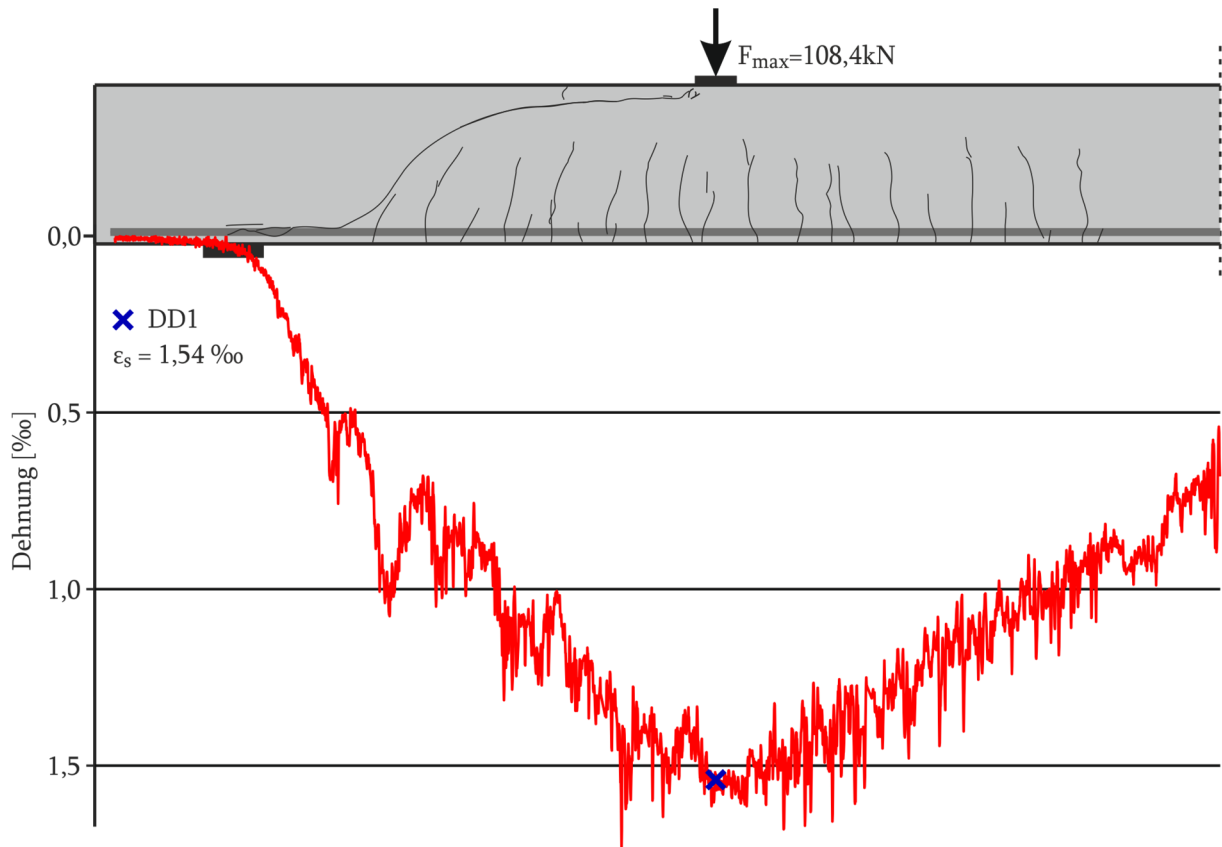
**Bild 69 B2.1 - Kraft-Verformungs-Diagramm**



**Bild 70 B2.1 - Kraft-Stahldehnungs-Diagramm**

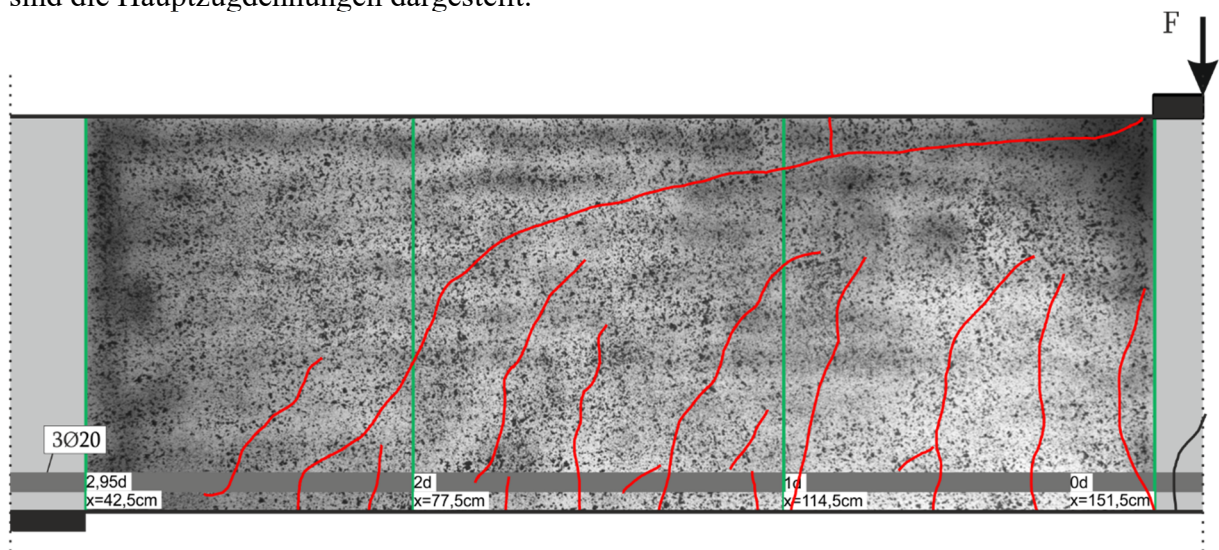


**Bild 71 B2.1 Kraft-Betondehnungs-Diagramm**

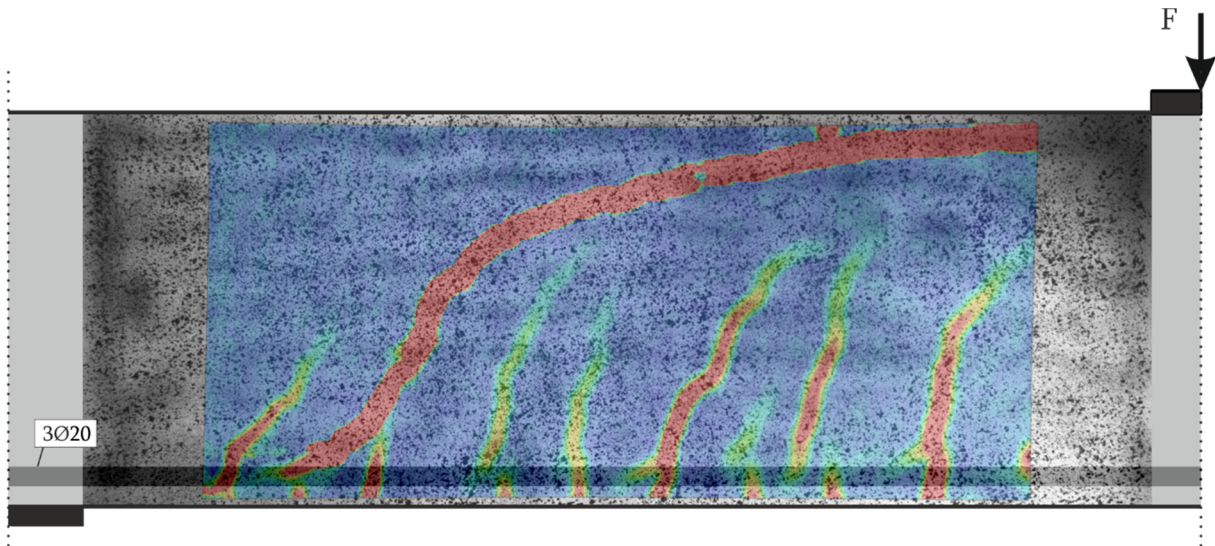


**Bild 72 B2.1-Faseroptisch und mit DD1 gemessene Stahldehnungen bei Maximallast  $F_{\max}$**

Die Bild 73 zeigt das photogrammetrische Messfeld mit dem ausgebildeten Rissbild. In Bild 74 sind die Hauptzugdehnungen dargestellt.

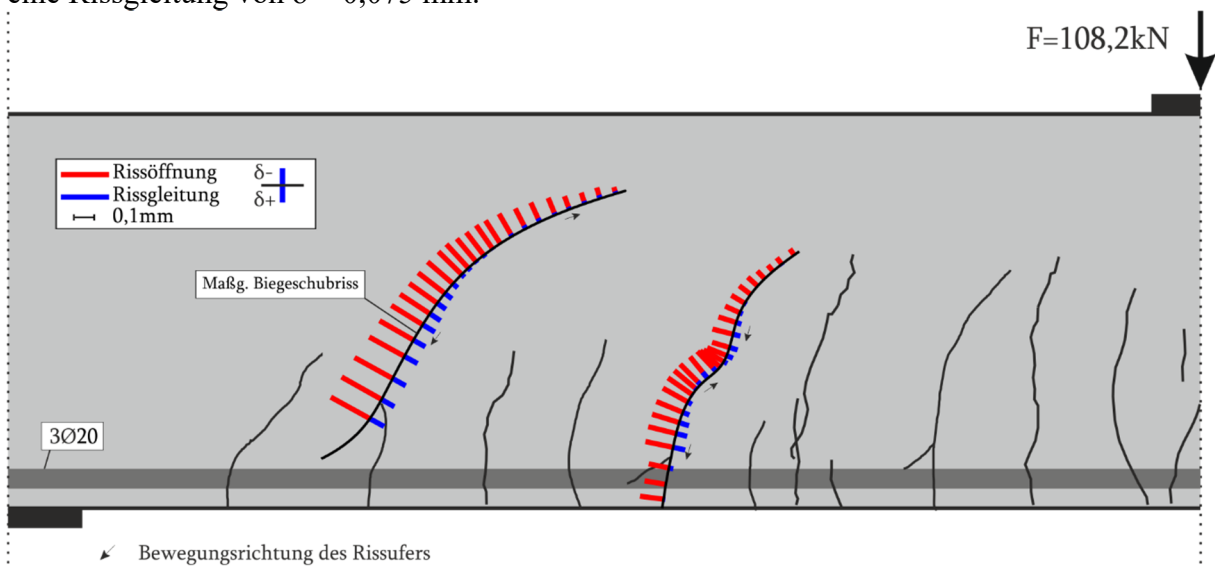


**Bild 73 B2.1 - Photogrammetrisches Messfeld mit Rissbildung anhand des Dehnungsfeldes nach  $F_{\max}$**

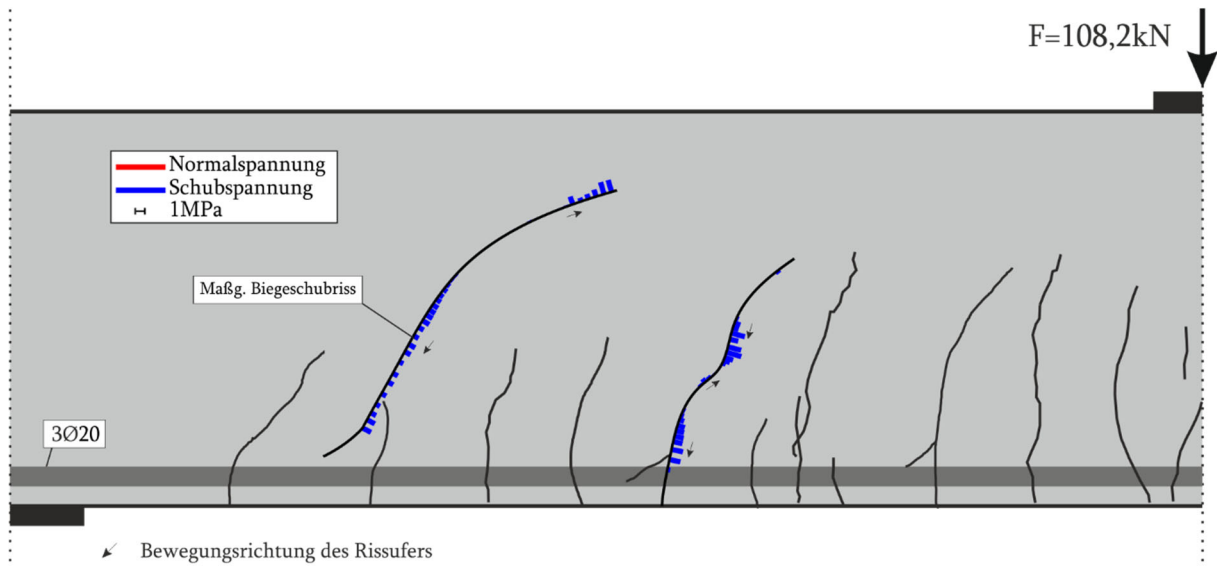


**Bild 74 B2.1 - Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen nach  $F_{\max} = 108,2 \text{ kN}$**

Die Risskinematik im Versuch bei Maximallast ist in Bild 75 für zwei Biegeschubriss dargestellt. Beide Biegeschubriss weisen große Rissöffnungen auf. Der maßgebende Biegeschubriss besitzt unter der Maximallast eine maximale Rissöffnung von  $w = 0,25 \text{ mm}$  und eine Rissgleitung von  $\delta = 0,075 \text{ mm}$ .



**Bild 75 B2.1 - Risskinematik bei  $F_{\max} = 108,2 \text{ kN}$**



**Bild 76 B2.1 - Rissspannungen nach Walraven bei  $F_{\max} = 108,2$  kN**

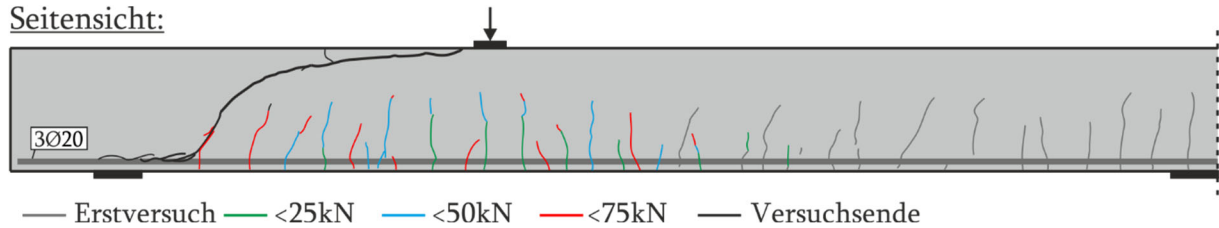
**Tabelle 9 B2.1 Querkraftanteil der Rissreibung am gesamten Querkraftabtrag für den maßgebenden Biegeschubriss bei  $F_{\max} = 108,2$  kN**

|                 | Gesamt | Walraven | Li   | Gambarova | Guidotti | Cavangis |
|-----------------|--------|----------|------|-----------|----------|----------|
| Querkraft [kN]  | 70,6   | 13,7     | 19,7 | 15,9      | 10,2     | 16,9     |
| Kraftanteil [%] | 100    | 19,4     | 27,8 | 22,6      | 14,4     | 23,9     |

## 6.2.4 B2.2

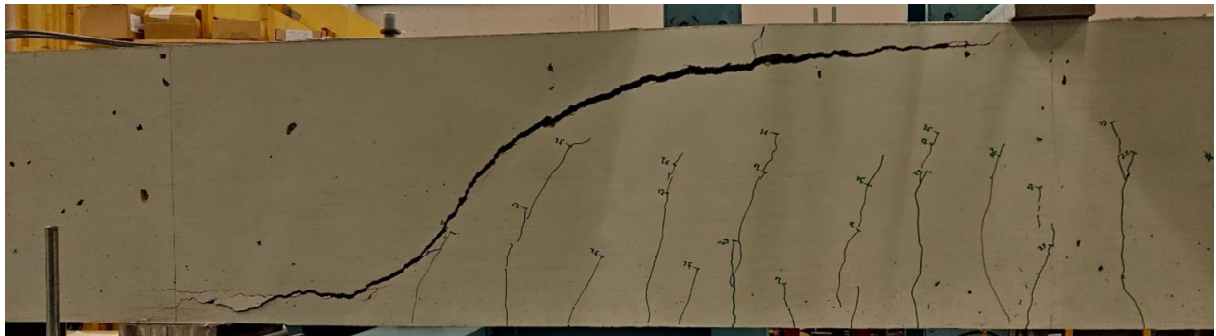
Beim Versuchsbalken B2.2 ist der Übergang des Balkens in den Zustand II nicht eindeutig definiert, aufgrund der Rissbildung des ersten Versuchs. Die Rissbildung des Balkens ist für unterschiedliche Laststufen in Bild 77 dargestellt. Bis zu einer Belastung von 25 kN entstehen einige Biegerisse im Bereich der Lasteinleitung mit einer maximalen Länge der halben Balkenhöhe. Die weitere Laststeigerung auf 50 kN führt zu weiteren Biegerissen, die sich bis über die halbe Balkenhöhe ausbilden. Bis 75 kN entstehen weitere Biegerisse, die sich in Richtung der Lasteinleitung neigen. Zu diesem Zeitpunkt ist das Rissbild bereits abgeschlossen, da durch die anschließende Belastung bis zum Versagen nur noch der maßgebende Biegeschubriss entsteht.

Seitensicht:



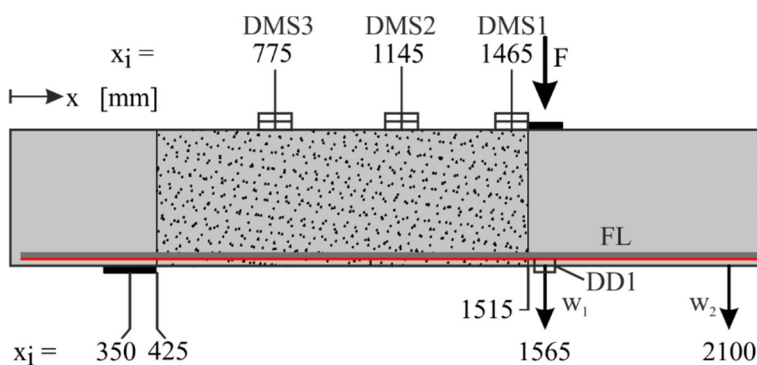
**Bild 77 B2.2 – Rissbild für verschiedene Laststufen**

Bei der Maximallast von **100,0 kN** und einer Durchbiegung von **6,33 mm** tritt der maßgebende Biegeschubriss schlagartig auf, wodurch die Last auf 20,6 kN abfällt. Während der Entstehung des Biegeschubrisses bricht die Druckzone aus. Der Biegeschubriss weist daraufhin eine sehr große Rissöffnung auf (Bild 78).



**Bild 78 B2.2 - Maßgebender Biegeschubriss (gespiegelt)**

In der Bild 79 sind die Lage der DMS und des DD1 dargestellt. Die aufgezeichneten Messwerte finden sich in den Bildern 79-82. Die Dehnungen des Längsbewehrung (FL), gemessen mit faseroptischen Sensoren, sind Bild 84 zu entnehmen. Es ergibt sich unter der Last eine sehr gute Übereinstimmung der Stahldehnung aus der faseroptischen Messung und dem Dehnungsaufnehmer Typ DD1.



**Bild 79 B2.2 - Lage der DMS und des DD1 entlang der Längsachse**

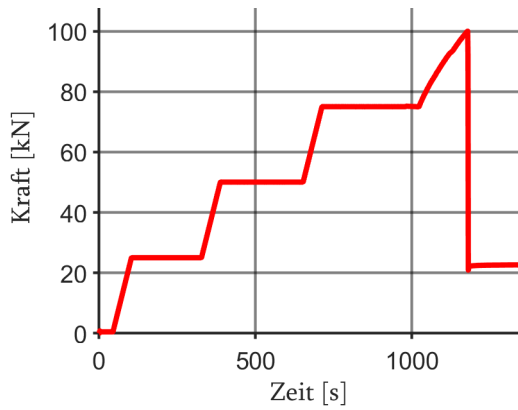


Bild 80 B2.2 - Kraft-Zeit-Diagramm

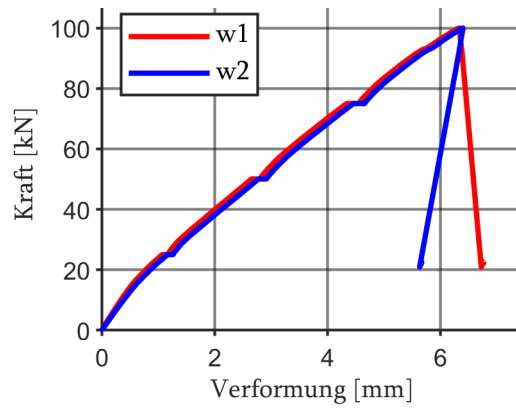


Bild 81 B2.2 - Kraft-Verformungs-Diagramm

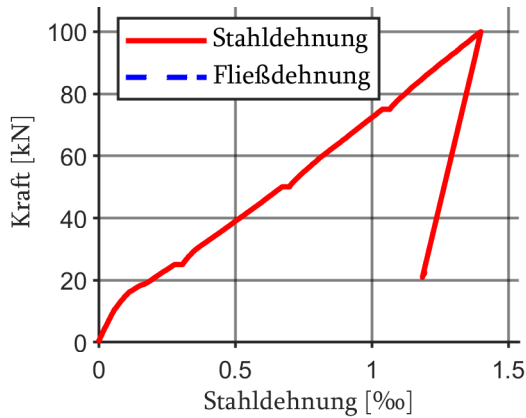


Bild 82 B2.2 - Kraft-Stahldehnungs-Diagramm

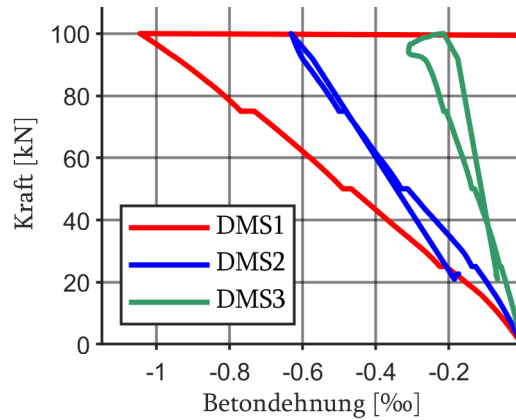


Bild 83 B2.2 - Kraft-Betondehnungs-Diagramm

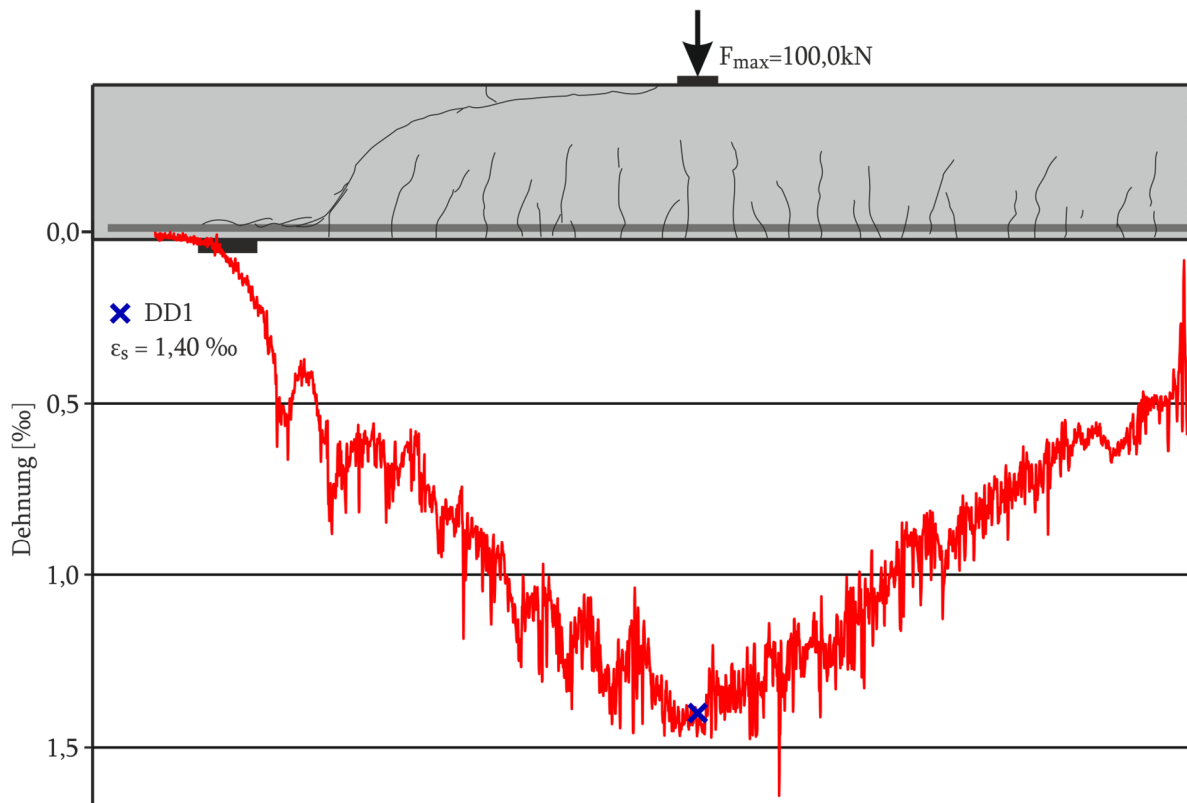
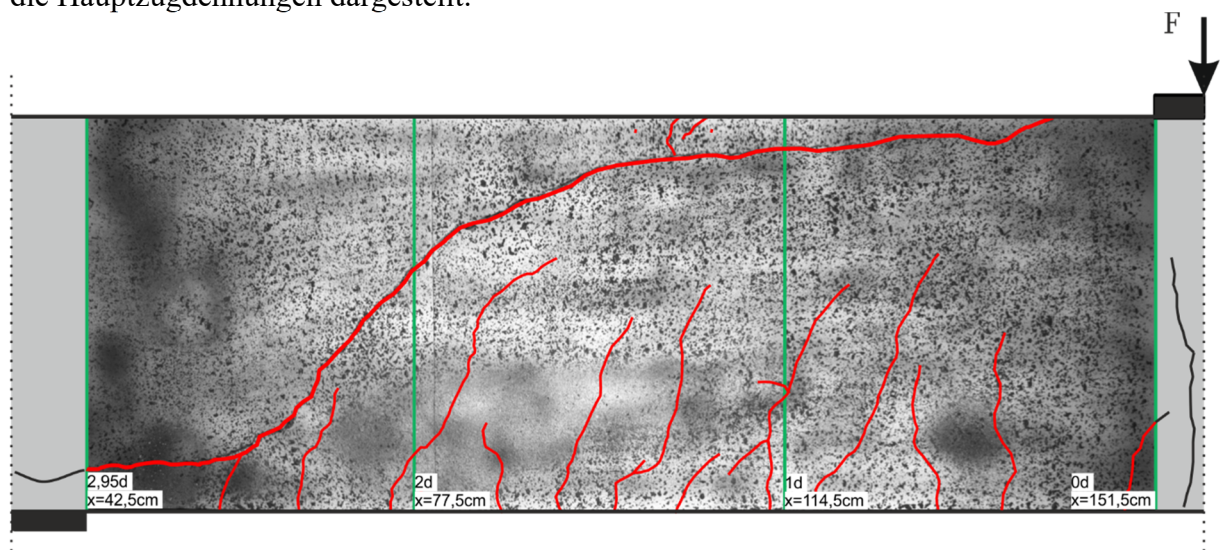
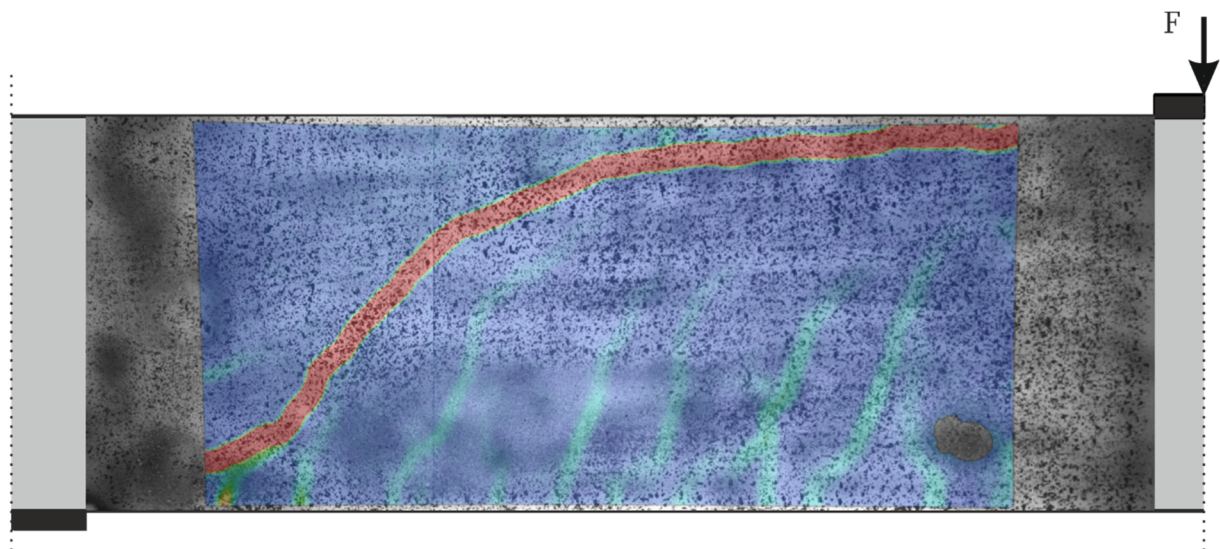


Bild 84 B2.2-Faseroptisch und mit DD1 gemessene Stahldehnungen bei Maximallast  $F_{max} = 100,0 \text{ kN}$

Bild 85 zeigt das photogrammetrische Messfeld mit dem ausgebildeten Rissbild. In Bild 86 sind die Hauptzugdehnungen dargestellt.

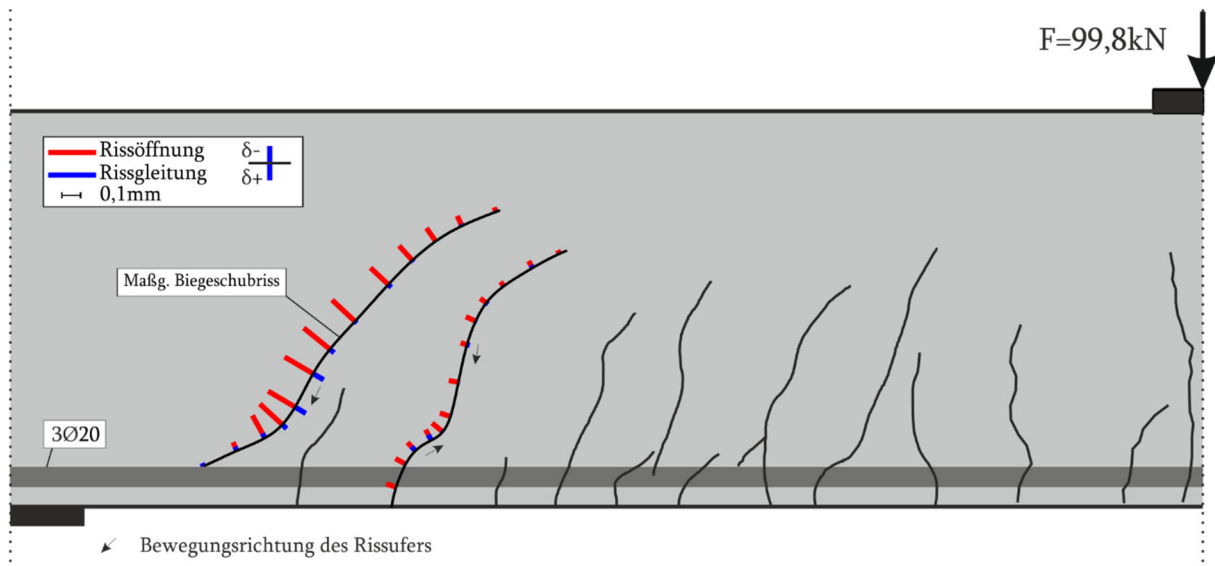


**Bild 85 B2.2 . Photogrammetrisches Messfeld mit Rissbildung anhand Dehnungsfeldes nach  $F_{\max}$**

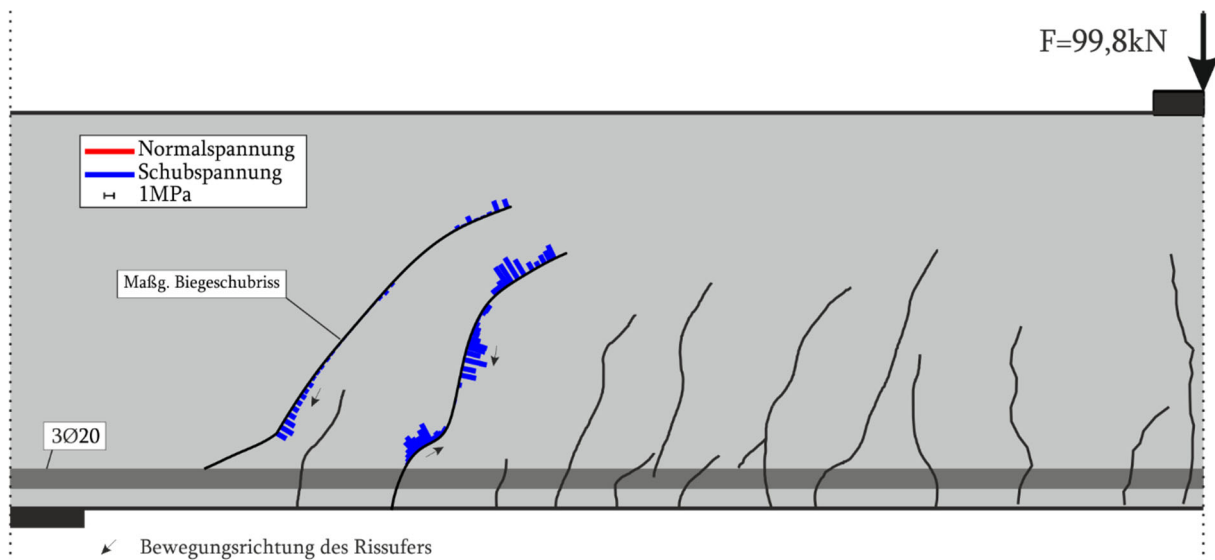


**Bild 86 B2.2 Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen nach  $F_{\max} = 100,0 \text{ kN}$**

Die Risskinematik im Versuch bei Maximallast ist in Bild 87 für zwei Biegeschubriss dargestellt. Bei  $F_{\max}$  ist die Rissöffnung des maßgebenden Biegeschubrisses mit  $0,17 \text{ mm}$  im Vergleich zur Rissgleitung mit  $0,07 \text{ mm}$  relativ groß. Der zweite Biegeschubriss weist nahezu keine Rissgleitung auf, jedoch liegt eine Rissöffnung vor.



**Bild 87 B2.2 - Risskinematik bei  $F = 99,8$  kN**



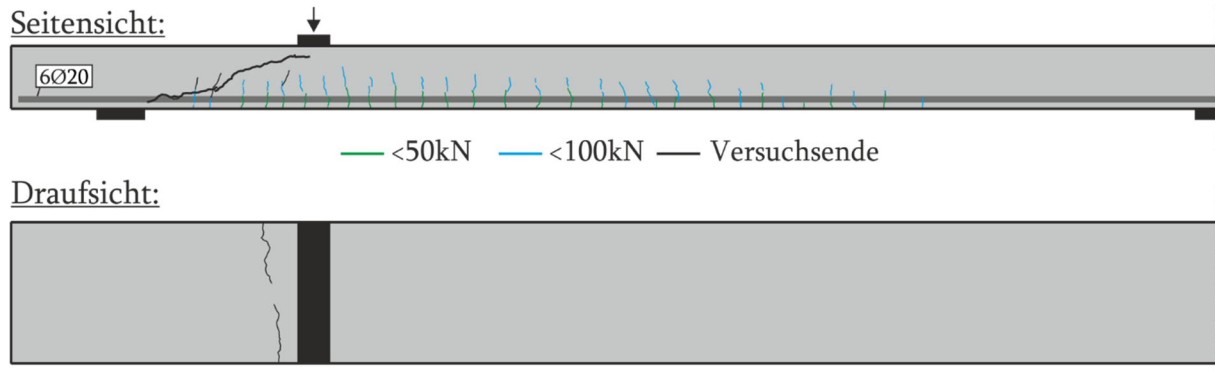
**Bild 88 B2.2 - Rissspannung nach Walraven bei  $F = 99,8$  kN**

**Tabelle 10 B2.2 Querkraftanteil der Rissreibung am gesamten Querkraftabtrag für den maßgebenden Biegeschubriß bei  $F = 99,8$  kN**

|                 | Gesamt | Walraven | Li   | Gambarova | Guidotti | Cavangis |
|-----------------|--------|----------|------|-----------|----------|----------|
| Querkraft [kN]  | 65,2   | 8,5      | 9,6  | 12,6      | 6,7      | 1,2      |
| Kraftanteil [%] | 100    | 13,0     | 14,8 | 19,3      | 10,2     | 23,3     |

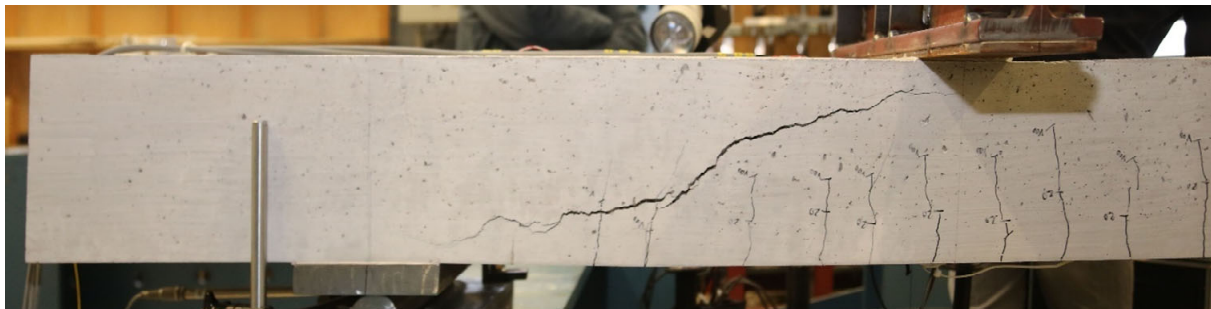
### 6.2.5 B3.1

Der Versuchsbalken B3.1 geht bei ca. 10 kN in den Zustand II über. Die Rissbildung des Balkens ist für unterschiedliche Laststufen in Bild 89 dargestellt. Bis zu einer Belastung von 50 kN entstehen Biegerisse mit einer maximalen Länge von einem Drittel der Balkenhöhe. Die weitere Laststeigerung auf 100 kN führt nur zu wenigen neuen Biegerissen. Die Länge der vorhandenen Risse nimmt deutlich zu und beträgt maximal zwei Drittel der Balkenhöhe. Durch die anschließende Belastung entsteht der maßgebende Biegeschubriss mit einem Übergang in einen Längsriss entlang der Bewehrung. Oberhalb des Längsrisses kommt es noch zu einer Verlängerung der Biegerisse.



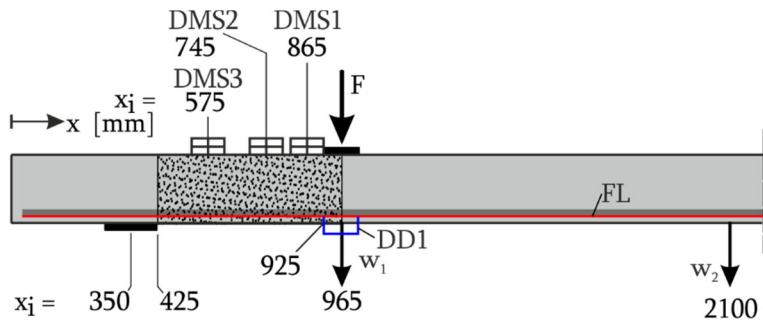
**Bild 89 B3.1 - Rissbild**

Bei der Last von  $F_{\max 1} = 172,8 \text{ kN}$  und einer Durchbiegung von **12,26 mm** tritt der maßgebende Biegeschubriss auf, wodurch die Last schlagartig auf 147,6 kN abfällt. Es handelt sich bei diesem Versuch um ein typisches Querkraftversagen, jedoch stellt das Rissbild eine Besonderheit dar (Bild 90). Nach Entstehung des Biegeschubrisses ist eine deutliche Laststeigerung möglich. Die maximale Belastung auf den Balken beträgt  $F_{\max 2} = 230,6 \text{ kN}$  bei einer maximalen Verformung von **20,34 mm**.

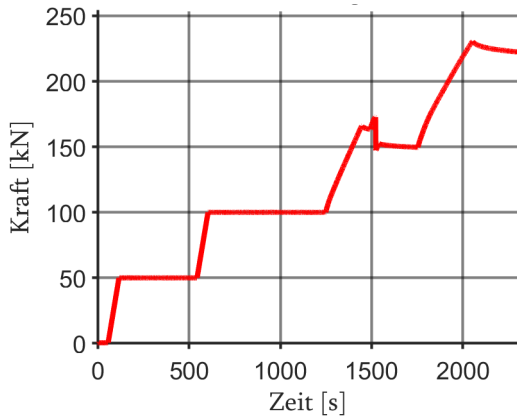


**Bild 90 B3.1 - Maßgebender Biegeschubriss (gespiegelt)**

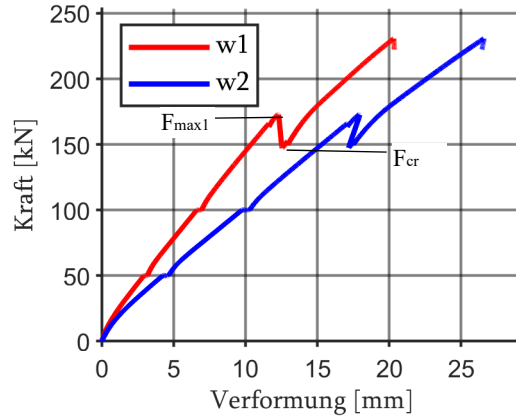
In der Bild 91 ist Lage der DMS und des DD1 dargestellt. Die aufgezeichneten Messwerte finden sich in Diagrammen in den Bildern 91-94. Die Dehnungen des Längsbewehrung (FL), gemessen mit faseroptischen Sensoren, sind Bild 96 zu entnehmen. Es ergibt sich unter der Last eine sehr gute Übereinstimmung der Stahldehnung aus der faseroptischen Messung und dem Dehnungsaufnehmer Typ DD1.



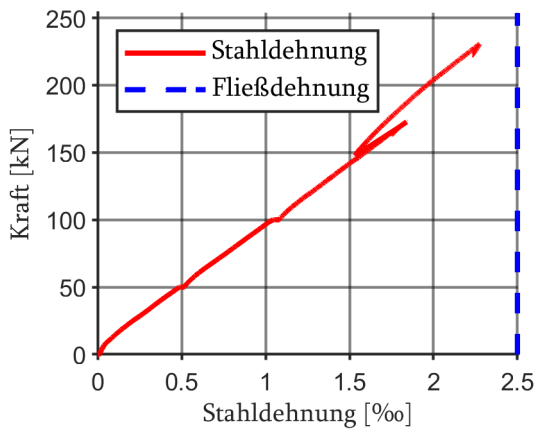
**Bild 91 B3.1 - Lage der DMS und des DD1 entlang der Längsachse**



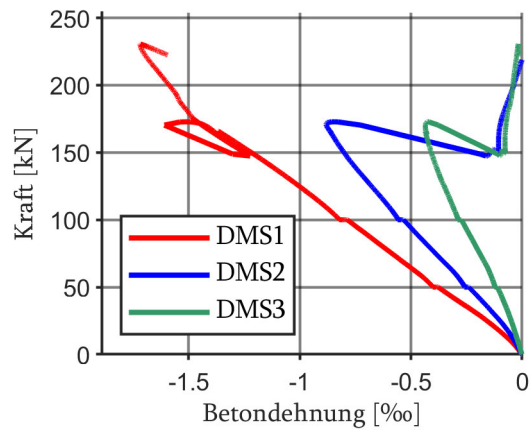
**Bild 92 B2.2 Kraft-Zeit-Diagramm**



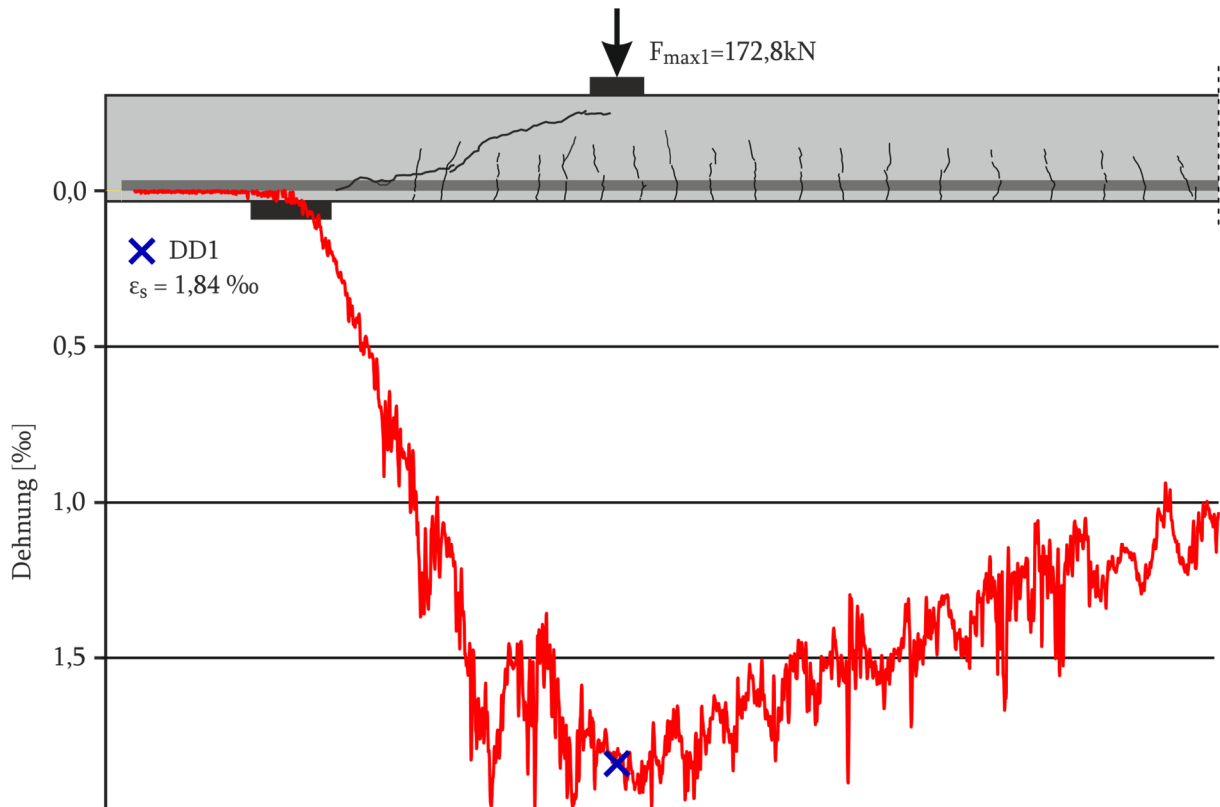
**Bild 93 B3.1 Kraft-Verformungs-Diagramm**



**Bild 94 B3.1 Kraft-Stahldehnungs-Diagramm**

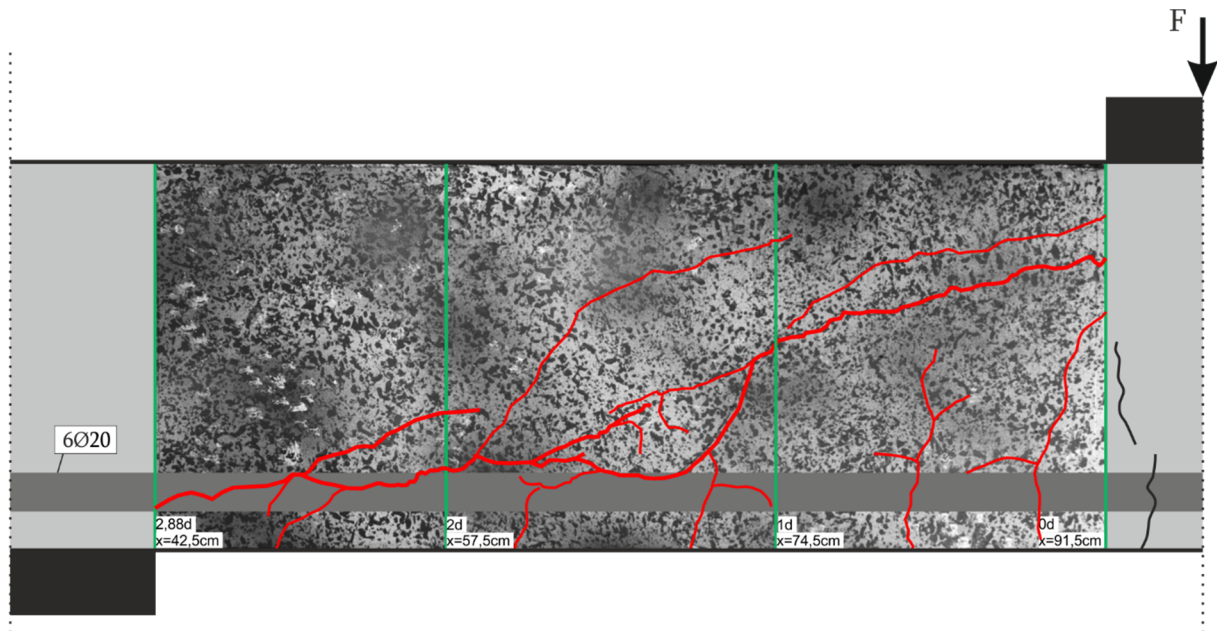


**Bild 95 B3.1 Kraft-Betondehnungs-Diagramm**

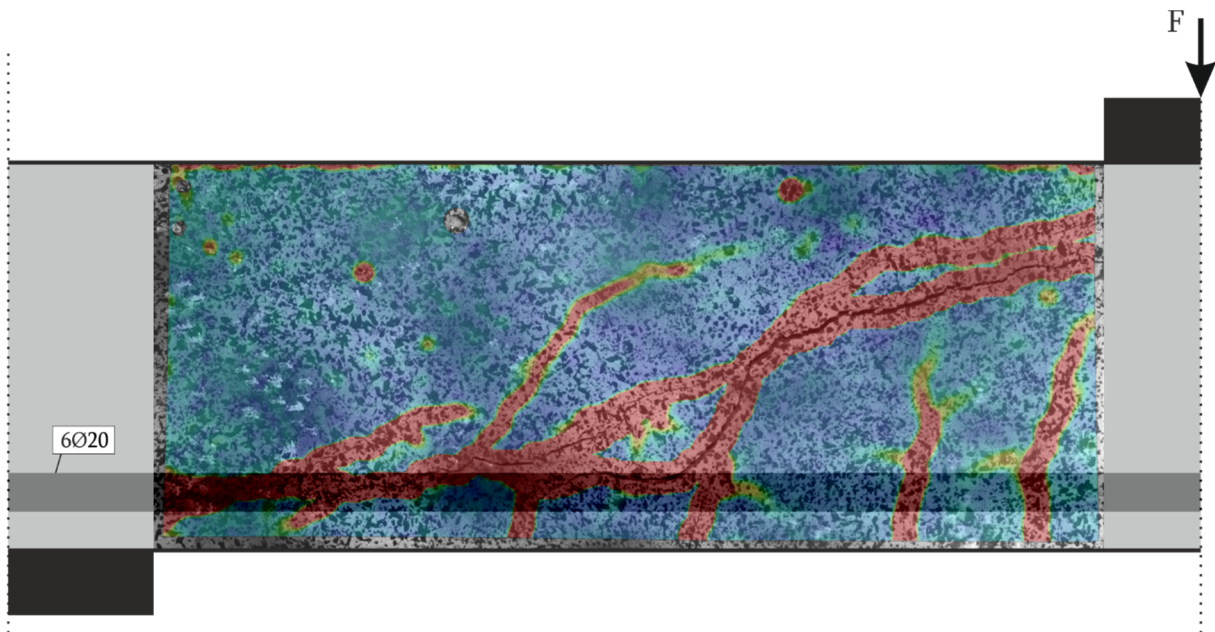


**Bild 96 B3.1 Faseroptische und Dehnungsmessungen bei Maximallast  $F_{\max 1} = 172,8 \text{ kN}$**

Die Bild 97 stellt das photogrammetrische Messfeld mit dem ausgebildeten Rissbild dar. Bild 98 zeigt die Hauptzugdehnungen im Messfeld.

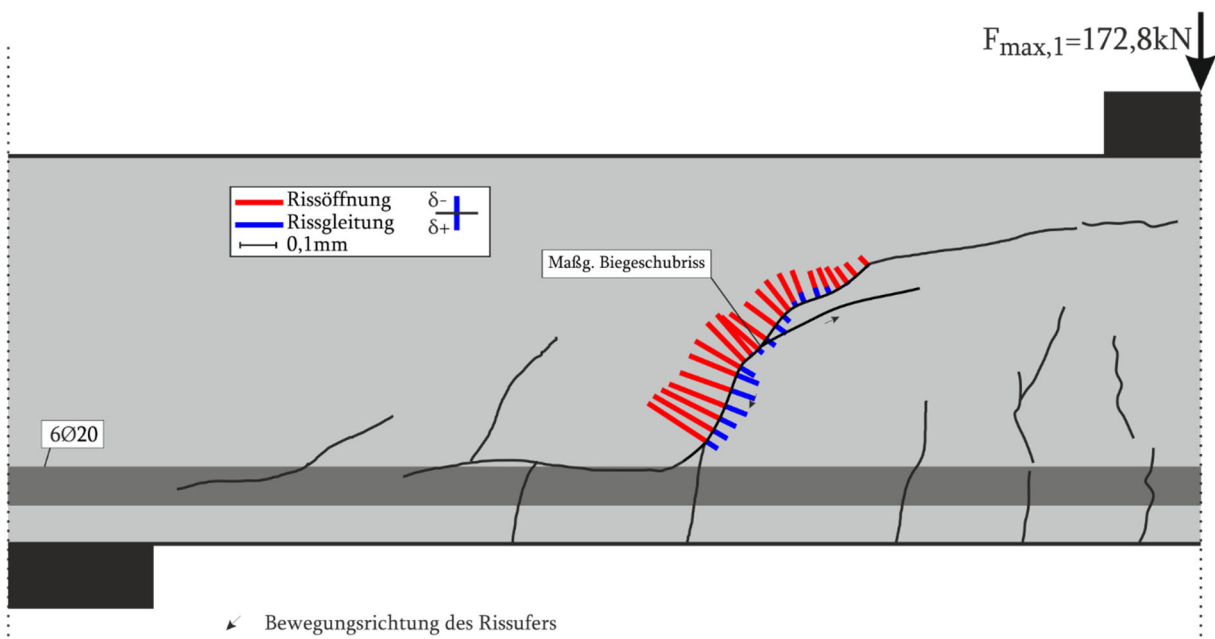


**Bild 97 B3.1 Photogrammetrisches Messfeld mit Rissbildung anhand Dehnungsfeldes nach  $F_{\max 2}$**

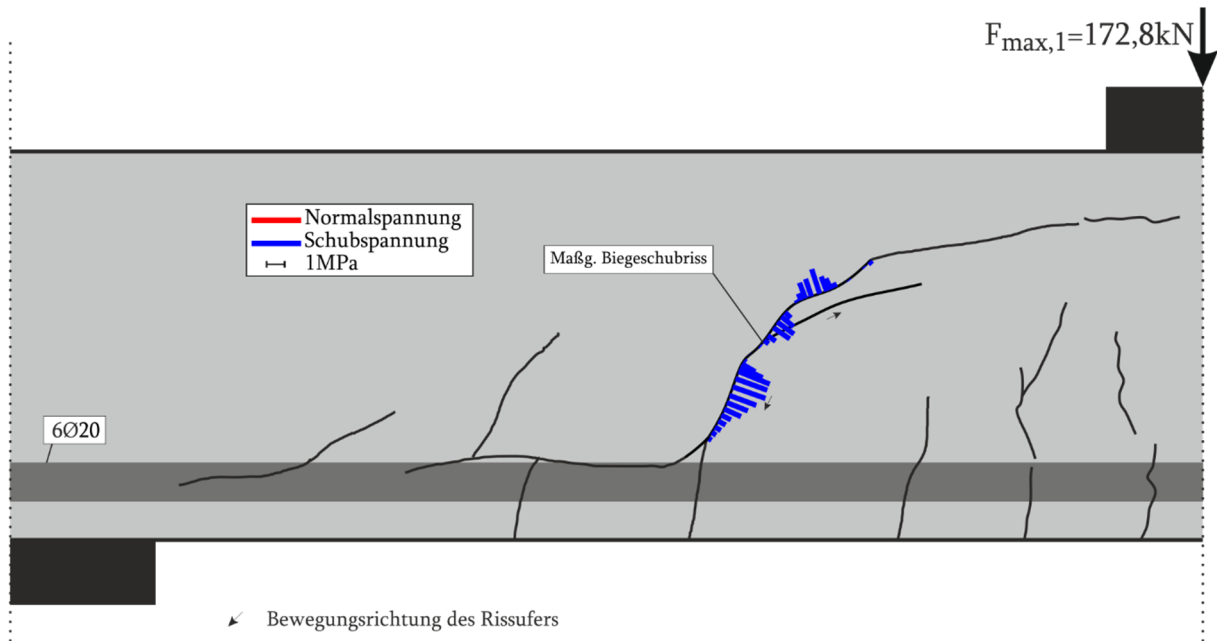


**Bild 98 B3.1 Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen nach  $F_{\max 2} = 230,6 \text{ kN}$**

Die Risskinematik des Versuchs bei Maximallast ist in Bild 99 für den maßgebenden Biegeschubriss dargestellt. Es liegt eine deutliche Rissöffnung von 0,2 mm maximal vor und im steilen Rissabschnitt ist die Rissgleitung mit 0,07 mm maximal.



**Bild 99 B3.1 Risskinematik bei  $F_{\max 1} = 172,8 \text{ kN}$**



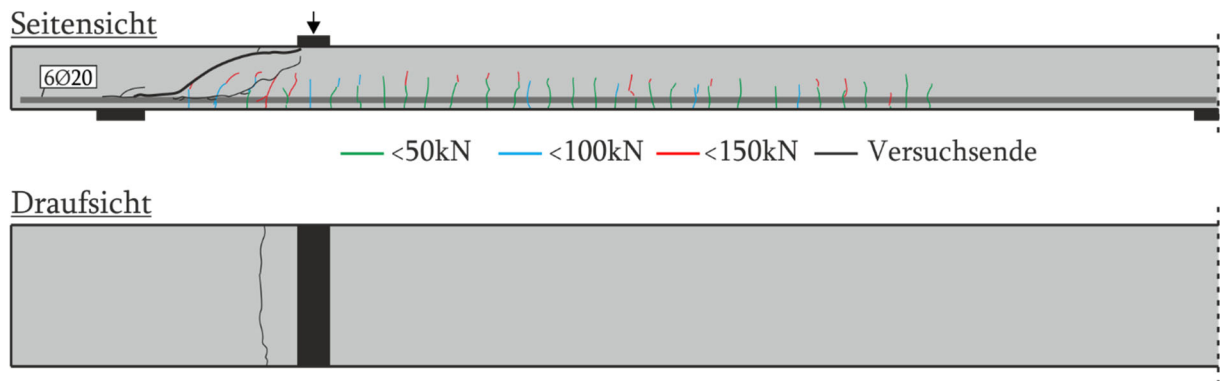
**Bild 100 B3.1** Rissspannung nach Walraven bei  $F_{\max,1} = 172,8 \text{ kN}$

**Tabelle 11 B3.1** Querkraftanteil der Rissreibung am gesamten Querkraftabtrag für den maßgebenden Biegeschubriss bei  $F_{\max,1}$

|                 | Gesamt | Walraven | Li   | Gambarova | Guidotti | Cavangis |
|-----------------|--------|----------|------|-----------|----------|----------|
| Querkraft [kN]  | 142,4  | 26,0     | 17,3 | 22,6      | 24,2     | 33,4     |
| Kraftanteil [%] | 100    | 18,3     | 12,1 | 15,9      | 17,0     | 23,4     |

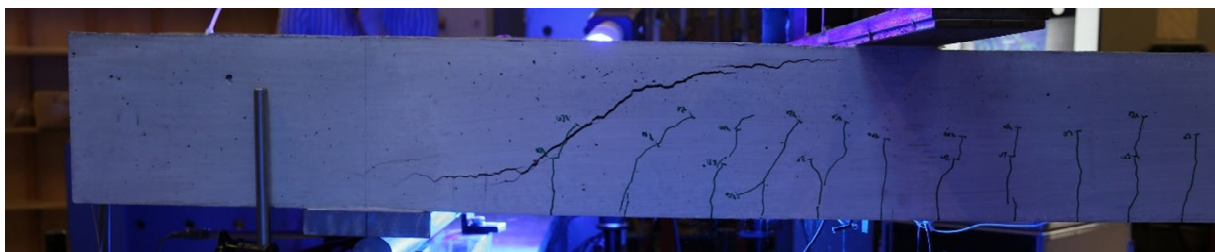
## 6.2.6 B3.2

Beim Versuchsbalken B3.2 ist der Übergang des Balkens in den Zustand II nicht eindeutig definiert, aufgrund der Rissbildung des ersten Versuchs. Die Rissbildung des Balkens ist für unterschiedliche Laststufen in Bild 101 dargestellt. Bis zu einer Belastung von 50 kN entstehen Biegerisse im Bereich der Balkenmitte mit einer maximalen Länge der halben Balkenhöhe. Die weitere Laststeigerung auf 100 kN führt zu weiteren Biegerissen, die sich bis über die halbe Balkenhöhe ausbilden. Bis 150 kN entstehen einige weitere Biegerisse. Die anschließende Belastung bis zum Versagen erzeugt den maßgebenden Biegeschubriss in Kombination mit einem Längsris, der bis über das Auflager verläuft. Bei weiterer Verformung bildet sich, unterhalb des bestehenden Risses, ein sekundärer Biegeschubriss aus.

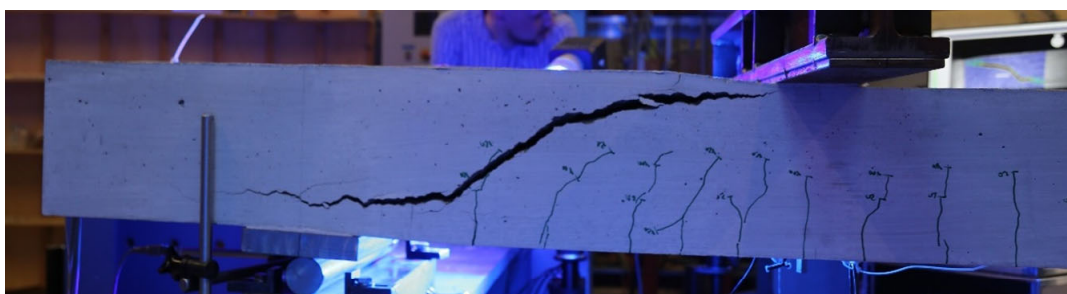


**Bild 101 B3.2 Rissbild**

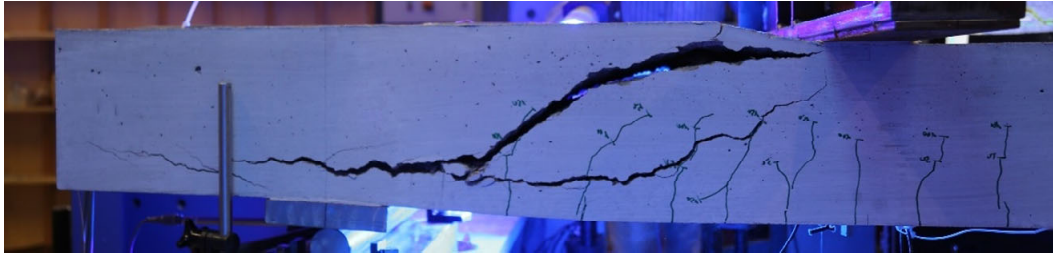
Beim Erreichen der Maximallast von  $F_{\max 1} = 172,0$  kN und einer Durchbiegung von **11,23 mm** entsteht der maßgebende Biegeschubriss, der von der Lasteinleitung bis vor das Auflager reicht und dort in einen Längsris auf Höhe der Längsbewehrung übergeht (Bild 102). Daraufhin fällt die Last auf 135,5 kN mit einer Verformung von 11,52 mm ab. Mit weiterer Verformung des Balkens kommt es zu einer massiven Öffnung des kritischen Biegeschubrisses (Bild 103). Die Belastung kann noch auf bis zu **149,5 kN** gesteigert werden, aber fällt im Anschluss stetig. Zum einen versagt die Druckzone (Bild 103) und zum anderen bildet sich anschließend ein zweiter Biegeschubriss aus (Bild 104).



**Bild 102 B3.2 Maßgebender Biegeschubriss nach der Entstehung (gespiegelt)**

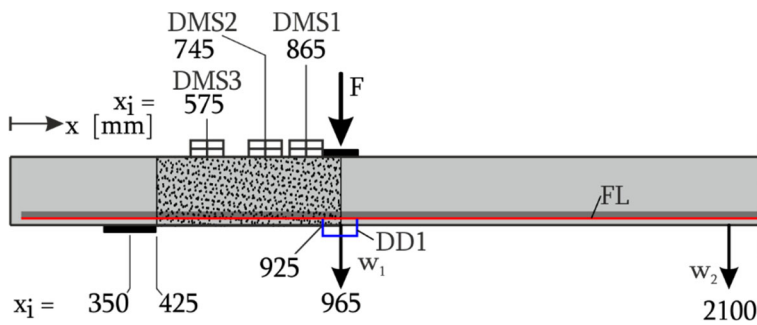


**Bild 103 B3.2 Maßgebender Biegeschubriss bei weiterer Verformung (gespiegelt)**

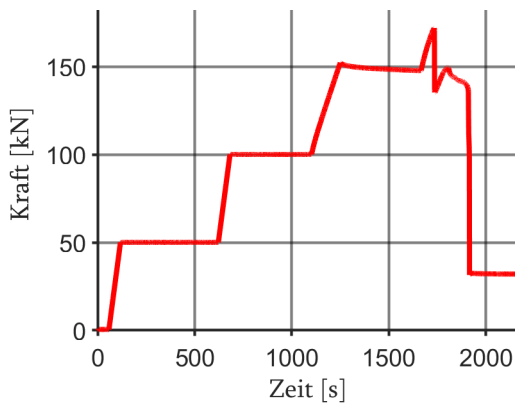


**Bild 104 B3.2 Maßgebender Biegeschubriss und sekundärer Biegeschubriss (gespiegelt)**

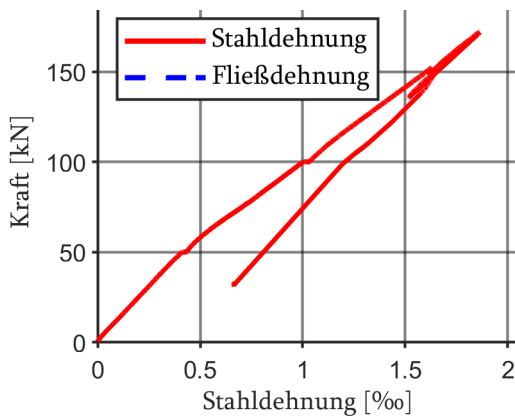
Bild 105 zeigt den Messaufbau. Die aufgezeichneten Werte finden sich in den Bildern 106-109. Die Dehnungen der Längsbewehrung, gemessen mit den faseroptischen Sensoren, (FL) sind in Bild 110 dargestellt.



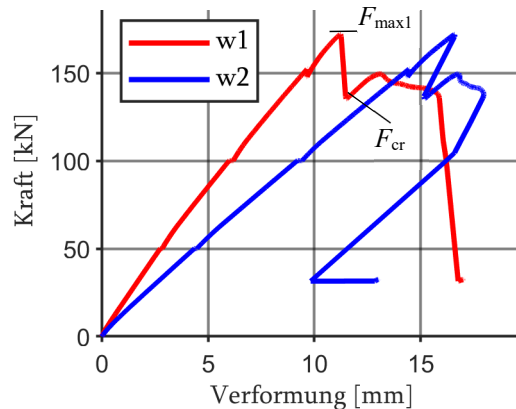
**Bild 105 B3.2 - Lage der DMS und des DD1 entlang der Längsachse**



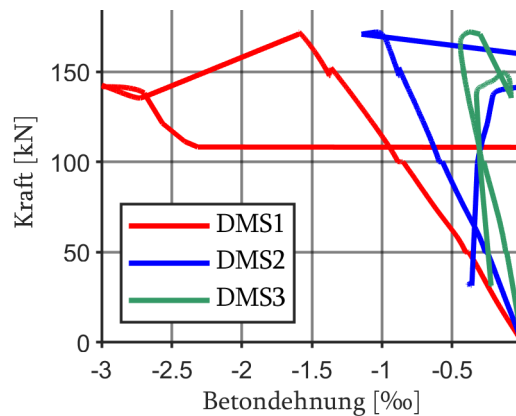
**Bild 106 B3.2 Kraft-Zeit-Diagramm**



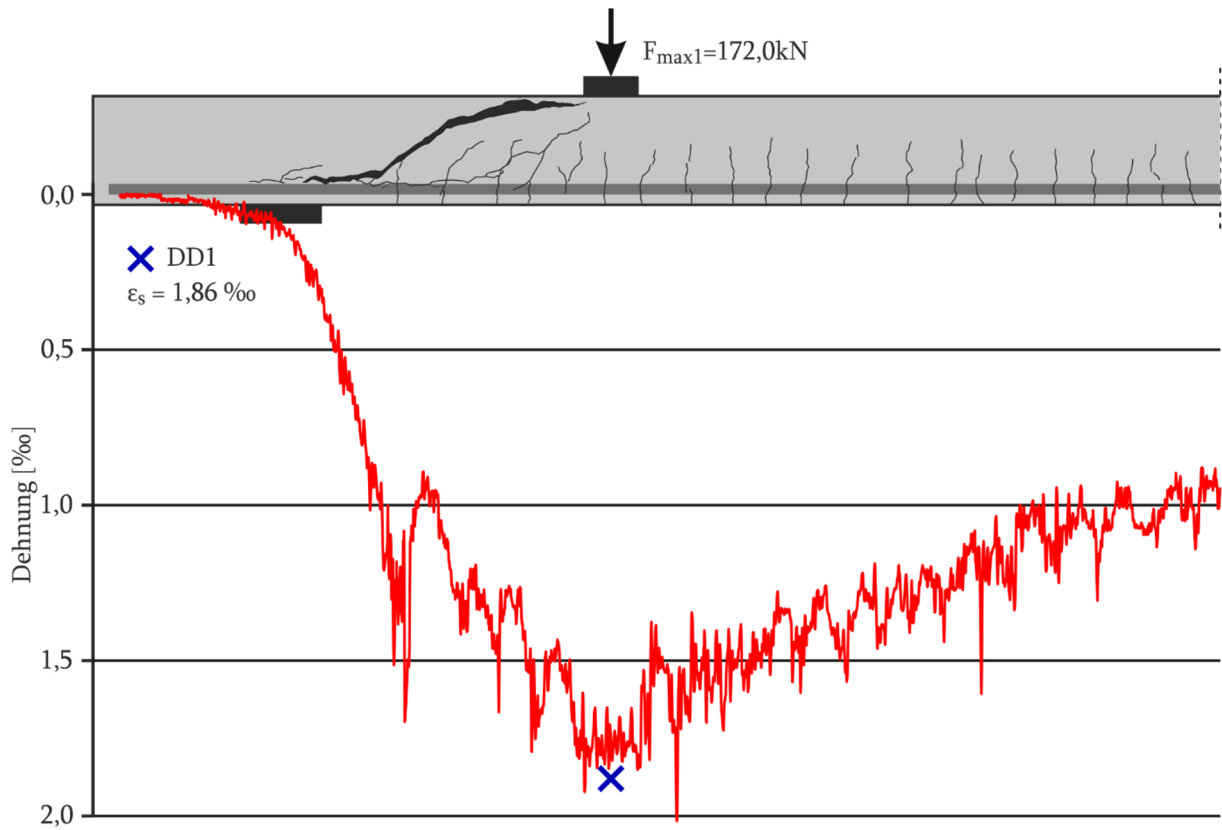
**Bild 108 B3.2 Kraft-Stahldehnungs-Diagramm**



**Bild 107 B3.2 Kraft-Verformungs-Diagramm**

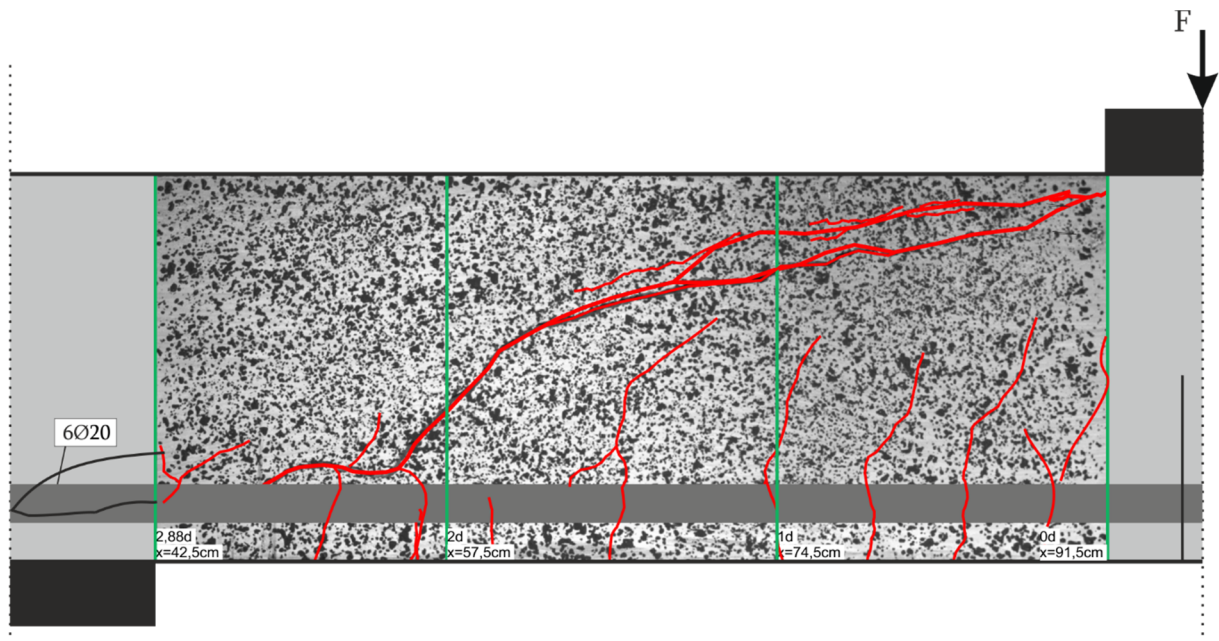


**Bild 109 B3.2 Kraft-Betondehnungs-Diagramm**

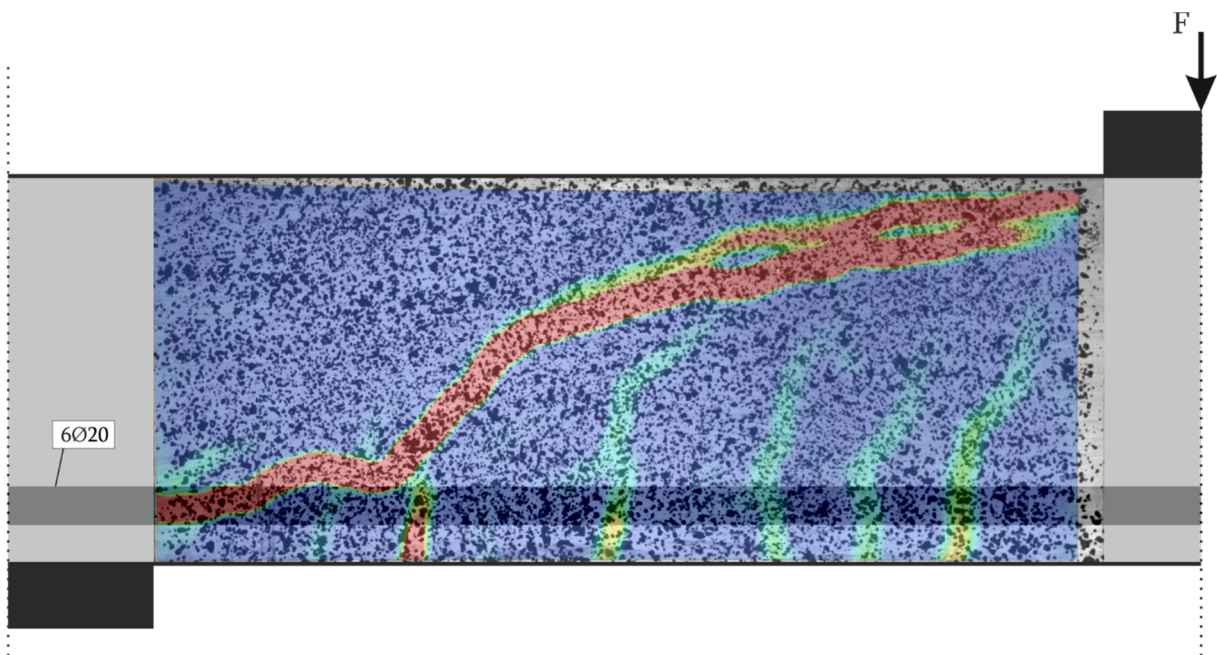


**Bild 110 B3.2 Faseroptische und Dehnungsmessungen bei Maximallast  $F_{\max 1} = 172,0$  kN**

Die Bild 111 stellt das photogrammetrische Messfeld mit dem ausgebildeten Rissbild dar. In Bild 112 sind die Hauptzugdehnungen im Messfeld dargestellt.

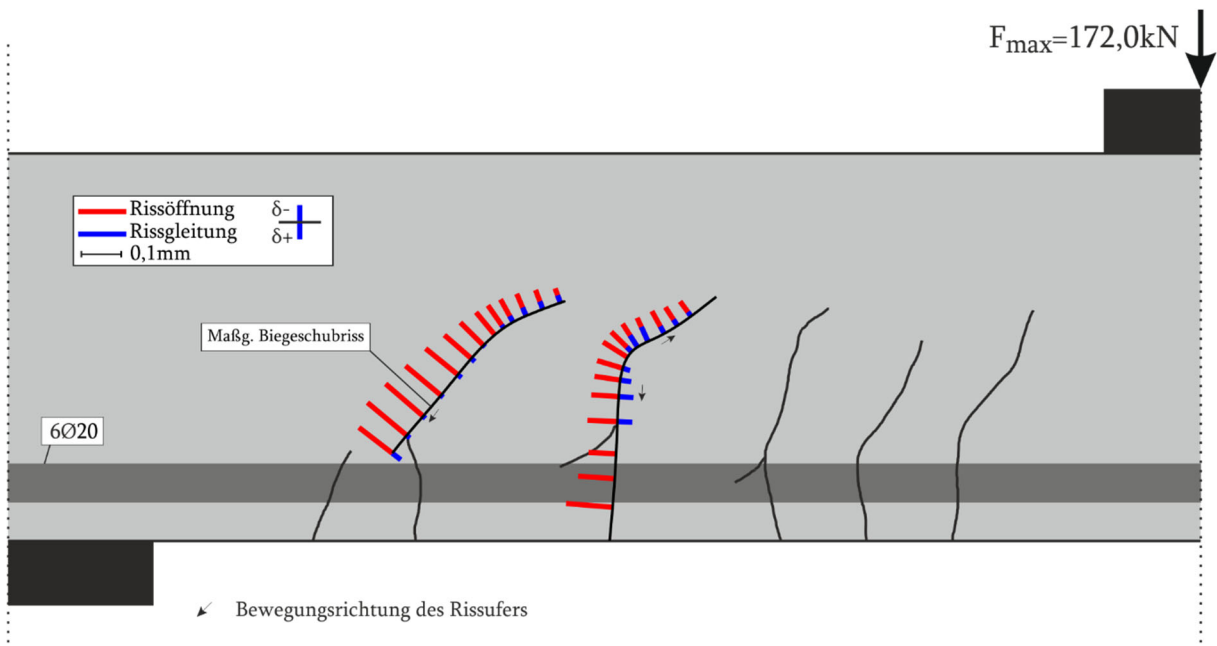


**Bild 111 B3.2 Photogrammetrisches Messfeld mit Rissbildung anhand Dehnungsfeldes nach  $F_{\max 1}$**

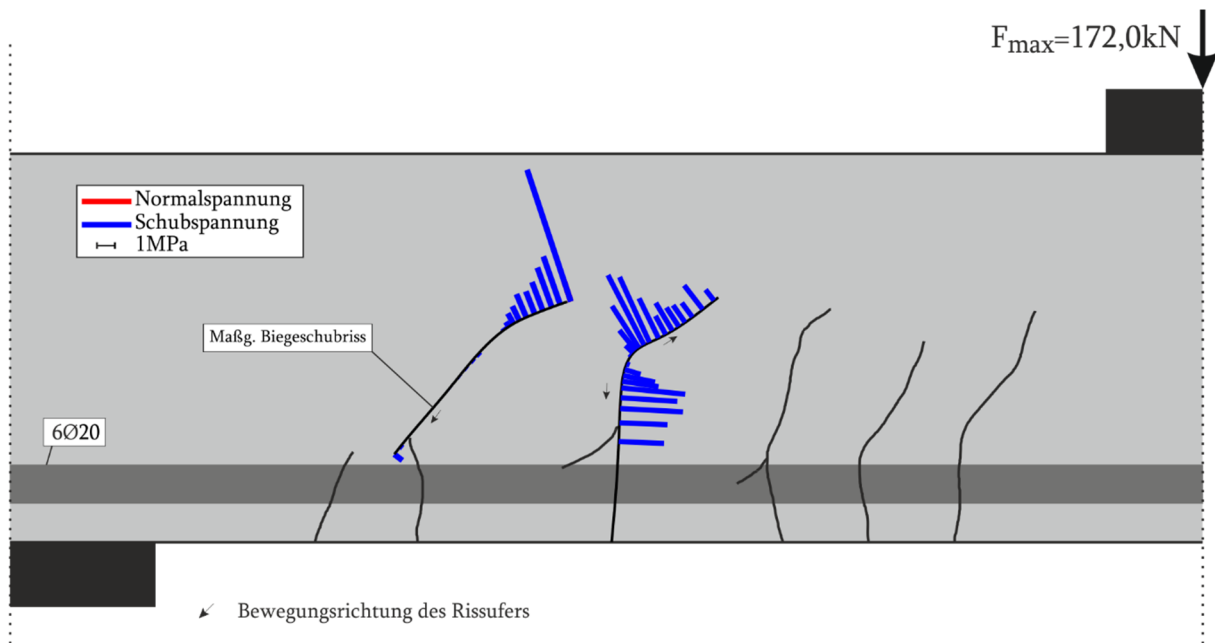


**Bild 112 B3.2 Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen nach  $F_{\max 1} = 172 \text{ kN}$**

Die Risskinematik des Versuchs bei Maximallast ist in Bild 113 für zwei Biegeschubriss dargestellt. Der maßgebende Biegeschubriss weist eine Rissöffnung von maximal 0,1 mm und keine Rissgleitung auf. Der zweite Biegeschubriss weist eine deutlichere Rissgleitung auf. Hieraus ist erkennbar, dass auf Höhe der Längsbewehrung reine Rissöffnung vorliegt.



**Bild 113 B3.2 Risskinematik bei  $F_{\max 1} = 172,0 \text{ kN}$**



**Bild 114 B3.2 Rissspannung nach Walraven bei  $F_{\max} = 172,0$  kN**

**Tabelle 12 B3.2 Querkraftanteil der Rissreibung am gesamten Querkraftabtrag für den maßgebenden Biegeschubriss bei  $F_{\max} = 172,0$  kN**

|                 | Gesamt | Walraven | Li   | Gambarova | Guidotti | Cavangis |
|-----------------|--------|----------|------|-----------|----------|----------|
| Querkraft [kN]  | 141,9  | -14,4    | -5,2 | -8,6      | -14,6    | -10,6    |
| Kraftanteil [%] | 100    | -10,2    | -3,7 | -6,0      | -10,3    | -7,5     |

Beim Versuch B3.2 handelt es sich um den Zweitversuch. Beim Erstversuch trat ein Biegeschubriss auf, der anders als bei den übrigen Balken, innerhalb des Feldes lag. Aus diesem Grund mussten Vorkehrungen getroffen werden, die ein frühzeitiges Versagen des Balkens verhindern. Dafür wurden Schraubzwingen als extern vorgespannte Querkraftbewehrung verwendet (Bild 115).

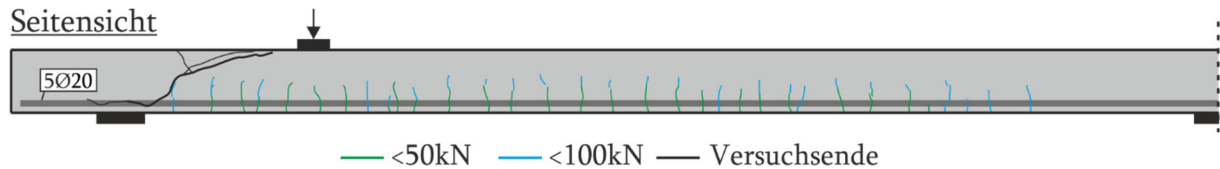


**Bild 115 B3.2 Extern vorgespannte „Querkraftbewehrung“**

### 6.2.7 B4.1

Der Versuchsbalken B4.1 geht bei ca. 10 kN in den Zustand II über. Die Rissbildung des Balkens ist für unterschiedliche Laststufen in Bild 116 dargestellt. Bis zu einer Belastung von 50 kN entstehen Biegerisse mit einer maximalen Länge von der halben Balkenhöhe. Die weitere Laststeigerung auf 100 kN führt nur zu einigen weiteren Biegerissen. Die Länge der vorhandenen Risse nimmt deutlich zu und beträgt maximal zwei Drittel der Balkenhöhe. Zu diesem Zeitpunkt ist das Rissbild bereits abgeschlossen. Durch die anschließende Belastung entsteht nur noch der maßgebende Biegeschubriss mit einem Übergang in einen Längsriss entlang der Bewehrung.

Seitensicht

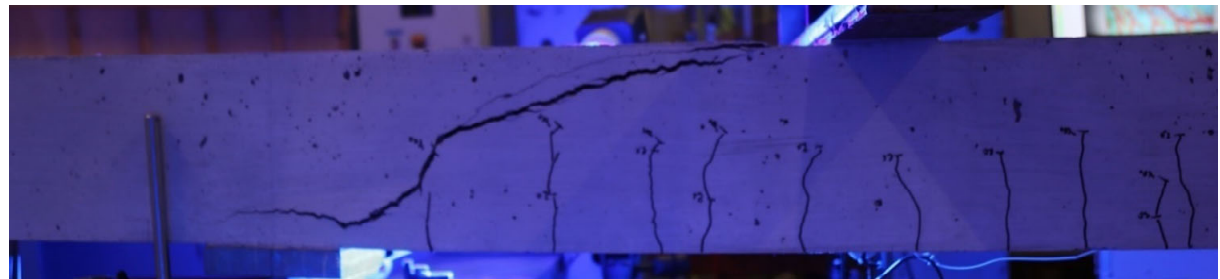


Draufsicht

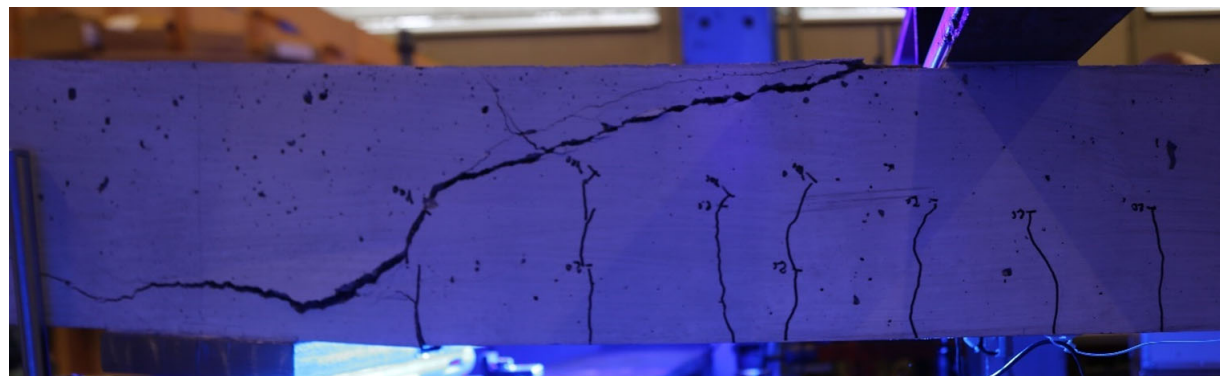


**Bild 116 B4.1 Rissbild**

Beim Erreichen der Maximallast von  $F_{\max 1} = 154,2 \text{ kN}$  und einer Durchbiegung von  $12,22 \text{ mm}$  entsteht der maßgebende Biegeschubriss. Die Druckzone ist kaum noch vorhanden (Bild 117). Daraufhin fällt die Last auf  $117,8 \text{ kN}$  mit einer Verformung von  $12,48 \text{ mm}$  ab. Mit weiterer Verformung des Balkens kommt es zu einer massiven Öffnung des kritischen Biegeschubrisses. Die Belastung kann noch auf bis zu  $133,5 \text{ kN}$  gesteigert werden. Daraufhin versagt die Druckzone (Bild 118) und es kommt zu einem erheblichen Lastabfall.

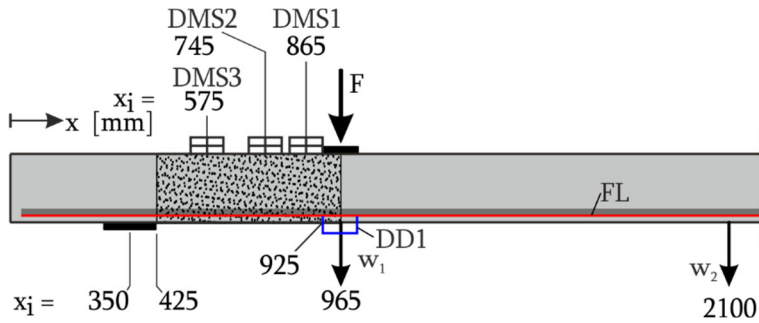


**Bild 117 B4.1 Maßgebender Biegeschubriss (gespiegelt)**

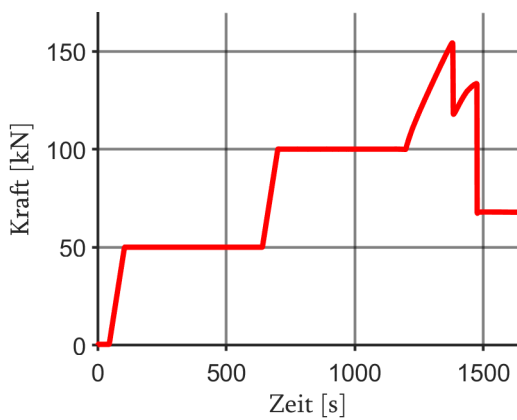


**Bild 118 B4.1 Maßgebender Biegeschubriss nach dem Versagen der Biegedruckzone (gespiegelt)**

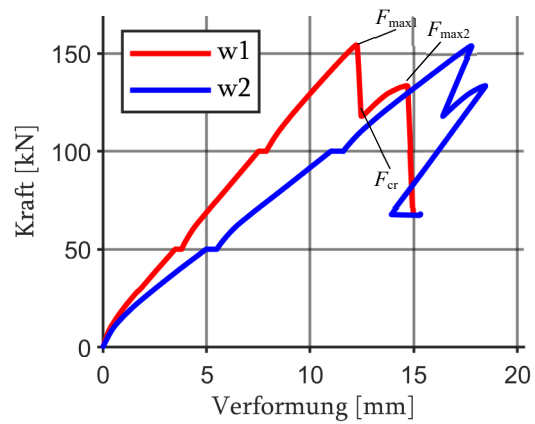
Bild 119 zeigt den Messaufbau. Die aufgezeichneten Werte finden sich in den Bildern 120-123. Die Messwerte der faseroptischen Sensoren an der Längsbewehrung (FL) sind in Bild 124 grafisch dargestellt.



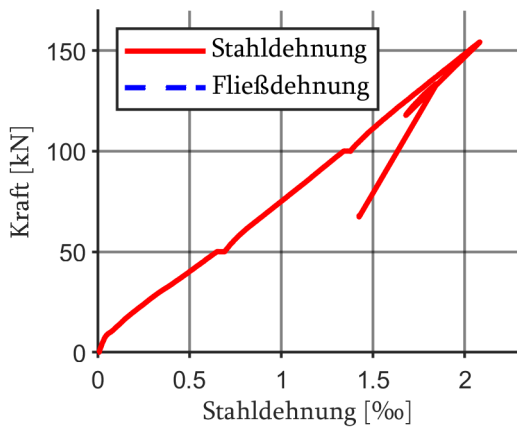
**Bild 119 B4.1 - Lage der DMS und des DD1 entlang der Längsachse**



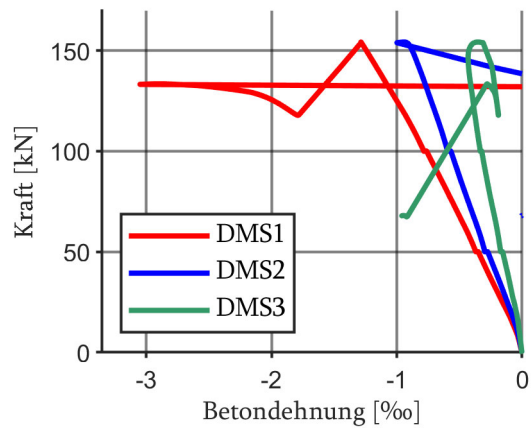
**Bild 120 B4.1 Kraft-Zeit-Diagramm**



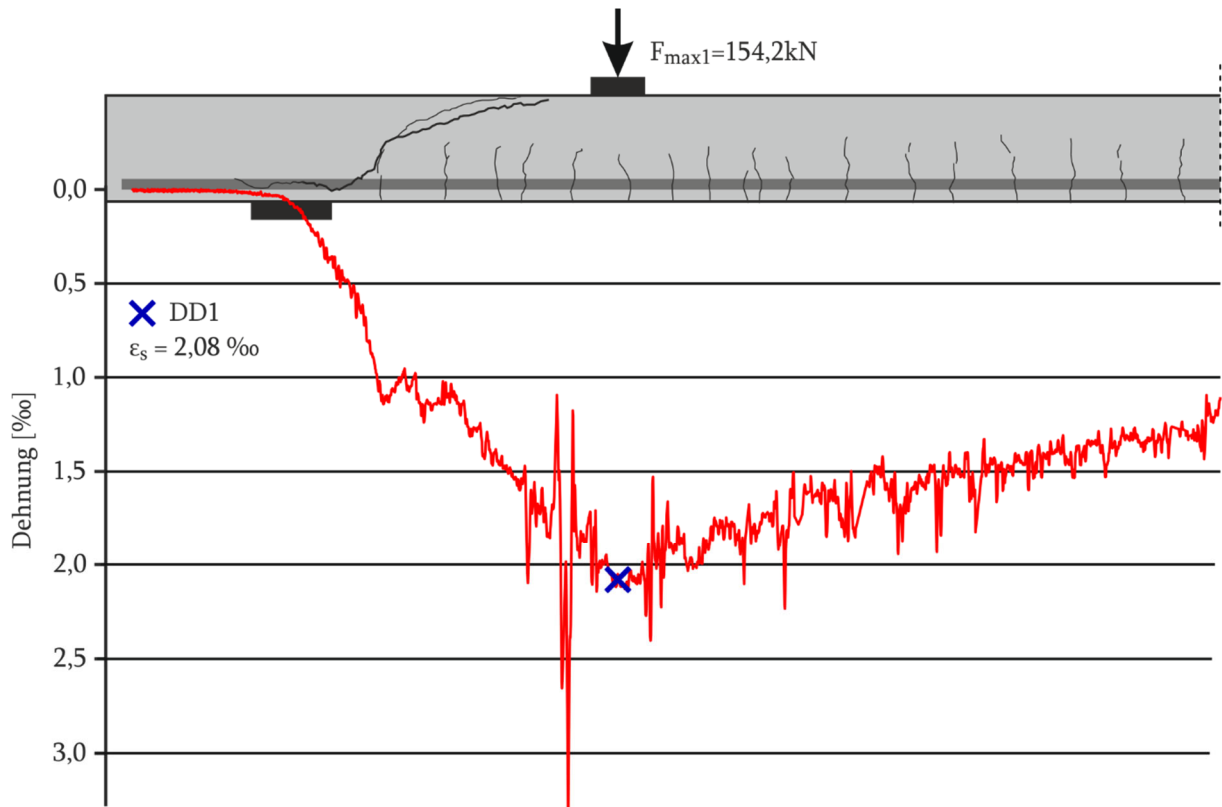
**Bild 121 B4.1 Kraft-Verformungs-Diagramm**



**Bild 122 B4.1 Kraft-Stahldehnungs-Diagramm**

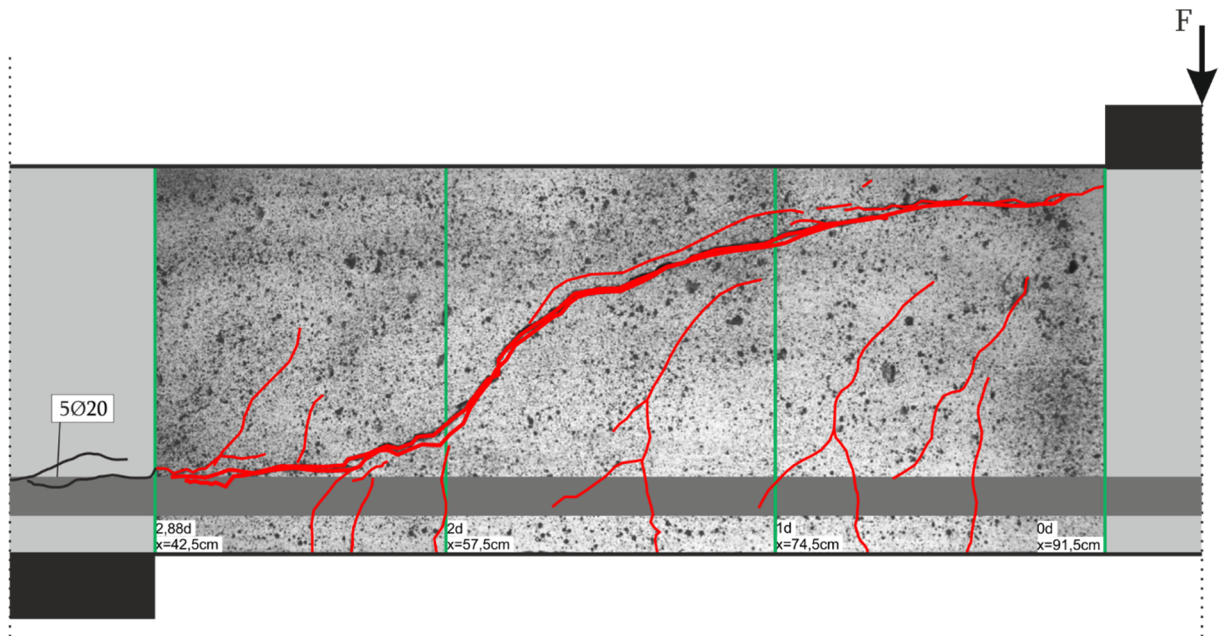


**Bild 123 B4.1 Kraft-Betondehnungs-Diagramm**

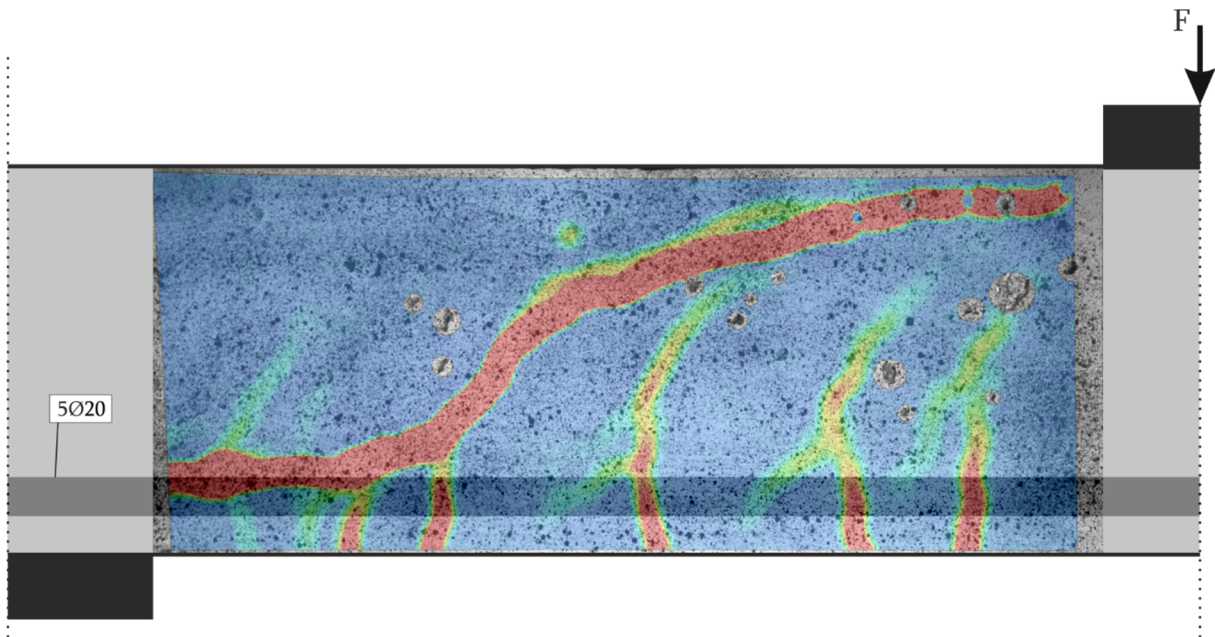


**Bild 124 B4.1 Faseroptische und Dehnungsmessungen bei Maximallast  $F_{\max 1}=154,2$  kN**

Die Bild 125 stellt das photogrammetrische Messfeld mit dem ausgebildeten Rissbild dar. In Bild 126 wird der Dehnungszustand der Hauptzugdehnungen im Messfeld dargestellt.

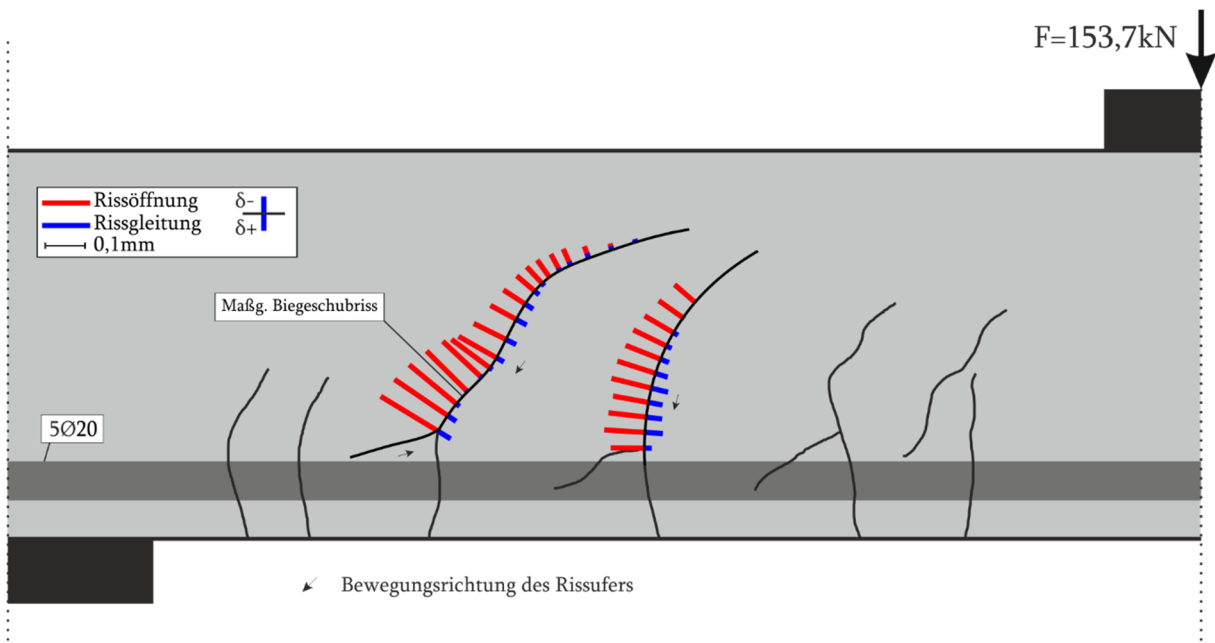


**Bild 125 B4.1 Photogrammetrisches Messfeld mit Rissbildung anhand Dehnungsfeldes nach  $F_{\max}$**

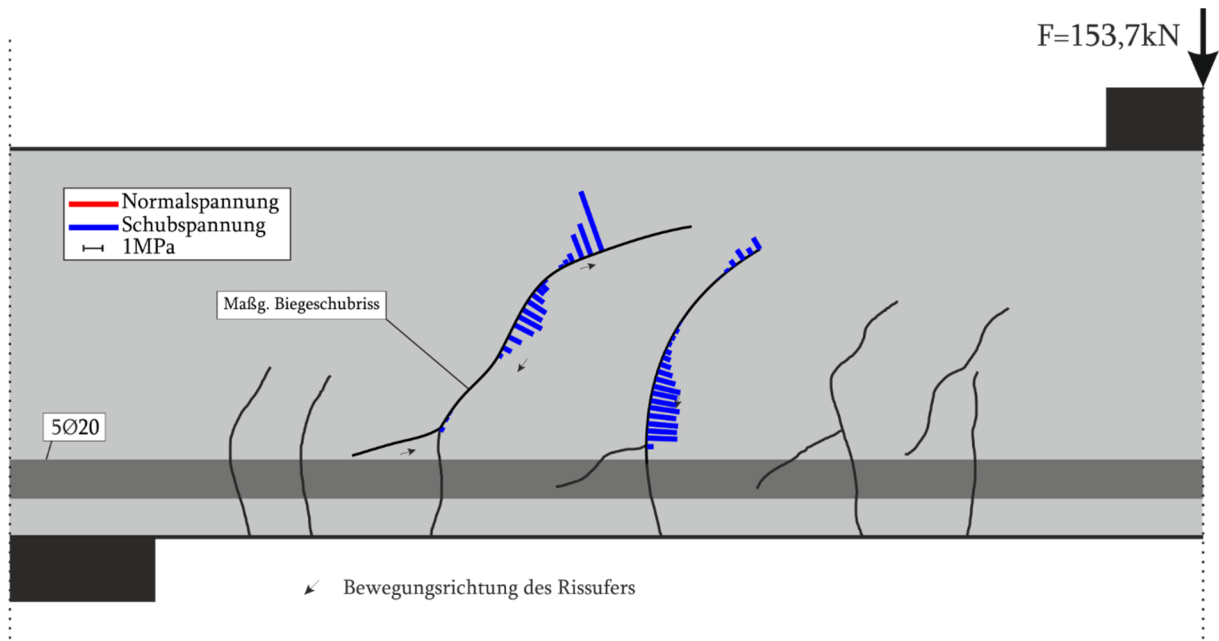


**Bild 126 B4.1 Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen nach  $F = 153,7 \text{ kN}$**

Die Rissskinematik des Versuchs bei Maximallast ist in Bild 127 für zwei Biegeschubriss dargestellt. Bei maximaler Belastung liegt die maximale Rissöffnung bei  $0,2 \text{ mm}$  und die maximale Rissgleitung bei ca.  $0,05 \text{ mm}$ . Im Bereich des Längsrisses liegt eine negative Rissgleitung vor. Der zweite Biegeschubriss besitzt eine maximale Rissöffnung von  $0,1 \text{ mm}$  und eine Rissöffnung von  $0,05 \text{ mm}$ . Beide Größen nehmen linear zur Risspitze ab.



**Bild 127 B4.1 Rissskinematik bei  $F = 153,7 \text{ kN}$**



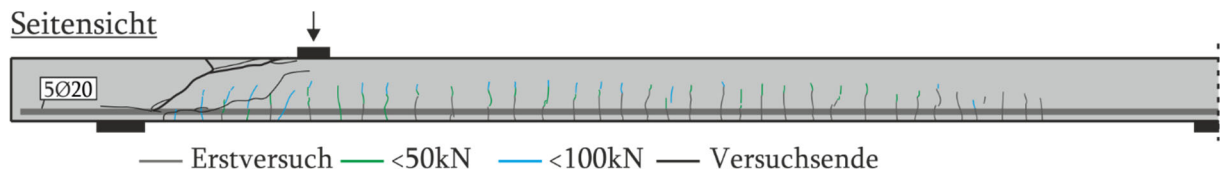
**Bild 128 B4.1 Rissspannung nach Walraven bei  $F = 153,7 \text{ kN}$**

**Tabelle 13 B4.1 Querkraftanteil der Rissreibung am gesamten Querkraftabtrag für den maßgebenden Biegeschubriss bei  $F = 153,7 \text{ kN}$**

|                 | Gesamt | Walraven | Li  | Gambarova | Guidotti | Cavangis |
|-----------------|--------|----------|-----|-----------|----------|----------|
| Querkraft [kN]  | 126,7  | 9,2      | 4,4 | 10,2      | 8,7      | 20,0     |
| Kraftanteil [%] | 100    | 7,3      | 3,4 | 8,0       | 6,8      | 15,8     |

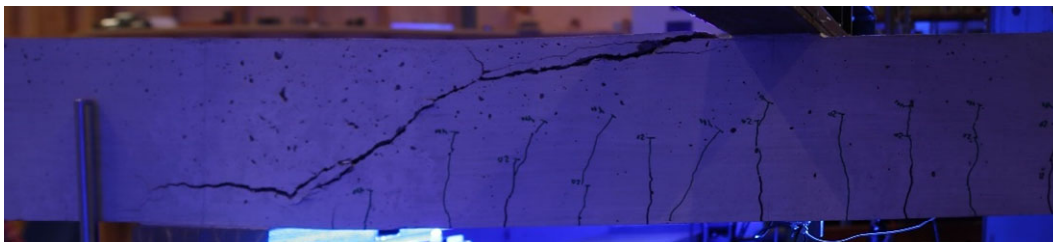
## 6.2.8 B4.2

Beim Versuchsbalken B4.2 ist der Übergang des Balkens in den Zustand II nicht eindeutig definiert, aufgrund der Rissbildung des ersten Versuchs. Die Rissbildung des Balkens ist für unterschiedliche Laststufen in Bild 129 dargestellt. Bis zu einer Belastung von 50 kN entstehen wenige neue Biegerisse, vielmehr verlängern sich die bereits vorhandenen Risse bis zu einer Länge von etwa zwei Drittel der Balkenhöhe. Die weitere Laststeigerung auf 100 kN führt zur Verlängerung der Biegerisse. Die anschließende Belastung bis zum Versagen erzeugt den maßgebenden primären Biegeschubriss in Kombination mit einem Längsriss entlang der Bewehrung, der bis über das Auflager verläuft. Bei weiterer Verformung bildet sich, unterhalb des bestehenden Risses, ein sekundärer Biegeschubriss aus.

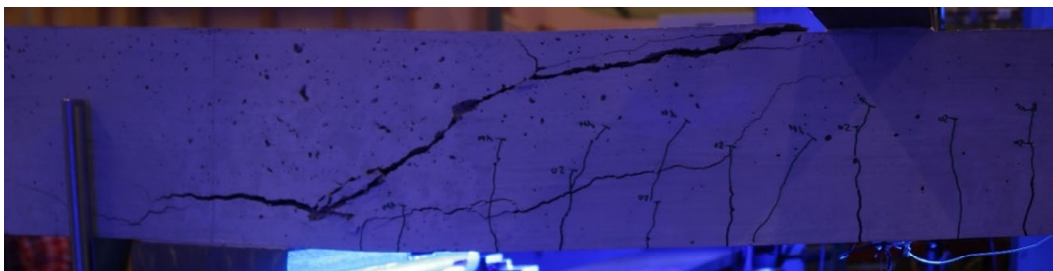


**Bild 129 B4.2 Rissbild**

Beim Erreichen der Maximallast von  $F_{\max 1} = 166,8 \text{ kN}$  und einer Durchbiegung von **12,12 mm** entsteht der maßgebende Biegeschubriss. Die Druckzone versagt mit Entstehung des Biegeschubrisses (Bild 130). Daraufhin fällt die Last auf 81,6 kN mit einer Durchbiegung von 12,71 mm ab. Mit weiterer Verformung des Balkens kommt es zu einer massiven Öffnung des kritischen Biegeschubrisses. Die Belastung kann noch bis 90,7 kN gesteigert werden. Daraufhin kommt es zum sekundären Biegeschubriss (Bild 131) und zu einem erheblichen Lastabfall.

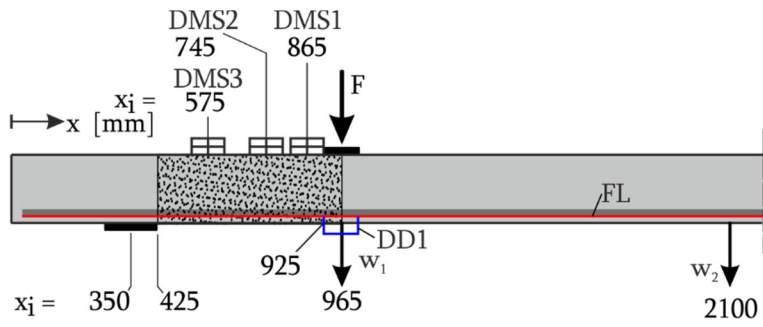


**Bild 130 B4.2 Maßgebender Biegeschubriss mit gleichzeitigem Versagen der Biegedruckzone (gespiegelt)**

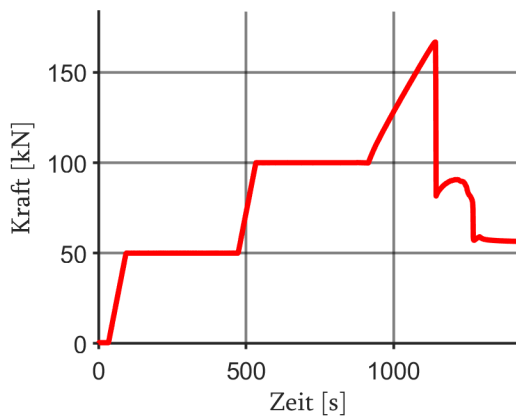


**Bild 131 B4.2 Maßgebender Biegeschubriss mit sekundärem Biegeschubriss (gespiegelt)**

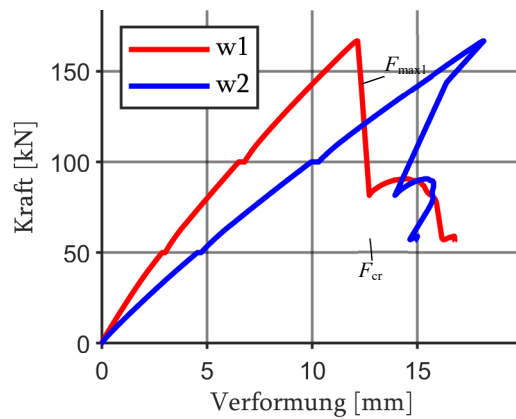
Bild 132 zeigt den Messaufbau. Die gemessenen Werte finden sich in Diagrammen in den Bildern 133-136. Die Messwerte der faseroptischen Sensoren an der Längsbewehrung (FL) sind in Bild 137 dargestellt.



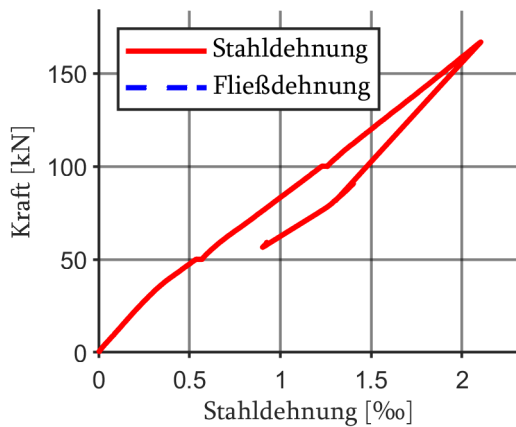
**Bild 132 B4.2 - Lage der DMS und des DD1 entlang der Längsachse**



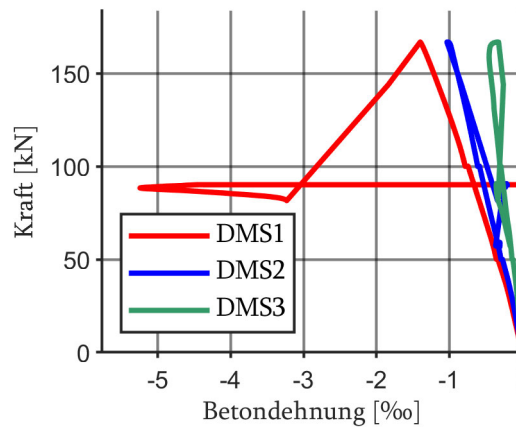
**Bild 133 B4.2 Kraft-Zeit-Diagramm**



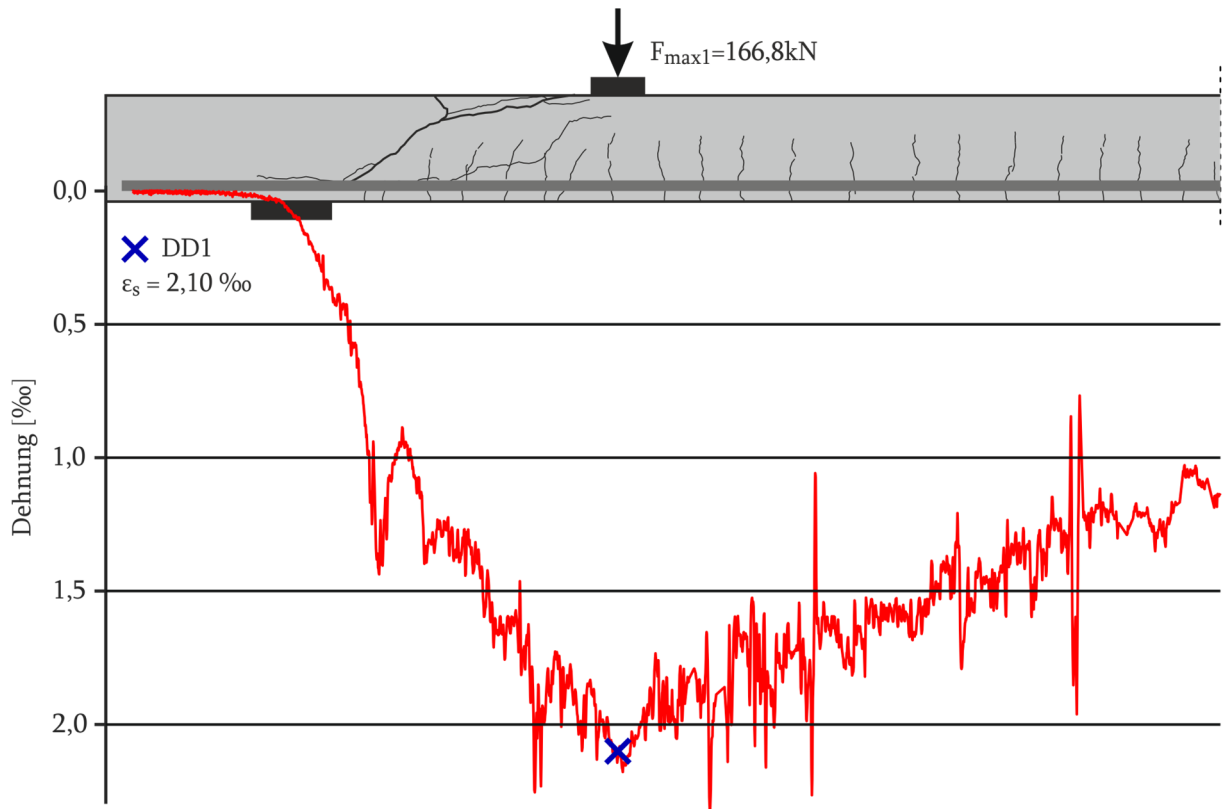
**Bild 134 B4.2 Kraft-Verformungs-Diagramm**



**Bild 135 B4.2 Kraft-Stahldehnungs-Diagramm**

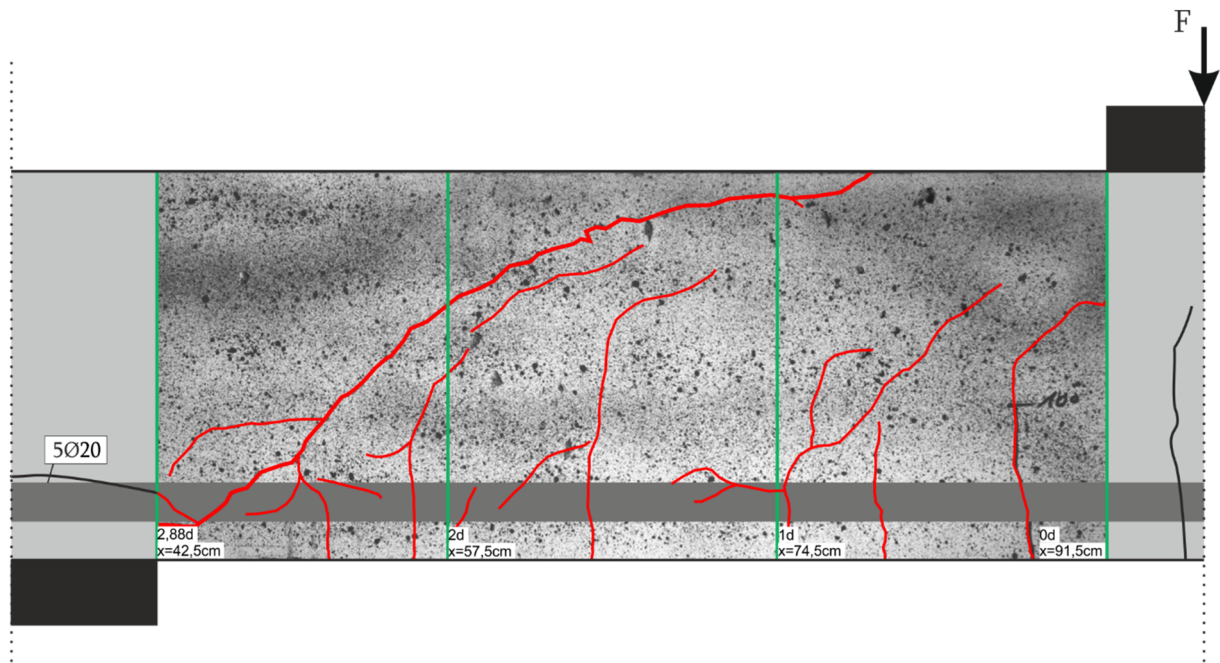


**Bild 136 B4.2 Kraft-Betondehnungs-Diagramm**

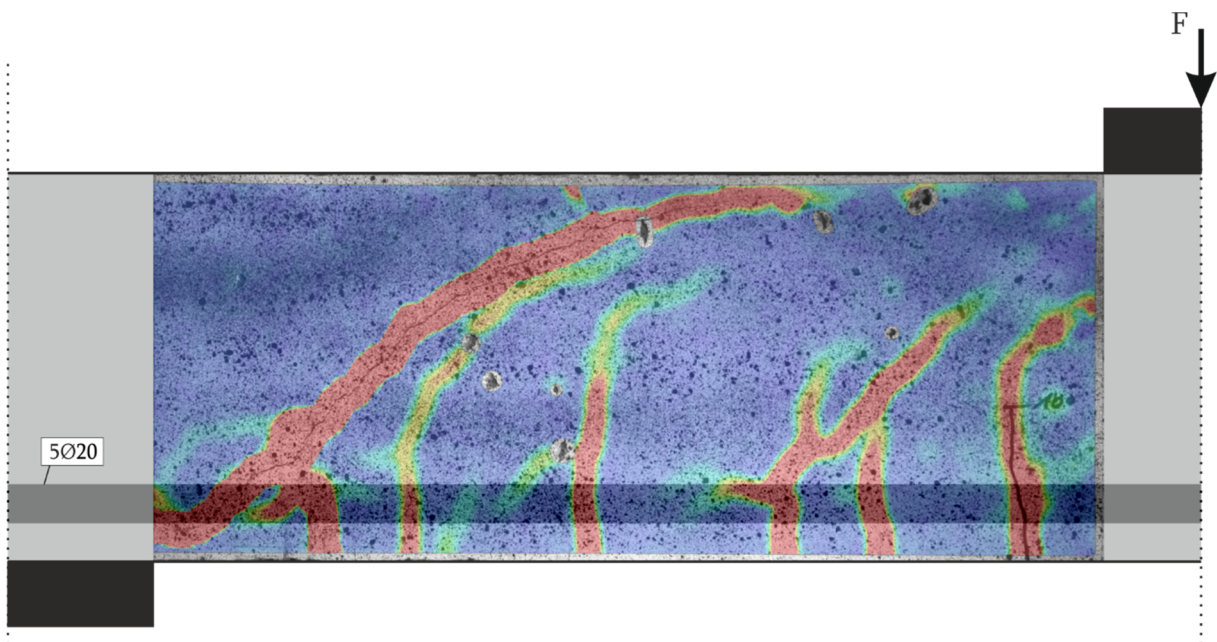


**Bild 137 B4.2 Faseroptische und Dehnungsmessungen bei Maximallast  $F_{\max 1} = 166,8 \text{ kN}$**

Bild 138 zeigt das photogrammetrische Messfeld mit dem ausgebildeten Rissbild. In Bild 139 sind die Hauptzugdehnungen im Messfeld dargestellt.

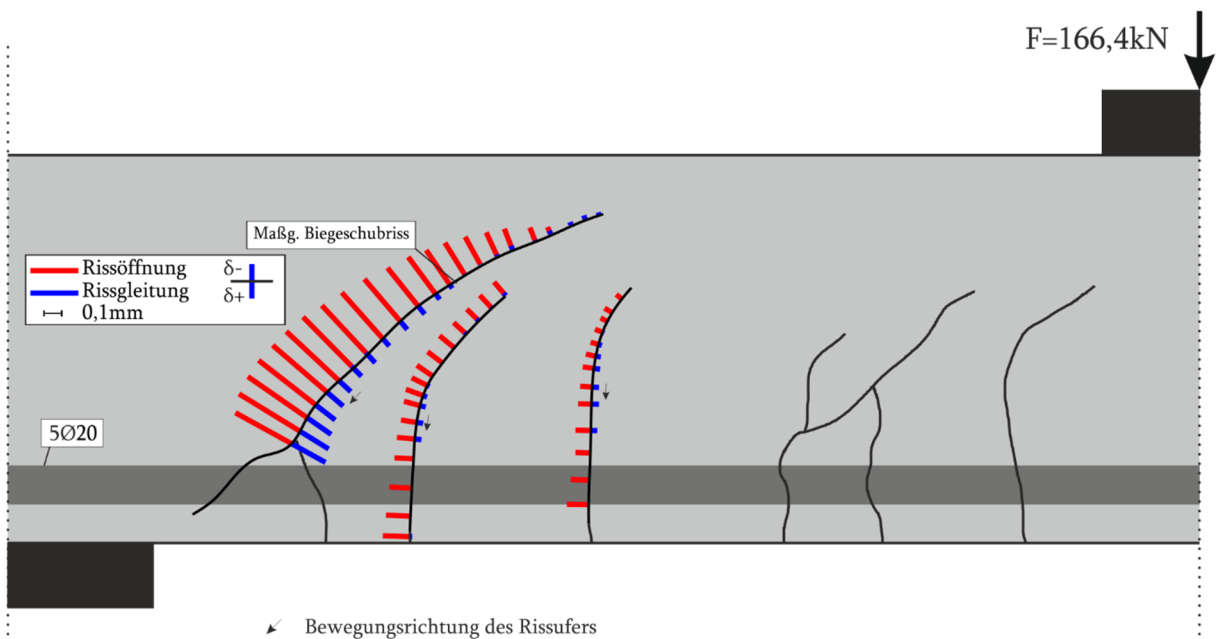


**Bild 138 B4.2 Photogrammetrisches Messfeld mit Rissbildung anhand Dehnungsfeldes nach  $F_{\max 1}$**

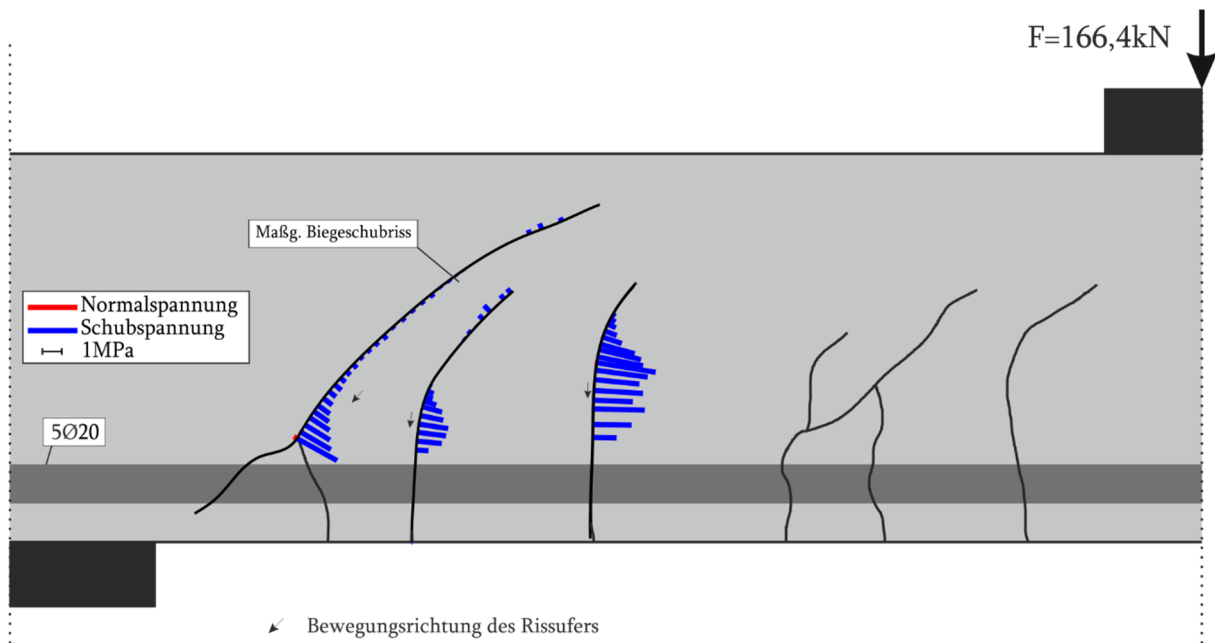


**Bild 139** B4.2 Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen nach  $F_{\max 1} = 166,8 \text{ kN}$

Die Risskinematik des Versuchs bei Maximallast ist in Bild 140 für mehrere Biegeschubriss dargestellt. Der maßgebende Biegeschubriss weist unter maximaler Belastung die größten Rissöffnungen von  $0,22 \text{ mm}$  und auch die größten Rissgleitungen von  $0,12 \text{ mm}$  auf. Bei den übrigen Biegeschubrissen tritt nur geringe Rissöffnungen ohne nennenswerte Rissgleitung auf.



**Bild 140** B4.2 Risskinematik bei  $F = 166,4 \text{ kN}$



**Bild 141 B4.2 Rissspannung nach Walraven bei  $F = 166,4\text{kN}$**

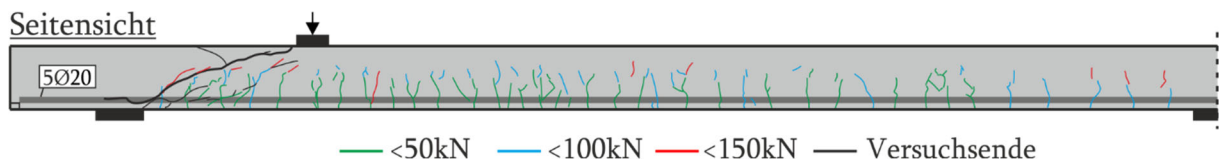
Da es sich hierbei um einen Zweitversuch handelt, wird der Versagensbereich aus dem Erstversuch wie bei dem Balken B3.2 gesichert (Bild 115).

**Tabelle 14 B4.2 Querkraftanteil der Rissreibung am gesamten Querkraftabtrag für den maßgebenden Biegeschubriss bei  $F = 166,4\text{kN}$**

|                 | Gesamt | Walraven | Li   | Gambarova | Guidotti | Cavangis |
|-----------------|--------|----------|------|-----------|----------|----------|
| Querkraft [kN]  | 137,2  | 16,4     | 18,7 | 21,6      | 12,9     | 26,9     |
| Kraftanteil [%] | 100    | 11,9     | 13,6 | 15,7      | 9,4      | 19,6     |

## 6.2.9 B5.1

Beim Versuchsbalken B5.1 entstehen bei ca. 10 kN die ersten Risse. Die Rissbildung des Balkens ist für unterschiedliche Laststufen in Bild 142 dargestellt. Bis zu einer Belastung von 50 kN entstehen Biegerisse mit einer maximalen Länge von der halben Balkenhöhe. Die weitere Laststeigerung auf 100 kN führt nur zu einigen weiteren Biegerissen. Die Länge der vorhandenen Risse nimmt deutlich zu und beträgt maximal zwei Drittel der Balkenhöhe. Zu diesem Zeitpunkt ist das Rissbild nahezu abgeschlossen. Es entsteht lediglich ein weiterer Biegeriss. Durch die anschließende Belastung bildet sich nur noch der maßgebende Biegeschubriss mit einem Übergang in einen Längsriss entlang der Bewehrung.



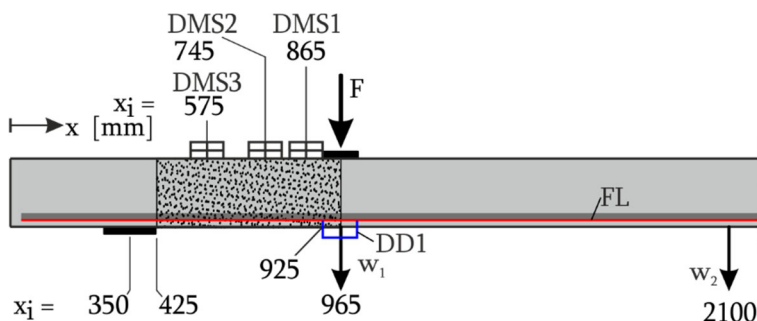
**Bild 142 B5.1 Rissbild**

Beim Erreichen der Maximallast von  $F_{\max} = 162,7 \text{ kN}$  und einer Durchbiegung von **12,46 mm** entsteht der maßgebende Biegeschubriss (Bild 143). Daraufhin fällt die Last auf 129,8 kN mit einer Verformung von 12,78 mm ab. Mit weiterer Verformung des Balkens kommt es zu einer massiven Öffnung des kritischen Biegeschubrisses. Die Belastung kann noch auf bis zu 138,1 kN gesteigert werden. Daraufhin versagt die Druckzone und es kommt zu einem erheblichen Lastabfall.



**Bild 143 B5.1 Versagensbild: Maßgebender Biegeschubriss, Versagen Druckzone, sekundärer Biegeschubriss (gespiegelt)**

Bild 144 zeigt den Messaufbau. Die gemessenen Werte finden sich in den Bildern 145-148. Die Messergebnisse der faseroptischen Sensoren auf der Längsbewehrung (FL) sind in Bild 149 dargestellt.



**Bild 144 B5.1 - Lage der DMS und des DD1 entlang der Längsachse**

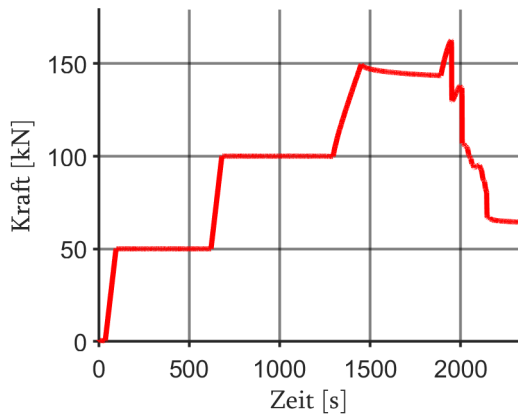


Bild 145 B5.1 Kraft-Zeit-Diagramm

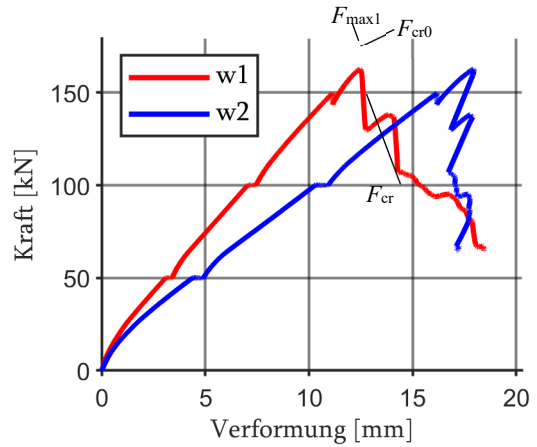


Bild 146 B5.1 Kraft-Verformungs-Diagramm

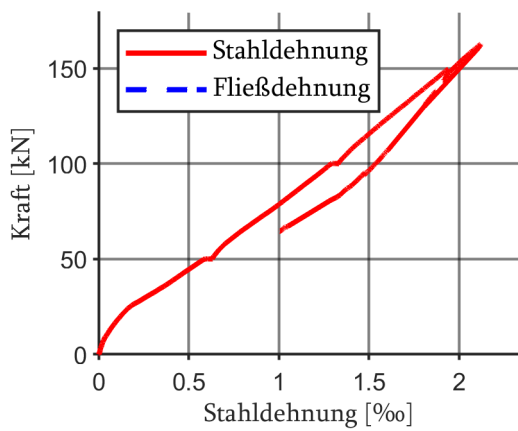


Bild 147 B5.1 Kraft-Stahldehnungs-Diagramm

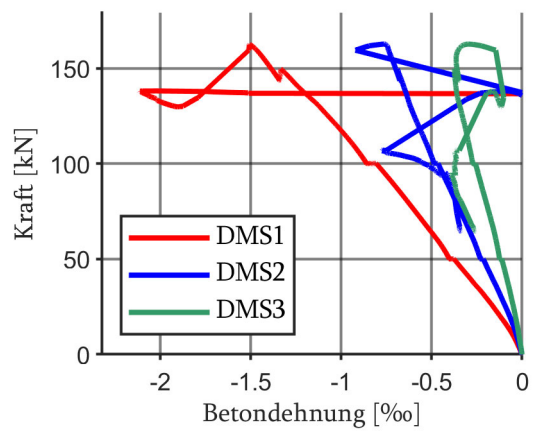
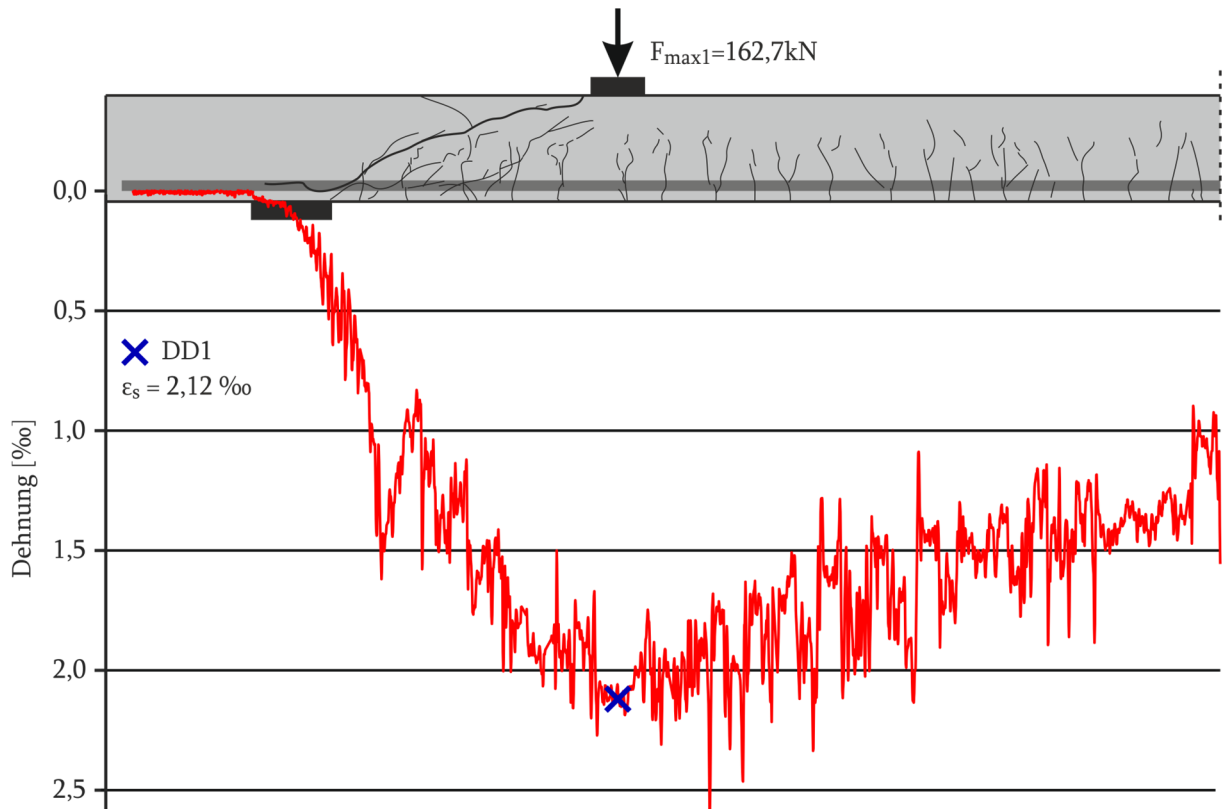
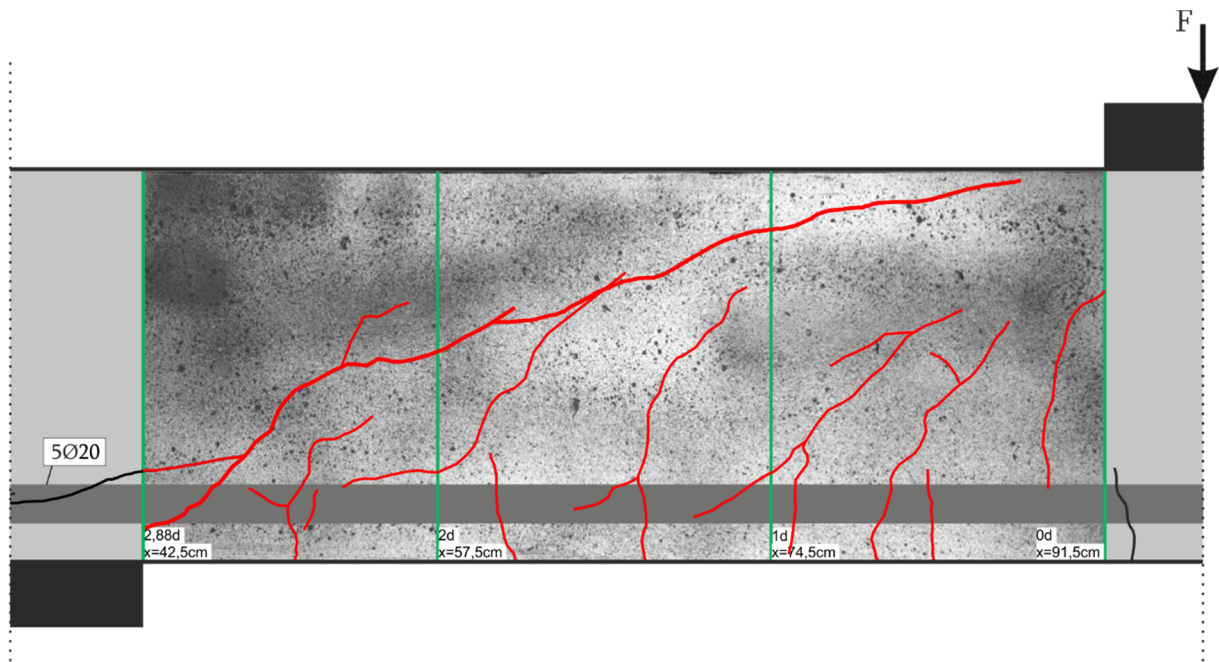


Bild 148 B5.1 Kraft-Betondehnungs-Diagramm

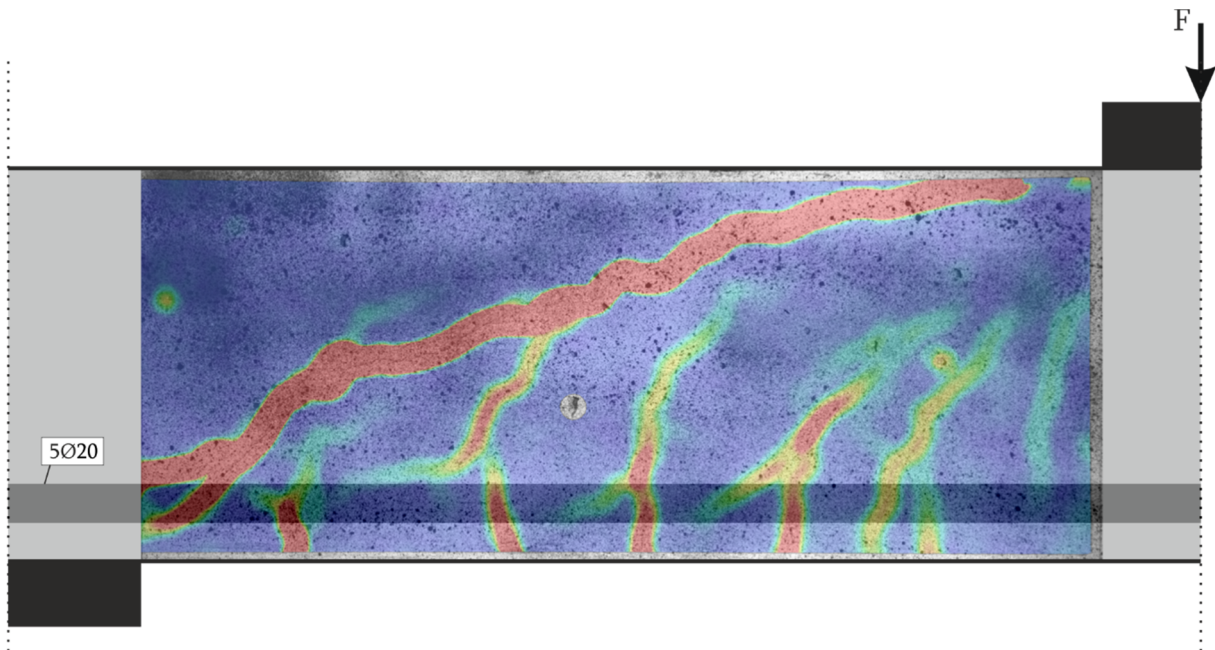


**Bild 149 B5.1 Faseroptische und Dehnungsmessungen bei Maximallast  $F_{\max 1} = 162,7 \text{ kN}$**

Die Bild 150 zeigt das photogrammetrische Messfeld mit dem ausgebildeten Rissbild. In Bild 151 sind die Hauptzugdehnungen im Messfeld dargestellt.

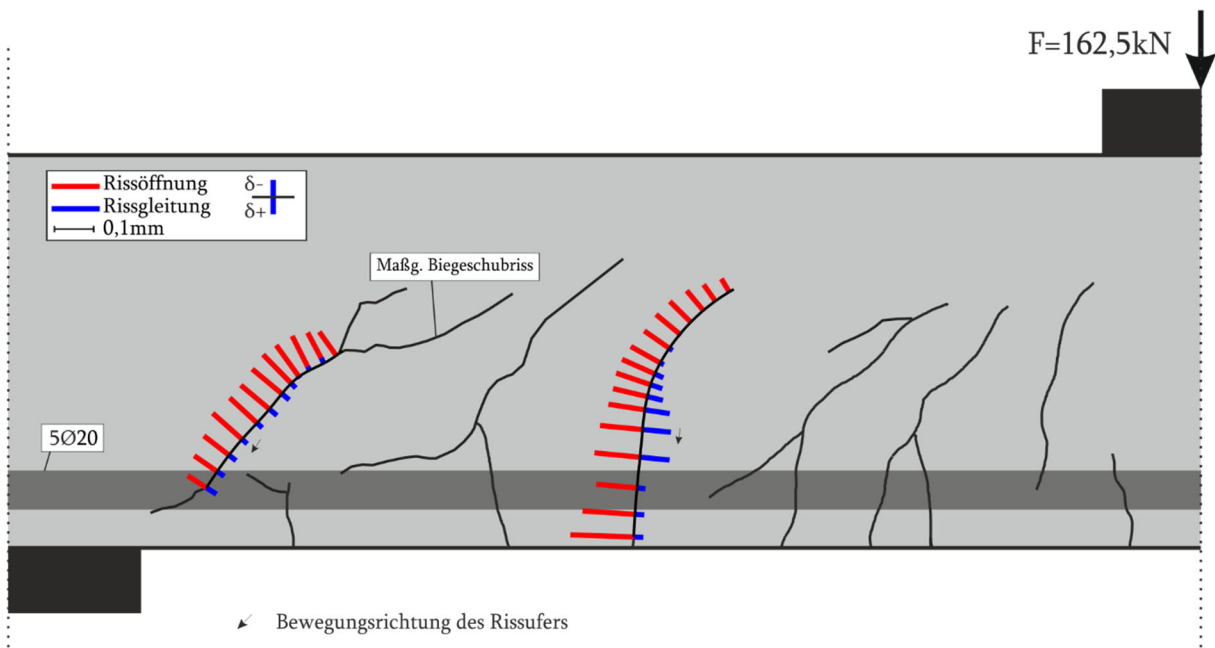


**Bild 150 B5.1 Photogrammetrisches Messfeld mit Rissbildung anhand Dehnungsfeldes nach  $F_{\max}$**

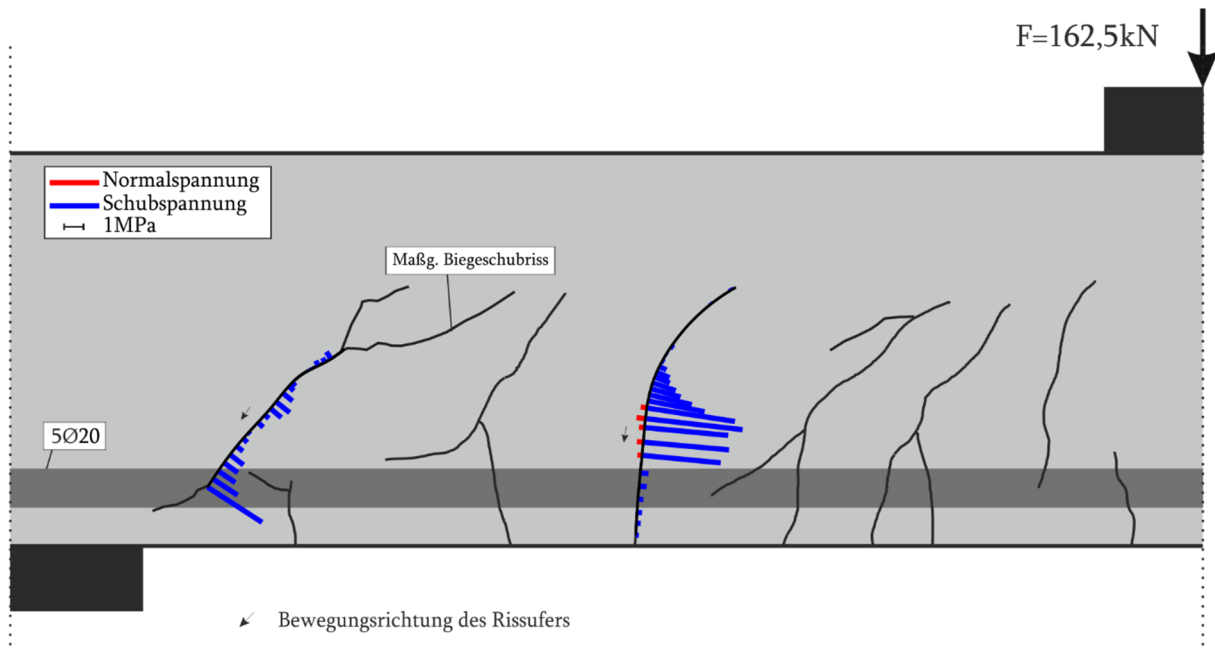


**Bild 151 B5.1 Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen nach  $F_{\max} = 162,7 \text{ kN}$**

Die Risskinematik des Versuchs bei Maximallast ist in Bild 152 für zwei Biegeschubrisse dargestellt. Der maßgebende Biegeschubriss besitzt im unteren und mittleren Rissabschnitt die größten Rissöffnungen. Das Maximum liegt bei  $0,16 \text{ mm}$ . Die Rissgleitung ist maximal  $0,06 \text{ mm}$ .



**Bild 152 B5.1 Risskinematik bei  $F = 162,5 \text{ kN}$**



**Bild 153 B5.1** Rissspannung nach Walraven bei  $F=162,5$  kN

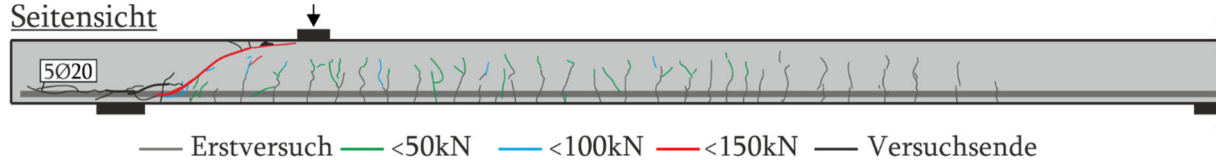
**Tabelle 15 B5.1** Querkraftanteil der Rissreibung am gesamten Querkraftabtrag für den maßgebenden Biegeschubriss bei  $F=162,5$  kN

|                 | Gesamt | Walraven | Li  | Gambarova | Guidotti | Cavangis |
|-----------------|--------|----------|-----|-----------|----------|----------|
| Querkraft [kN]  | 133,9  | 17,6     | 2,9 | 16,0      | 17,6     | 44,4     |
| Kraftanteil [%] | 100    | 13,1     | 2,2 | 11,9      | 13,1     | 33,2     |

## 6.2.10 B5.2

Beim Versuchsbalken B5.2 ist der Übergang des Balkens in den Zustand II aufgrund der Rissbildung des ersten Versuchs nicht eindeutig definiert. Die Rissbildung des Balkens ist für unterschiedliche Laststufen in Bild 154 dargestellt. Bis zu einer Belastung von 50 kN entstehen wenige neue Biegerisse, vielmehr verlängern sich die bereits vorhandenen Risse bis zu einer Länge von etwa zwei Drittel der Balkenhöhe. Die weitere Laststeigerung auf 100 kN führt zur Verlängerung einiger Biegerisse. Die anschließende Belastung bis 150 kN erzeugt den maßgebenden Biegeschubriss während des Anzeichnens der Risse.

### Seitensicht

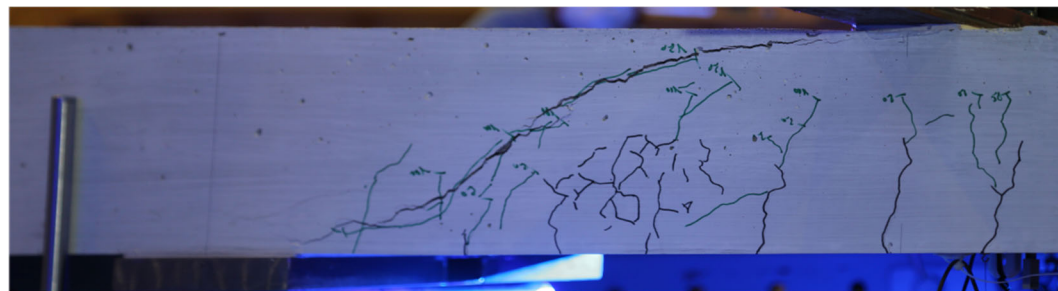


### Draufsicht



**Bild 154 B5.2 Rissbild**

Beim Erreichen der Maximallast von  $F_{\max 1} = 149,7 \text{ kN}$  und einer Durchbiegung von **10,18 mm** entsteht der maßgebende Biegeschubriss während der Pause zum Anzeichnen der Risse (Bild 155). Daraufhin fällt die Last auf 121,4 kN mit einer Verformung von 10,30 mm ab. Mit weiterer Verformung des Balkens kommt es zu einer massiven Öffnung des kritischen Biegeschubrisses. Die Belastung kann noch bis 133,7 kN gesteigert werden. Daraufhin kommt es zum Versagen der Druckzone und bei weiterer Verformung entsteht ein Verankerungsbruch (Bild 156).

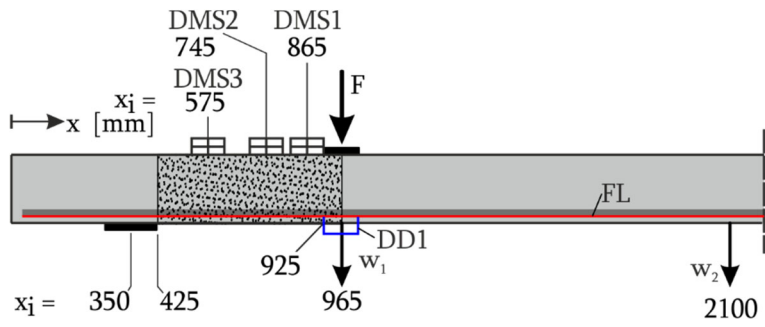


**Bild 155 B5.2 Maßgebender Biegeschubriss (gespiegelt)**

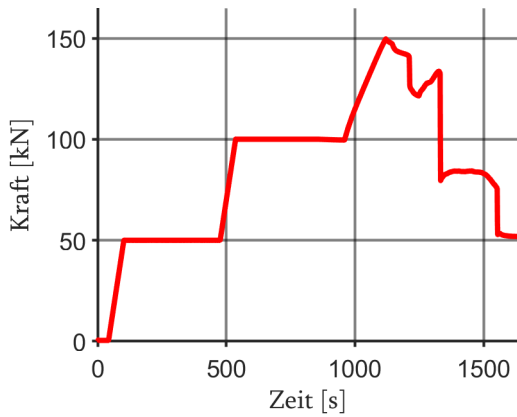


**Bild 156 B5.2 Maßgebender Biegeschubriss mit Versagen der Biegedruckzone (gespiegelt)**

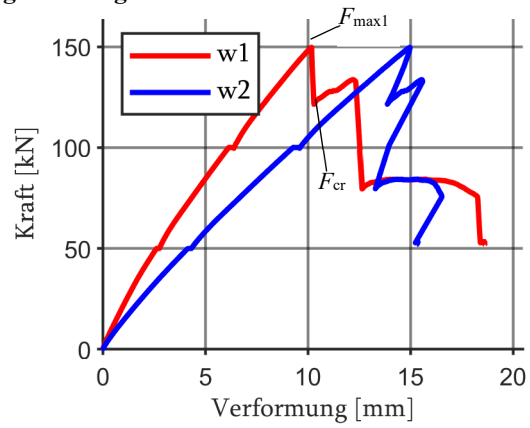
Bild 157 zeigt den Messaufbau. Die aufgezeichneten Werte finden sich in den Bildern 158-161. Die Messwerte der faseroptischen Sensoren an der Längsbewehrung (FL) sind in Bild 162 grafisch dargestellt.



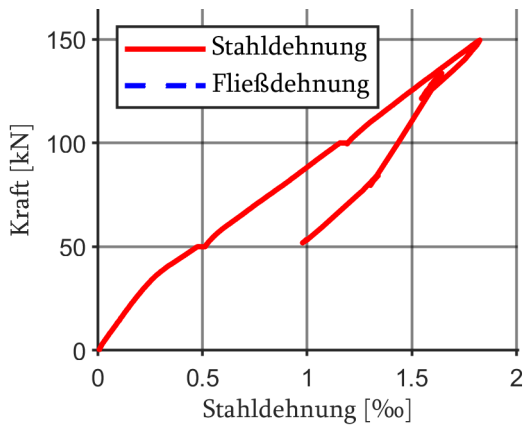
**Bild 157 B5.2 - Lage der DMS und des DD1 entlang der Längsachse**



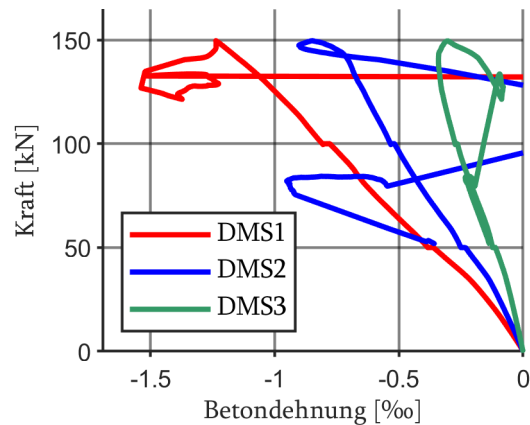
**Bild 158 B5.2 Kraft-Zeit-Diagramm**



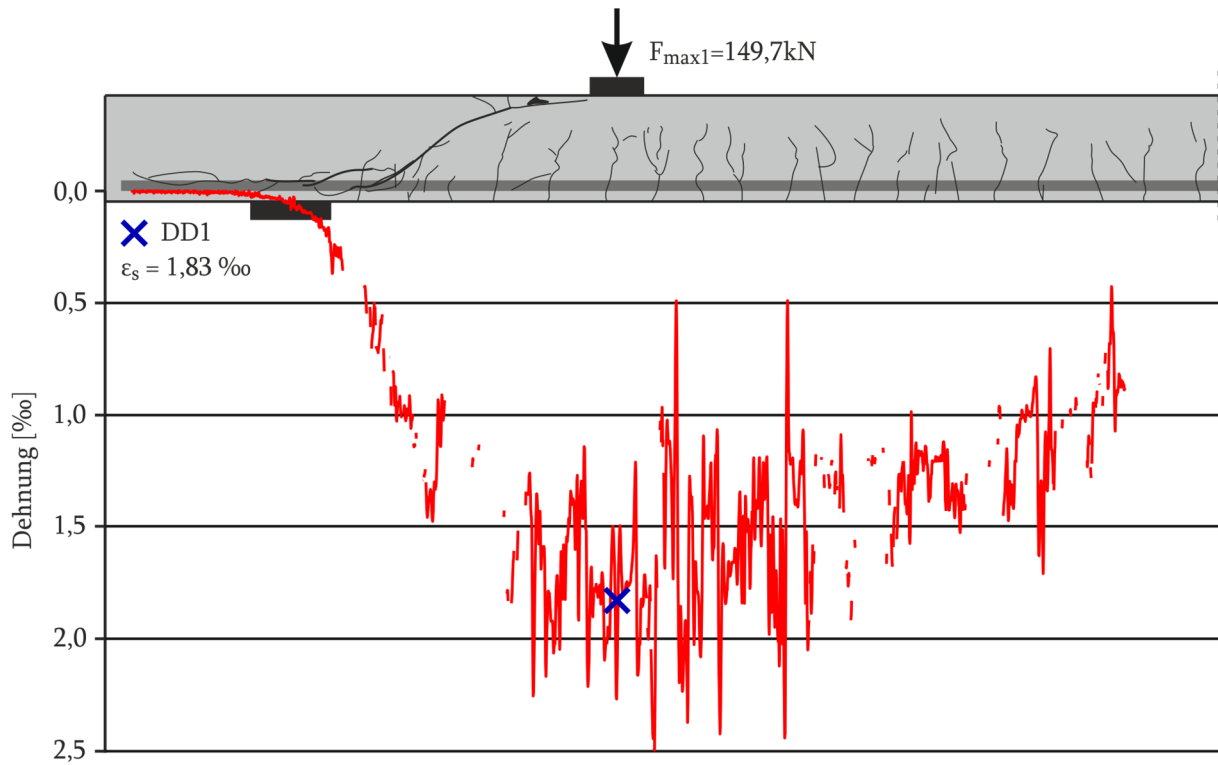
**Bild 159 B5.2 Kraft-Verformungs-Diagramm**



**Bild 160 B5.2 Kraft-Stahldehnungs-Diagramm**

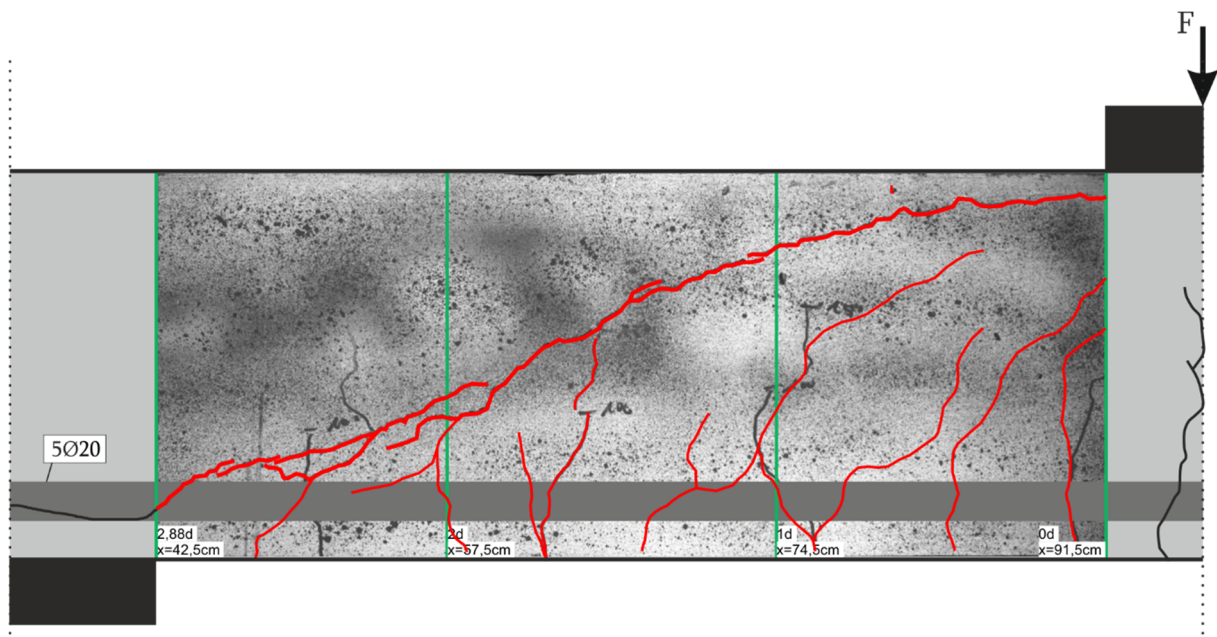


**Bild 161 B5.2 Kraft-Betondehnungs-Diagramm**

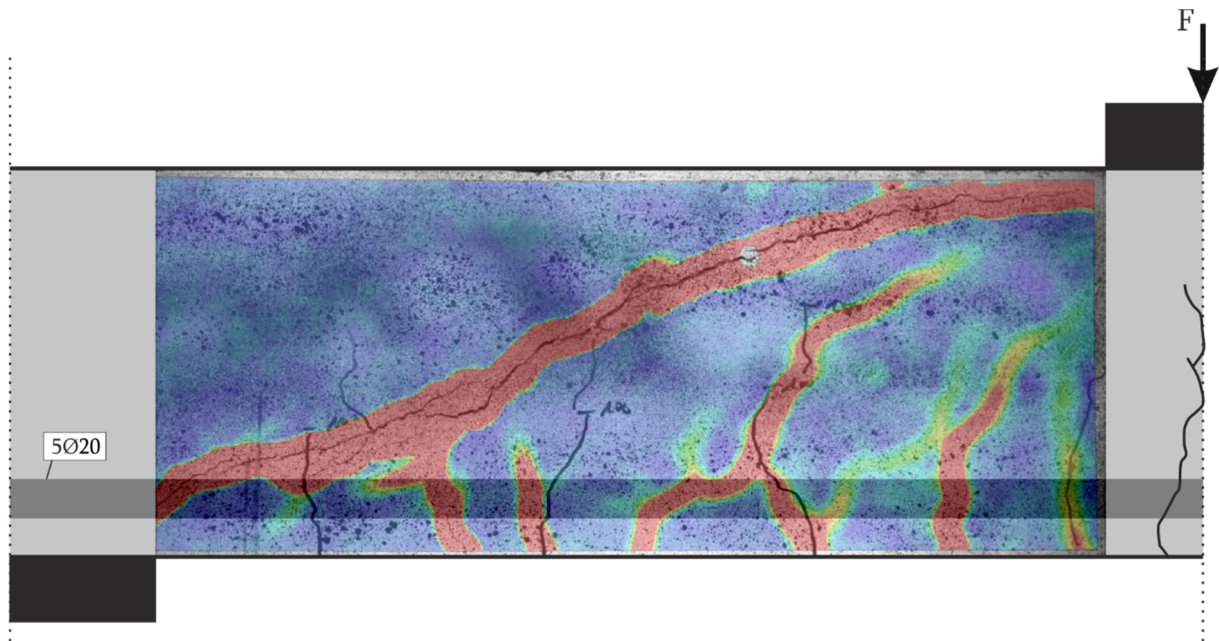


**Bild 162 B5.2 Faseroptische und Dehnungsmessungen bei Maximallast  $F_{\max} = 149,7 \text{ kN}$**

Die Bild 163 stellt das photogrammetrische Messfeld mit dem ausgebildeten Rissbild dar. In Bild 164 wird der Dehnungszustand der Hauptzugdehnungen im Messfeld dargestellt.

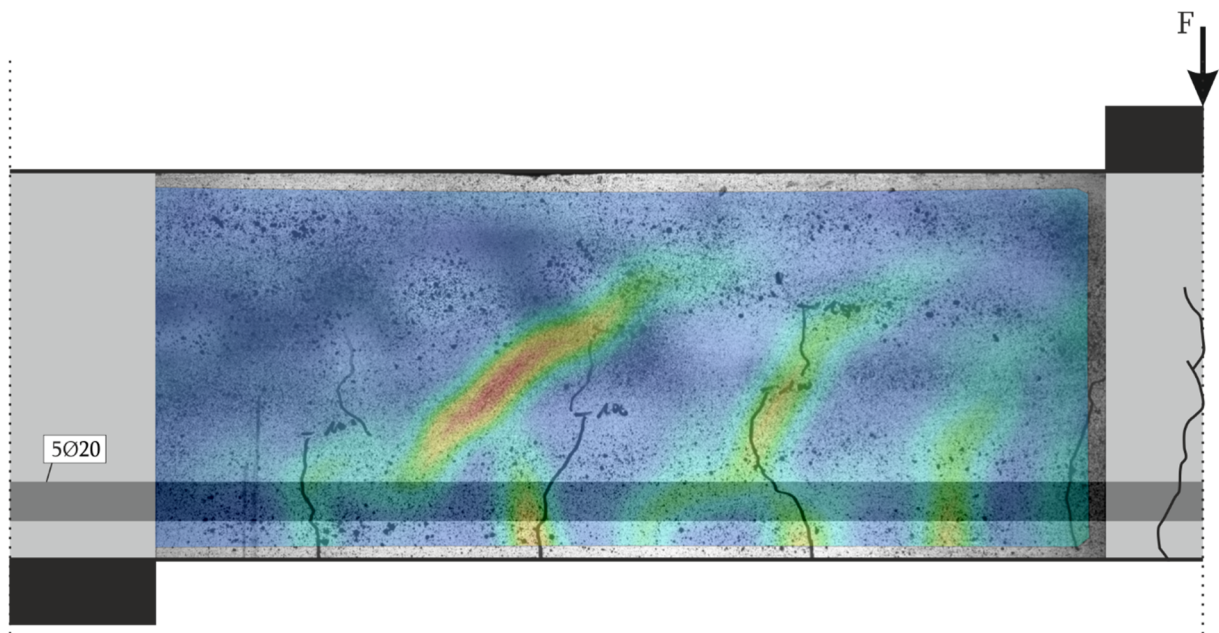


**Bild 163 B5.2 Photogrammetrisches Messfeld mit Rissbildung anhand Dehnungsfeldes nach  $F_{\max}$**



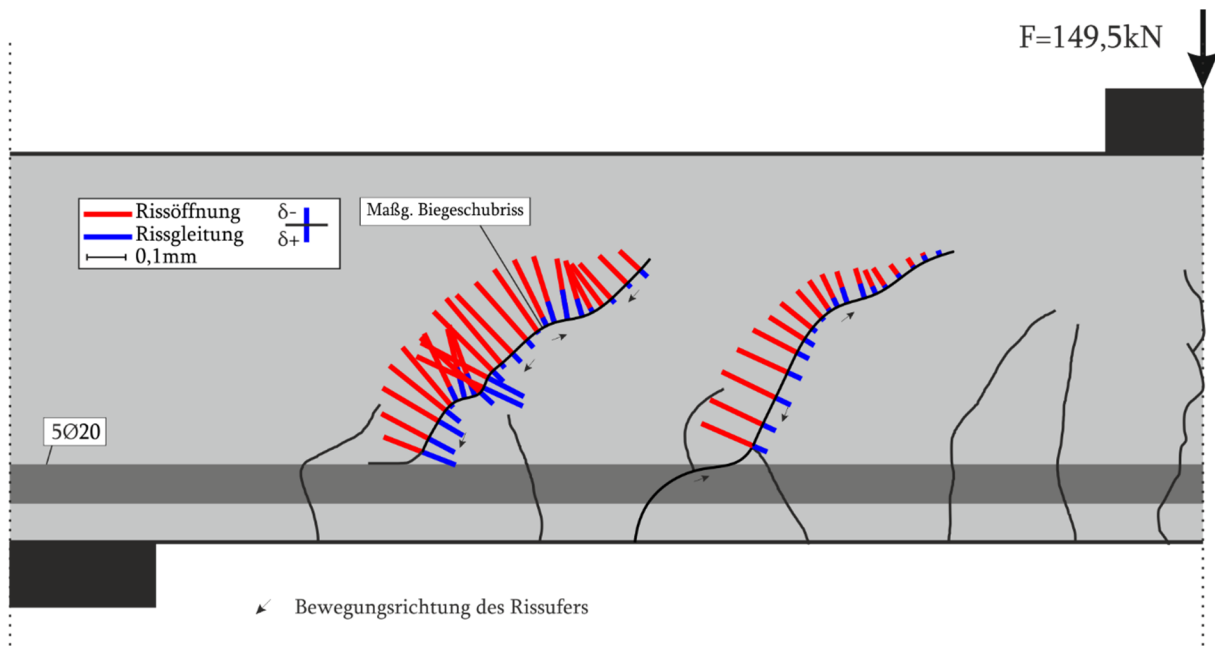
**Bild 164 B5.2 Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen nach  $F_{\max} = 149,7 \text{ kN}$**

Während der Belastungspause bei 150 kN, zum Anzeichnen der Risse, hat sich ein reiner Schubriss in Balkenmitte ausgebildet (Bild 165).

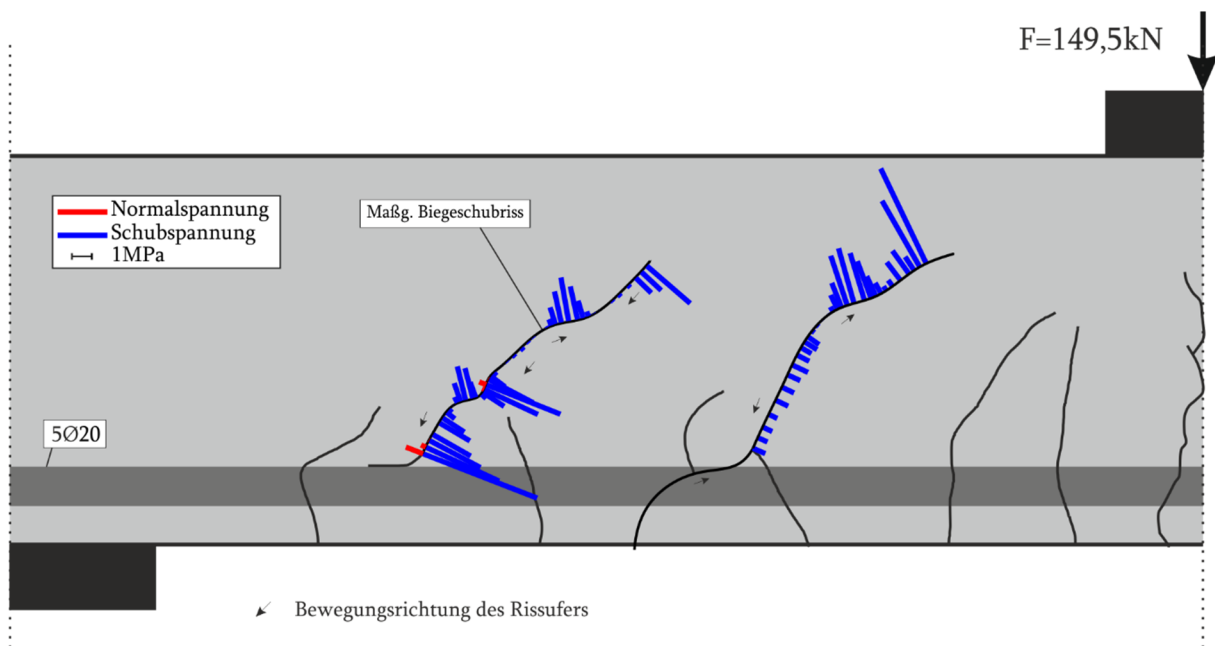


**Bild 165 B5.2 Hauptzugdehnungen zur Darstellung des Schubrisses bei der Maximallast  $F_{\max} = 149,7 \text{ kN}$**

Die Risskinematik des Versuchs bei Maximallast ist in Bild 166 für zwei Biegeschubrisse dargestellt. Der maßgebende Schubriss weist bei maximaler Belastung eine maximale Rissöffnung von 0,22 mm und Rissgleitung von 0,11 mm auf. Der zweite Biegeschubriss besitzt im Wesentlichen nur Rissöffnung. Außerdem liegt im steilen Rissbereich eine geringe Rissgleitung vor.



**Bild 166 B5.2 Risskinematik bei  $F = 149,5$  kN**



**Bild 167 B5.2 Rissspannungen nach Walraven bei  $F = 149,5$  kN**

Da es sich hierbei um einen Zweitversuch handelt, wird der Versagensbereich aus dem Erstversuch wie bei B3.2 gesichert (Bild 115).

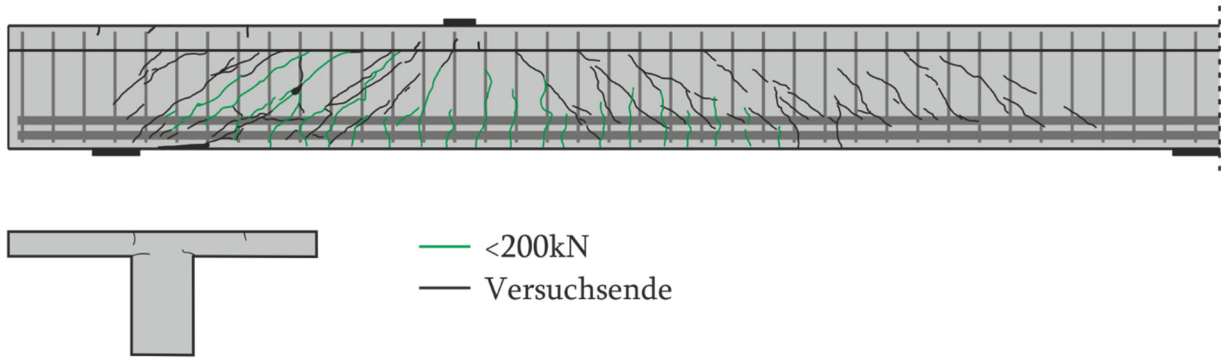
**Tabelle 16 B5.2 Querkraftanteil der Rissreibung am gesamten Querkraftabtrag für den maßgebenden Biegeschubriss bei  $F = 149,5$  kN**

|                 | Gesamt | Walraven | Li   | Gambarova | Guidotti | Cavangis |
|-----------------|--------|----------|------|-----------|----------|----------|
| Querkraft [kN]  | 111,4  | 39,5     | 19,7 | 33,0      | 37,7     | 34,6     |
| Kraftanteil [%] | 100    | 32,0     | 16,1 | 26,9      | 30,7     | 28,2     |

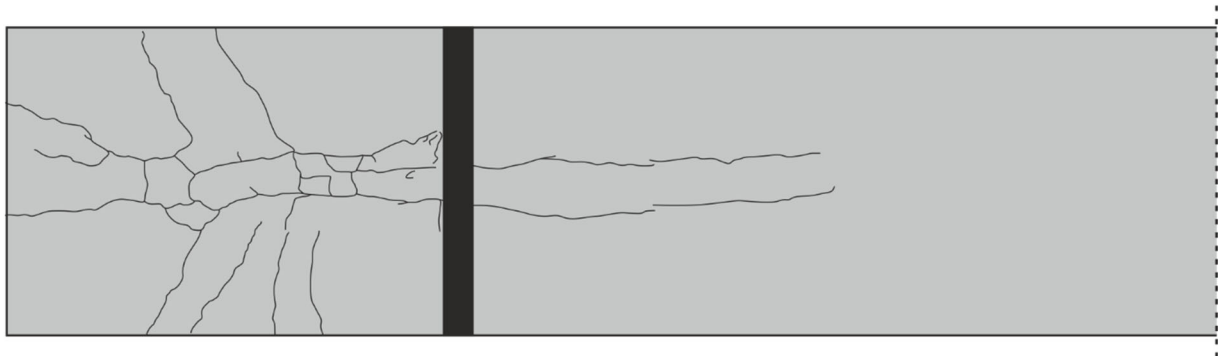
### 6.2.11 B6.1

Beim Versuchsbalken B6.1 bilden sich bei ca. 25 kN die ersten Risse. Die Rissentwicklung des Balkens ist für unterschiedliche Laststufen in Bild 168 dargestellt. Bis zu einer Belastung von 200 kN entstehen überwiegend Biegerisse mit einer maximalen Länge von zwei Drittel der Balkenhöhe. Zudem bilden sich zwischen dem nahen Auflager und der Lasteinleitung mehrere Biegeschubrisse. Die weitere Lastaufbringung erzeugt noch wenige Biegerisse, jedoch viele Schubrisse über die gesamte Balkenlänge.

Seitensicht:

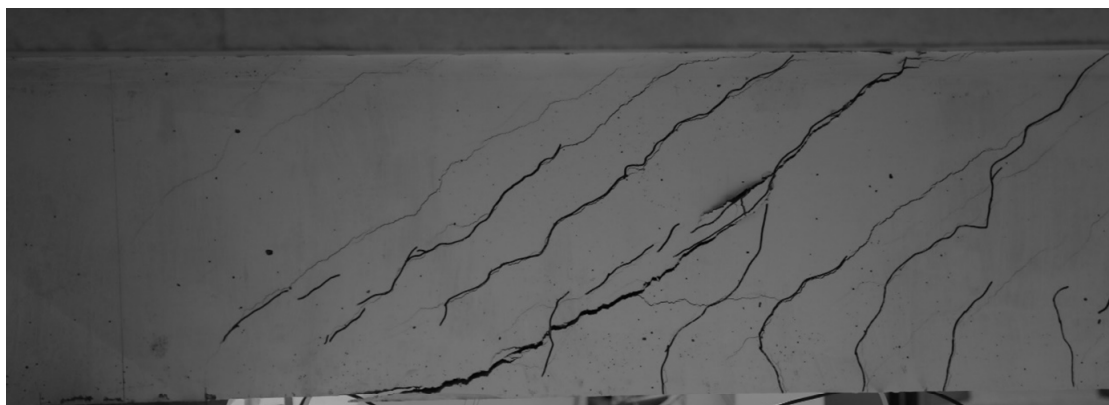


Draufsicht:



#### Bild 168 B6.1 Rissbild

Beim Erreichen der Maximallast von  $F_{\max} = 696,7 \text{ kN}$  und einer Durchbiegung von **17,21 mm** ist der maßgebende Biegeschubriss deutlich geöffnet (Bild 169). Daraufhin nimmt die Last allmählich ab. Bei einer Last von 574,1 kN und einer Verformung von 18,72 mm wird der Versuch beendet (Bild 170).

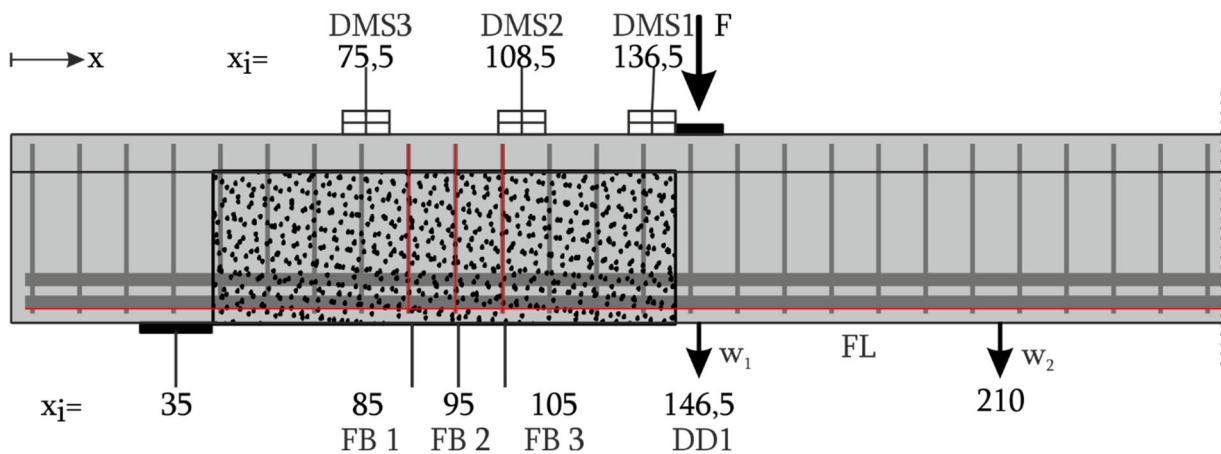


**Bild 169 B6.1 Maßgebender Biegeschubriss während des Versuchs (gespiegelt)**



**Bild 170 B6.1 Maßgebender Biegeschubriss nach Versuchsende (gespiegelt)**

Bild 171 zeigt den Messaufbau. Die aufgezeichneten Werte finden sich in den Bildern 172-175. Die Messungen der faseroptischen Sensoren an der Längsbewehrung (FL) und der Bügelbewehrung (FB1-FB3) sind in Bild 176 dargestellt.



**Bild 171 B6.1 - Lage der DMS und des DD1 entlang der Längsachse**

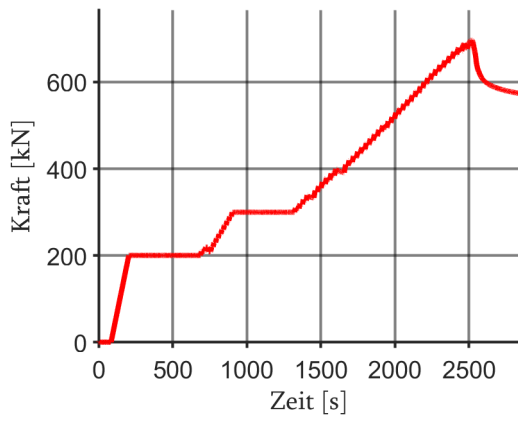


Bild 172 B6.1 Kraft-Zeit-Diagramm

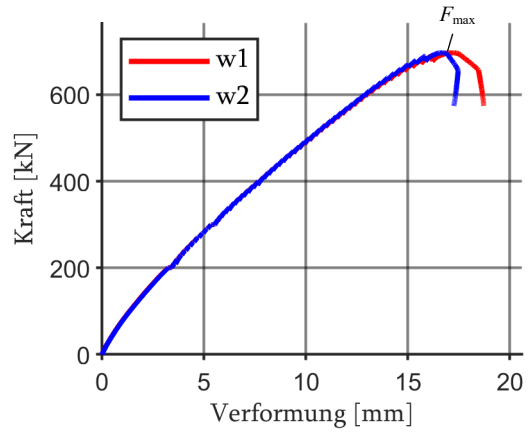


Bild 173 B6.1 Kraft-Verformungs-Diagramm

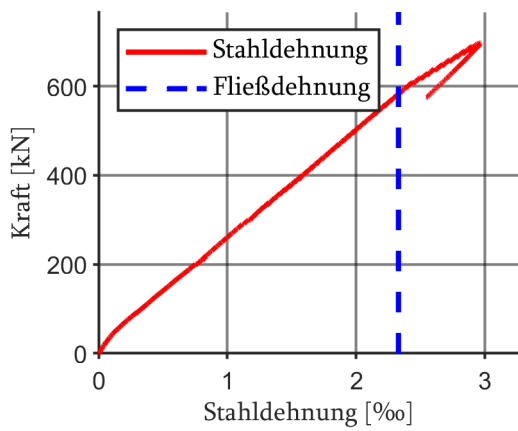


Bild 174 B6.1 Kraft-Stahldehnungs-Diagramm

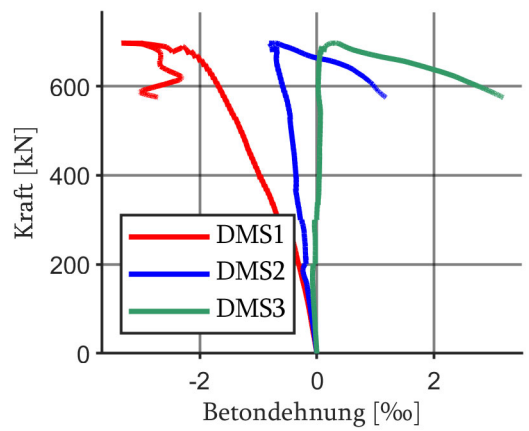
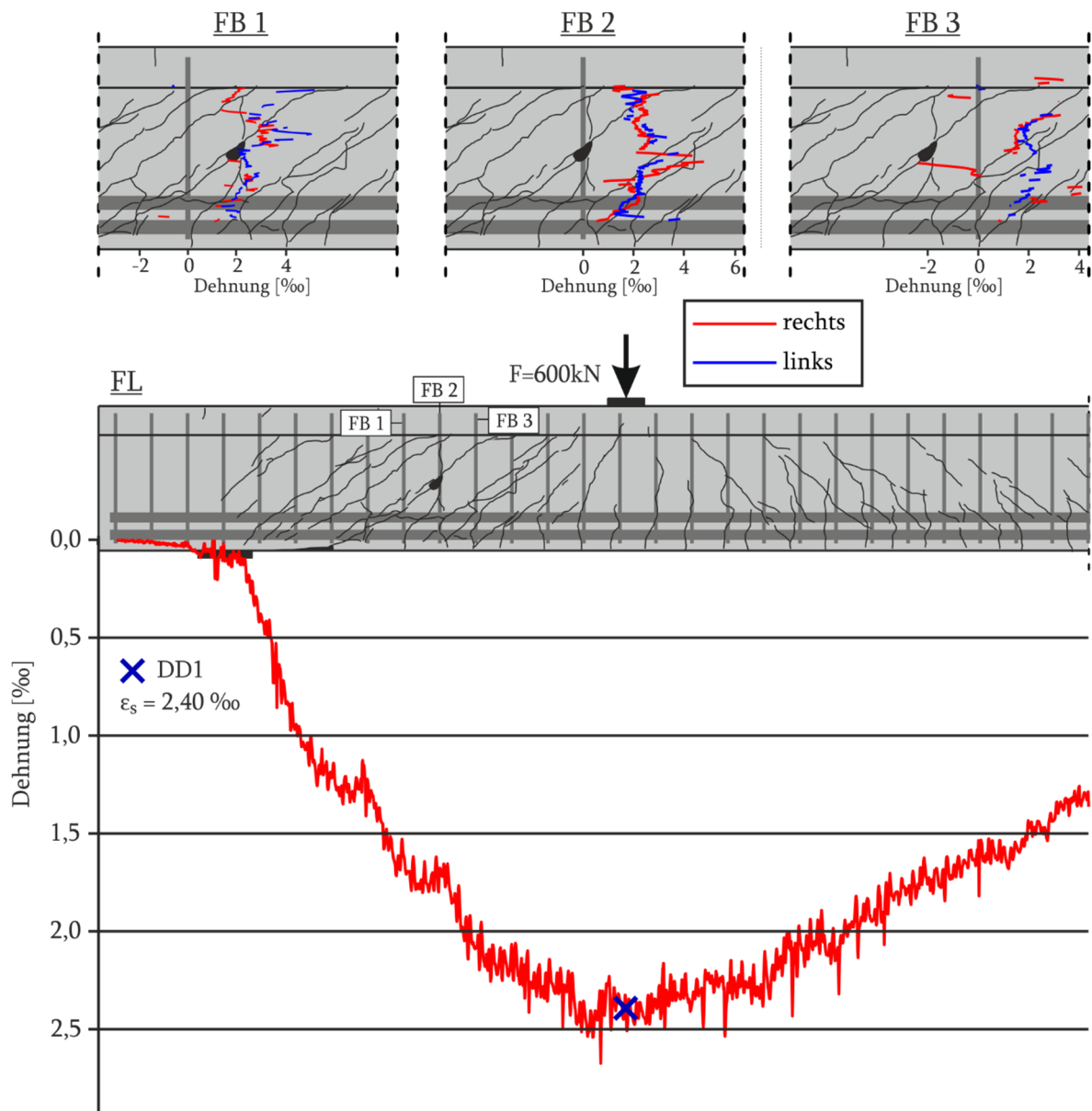
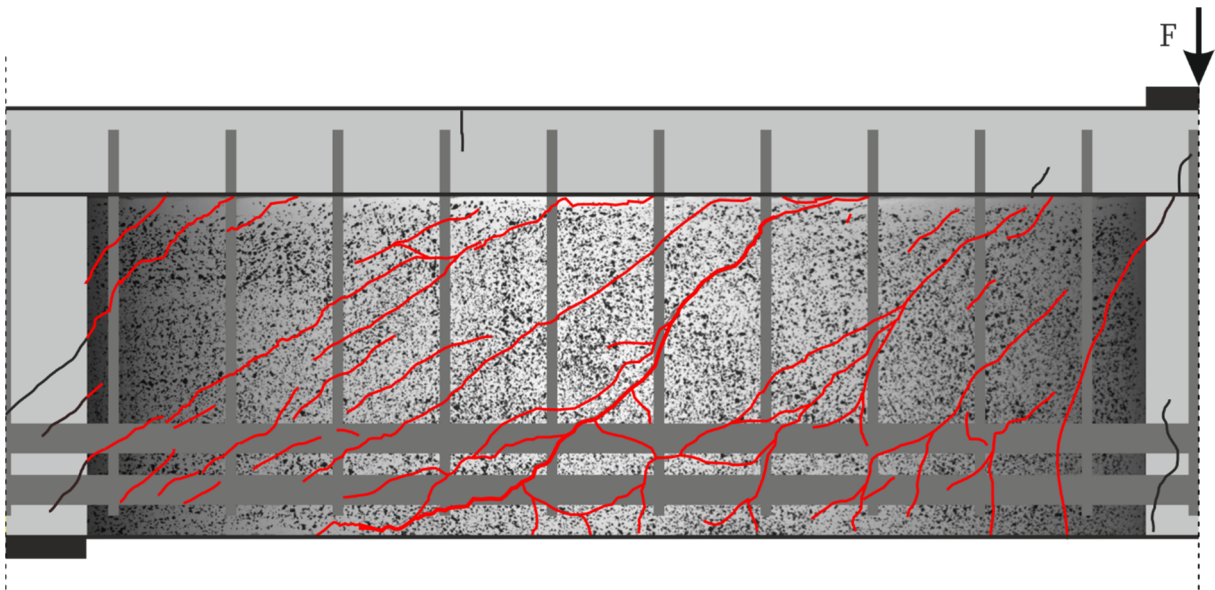


Bild 175 B6.1 Kraft-Betondehnungs-Diagramm

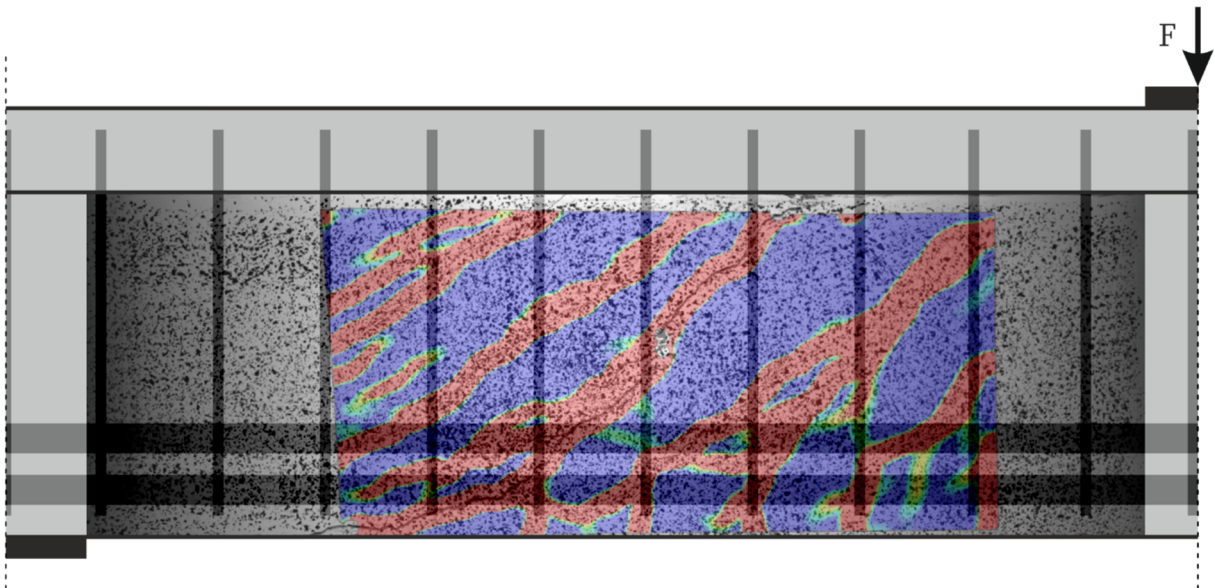


**Bild 176 B6.1 Faseroptische und Dehnungsmessungen bei der Last  $F = 600\text{kN}$**

Bild 177 zeigt das photogrammetrische Messfeld mit dem ausgebildeten Rissbild. In Bild 178 sind die Hauptzugdehnungen im Messfeld dargestellt.

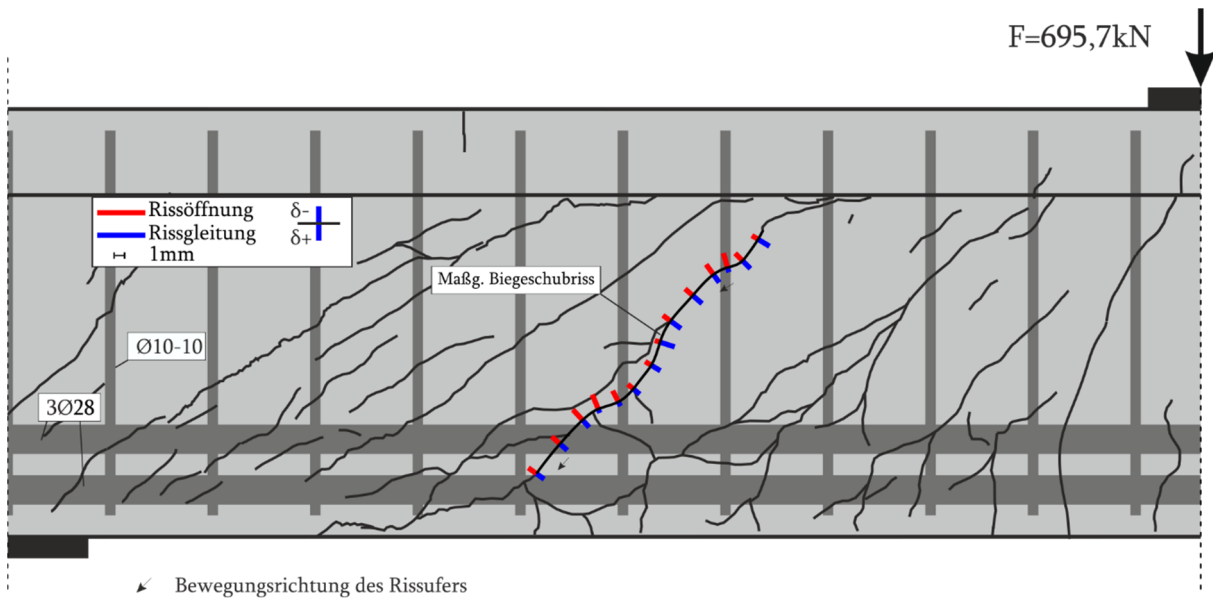


**Bild 177 B6.1 Photogrammetrisches Messfeld mit Rissbildung anhand Dehnungsfeldes nach  $F_{\max}$**

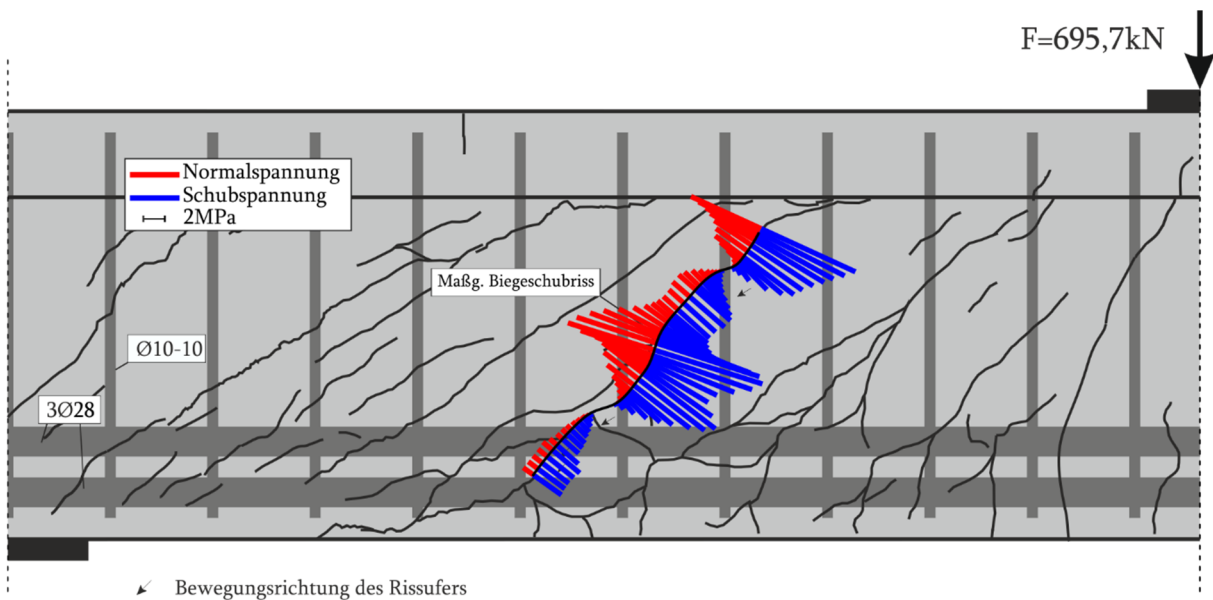


**Bild 178 B6.1 Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen nach  $F_{\max} = 696,7 \text{ kN}$**

Die Risskinematik des Versuchs bei Maximallast ist in Bild 179 für den maßgebenden Biegeschubriss dargestellt. Die risskinematischen Größen des maßgebenden Biegeschubrisses besitzen ähnliche Größenordnungen. Die maximale Rissöffnung liegt bei 1,3 mm und die maximale Rissgleitung liegt ebenfalls bei 1,3 mm.



**Bild 179 B6.1 Risskinematik bei  $F = 695,7$  kN**



**Bild 180 B6.1 Rissspannung nach Walraven bei  $F = 695,7$  kN**

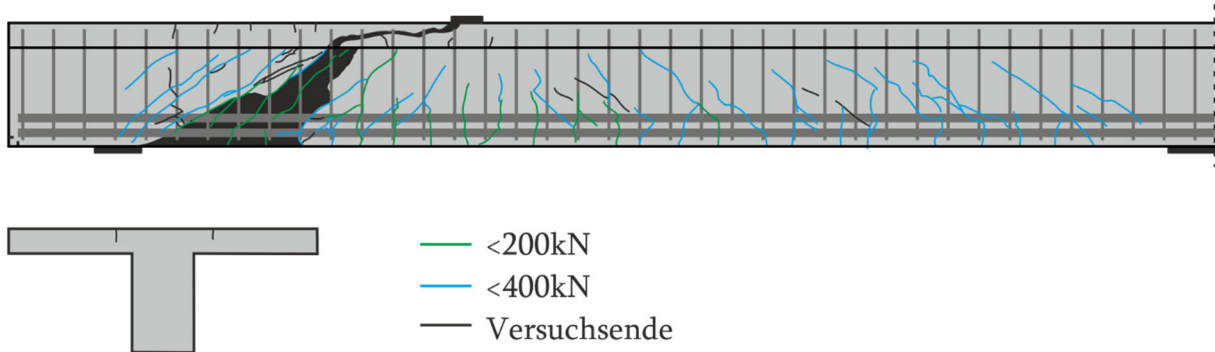
**Tabelle 17 B6.1 Querkraftanteil der Rissreibung am gesamten Querkraftabtrag für den maßgebenden Biegeschubriss bei  $F= 695,7$  kN**

|                 | Gesamt | Walraven | Li    | Gambarova | Guidotti | Cavangis |
|-----------------|--------|----------|-------|-----------|----------|----------|
| Querkraft [kN]  | 474,1  | 147,1    | 205,2 | 149,5     | 122,1    | 128,8    |
| Kraftanteil [%] | 100    | 31,0     | 43,3  | 31,5      | 25,8     | 27,2     |

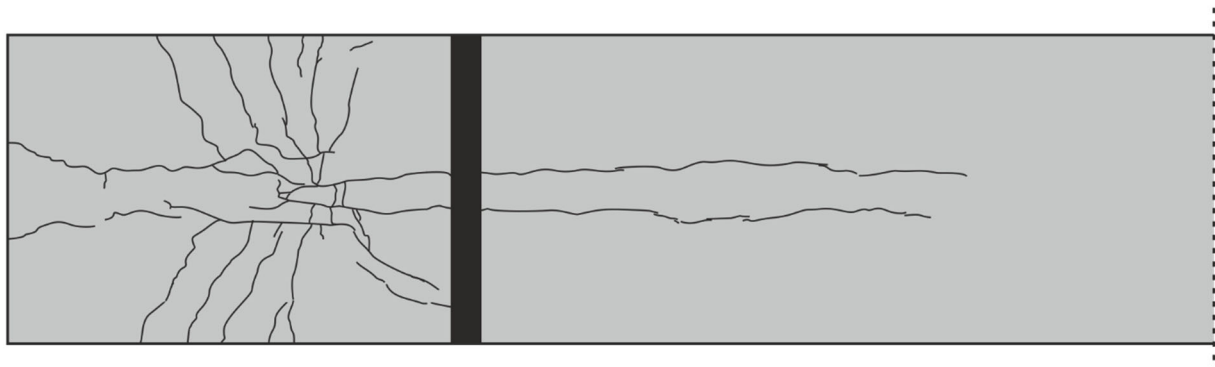
## 6.2.12 B6.2

Der Versuchsbalken B6.2 geht bei ca. 25 kN in den Zustand II über. Die Rissbildung des Balkens ist für unterschiedliche Laststufen in Bild 181 dargestellt. Bis zu einer Belastung von 200 kN entstehen überwiegend Biegerisse mit einer maximalen Länge von zwei Dritteln der Balkenhöhe. Zudem entstehen zwischen dem nahen Auflager und der Lasteinleitung mehrere Biegeschubrisse. Bis zur Belastung von 400 kN entstehen Biegerisse und aus diesen entwickeln sich Biegeschubrisse. Bei weiterer Belastung entstehen keine weiteren Biegerisse, jedoch Schubrisse über die gesamte Balkenlänge. Das Versagen tritt durch das Abplatzen der Betondeckung an einem Bügel auf.

Seitensicht:

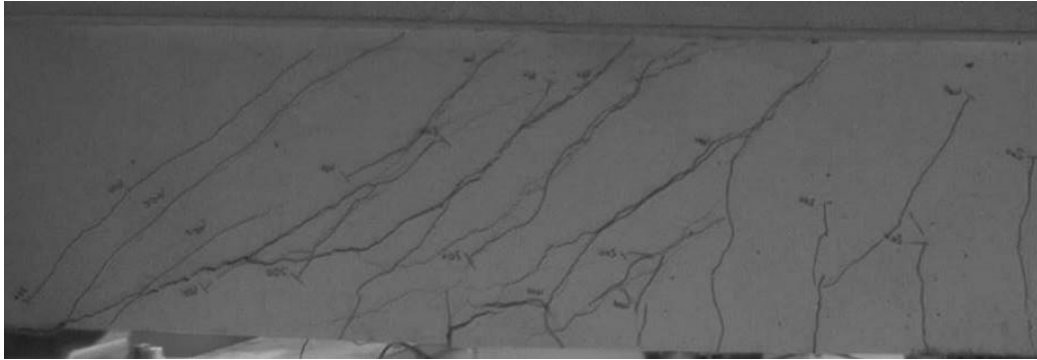


Draufsicht:



**Bild 181 B6.2 Rissbild**

Beim Erreichen der Maximallast von  $F_{\max} = 735,3 \text{ kN}$  und einer Durchbiegung von  $19,38 \text{ mm}$  ist das Rissbild schon voll ausgebildet und es liegen hohe risskinematische Größen vor (Bild 182). Daraufhin nimmt die Last allmählich ab, bis es zum Versagen infolge des Aufsprengens des Bügelschlosses kommt (Bild 183). Daraufhin löst sich die Betondeckung um den Bügel und die Last fällt auf 514,6 kN ab (Bild 184).



**Bild 182 B6.2 Aufnahme kurz vor dem Versagen (gespiegelt)**

Es trat nicht ein typisches Querkraftversagen auf, da der Versagensmechanismus bei diesem Versuch von den vorherigen abweicht.



**Bild 183 Ausbrechen der Übergreifung der Bügelbewehrung**



**Bild 184 B6.2 Versagensbild nach Versuchsende (gespiegelt)**

Bild 185 zeigt den Messaufbau. Die aufgezeichneten Werte finden sich in den Bildern 186-189. Die Messwerte der faseroptischen Sensoren an der Längs- (FL) und der Bügelbewehrung (FB1-FB3) sind in Bild 190 grafisch dargestellt.

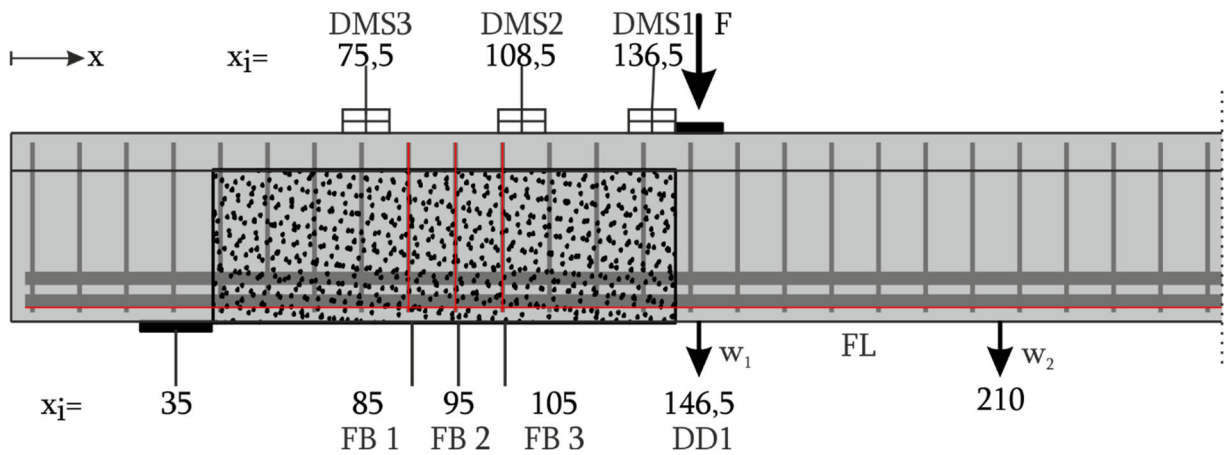


Bild 185 B6.2 - Lage der DMS und des DD1 entlang der Längsachse

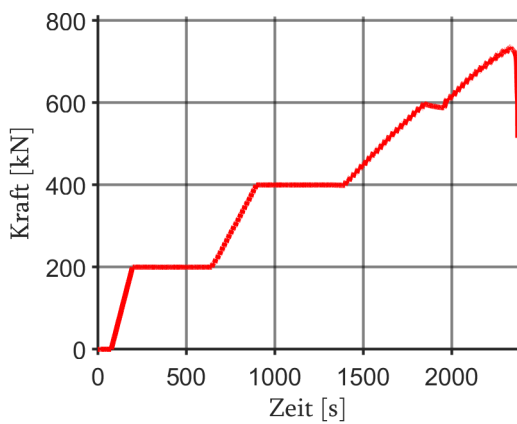


Bild 186 B6.2 Kraft-Zeit-Diagramm

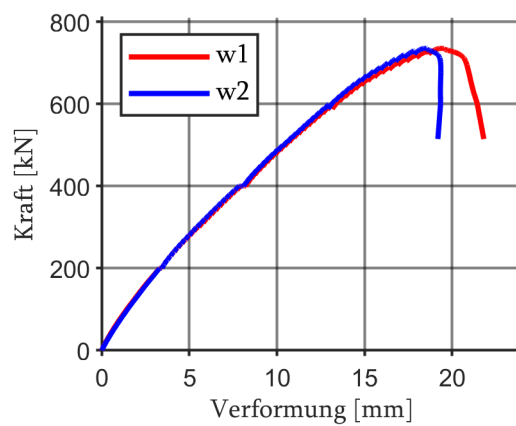


Bild 187 B6.2 Kraft-Verformungs-Diagramm

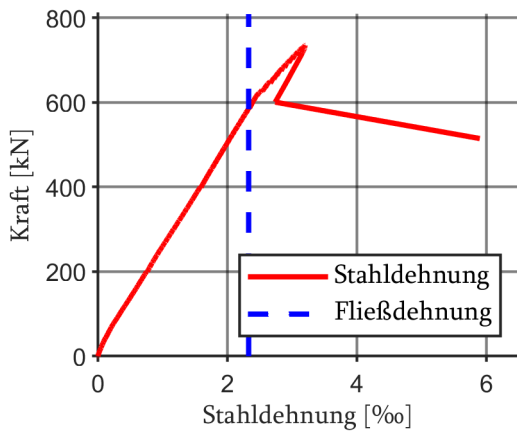


Bild 188 B6.2 Kraft-Stahldehnungs-Diagramm

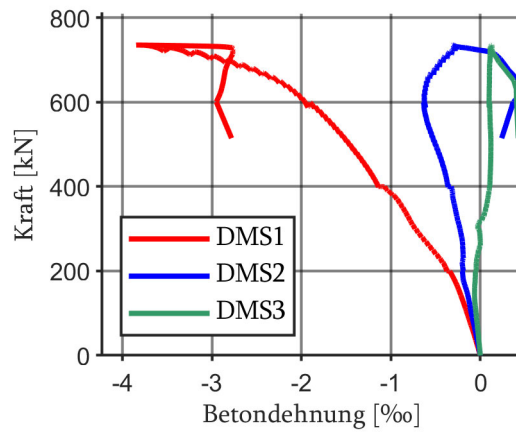
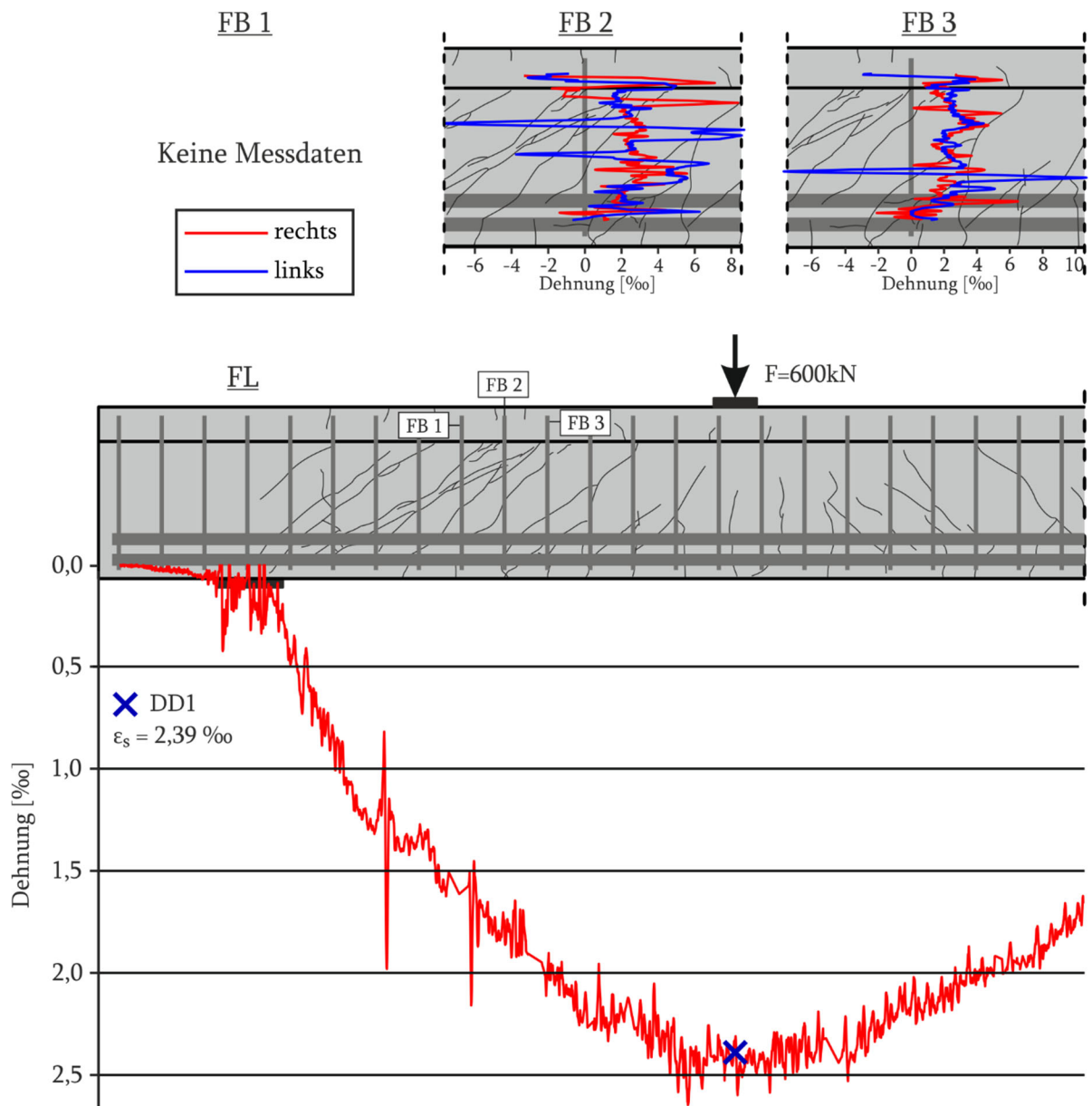
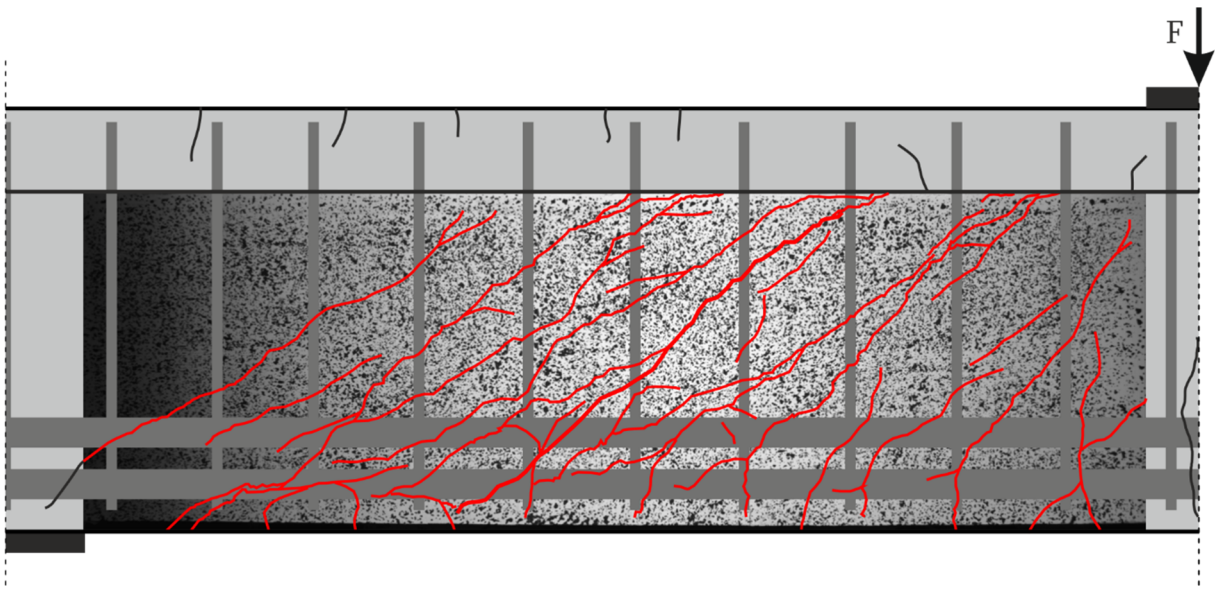


Bild 189 B6.2 Kraft-Betondehnungs-Diagramm

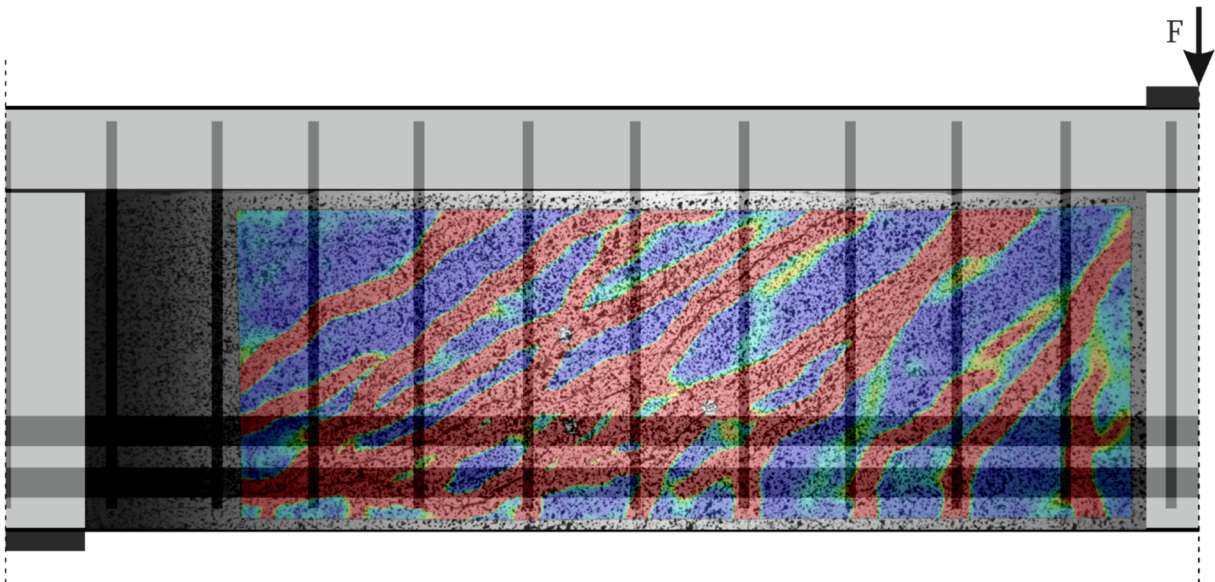


**Bild 190 B6.2 Faseroptische und Dehnungsmessungen bei der Last  $F = 600\text{kN}$**

Die Bild 191 stellt das photogrammetrische Messfeld mit dem ausgebildeten Rissbild dar. In Bild 192 wird der Dehnungszustand der Hauptzugdehnungen im Messfeld dargestellt.

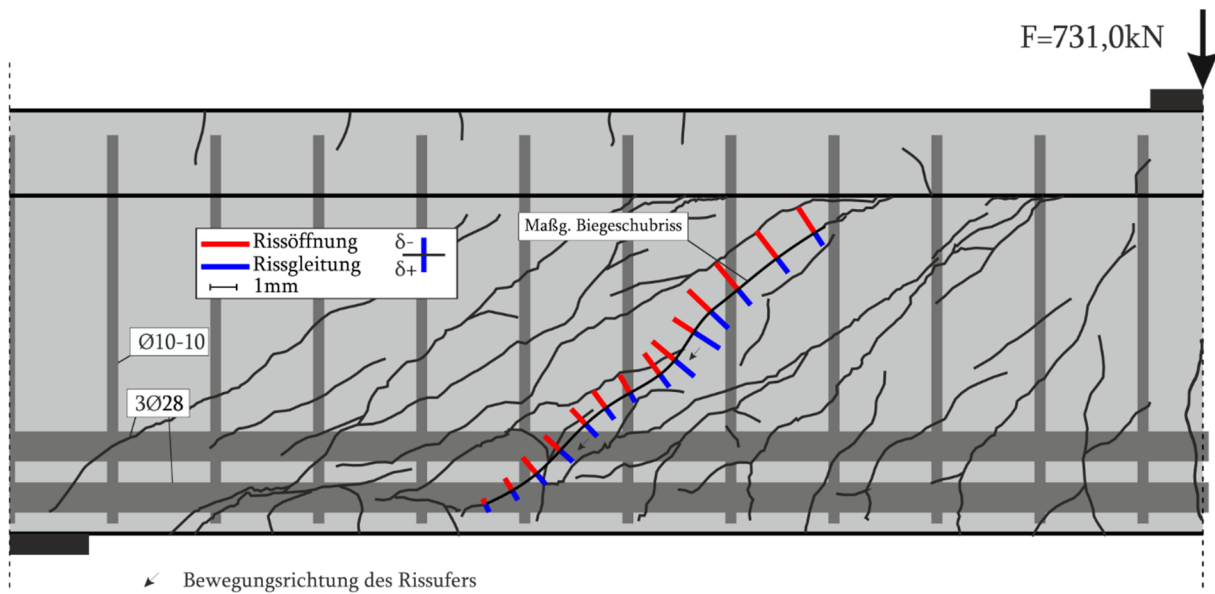


**Bild 191** B6.2 Photogrammetrisches Messfeld mit Rissbildung anhand Dehnungsfeldes nach  $F_{\max}$

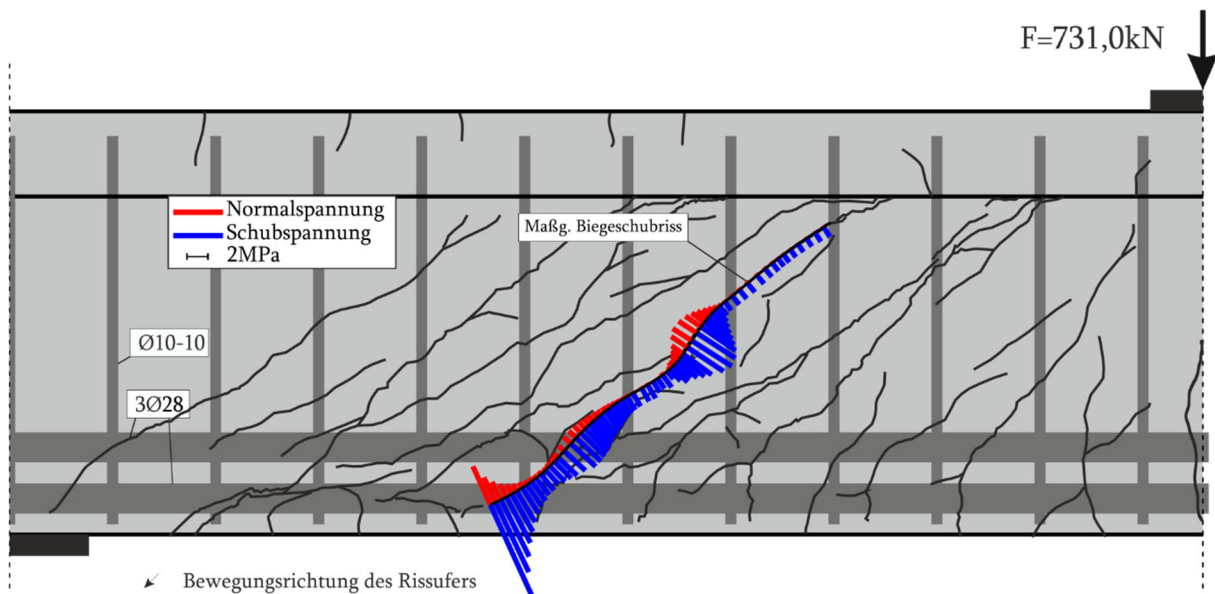


**Bild 192** B6.2 Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen nach  $F_{\max} = 735,3 \text{ kN}$

Die Risskinematik des Versuchs bei Maximallast ist in Bild 193 für den maßgebenden Biegeschubriss dargestellt. Die risskinematischen Größen sind im Bereich der Längsbewehrung am niedrigsten und nehmen zur Risspitze zu. Die Rissöffnung erreicht bei maximaler Belastung einen Wert von 1,3 mm und die Rissgleitung von 1,15 mm.



**Bild 193 B6.2 Risskinematik bei  $F = 731,0$  kN**



**Bild 194 B6.2 Rissstress nach Walraven bei  $F = 731,0$  kN**

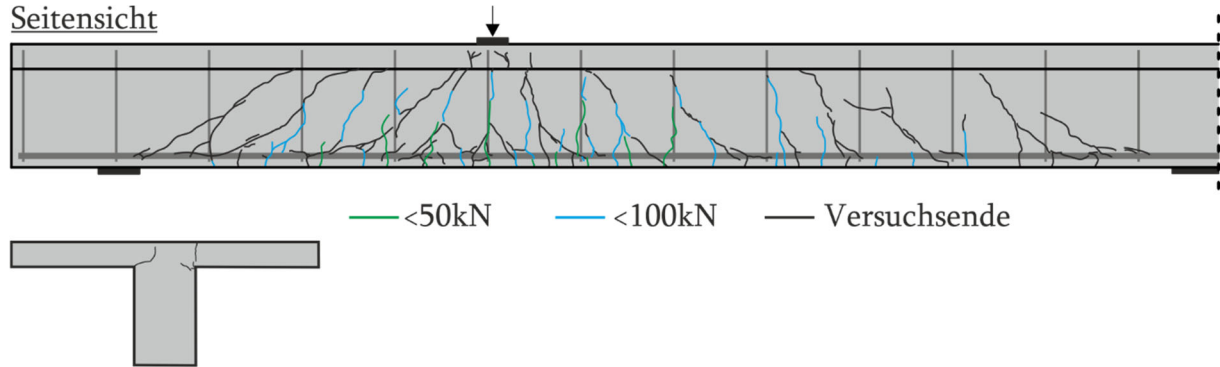
**Tabelle 18 B6.2 Querkraftanteil der Rissreibung am gesamten Querkraftabtrag für den maßgebenden Biegeschubriss bei  $F = 731$  kN**

|                 | Gesamt | Walraven | Li    | Gambarova | Guidotti | Cavangis |
|-----------------|--------|----------|-------|-----------|----------|----------|
| Querkraft [kN]  | 498,4  | 82,5     | 133,4 | 925       | 58,2     | 37,5     |
| Kraftanteil [%] | 100    | 16,5     | 26,8  | 18,6      | 11,7     | 7,5      |

### 6.2.13 B7.1

Der Versuchsbalken B7.1 geht bei ca. 25 kN in den Zustand II über. Die Rissbildung des Balkens ist für unterschiedliche Laststufen in Bild 195 dargestellt. Bis zu einer Belastung von 50 kN entstehen ausschließlich Biegerisse mit einer maximalen Länge der halben Balkenhöhe. Bis 100 kN entstehen weitere Biegerisse mit einer Länge von zwei Drittel der Balkenhöhe, die sich neigen. Die weitere Lastaufbringung erzeugt noch einige Biegerisse und überwiegend Biegeschubrisse über die gesamte Balkenlänge.

#### Seitensicht



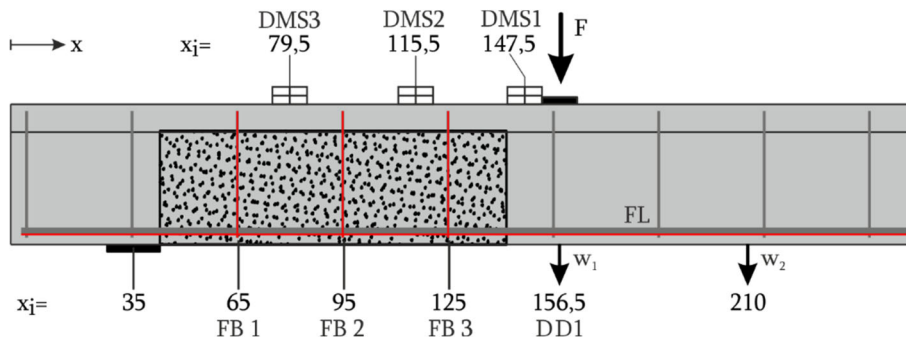
**Bild 195 B7.1 Rissbild**

Beim Erreichen der Maximallast von  $F_{\max} = 235,6 \text{ kN}$  und einer Verformung von  $15,69 \text{ mm}$  ist der maßgebende Biegeschubriss deutlich geöffnet (Bild 196). Daraufhin nimmt die Last geringfügig ab und der Versuch wird beendet, da ein dynamischer Versuch im Anschluss geplant war.

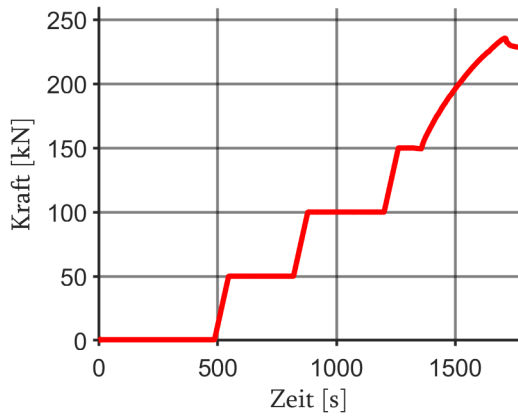


**Bild 196 B7.1 Maßgebender Biegeschubriss während des Versuchs (gespiegelt)**

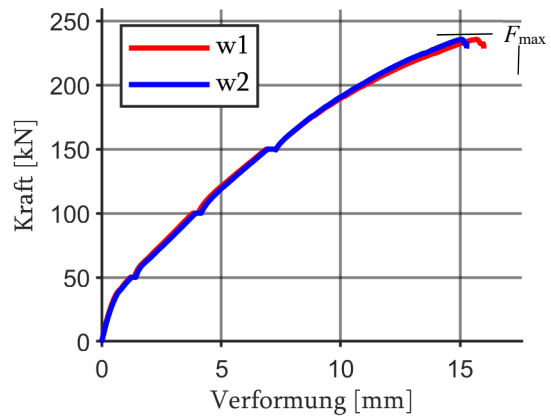
Bild 197 zeigt den Messaufbau. Die aufgezeichneten Werte finden sich in den Bildern 198-201. Bild 202 zeigt die Messwerte der faseroptischen Sensoren an der Längsbewehrung (FL) und der Bügelbewehrung (FB1-FB3).



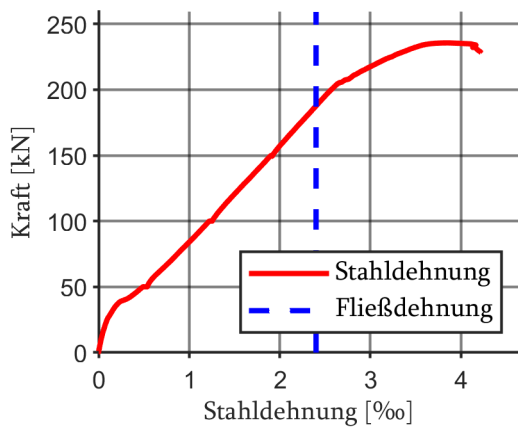
**Bild 197 B7.1 - Lage der DMS und des DD1 entlang der Längsachse**



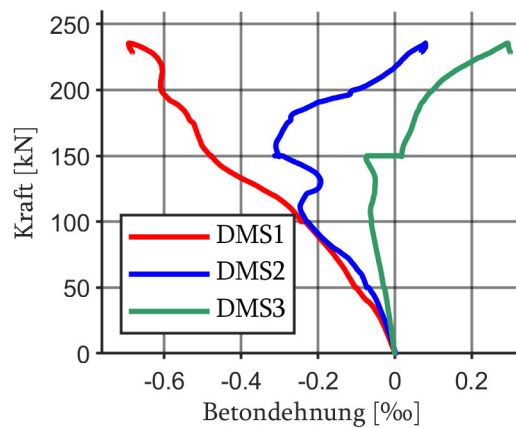
**Bild 198 B7.1 Kraft-Zeit-Diagramm**



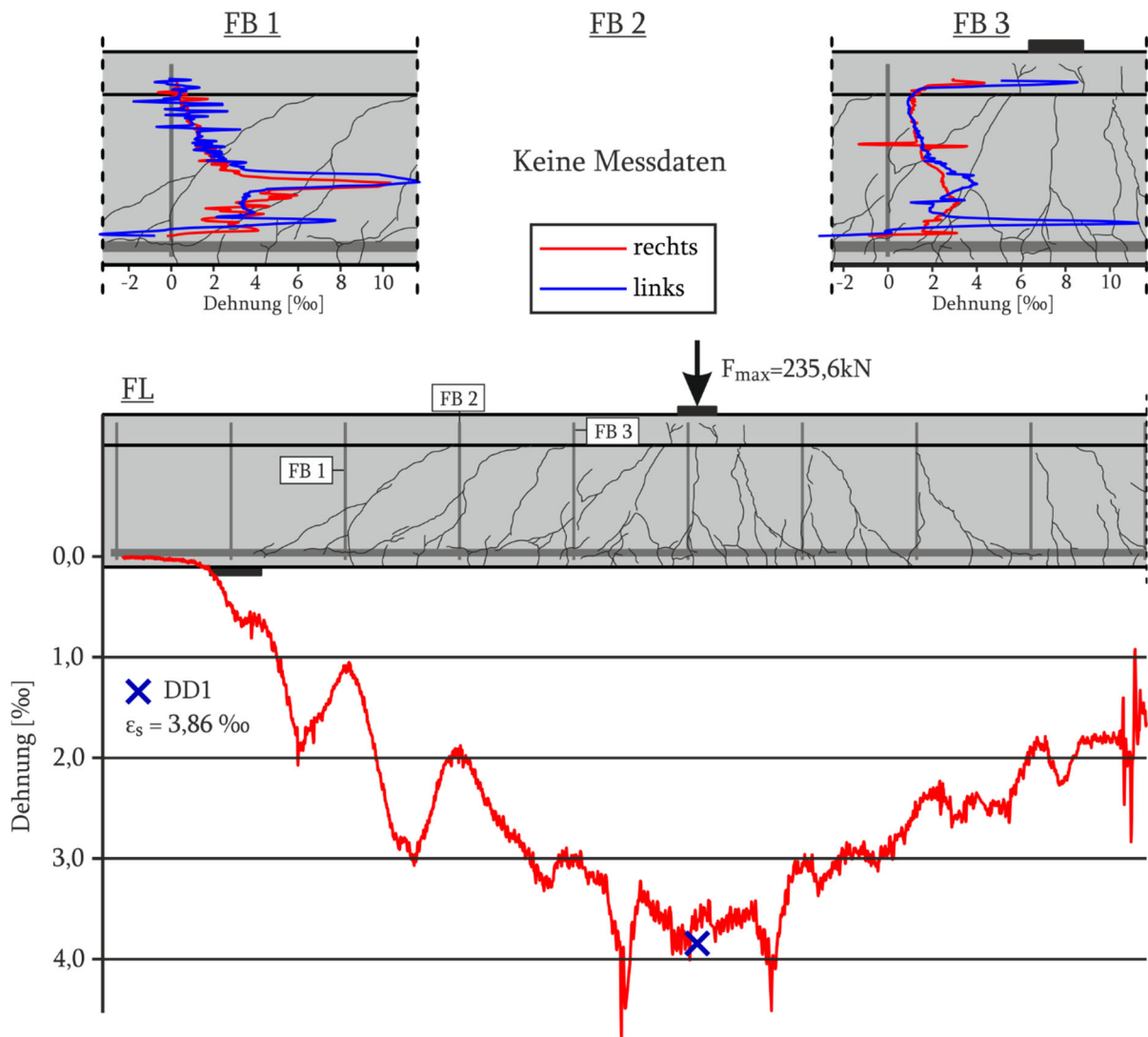
**Bild 199 B7.1 Kraft-Verformungs-Diagramm**



**Bild 200 B7.1 Kraft-Stahldehnungs-Diagramm**

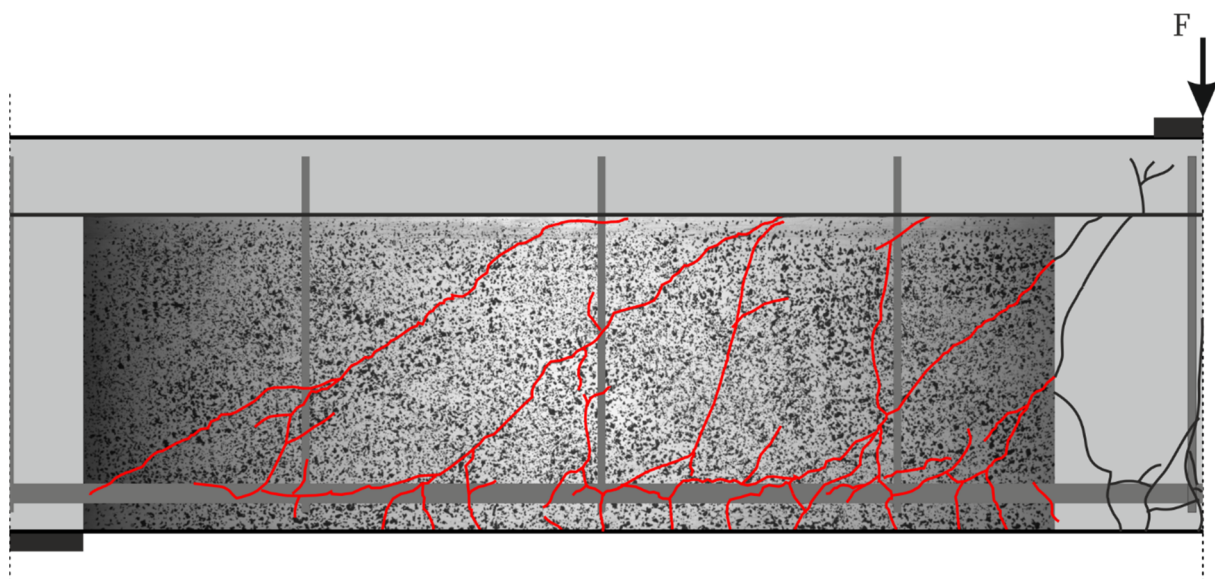


**Bild 201 B7.1 Kraft-Betondehnungs-Diagramm**

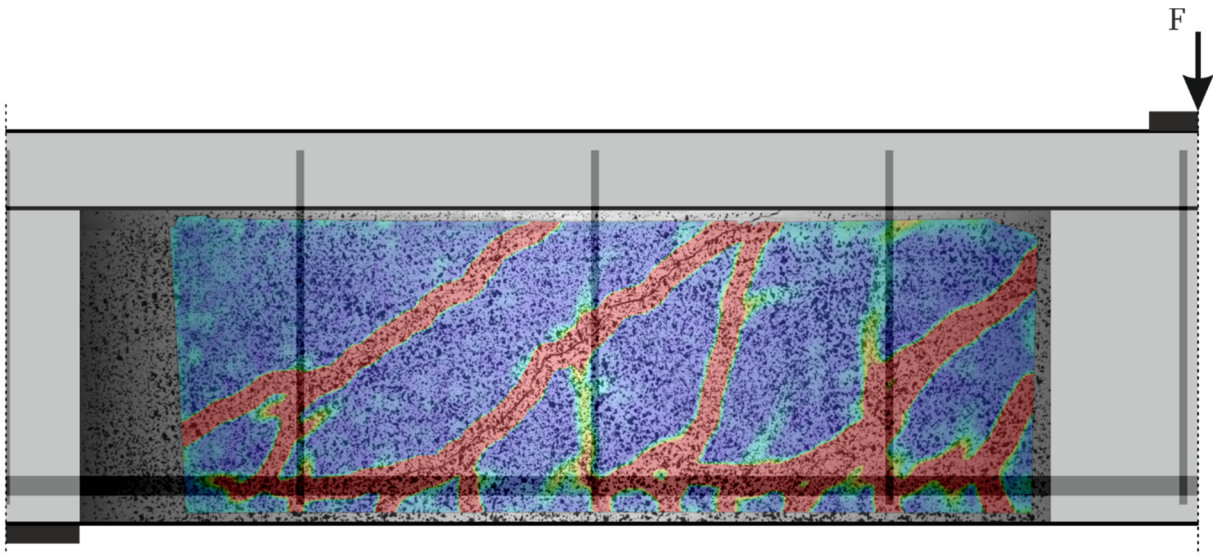


**Bild 202 B7.1 Faseroptische und Dehnungsmessungen bei Maximalast  $F_{\max} = 235,6 \text{ kN}$**

Die Bild 203 stellt das photogrammetrische Messfeld mit dem ausgebildeten Rissbild dar. In Bild 204 zeigt die Hauptzugdehnungen im Messfeld.

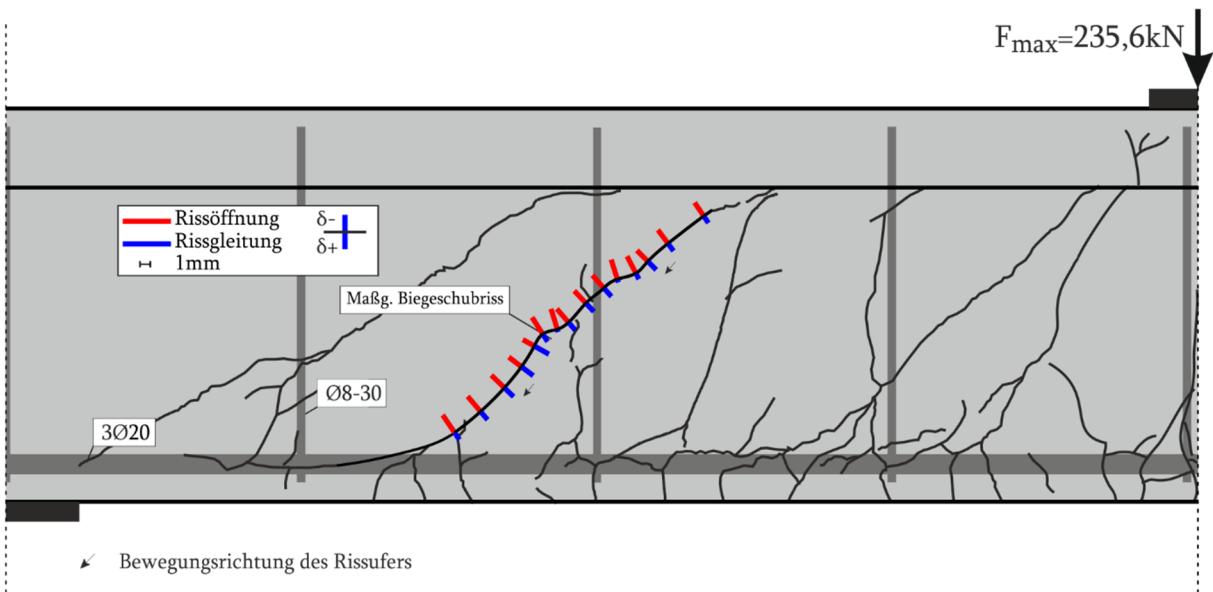


**Bild 203 B7.1 Photogrammetrisches Messfeld mit Rissbildung anhand des Dehnungsfeldes**

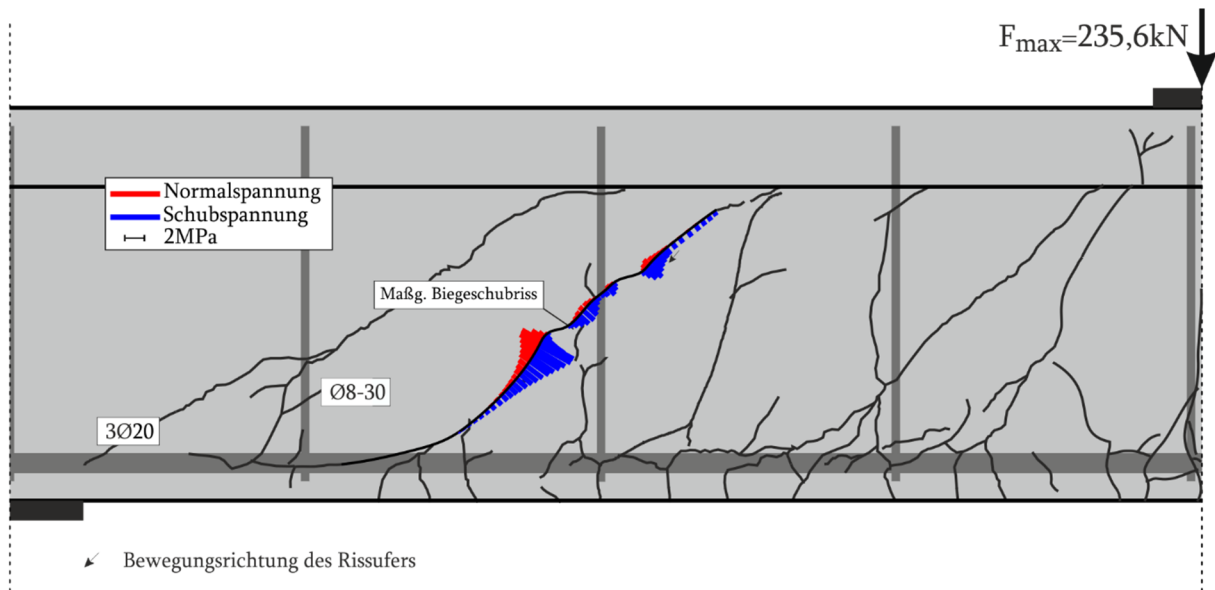


**Bild 204 B7.1** Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen bei  $F_{\max} = 235,6 \text{ kN}$

Die Risskinematik des Versuchs bei Maximallast ist in Bild 205 für den maßgebenden Biegeschubriss dargestellt. Aufgrund von Bügelfließen liegen beim maßgebenden Biegeschubriss besonders hohe risskinematische Größen vor. Die maximale Rissöffnung beträgt 2,15 mm und die maximale Rissgleitung 1,7 mm.



**Bild 205 B7.1** Risskinematik bei  $F_{\max} = 235,6 \text{ kN}$



**Bild 206 B7.1 Rissspannung nach Walraven bei  $F_{\max} = 235,6 \text{ kN}$**

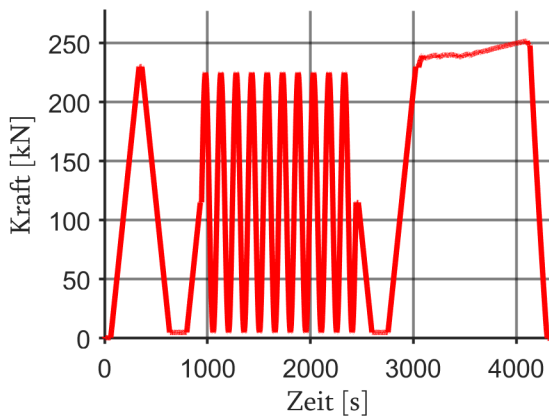
**Tabelle 19 B7.1 Querkraftanteil der Rissreibung am gesamten Querkraftabtrag für den maßgebenden Biegeschubriss bei  $F_{\max} = 235,6 \text{ kN}$**

|                 | Gesamt | Walraven | Li    | Gambarova | Guidotti | Cavangis |
|-----------------|--------|----------|-------|-----------|----------|----------|
| Querkraft [kN]  | 153,7  | 33,5     | 118,3 | 49,4      | 16,2     | 8,7      |
| Kraftanteil [%] | 100    | 21,8     | 77,0  | 32,2      | 10,6     | 5,6      |

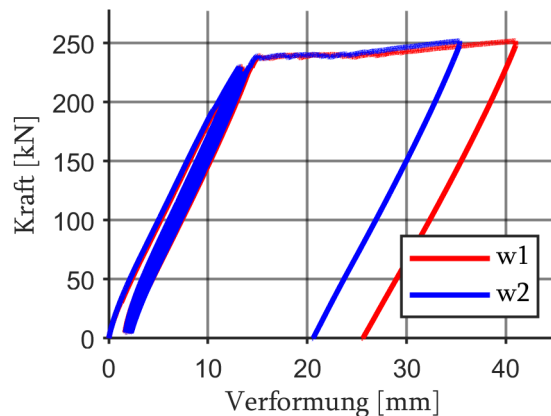
## 6.2.14 B7.1.2 (Wiederbelastung)

Der Balken B7.1 wird ein weiteres Mal getestet. Im Unterschied zu den vorherigen Versuchen erfolgt eine zyklische Belastung. Ziel ist es, den Einfluss einer dynamischen Einwirkung auf die risskinematischen Größen aufzuzeigen. Der Plattenbalken wird unterhalb der Fließkraft mit 230 kN belastet. Im Anschluss erfolgt die Entlastung und Wiederbelastung auf eine mittlere Kraft von 115 kN. Von dieser Belastungsstufe werden 10 sinusförmige Belastungszyklen mit einer Maximallast von 225 kN und einer Minimallast von 5 kN durchgeführt. Nach Abschluss der Belastungszyklen wird die Last auf 5 kN herabgesetzt, um dann das Versagen des Balkens herbeizuführen (Bild 207).

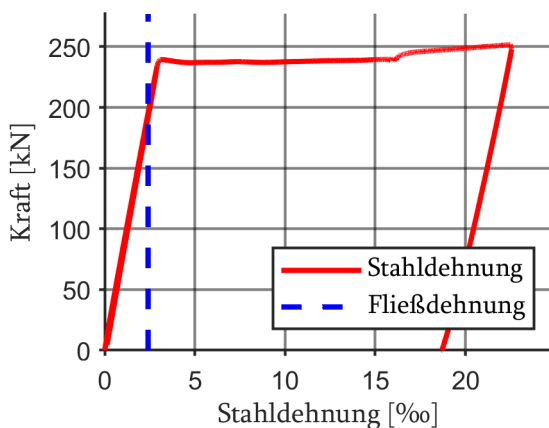
Aus den Bilder 208 und 209 ist das Fließen der Längsbewehrung bei einer Belastung von 239,4 kN und einer Verformung von 15,27 mm deutlich zu erkennen. Die plastische Verformung in der Längsbewehrung liegt bei etwa 20,1 ‰. In der Bild 210 sind die Betondehnungen aufgetragen. Diese verhalten sich in jeder Belastungsstufe nahezu linear mit einer Maximaldehnung von 0,65 ‰. Nach dem Versuchsende ist noch eine deutliche Verformung vorhanden.



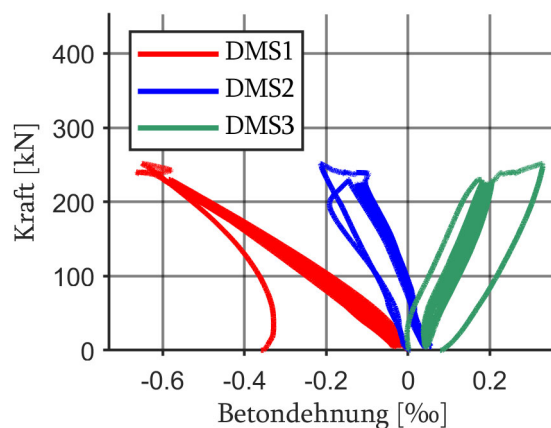
**Bild 207 B7.1.2 Last-Zeit-Kurve**



**Bild 208 B7.1.2 Kraft-Verformungs-Diagramm**



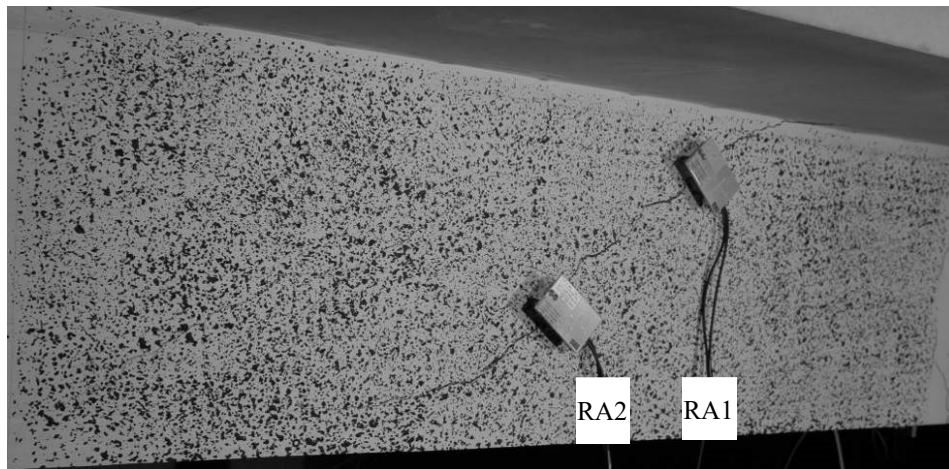
**Bild 209 B7.1.2 Kraft-Stahldehnungs-Diagramm**



**Bild 210 B7.1.2 Kraft-Betondehnungs-Diagramm**

Da der maßgebende Biegeschubriss in diesem Versuch bereits bekannt ist, werden 2 Rissaufnehmer im unteren (Rissaufnehmer 2 = RA2) und oberen (Rissaufnehmer 1 = RA1) Rissabschnitt angebracht, um einen Vergleichswert zu der Auswertung mit ARAMIS zu erhalten (Bild 211). Das Kraft-Verformungs-Diagramm deutet auf ein Fließen der Längsbewehrung hin. Zu diesem Belastungszustand sind in Bild 212 die Biegerisse im Bereich

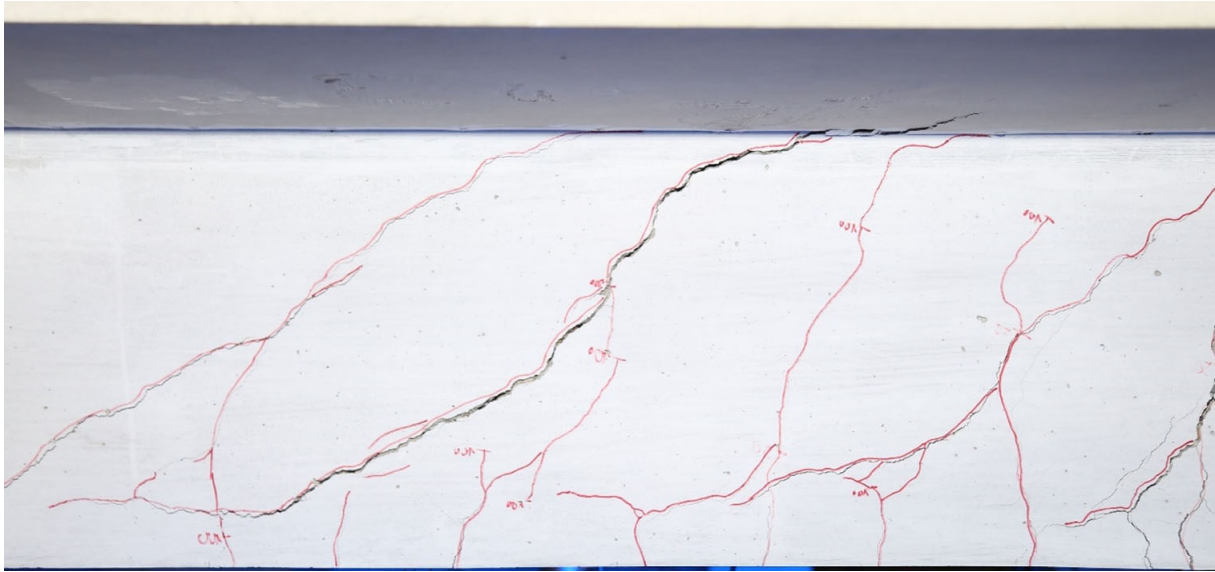
der Lasteinleitung dargestellt. Der maßgebende Biegeschubriss weist ebenfalls eine deutliche Öffnung auf (Bild 213).



**Bild 211 B7.1.2 Messfeld mit Rissaufnehmern ohne Belastung**

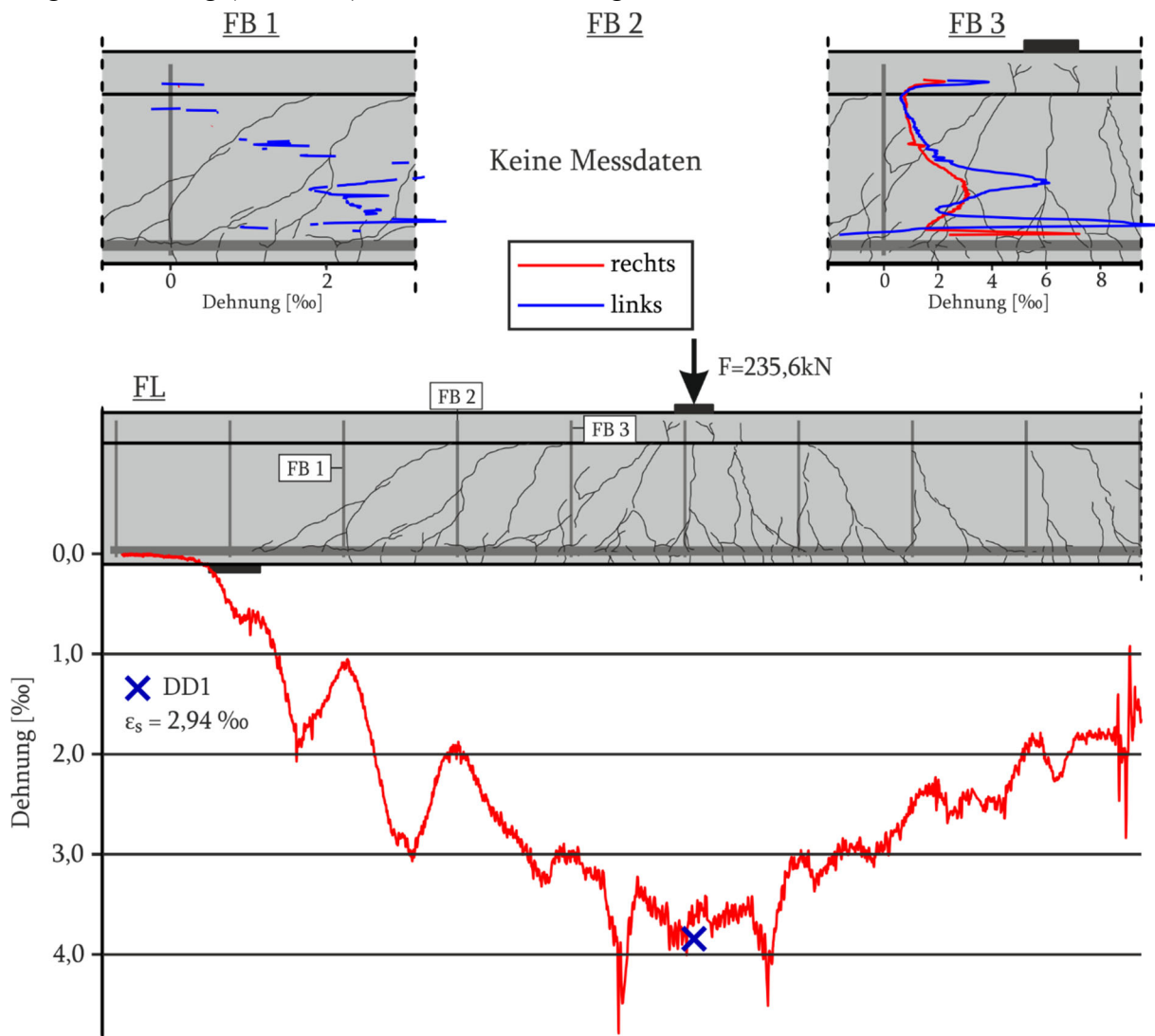


**Bild 212 B7.1.2 Biegerisse bei  $F = 239,4$  kN (gespiegelt)**



**Bild 213 B7.1.2 Biegeschubrisse bei  $F_{\max} = 239,4 \text{ kN}$  (gespiegelt)**

Die Darstellung der faseroptischen Sensoren der Längsbewehrung (FL) und der Bügelbewehrung (FB1-FB3) sind in Bild 214 dargestellt.

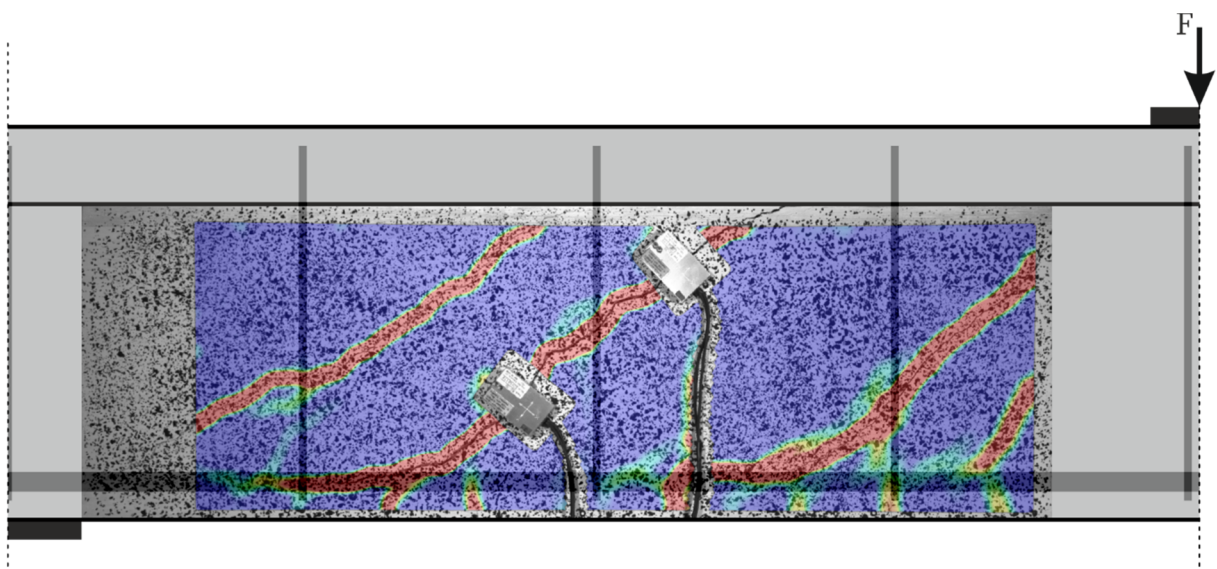


**Bild 214 B7.1.2 Faseroptische und Dehnungsmessungen bei der Last  $F = 235,6\text{kN}$**

Die Bild 215 stellt das photogrammetrische Messfeld mit dem ausgebildeten Rissbild dar. In Bild 216 sind die Hauptzugdehnungen im Messfeld grafisch dargestellt.



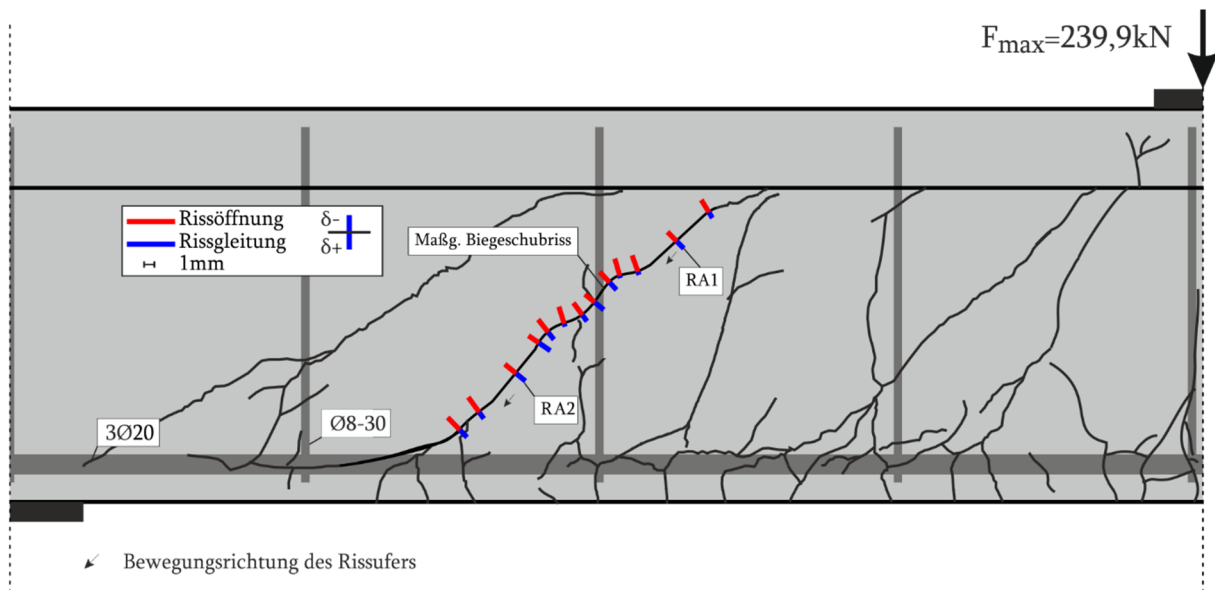
**Bild 215 B7.1.2 Photogrammetrisches Messfeld mit Rissbildung anhand Dehnungsfeldes**



**Bild 216 B7.1.2 Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen bei  $F = 239,4 \text{ kN}$**

Die Risskinematik des Versuchs bei Maximallast ist in Bild 217 für den maßgebenden Biegeschubriss dargestellt. Die Größenordnung der Rissöffnung mit maximal 1,9 mm und der Rissgleitung mit 1,6 mm ist identisch zum Erstversuch. Aufgrund des Erstversuchs liegt jedoch bereits vor Beginn der photogrammetrischen Aufzeichnung eine deutliche Rissöffnung von etwa 0,75-1,0 mm vor. Demnach hat die zyklische Belastung einen erheblichen Einfluss auf die risskinematischen Größen.

Die Rissaufnehmer liefern passende Ergebnisse zu den Werten der photogrammetrischen Auswertung.



**Bild 217 B7.1.2 Risskinematik entlang des Risses bei  $F_{\max} F = 239,9$  kN**

Auf die Darstellung der Rissspannung wird an dieser Stelle verzichtet, da große Teile des maßgebenden Risses von den Rissaufnehmern verdeckt werden. Bei der Auswertung der Risskinematik erfolgt daher eine lineare Interpolation über die Rissaufnahme

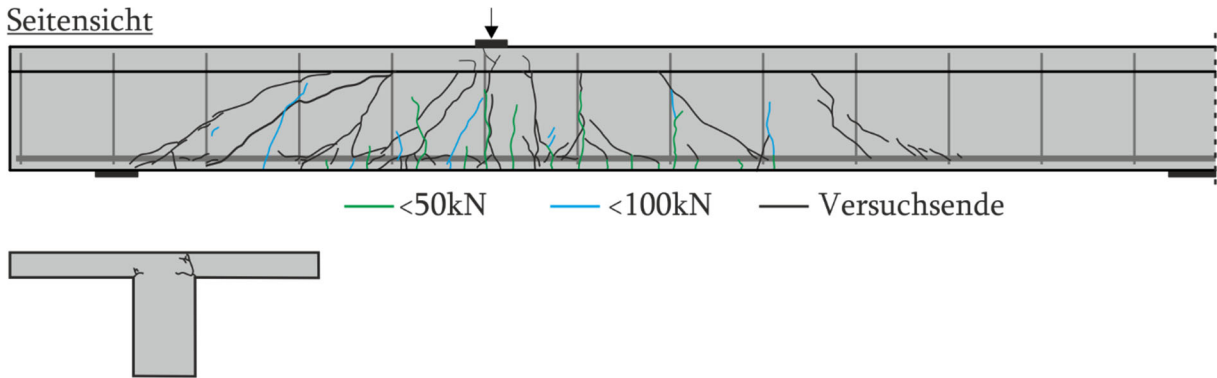
**Tabelle 20 B7.1.2 Querkraftanteil der Rissreibung am gesamten Querkraftabtrag für den maßgebenden Biegeschubriss bei  $F_{\max} = 239,9$  kN**

|                 | Gesamt | Walraven | Li    | Gambarova | Guidotti | Cavangis |
|-----------------|--------|----------|-------|-----------|----------|----------|
| Querkraft [kN]  | 156,6  | 38,6     | 113,2 | 54,6      | 20,9     | 12,9     |
| Kraftanteil [%] | 100    | 24,7     | 72,3  | 34,8      | 13,3     | 8,3      |

### 6.2.15 B7.2

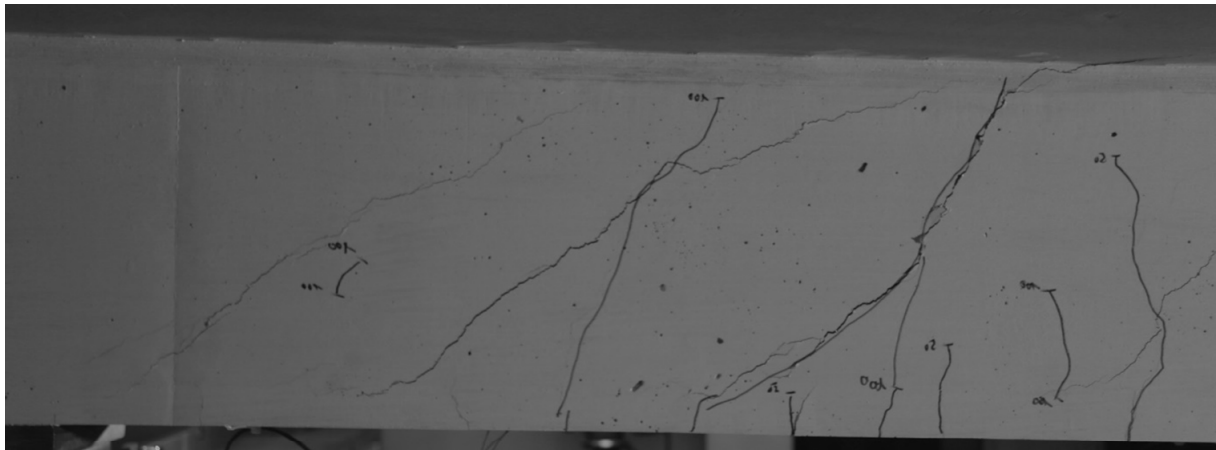
Der Versuchsbalken B7.2 geht bei ca. 25 kN in den Zustand II über. Die Rissbildung des Balkens ist für unterschiedliche Laststufen in Bild 218 dargestellt. Bis zu einer Belastung von 50 kN entstehen ausschließlich Biegerisse mit einer maximalen Länge der halben Balkenhöhe. Bis 100 kN entstehen weitere Biegerisse mit einer Länge von zwei Drittel der Balkenhöhe, die sich neigen. Die weitere Lastaufbringung erzeugt noch einige Biegerisse und überwiegend Biegeschubrisse.

#### Seitensicht

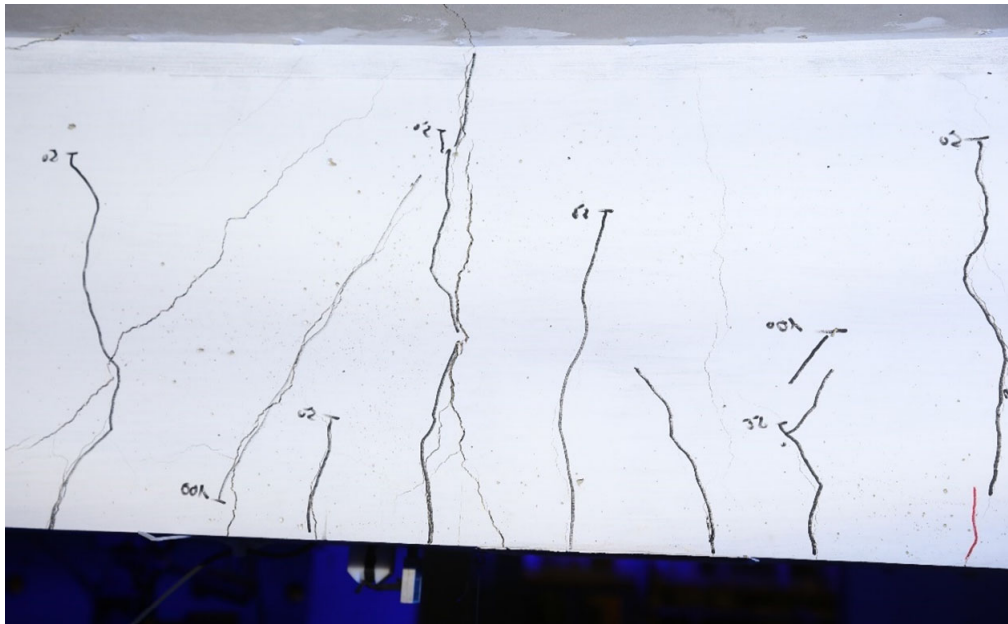


**Bild 218 B7.2 Rissbild**

Beim Erreichen der Fließkraft von 234,4 kN und einer Durchbiegung von 15,23 mm ist der maßgebende Biegeschubriss deutlich geöffnet (Bild 219). Daraufhin nimmt die Last geringfügig zu. Auf den Balken wird weiterhin eine Verformung bis 23,5 mm und eine zugehörige Belastung von  $F_{\max} = 237,5$  kN aufgebracht. Daraufhin wird der Versuch beendet, da anzunehmen ist, dass kein Querkraftversagen mehr auftreten wird (Bild 220).

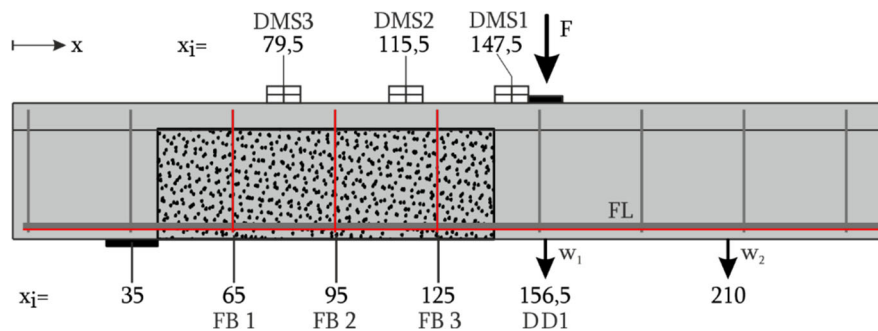


**Bild 219 B7.2 Maßgebende Biegeschubriss während des Versuchs (gespiegelt)**

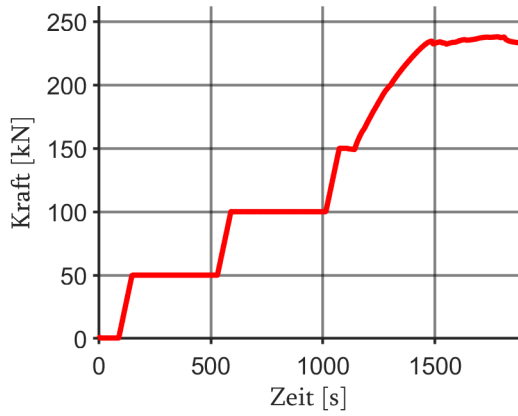


**Bild 220 B7.2 Biegeriss unterhalb der Last während des Versuchs (gespiegelt)**

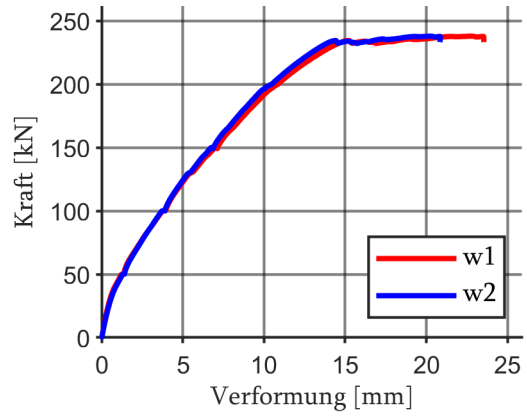
Bild 221 zeigt den Messaufbau. Die aufgezeichneten Werte finden sich in den Bildern 222-225. Die Messwerte der faseroptischen Sensoren an der Längsbewehrung (FL) und der Bügelbewehrung (FB1-FB3) sind in Bild 226 grafisch dargestellt. Die Belastung entspricht  $F = 232,3 \text{ kN}$ , da bei der Maximallast die Glasfaser in der Längsbewehrung versagte.



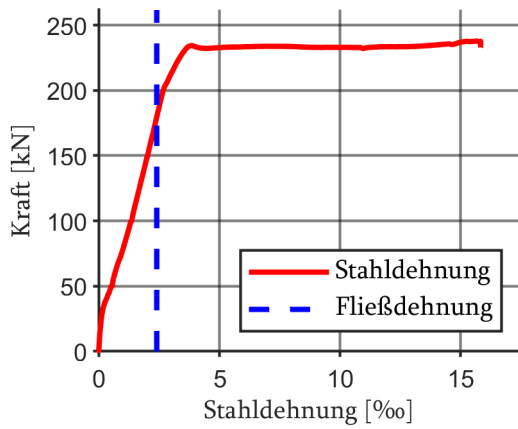
**Bild 221 B7.2 - Lage der DMS und des DD1 entlang der Längsachse**



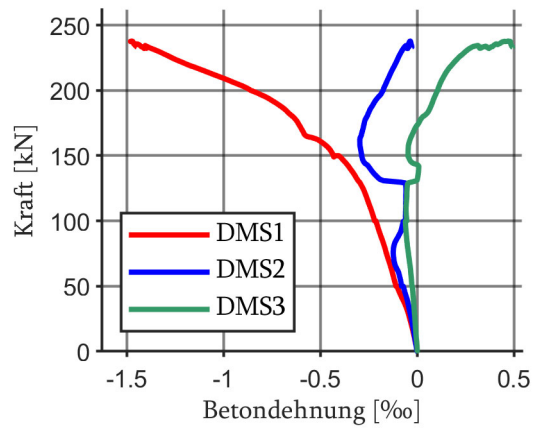
**Bild 222 B7.2 Kraft-Zeit-Diagramm**



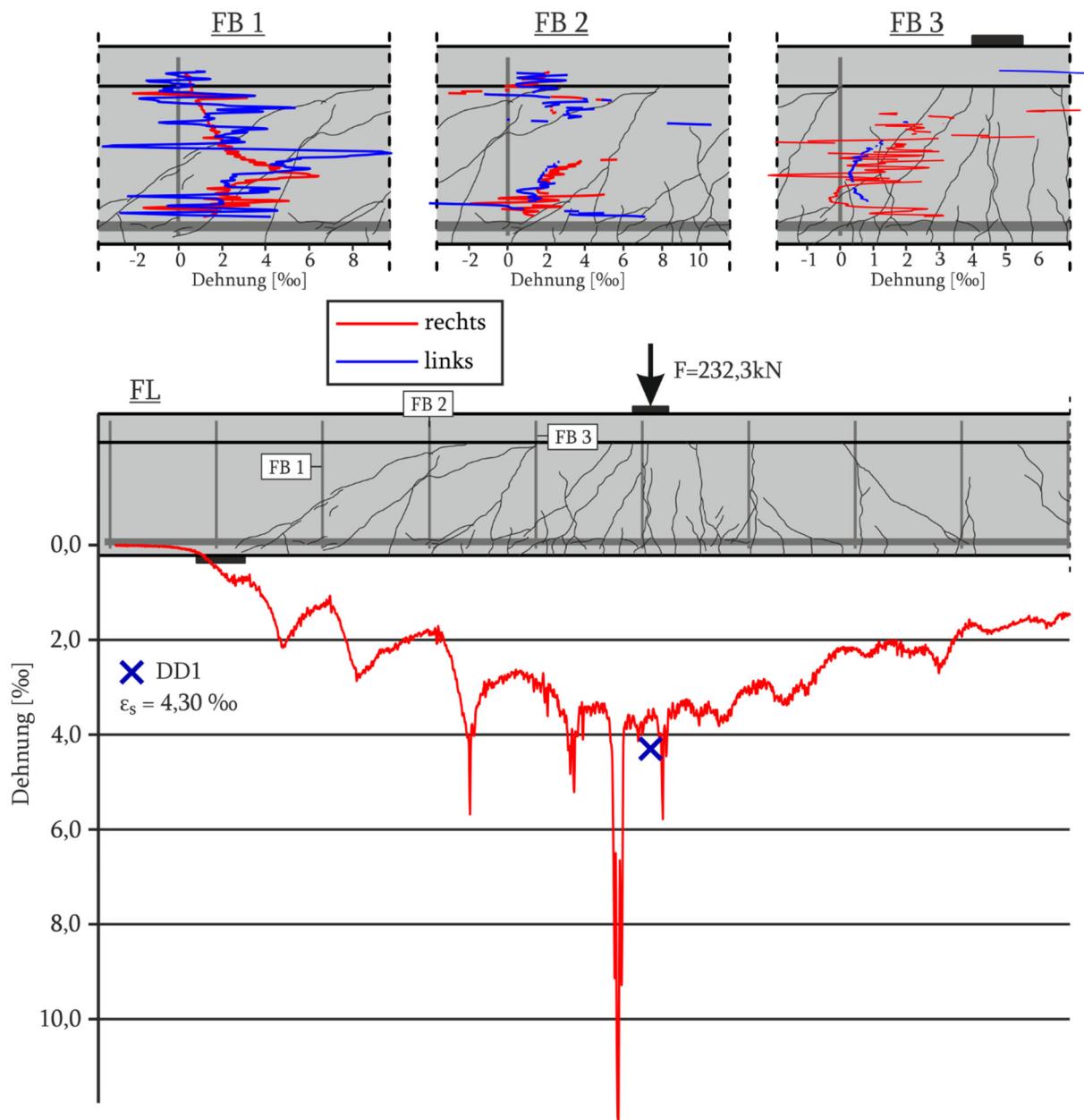
**Bild 223 B7.2 Kraft-Verformungs-Diagramm**



**Bild 224 B7.2 Kraft-Stahldehnungs-Diagramm**

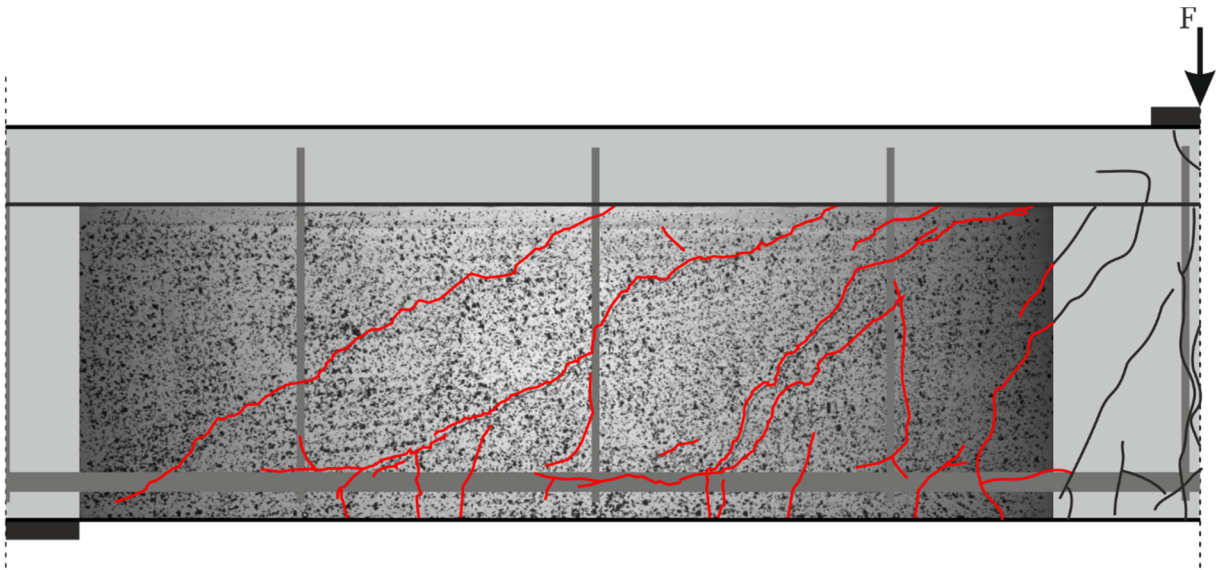


**Bild 225 B7.2 Kraft-Betondehnungs-Diagramm**

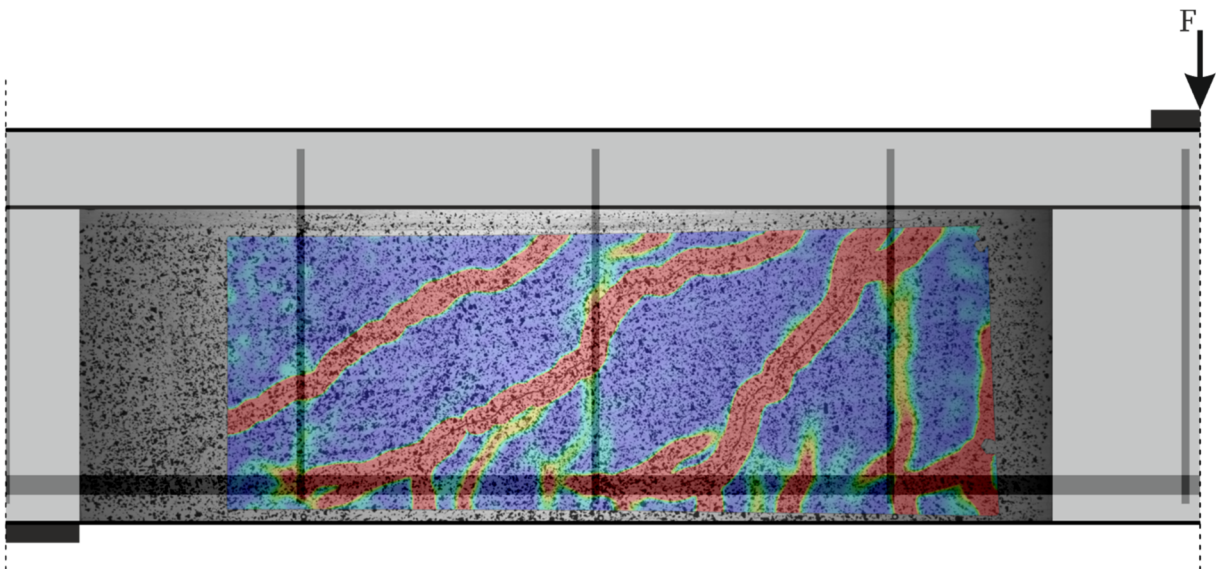


**Bild 226 B7.2 Faseroptische und Dehnungsmessungen bei der Last  $F = 232,3\text{kN}$**

Die Bild 227 zeigt das photogrammetrische Messfeld mit dem ausgebildeten Rissbild. In Bild 228 sind die Hauptzugdehnungen dargestellt.

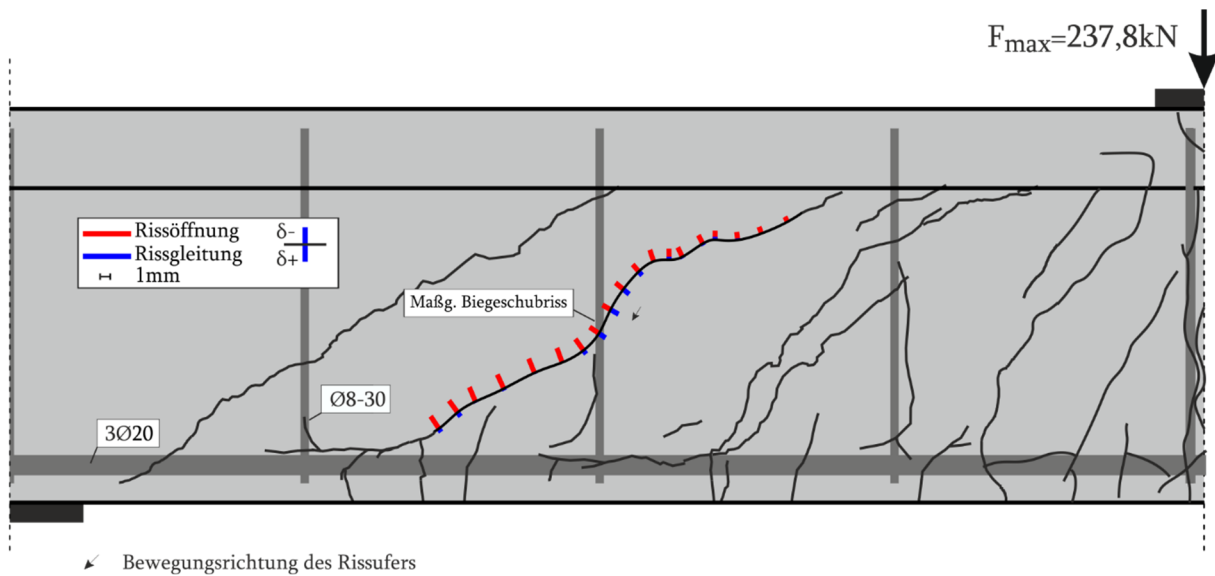


**Bild 227 B7.2 Photogrammetrisches Messfeld mit Rissbildung anhand Dehnungsfeldes**

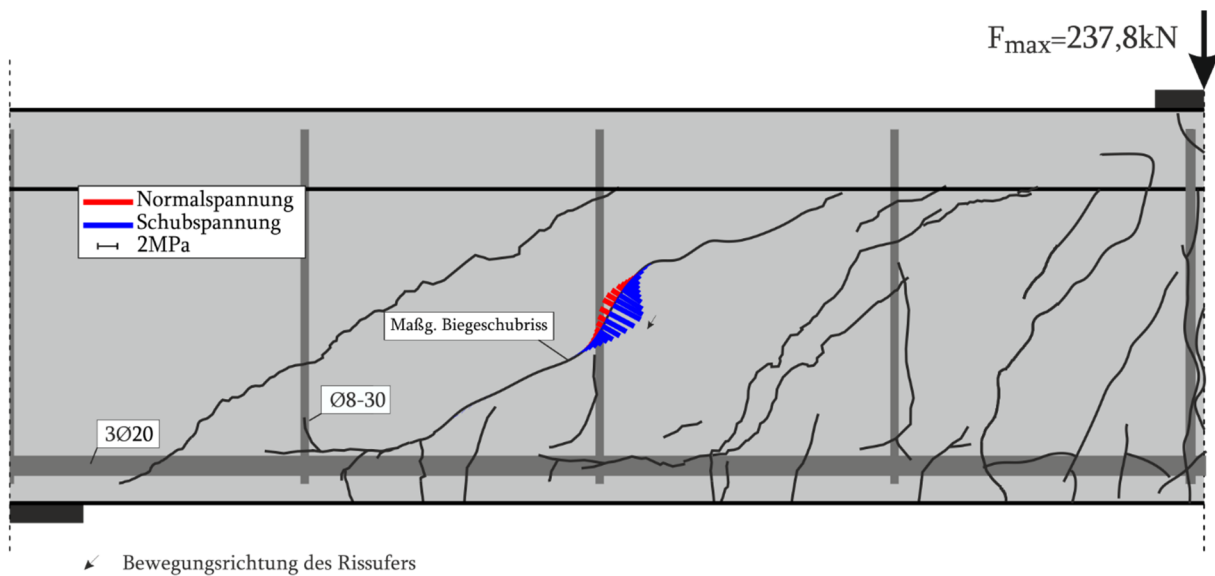


**Bild 228 B7.2 Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen bei  $F_{\max} = 237,5$  kN**

Die Risskinematik des Versuchs bei Maximallast ist in Bild 229 für den maßgebenden Biegeschubriss dargestellt. Dieser weist im unteren Rissabschnitt die maximale Rissöffnung von  $w = 1,55$  mm und sehr geringe Rissgleitung auf. Die maximale Rissgleitung von  $\delta = 1$  mm befindet sich im steilen Rissabschnitt.



**Bild 229 B7.2 Risskinematik bei  $F_{\max} = 237,8$  kN**



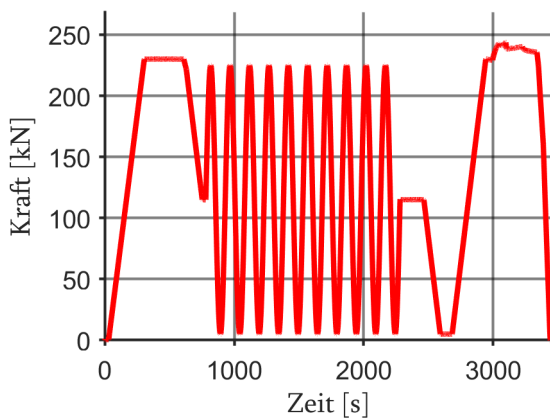
**Bild 230 B7.2 Rissspannung nach Walraven bei  $F_{\max} = 237,8$  kN**

**Tabelle 21 B7.2 Querkraftanteil der Rissreibung am gesamten Querkraftabtrag für den maßgebenden Biegeschubriss bei  $F_{\max} = 237,8$  kN**

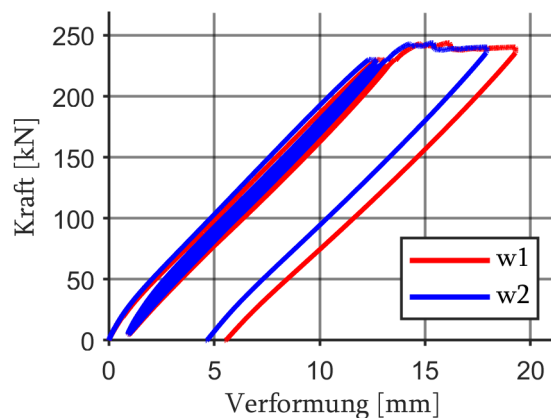
|                 | Gesamt | Walraven | Li   | Gambarova | Guidotti | Cavangis |
|-----------------|--------|----------|------|-----------|----------|----------|
| Querkraft [kN]  | 131,2  | 25,4     | 63,7 | 36,8      | 14,7     | 11,6     |
| Kraftanteil [%] | 100    | 16,4     | 40,9 | 23,6      | 9,5      | 7,5      |

### 6.2.16 B7.2.2 (Wiederbelastung)

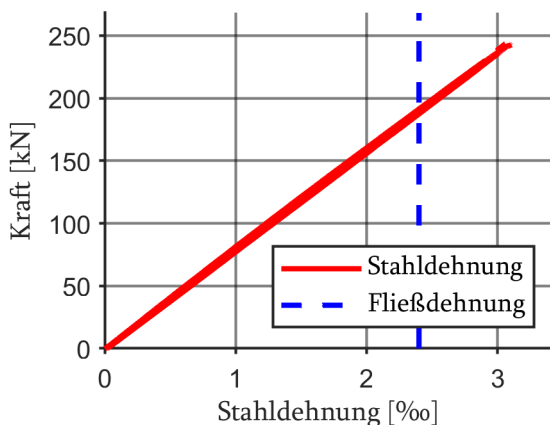
Der Balken B7.2 wird ein weiteres Mal getestet. Im Unterschied zu den vorherigen Versuchen erfolgt eine zyklische Belastung. Ziel ist es, den Einfluss einer dynamischen Einwirkung auf die risskinematischen Größen aufzuzeigen. Der Plattenbalken wird unterhalb der Fließkraft mit 230 kN belastet. Im Anschluss erfolgt die Entlastung und Wiederbelastung auf eine mittlere Kraft von 115 kN. Von dieser Belastungsstufe werden 10 sinusförmige Belastungszyklen mit einer Maximallast von 225 kN und einer Minimallast von 5 kN durchgeführt. Nach Abschluss der Belastungszyklen wird die Last auf 5 kN herabgesetzt, um dann das Versagen des Balkens herbeizuführen (Bild 207). In Bild 232 ist eine plastische Verformung des Trägers erkennbar. Bild 233 zeigt, dass die Längsbewehrung sich über den gesamten Versuch linear elastisch verhält. In der Bild 234 sind die Betondehnungen aufgetragen. An der Lasteinleitung ist eine plastische Verformung erkennbar (siehe DMS1). Es verbleibt auch ein plastischer Anteil von  $\epsilon_c = 0,15 \text{ ‰}$ , womit sich die bleibenden Verformungen des Balkens nach Entlastung erklären lassen. Sicherlich spielt hier auch das Kriechen des Betons eine Rolle.



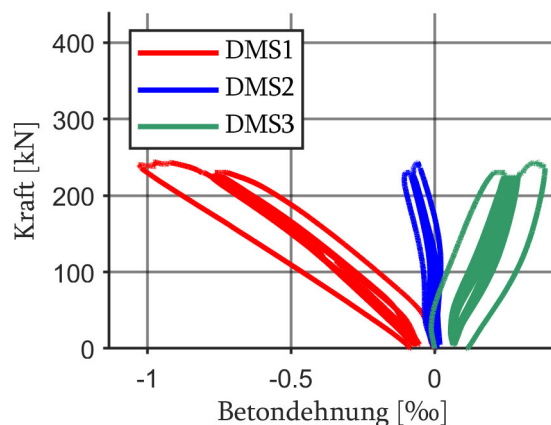
**Bild 231 B7.2.2 Last-Zeit-Kurve**



**Bild 232 B7.2.2 Kraft-Verformungs-Diagramm**



**Bild 233 B7.2.2 Kraft-Stahldehnungs-Diagramm**



**Bild 234 B7.2.2 Kraft-Betondehnungs-Diagramm**

Da der maßgebende Biegeschubriss in diesem Versuch bereits bekannt ist, werden 2 Rissaufnehmer im unteren (Rissaufnehmer 2 = RA2) und oberen (Rissaufnehmer 1 = RA1) Teil des Risses angebracht, um einen Vergleichswert zu den Messungen mit ARAMIS zu erhalten (Bild 235).

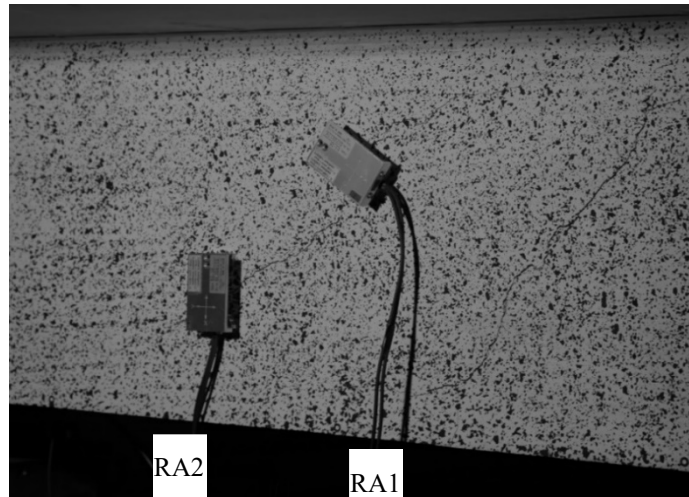


Bild 235 B7.2.2 Messfeld mit Rissaufnehmern ohne Belastung

Die Darstellung der faseroptischen Sensoren der Längsbewehrung (FL) und der Bügelbewehrung (FB1-FB3) sind in Bild 236 dargestellt.

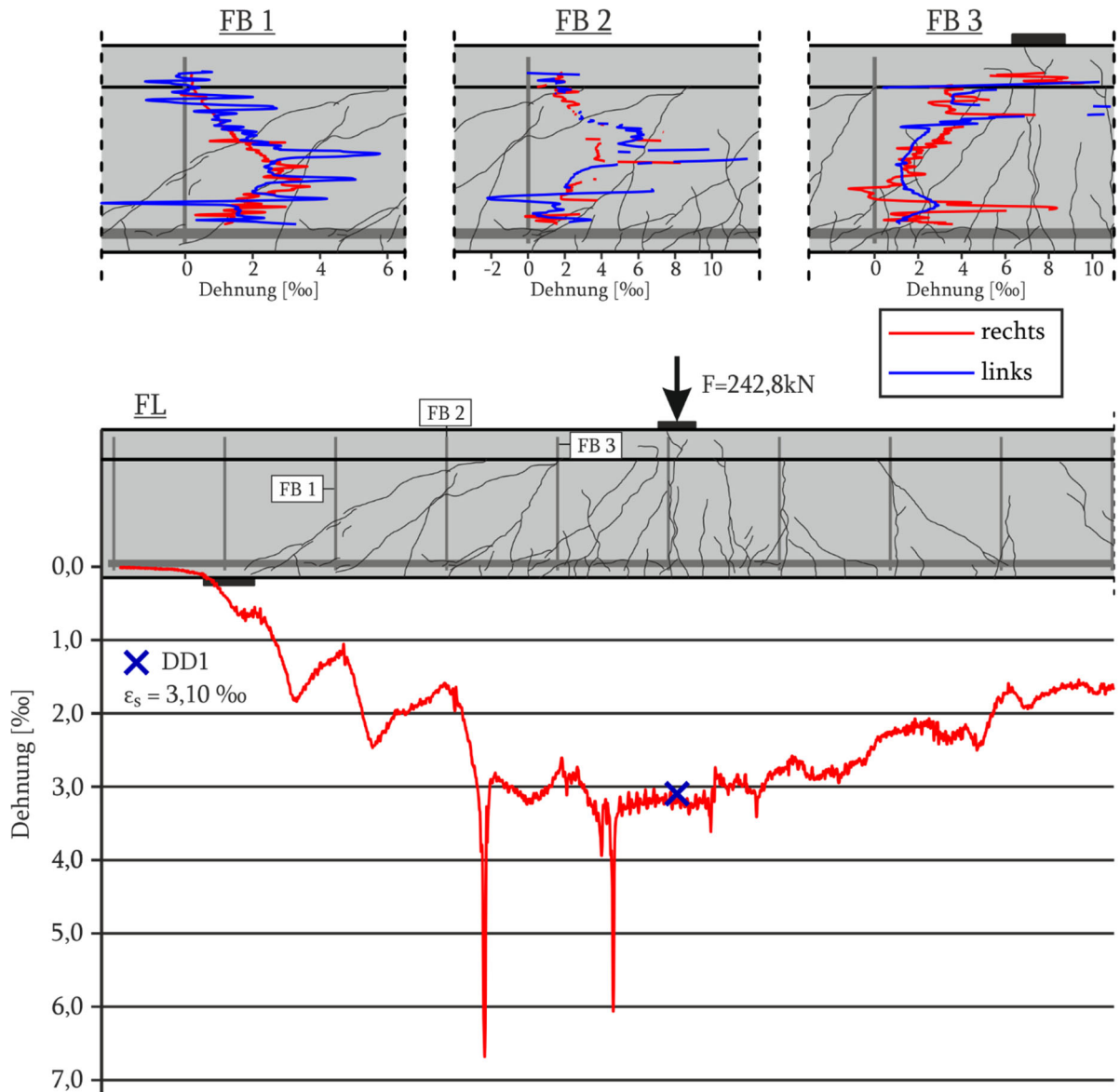
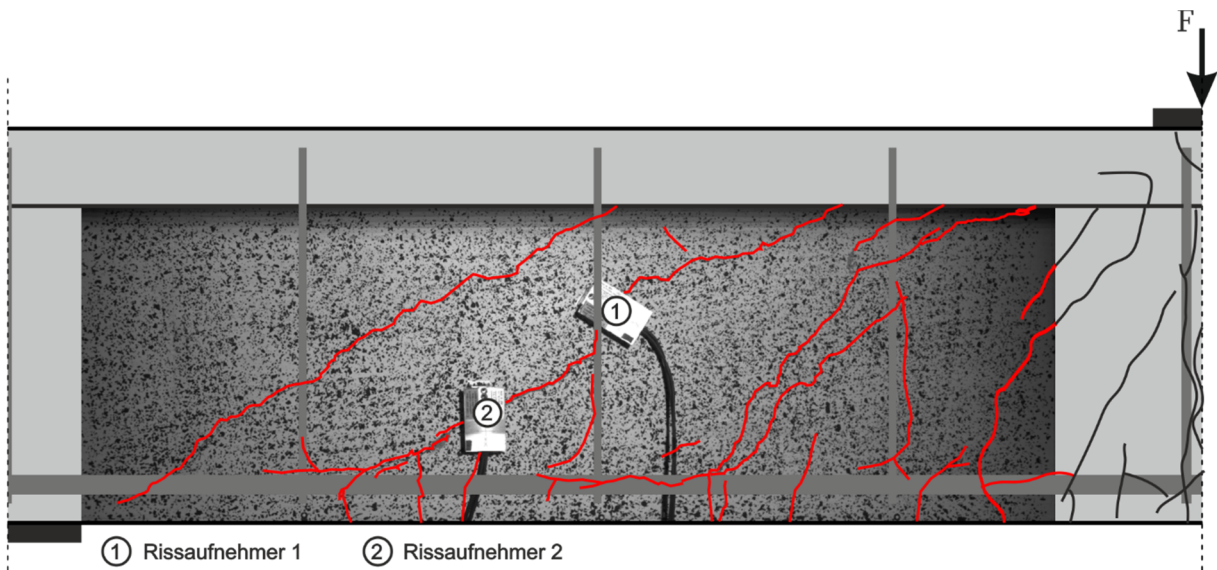
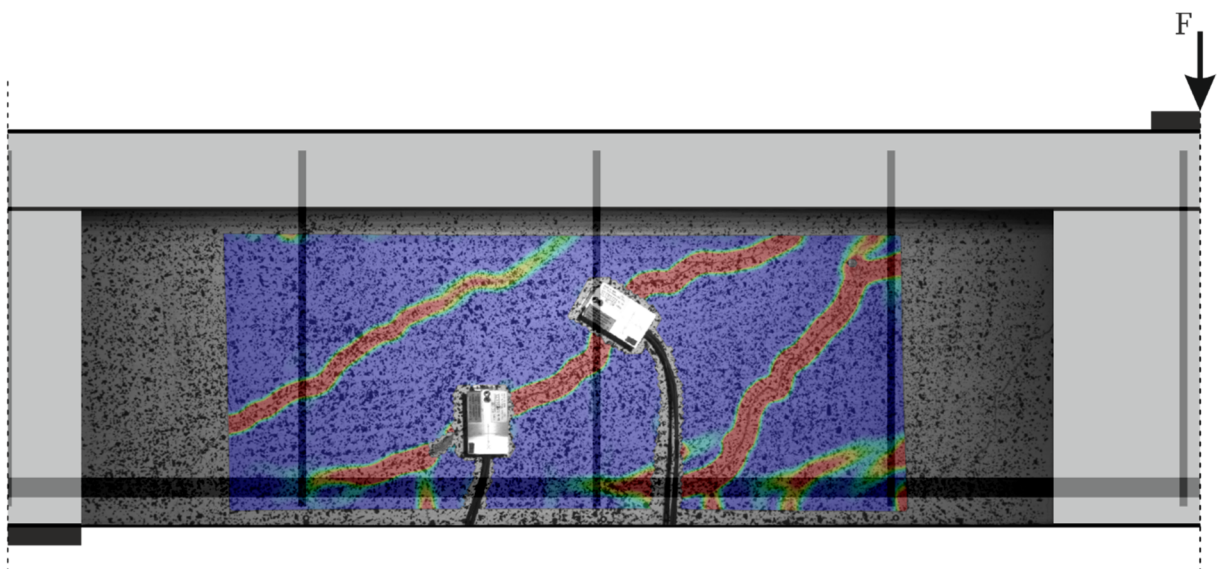


Bild 236 B7.2.2 Faseroptische und Dehnungsmessungen bei der Last  $F = 242,8\text{kN}$

Die Bild 237 stellt das photogrammetrische Messfeld mit dem ausgebildeten Rissbild dar. In Bild 238 wird der Dehnungszustand der Hauptzugdehnungen im Messfeld dargestellt.

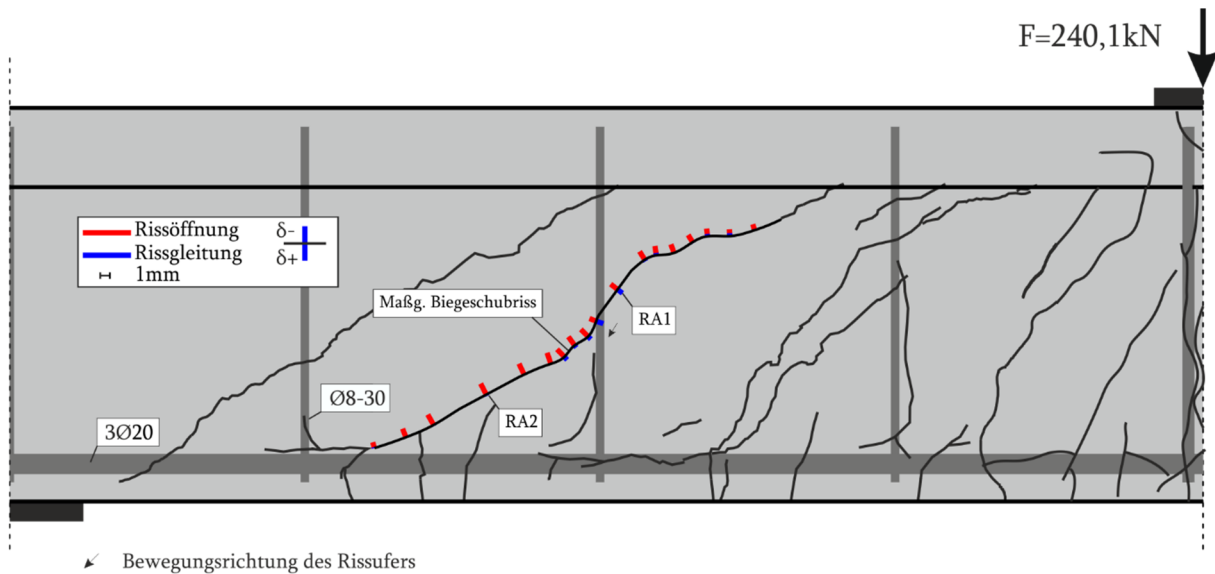


**Bild 237 B7.2.2 Photogrammetrisches Messfeld mit Rissbildung anhand Dehnungsfeldes**



**Bild 238 B7.2.2 Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen bei  $F = 242,8\text{kN}$**

Die Risskinematik des Versuchs bei Maximallast ist in Bild 239 für den maßgebenden Biegeschubriss dargestellt. Die Größenordnung der Rissöffnung mit maximal 1,25 mm und der Rissgleitung mit 0,75 mm liegt unter den Werten des Erstversuchs. Aufgrund des Erstversuch liegt jedoch bereits vor Beginn der photogrammetrischen Aufzeichnung eine deutliche Rissöffnung von etwa 0,5 mm vor. Demnach hat die zyklische Belastung einen Einfluss auf die risskinematischen Größen.



**Bild 239 B7.2.2 Risskinematik entlang des Risses bei  $F = 240,1$  kN**

Auf die Darstellung der Rissspannung wird an dieser Stelle verzichtet, da große Teile des maßgebenden Risses von den Rissaufnehmern verdeckt werden. Die Auswertung der Risskinematik erfolgt daher durch eine lineare Interpolation über die Rissaufnehmer.

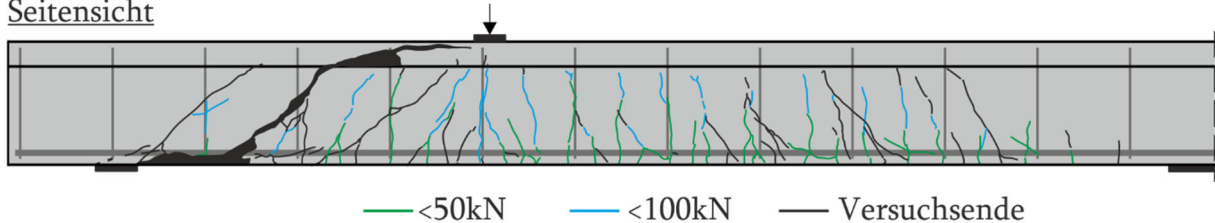
**Tabelle 22 B7.2 Querkraftanteil der Rissreibung am gesamten Querkraftabtrag für den maßgebenden Biegeschubriss bei  $F_{\max}$**

|                 | Gesamt | Walraven | Li   | Gambarova | Guidotti | Cavangis |
|-----------------|--------|----------|------|-----------|----------|----------|
| Querkraft [kN]  | 156,8  | 29,0     | 55,1 | 35,0      | 18,3     | 14,7     |
| Kraftanteil [%] | 100    | 18,5     | 35,1 | 22,4      | 11,7     | 9,4      |

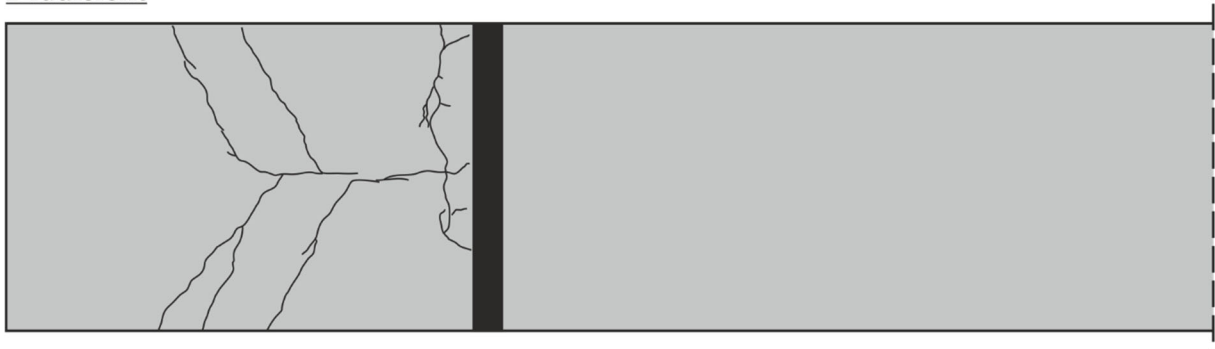
### 6.2.17 B8.1

Der Versuchsbalken B8.1 geht bei ca. 25 kN in den Zustand II über. Die Rissbildung des Balkens ist für unterschiedliche Laststufen in Bild 240 dargestellt. Bis zu einer Belastung von 50 kN entstehen ausschließlich Biegerisse mit einer maximalen Länge der halben Balkenhöhe. Bis 100 kN entstehen weitere Biegerisse mit einer Länge von zwei Drittel der Balkenhöhe, die sich neigen. Die weitere Lastaufbringung erzeugt noch einige Biegerisse und überwiegend Biegeschubrisse.

#### Seitensicht

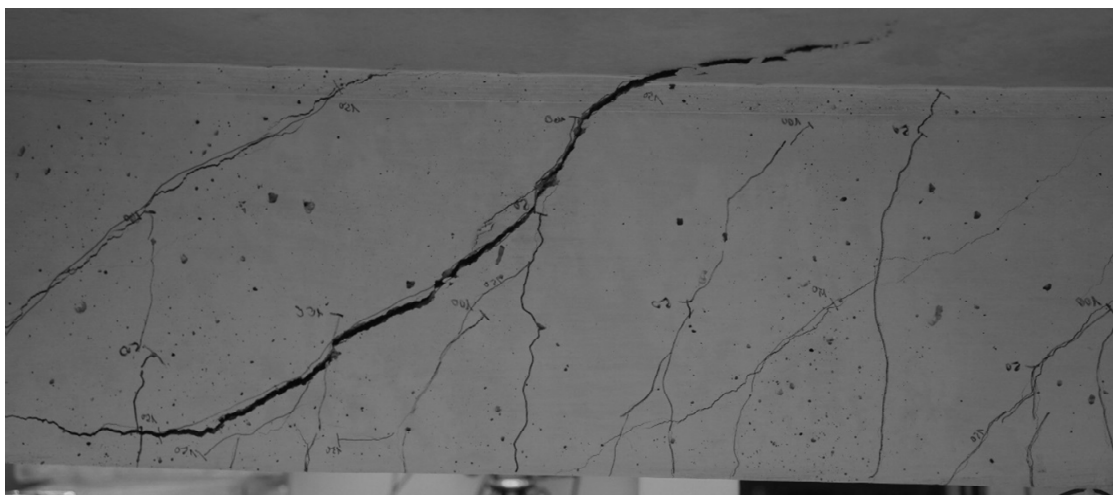


#### Draufsicht



**Bild 240 B8.1 Rissbild**

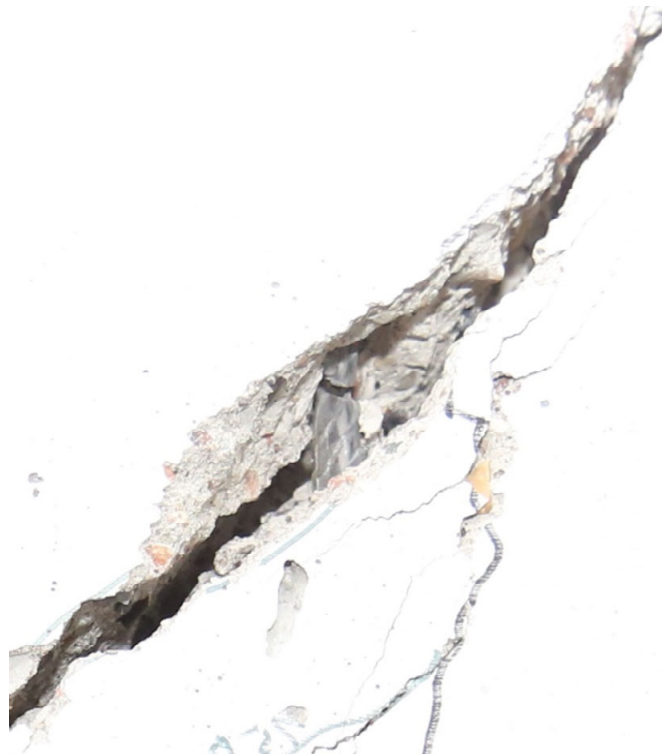
Beim Erreichen der Fließkraft von **235,1 kN** und einer Durchbiegung von **14,24 mm** ist der maßgebende Biegeschubriss deutlich geöffnet. Daraufhin nimmt die Last nicht mehr zu, jedoch vergrößert sich die Öffnung des Biegeschubrisses deutlich (Bild 241). Bei einer aufgebrachtten Verformung von 24,76 mm kommt es zum Bügelriss und plötzlichem Lastabfall (Bild 242 & Bild 243).



**Bild 241 B8.1 Maßgebender Biegeschubriss und Bügelversagen während des Versuchs (gespiegelt)**

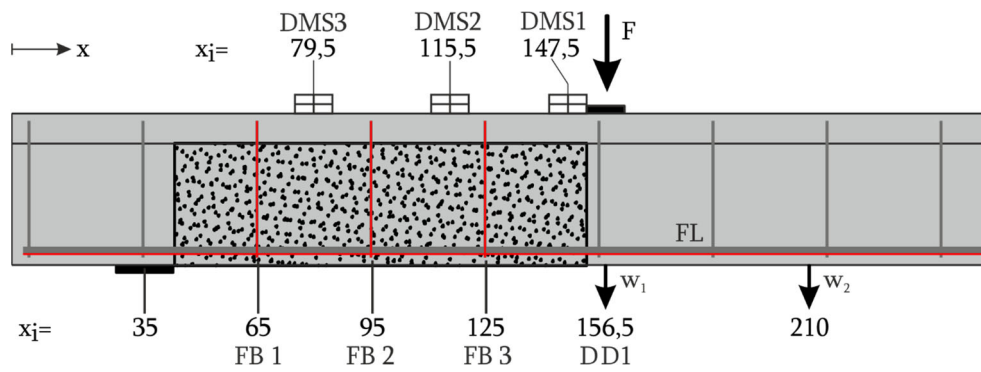


**Bild 242 B8.1 Maßgebender Biegeschubriss und Bügelversagen nach Versuchsende (gespiegelt)**

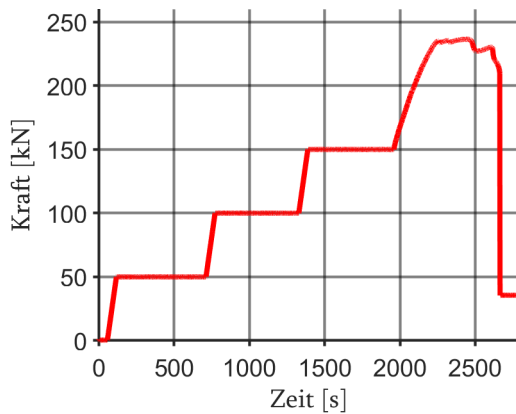


**Bild 243 B8.1 Bügelriss im maßgebenden Biegeschubriss (gespiegelt)**

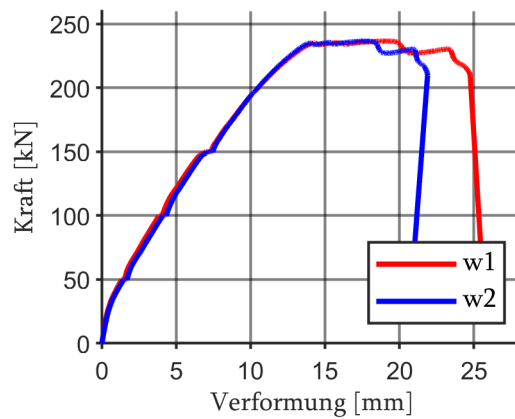
Bild 244 zeigt den Messaufbau. Die aufgezeichneten Werte finden sich in den Bildern 245-248. Die Messung der faseroptischen Sensoren an der Längs- (FL) und der Bügelbewehrung (FB1-FB3) sind Bild 249 zu entnehmen.



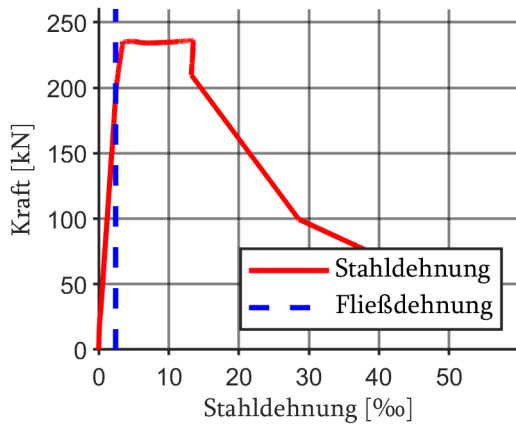
**Bild 244 B8.1 - Lage der DMS und des DD1 entlang der Längsachse**



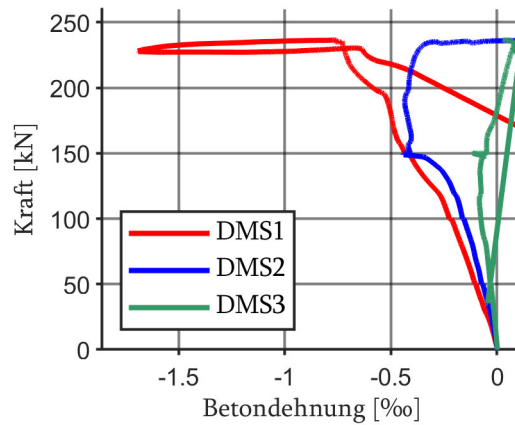
**Bild 245 B8.1 Kraft-Zeit-Diagramm**



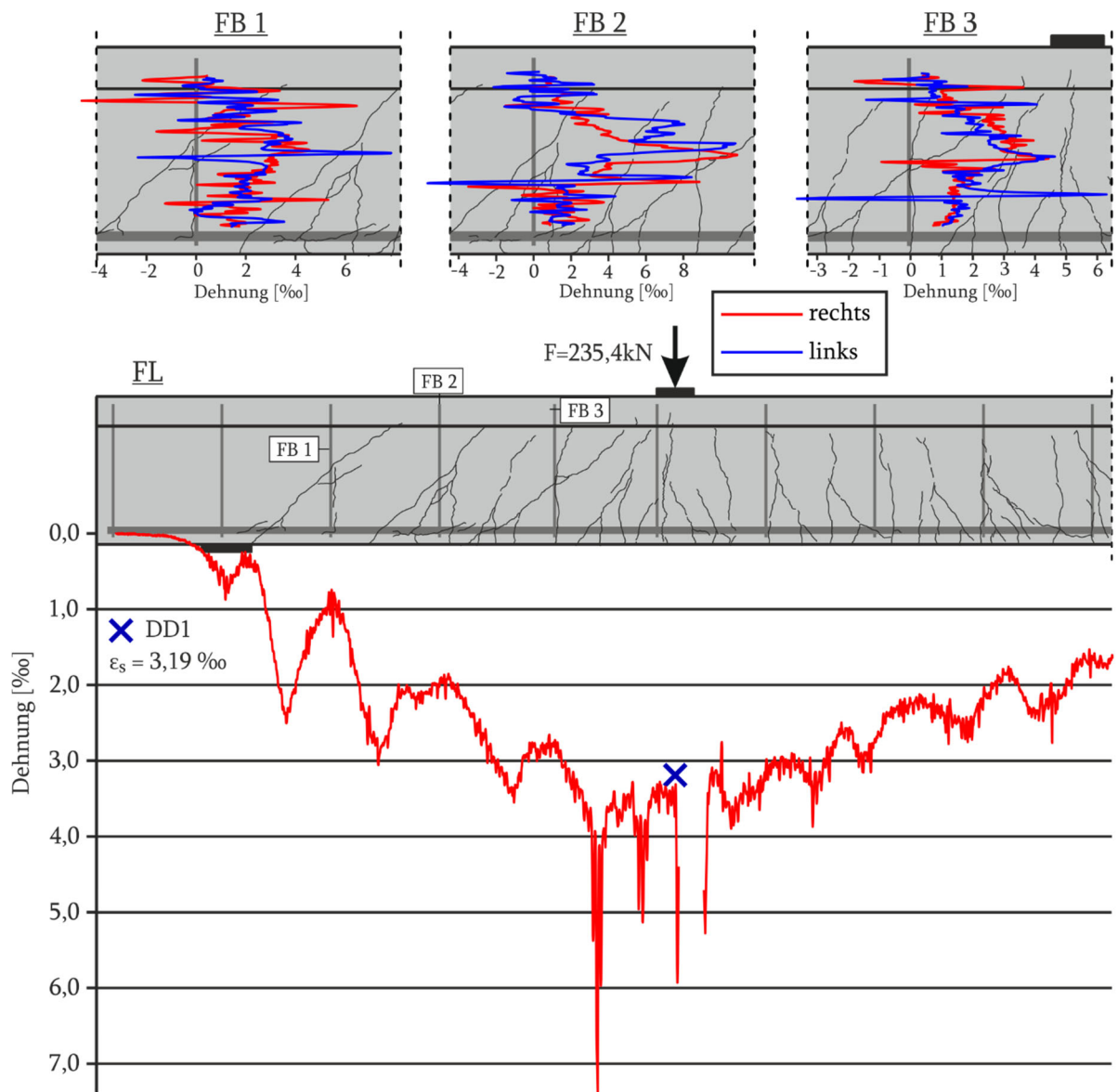
**Bild 246 B8.1 Kraft-Verformungs-Diagramm**



**Bild 247 B8.1 Kraft-Stahldehnungs-Diagramm**

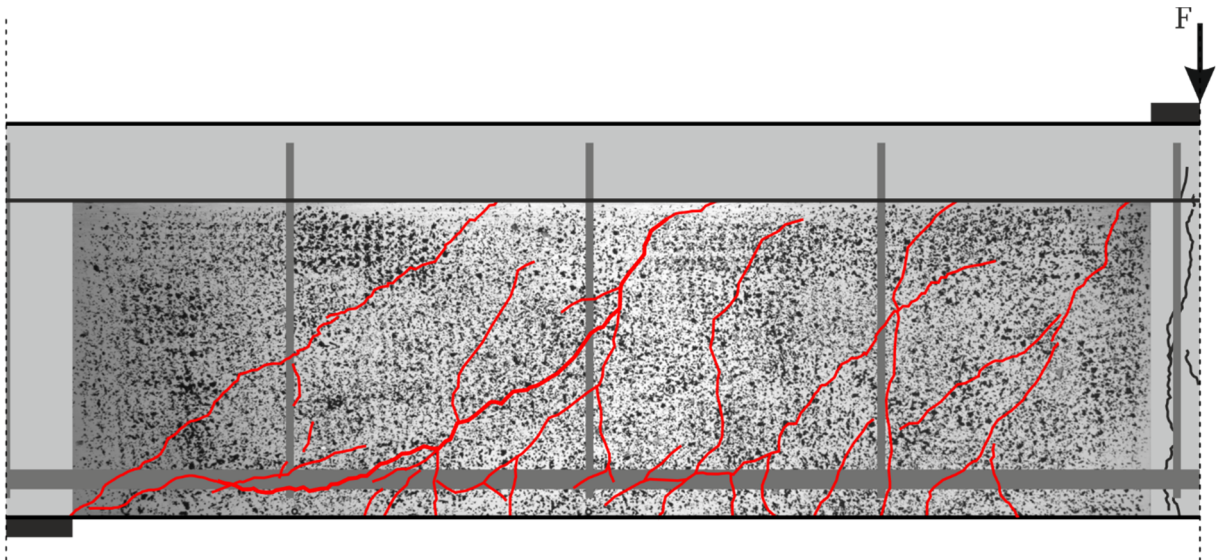


**Bild 248 B8.1 Kraft-Betondehnungs-Diagramm**

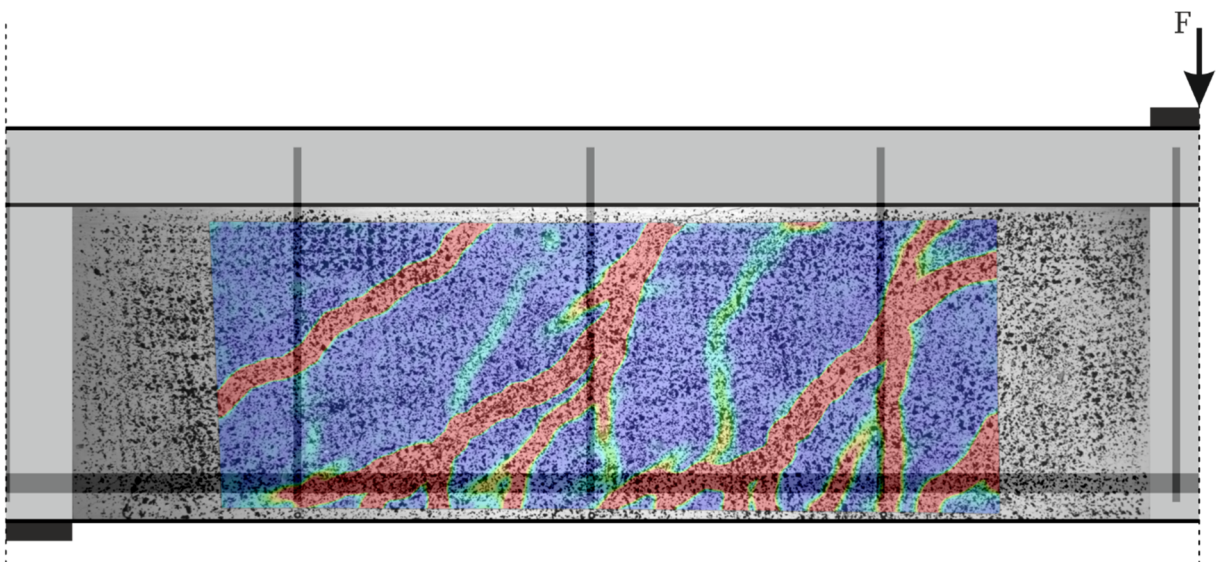


**Bild 249 B8.1 Faseroptische und Dehnungsmessungen bei der Last  $F = 235,4 \text{ kN}$**

Bild 250 zeigt das photogrammetrische Messfeld mit dem ausgebildeten Rissbild. In Bild 251 sind die Hauptzugdehnungen dargestellt.



**Bild 250 B8.1 Photogrammetrisches Messfeld mit Rissbildung anhand Dehnungsfeldes**



**Bild 251 B. Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen**

Die Risskinematik des Versuchs bei Maximallast ist in Bild 252 für den maßgebenden Biegeschubriss dargestellt. Die Rissöffnung besitzt im unteren Rissabschnitt hohe Werte von maximal 1,3 mm und nimmt zur Rissspitze ab. Die Rissgleitung liegt überwiegend in steilen Rissabschnitten mit maximal 0,8 mm vor.

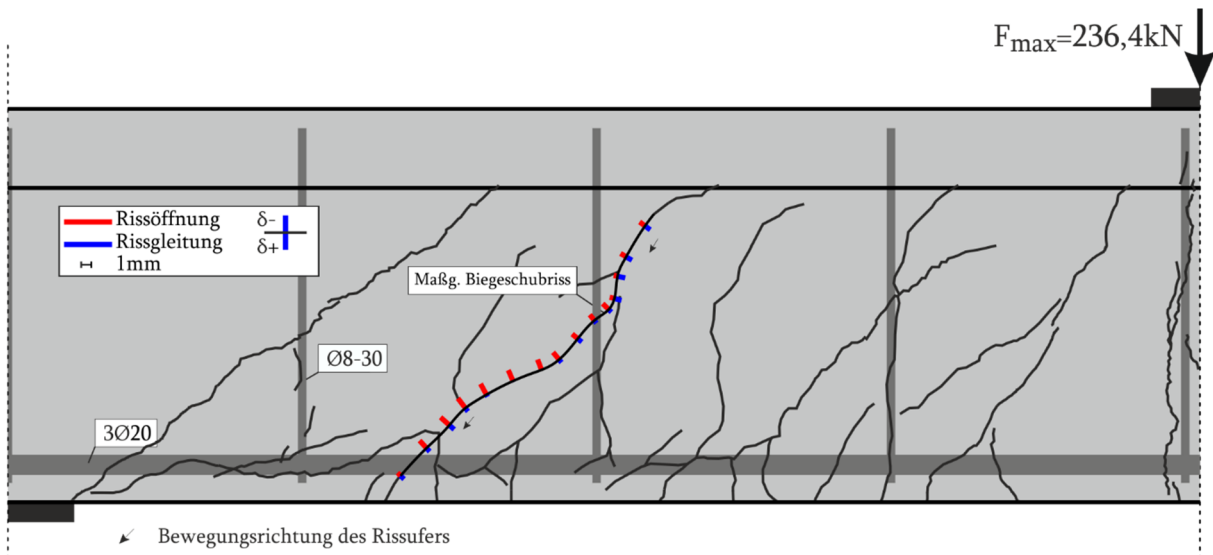


Bild 252 B8.1 Risskinematik bei  $F_{\max} = 236,4 \text{ kN}$

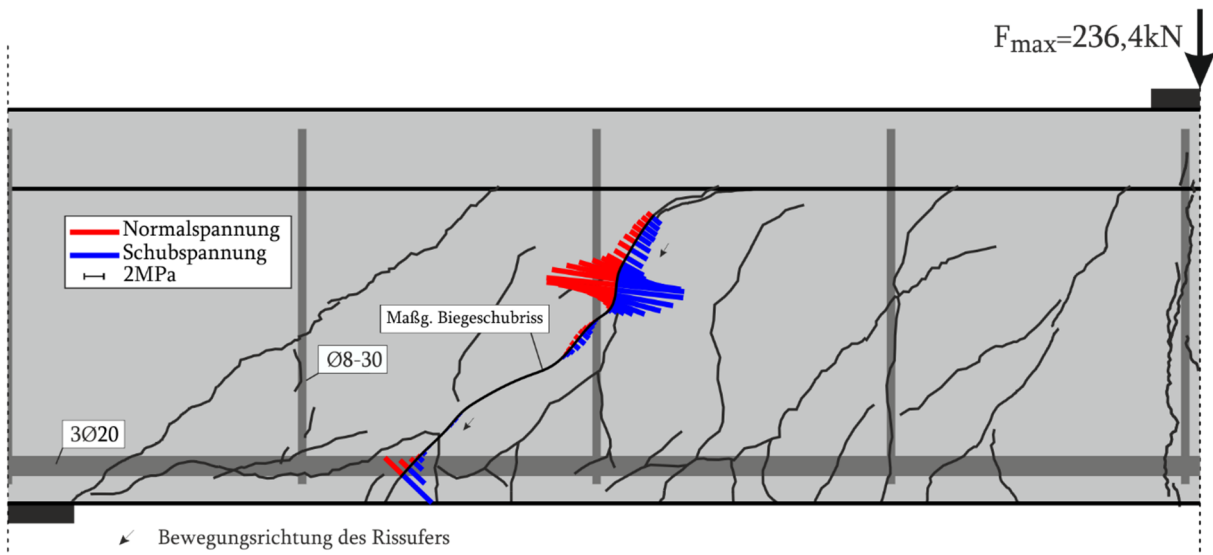


Bild 253 B8.1 Risskinematik entlang des Risses bei  $F_{\max} = 236,4 \text{ kN}$

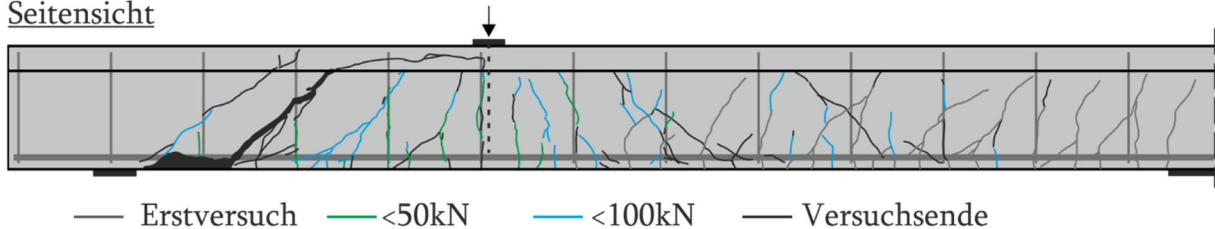
Tabelle 23 B8.1 Querkraftanteil der Rissreibung am gesamten Querkraftabtrag für den maßgebenden Biegeschubriss bei  $F_{\max} = 236,4 \text{ kN}$

|                 | Gesamt | Walraven | Li    | Gambarova | Guidotti | Cavangis |
|-----------------|--------|----------|-------|-----------|----------|----------|
| Querkraft [kN]  | 154,3  | 52,6     | 183,8 | 82,8      | 34,6     | 59,8     |
| Kraftanteil [%] | 100    | 34,1     | 119,1 | 53,6      | 22,4     | 38,8     |

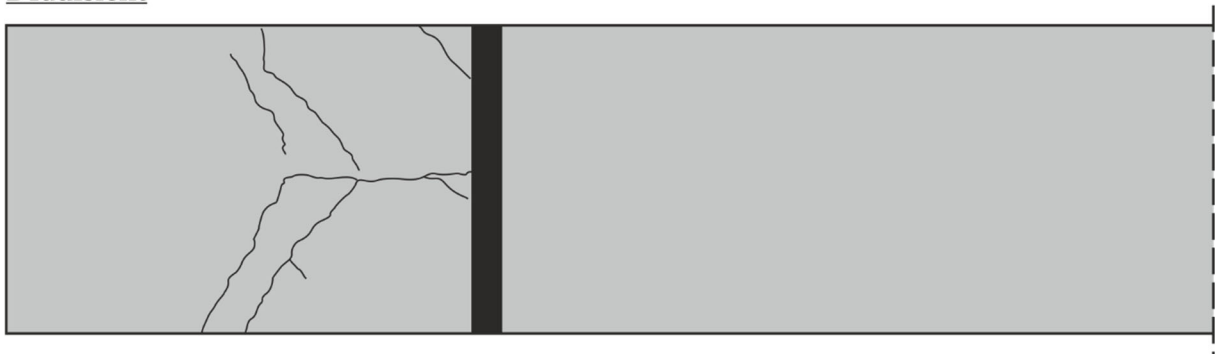
## 6.2.18 B8.2

Der Versuchs balken B8.1 geht bei ca. 20 kN in den Zustand II über. Die Rissbildung des Balkens ist für unterschiedliche Laststufen in Bild 254 dargestellt. Bis zu einer Belastung von 50 kN entstehen ausschließlich Biegerisse mit einer maximalen Länge zwei Drittel der Balkenhöhe. Bis 100 kN entstehen weitere Biegerisse sowie eine Verlängerung der bestehen Risse, die sich noch neigen. Die weitere Lastaufbringung erzeugt noch einige Biegerisse und überwiegend Biegeschubrisse.

### Seitensicht



### Draufsicht



### Bild 254 B8.2 Rissbild

Beim Erreichen der Maximalkraft von  $F_{\max} = 236,0 \text{ kN}$  und einer Durchbiegung von **18,58 mm** ist der maßgebende Biegeschubriss deutlich geöffnet (Bild 255). Daraufhin fällt die Last geringfügig, bis der Bügel im maßgebenden Biegeschubriss versagt (Bild 256 & Bild 257). Danach kommt es zu einem plötzlichen Lastabfall

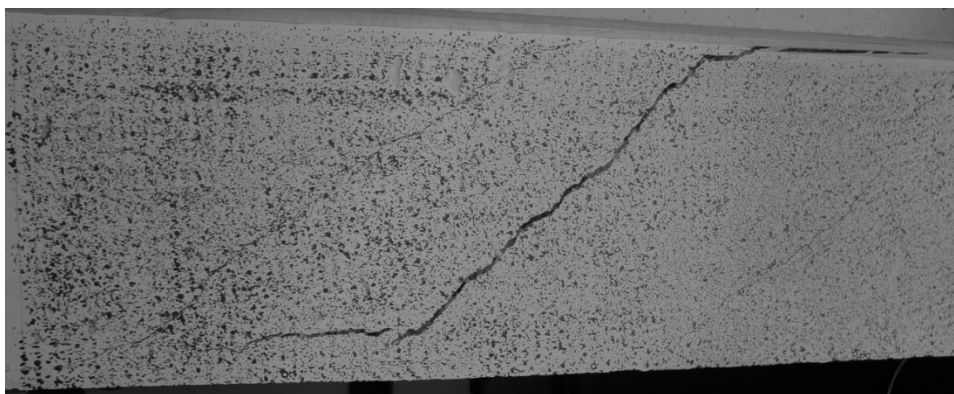
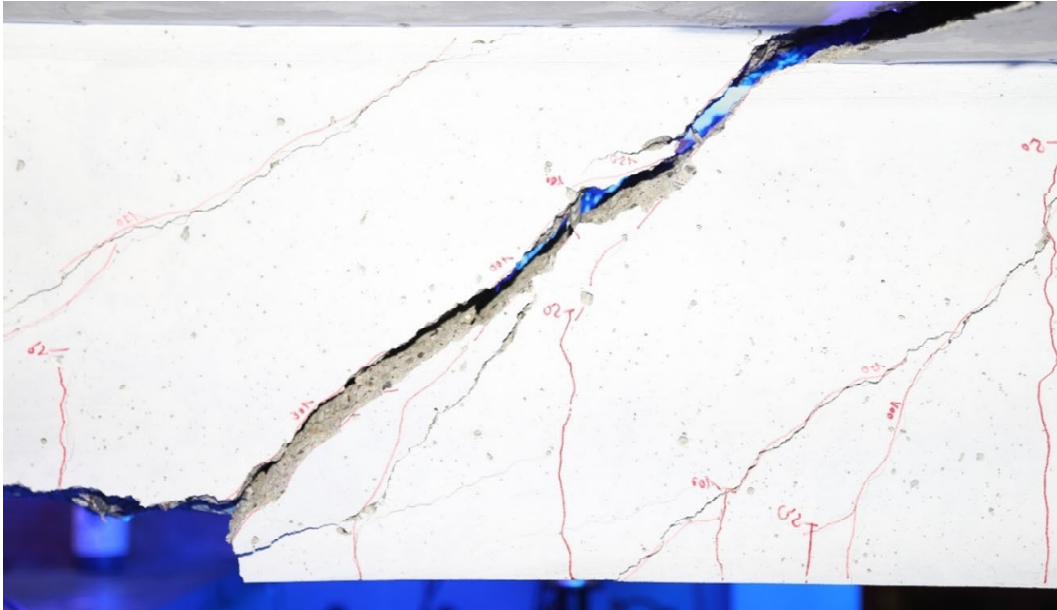
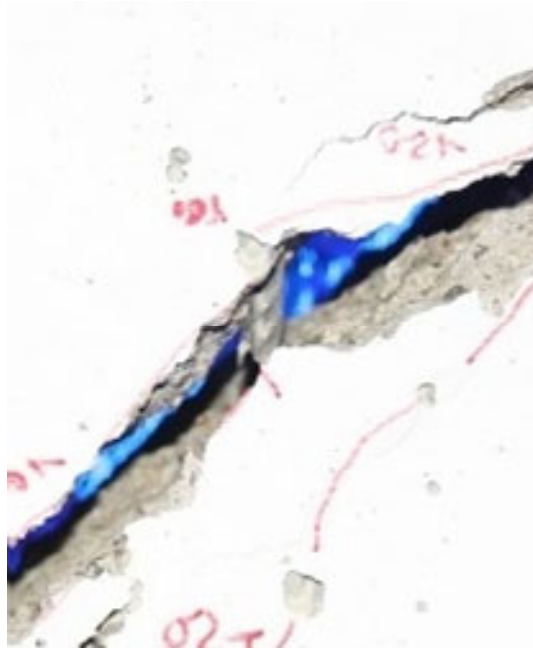


Bild 255 B8.2 Maßgebender Biegeschubriss während des Versuchs

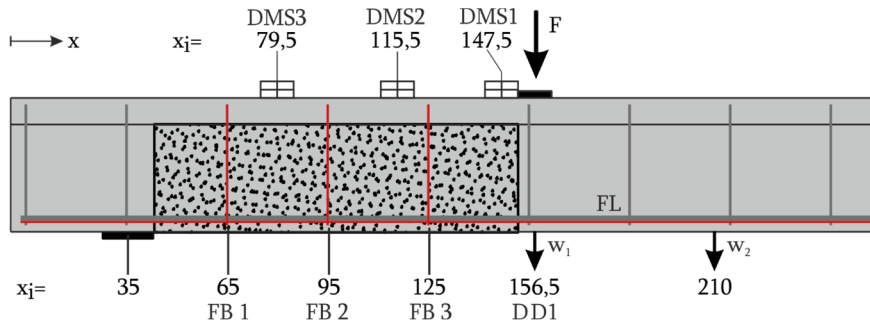


**Bild 256 B8.2 Maßgebender Biegeschubriss und Bügelversagen (Versuchsende, gespiegelt)**

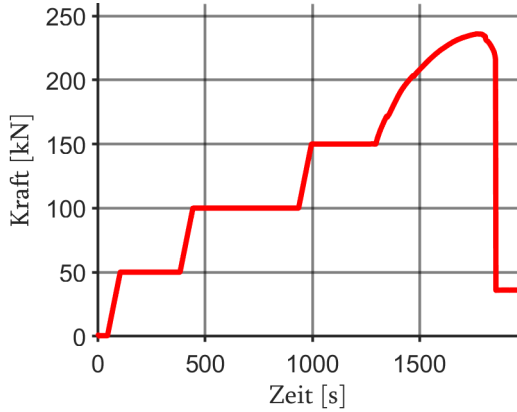


**Bild 257 B8.2 Bügelriss im maßgebenden Biegeschubriss (gespiegelt)**

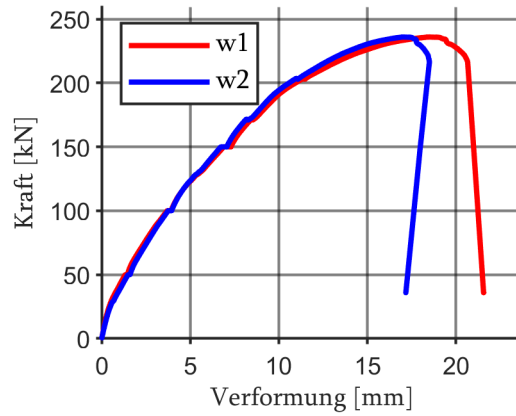
Bild 258 zeigt den Messaufbau. Die aufgezeichneten Werte finden sich in den Bildern 259-261. Die Darstellung der Messungen der faseroptischen Sensoren an der Längs- (FL) und der Bügelbewehrung (FB1-FB3) sind in Bild 262 dargestellt.



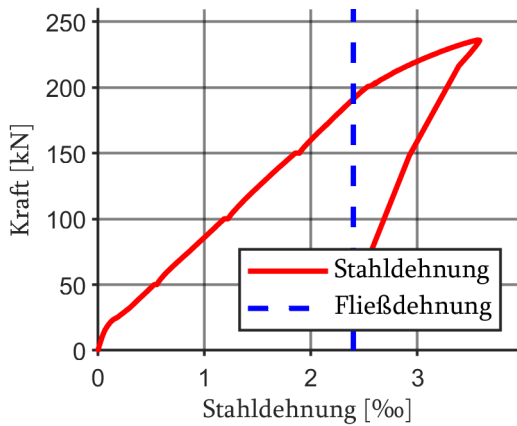
**Bild 258 B8.2 - Lage der DMS und des DD1 entlang der Längsachse**



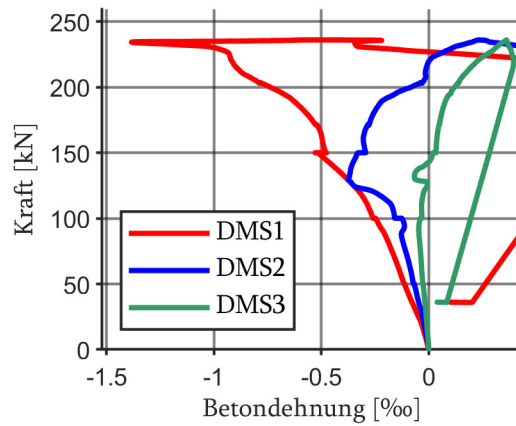
**Bild 259 B8.2 Kraft-Zeit-Diagramm**



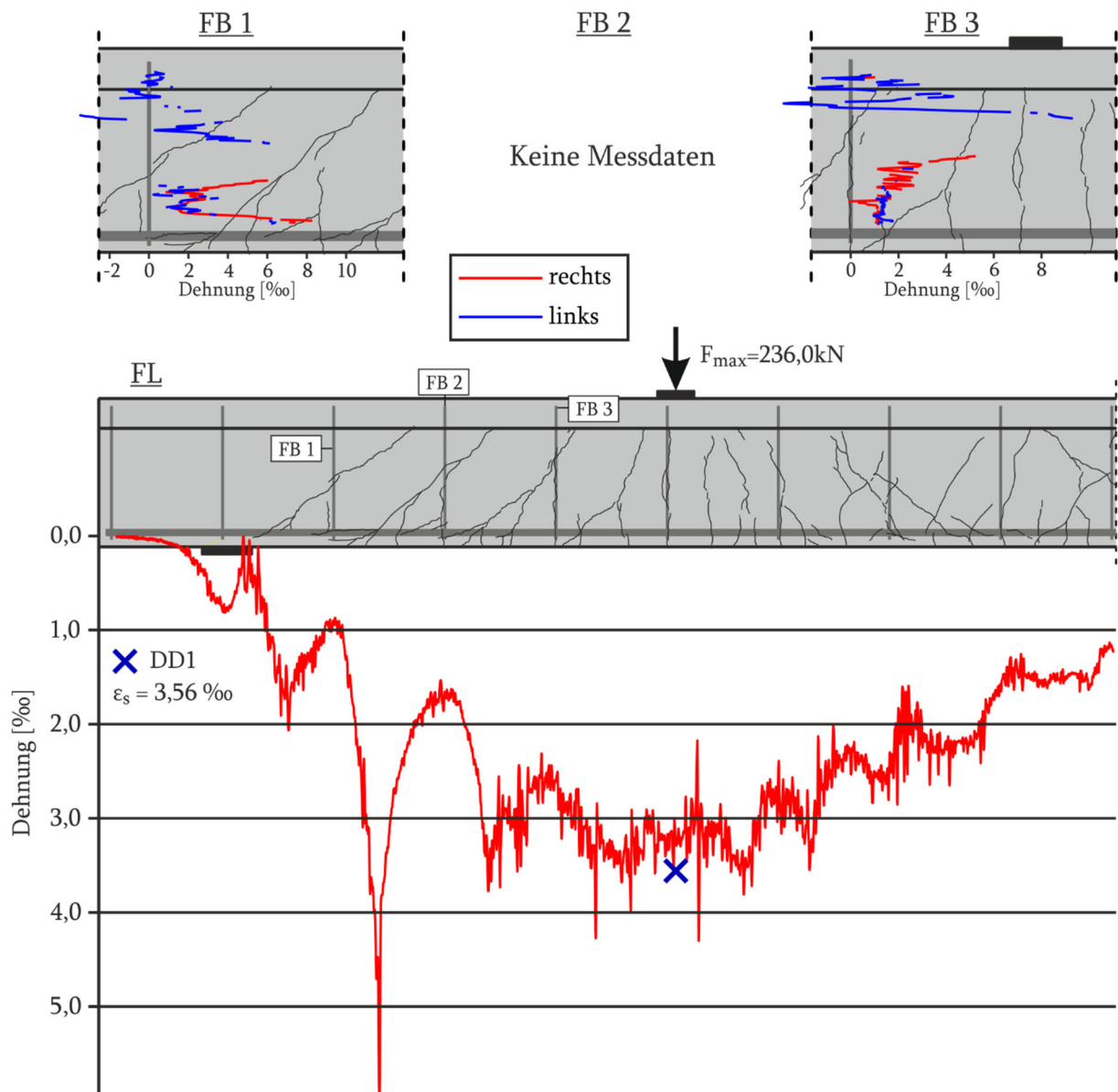
**Bild B8.2 Kraft-Verformungs-Diagramm**



**Bild 260 B8.2 Kraft-Stahldehnungs-Diagramm**

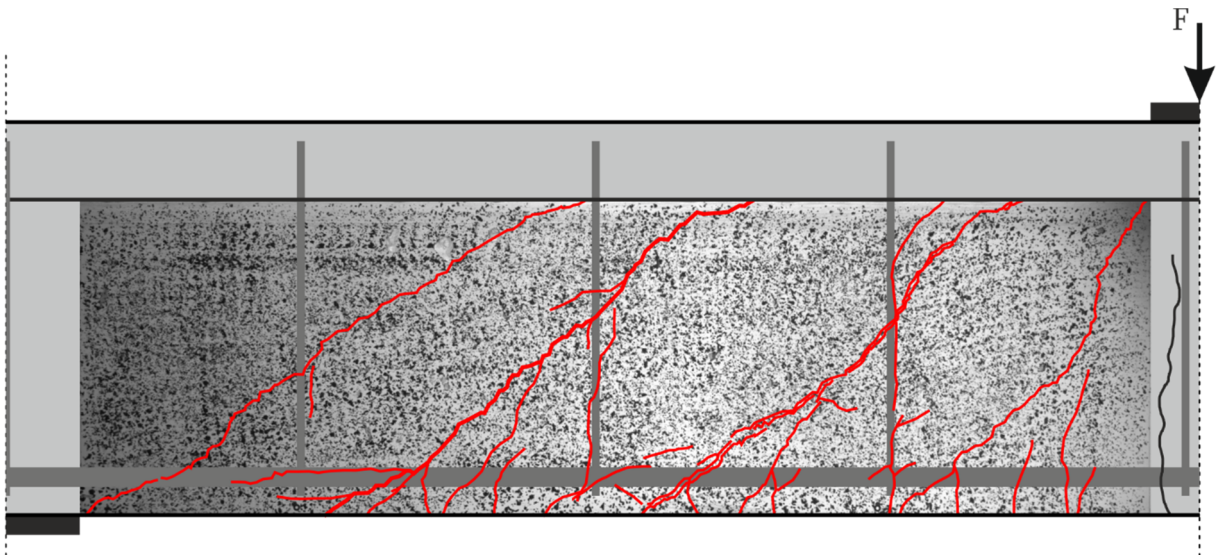


**Bild 261 B8.2 Kraft-Betondehnungs-Diagramm**

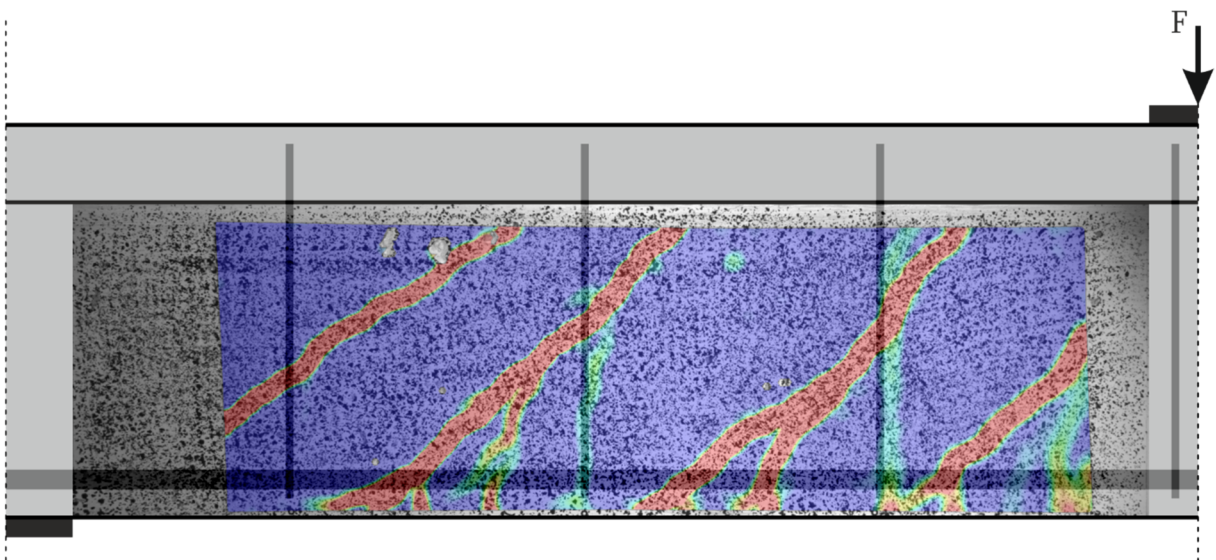


**Bild 262 B8.2 Faseroptische und Dehnungsmessungen bei Maximallast  $F_{\max} = 236 \text{ kN}$**

Bild 263 zeigt das photogrammetrische Messfeld mit dem ausgebildeten Rissbild. In Bild 264 sind die Hauptzugdehnungen im Messfeld dargestellt.

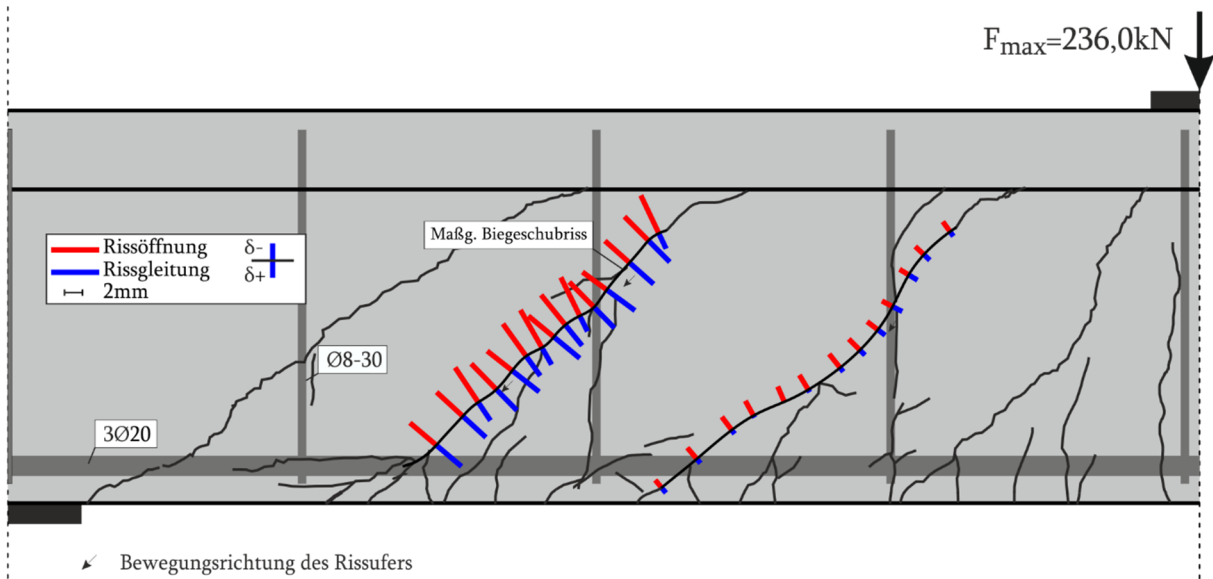


**Bild 263 B8.2 Photogrammetrisches Messfeld mit Rissbildung**

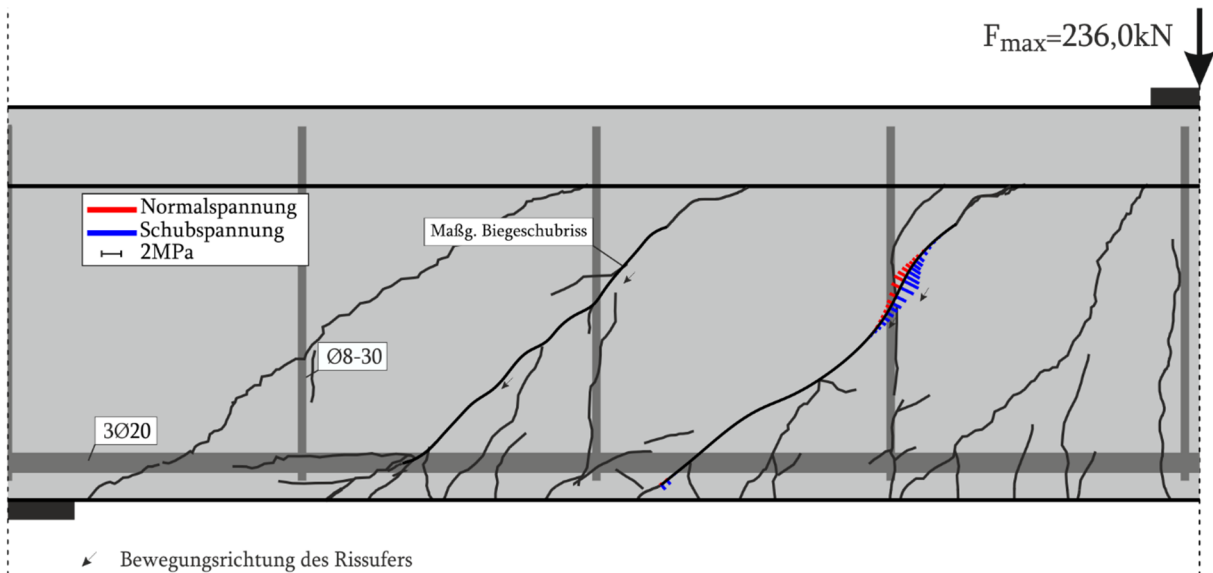


**Bild 264 B8.2 Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen**

Die Risskinematik des Versuchs bei Maximallast ist in Bild 265 für zwei Biegeschubriss dargestellt. Bei maximaler Belastung nimmt die Rissöffnung des maßgebenden Biegeschubrisses besonders hohe Werte von bis zu 5 mm an und die Rissgleitung schwankt zwischen 2 und 4 mm. Der zweite Biegeschubriss weist deutlich geringere Werte auf.



**Bild 265 B8.2 Risskinematik bei  $F_{\max} = 236,0 \text{ kN}$**



**Bild 266 B8.2 Risskinematik entlang des Risses bei  $F_{\max} = 236,0 \text{ kN}$**

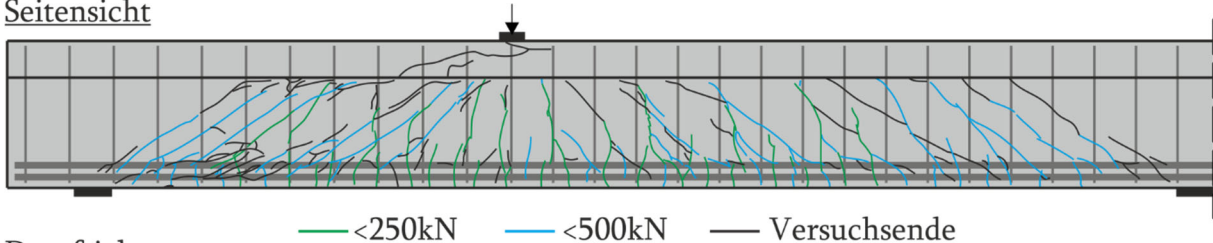
**Tabelle 24 B8.2 Querkraftanteil der Rissreibung am gesamten Querkraftabtrag für den maßgebenden Biegeschubriss bei  $F_{\max} = 236,0 \text{ kN}$**

|                 | Gesamt | Walraven | Li   | Gambarova | Guidotti | Cavangis |
|-----------------|--------|----------|------|-----------|----------|----------|
| Querkraft [kN]  | 154,0  | 0,0      | 10,5 | 1,6       | 0,0      | 0,0      |
| Kraftanteil [%] | 100    | 0,0      | 6,8  | 1,1       | 0,0      | 0,0      |

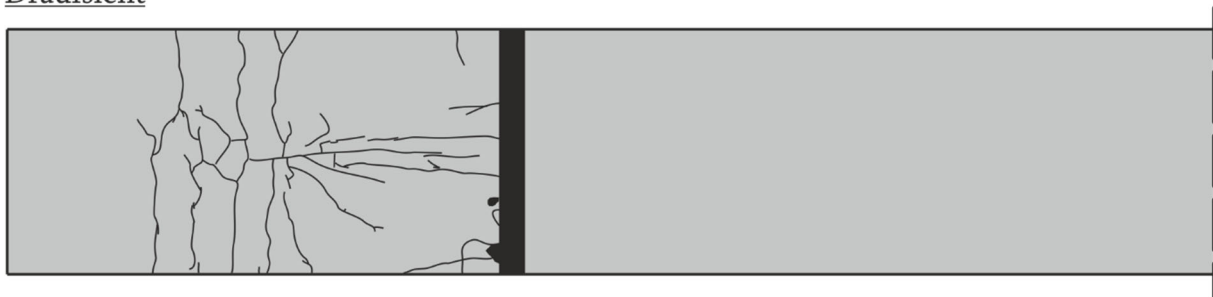
### 6.2.19 B9.1

Der Versuchsbalken B9.1 geht bei ca. 50 kN in den Zustand II über. Die Rissbildung des Balkens ist für unterschiedliche Laststufen in Bild 267 dargestellt. Bis zu einer Belastung von 250 kN entstehen Biegerisse, die bis in die Platte reichen, und auch Biegeschubrisse. Bis 500 kN entstehen weitere Biegerisse, die sich zu Biegeschubrisse entwickeln, aber auch reine Schubrisse entstehen. Bei einer weiterer Laststeigerung bilden sich noch einige Biegerisse, überwiegend Biegeschubrisse und Risse entlang der Längsbewehrung.

Seitensicht



Draufsicht



**Bild 267 B9.1 Rissbild**

Beim Erreichen der Maximalkraft von  $F_{\max} = 954,3 \text{ kN}$  und einer Durchbiegung von  $31,22 \text{ mm}$  ist der maßgebende Biegeschubriss deutlich geöffnet (Bild 268). Anschließend nimmt die Last geringfügig ab, bis es zum Versagen der Druckzone kommt und die Last deutlich abfällt (Bild 269).

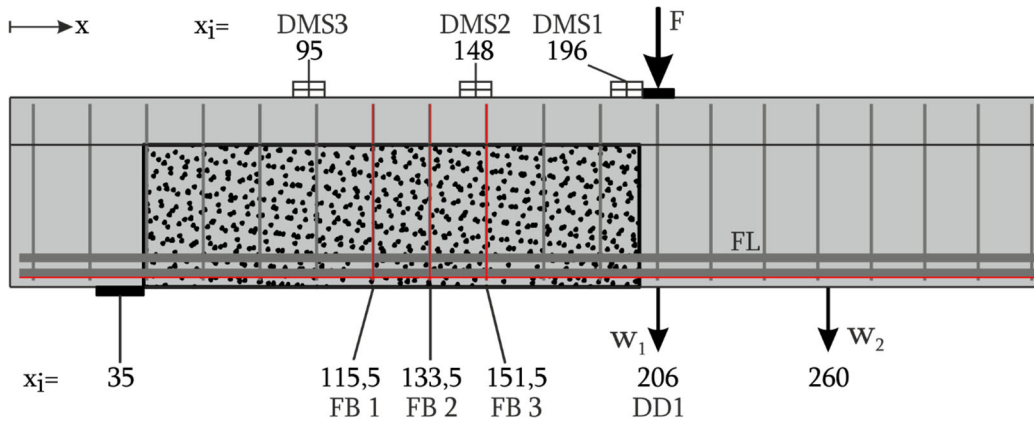


**Bild 268 B9.1 Maßgebender Biegeschubriss (gespiegelt)**

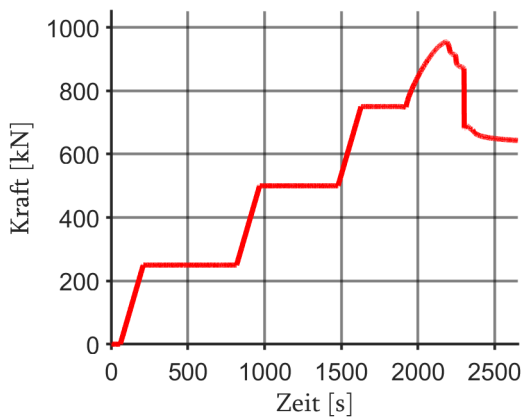


**Bild 269 B9.1 Versagen der Biegedruckzone an der Lasteinleitung**

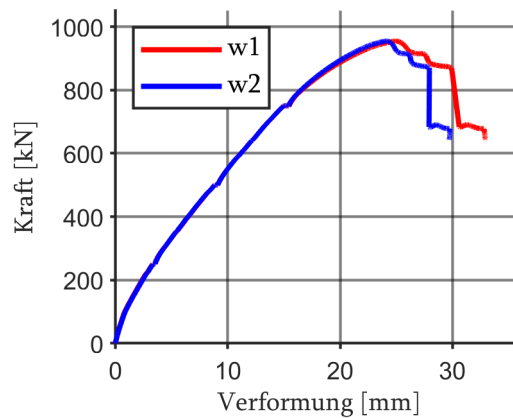
Bild 270 zeigt den Messaufbau und dessen Positionierung. Die aufgezeichneten Werte finden sich in den Bildern 272-275. Die Darstellung der Messungen der faseroptischen Sensoren der Längs- (FL) und der Bügelbewehrung (FB1-FB3) sind in Bild 275 dargestellt.



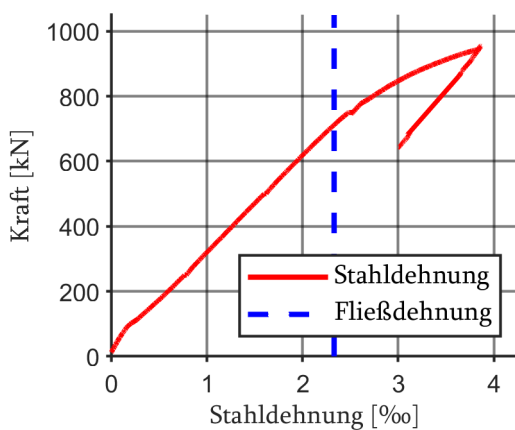
**Bild 270 B9.1 - Lage der DMS und des DD1 entlang der Längsachse**



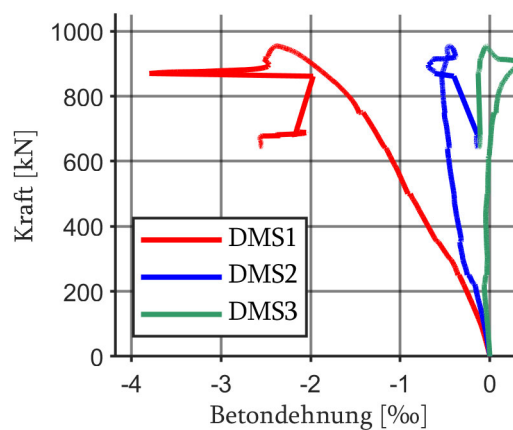
**Bild 271 B9.1 Kraft-Zeit-Diagramm**



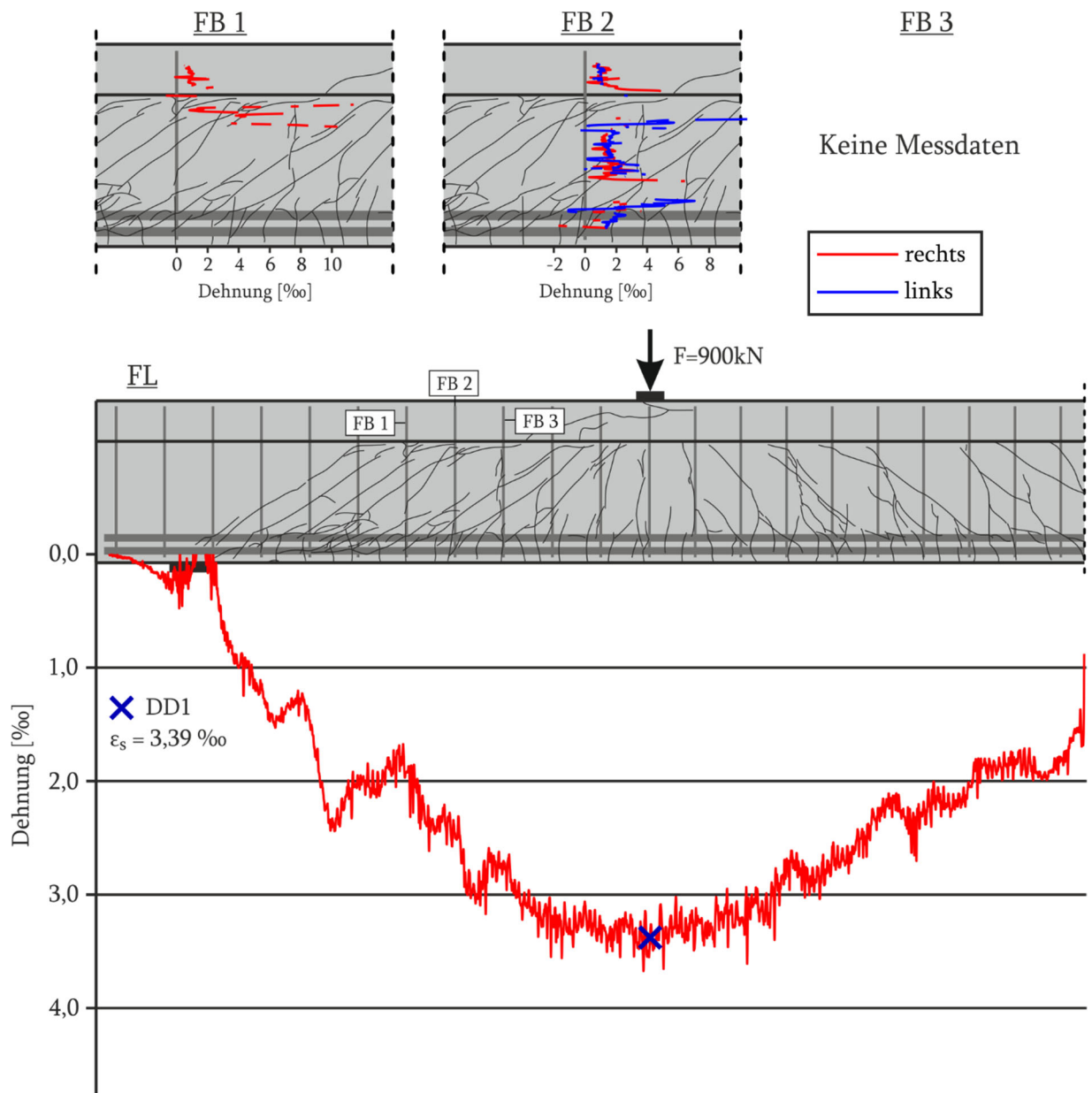
**Bild 272 B9.1 Kraft-Verformungs-Diagramm**



**Bild 273 B9.1 Kraft-Stahldehnungs-Diagramm**

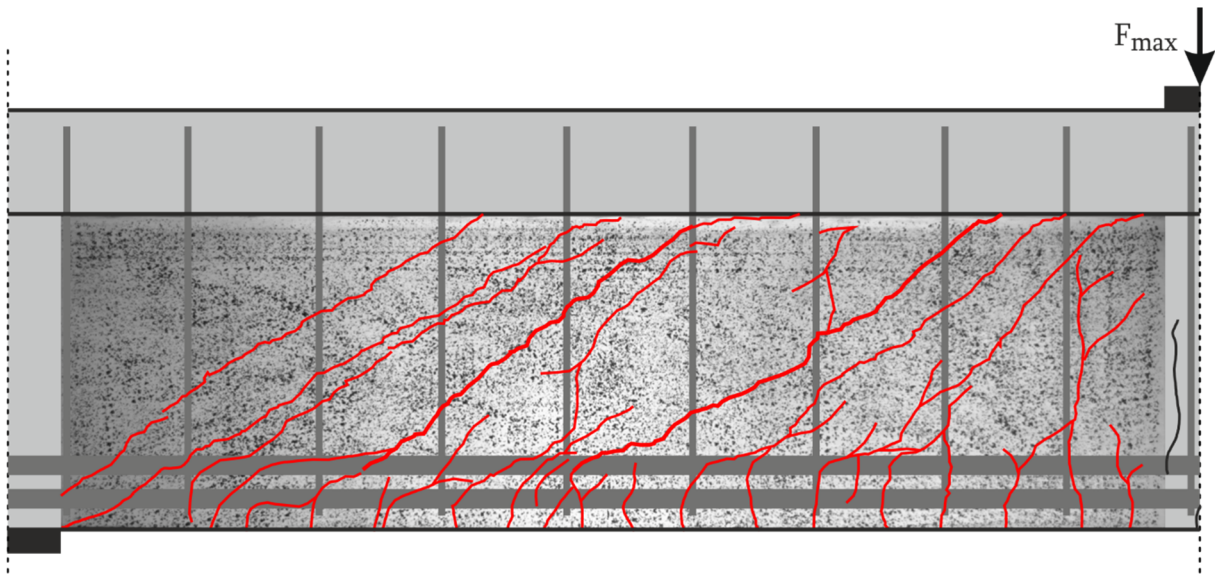


**Bild 274 B9.1 Kraft-Betondehnungs-Diagramm**

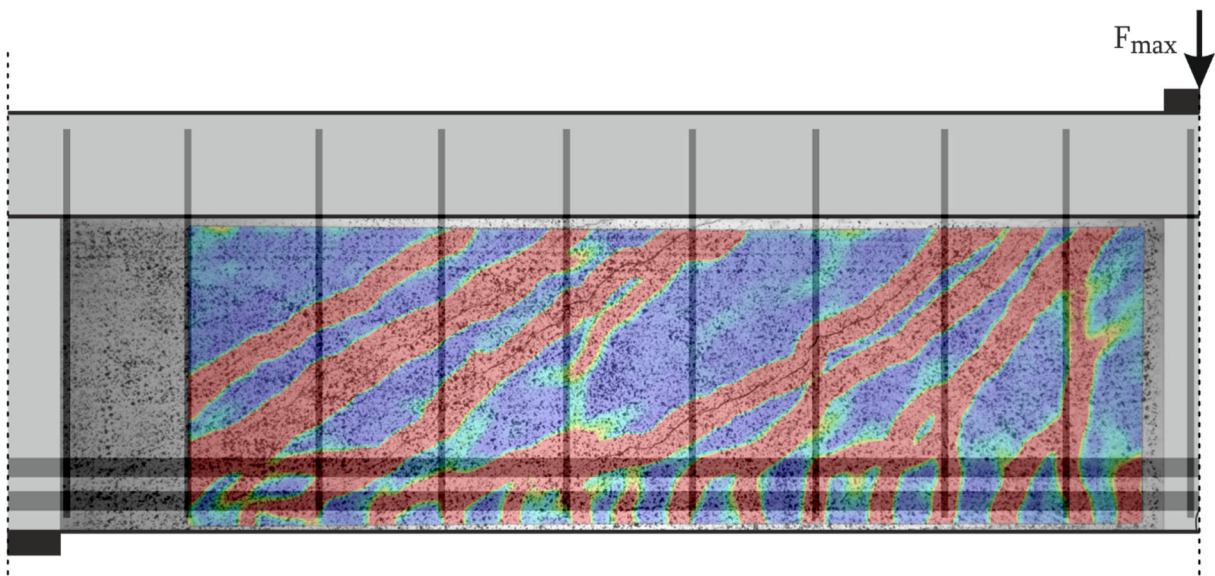


**Bild 275 B9.1 Faseroptische und Dehnungsmessungen bei der Last  $F = 900\text{kN}$**

Bild 276 zeigt das photogrammetrische Messfeld mit dem ausgebildeten Rissbild. In Bild 277 sind die Hauptzugdehnungen dargestellt.

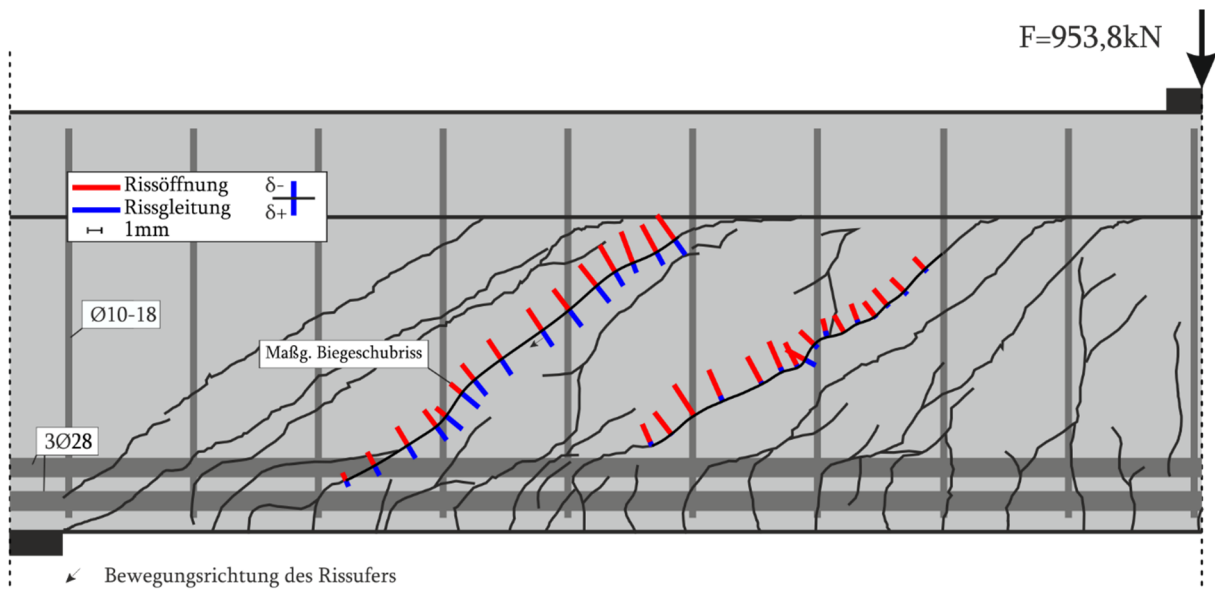


**Bild 276 B9.1 Photogrammetrisches Messfeld mit Rissbildung nach  $F_{\max} = 954,3$  kN**

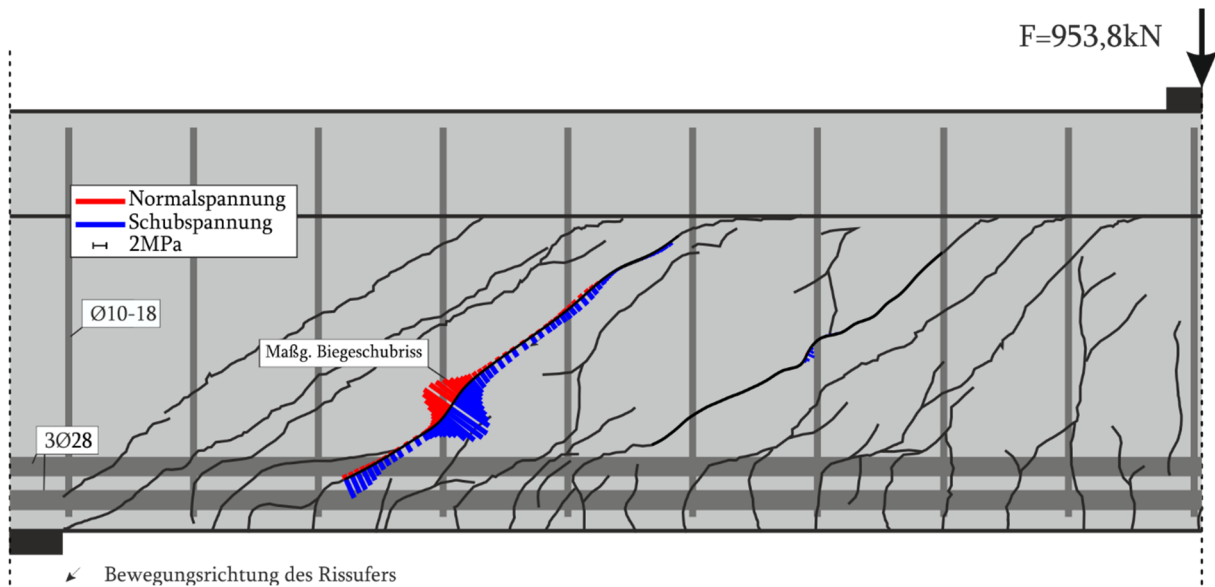


**Bild 277 B9.1 Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen nach  $F_{\max} = 954,3$  kN**

Die Risskinematik des Versuchs bei Maximallast ist in Bild 278 für zwei Biegeschubrisse dargestellt. Der maßgebende Biegeschubriss weist eine maximale Rissöffnung von 2,4 mm auf. Die Rissöffnung nimmt zunächst von der Unterseite aus zu. Anschließend ist sie näherungsweise konstant mit einem maximalen Wert von 1,3 mm. Der zweite Biegeschubriss weist nur eine kleine Rissöffnung auf.



**Bild 278 B9.1 Risskinematik bei  $F = 953,8$  kN**



**Bild 279 B9.1 Risskinematik entlang des Risses bei  $F = 953,8$  kN**

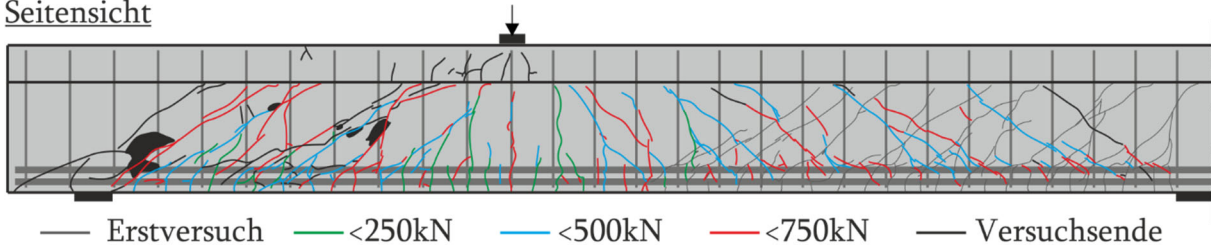
**Tabelle 25 B9.1 Querkraftanteil der Rissreibung am gesamten Querkraftabtrag für den maßgebenden Biegeschubriss bei  $F = 958,8$  kN**

|                 | Gesamt | Walraven | Li    | Gambarova | Guidotti | Cavangis |
|-----------------|--------|----------|-------|-----------|----------|----------|
| Querkraft [kN]  | 591,4  | 66,8     | 151,2 | 66,7      | 48,0     | 24,6     |
| Kraftanteil [%] | 100    | 11,3     | 25,6  | 11,3      | 8,1      | 4,2      |

## 6.2.20 B9.2

Der Versuchsbalken B9.2 geht bei ca. 50 kN in den Zustand II über. Die Rissbildung des Balkens ist für unterschiedliche Laststufen in Bild 280 dargestellt. Bis zu einer Belastung von 250 kN entstehen Biegerisse, die bis in die Platte reichen sowie Biegeschubrisse. Bis 500 kN entstehen weitere Biegerisse, die sich zu Biegeschubrisse entwickeln, aber auch reine Schubrisse entstehen. Dies setzt sich bis 750 kN fort. Die weitere Lasterhöhung erzeugt wenige zusätzliche Biegeschubrisse und Risse entlang der Längsbewehrung.

### Seitensicht



### Draufsicht

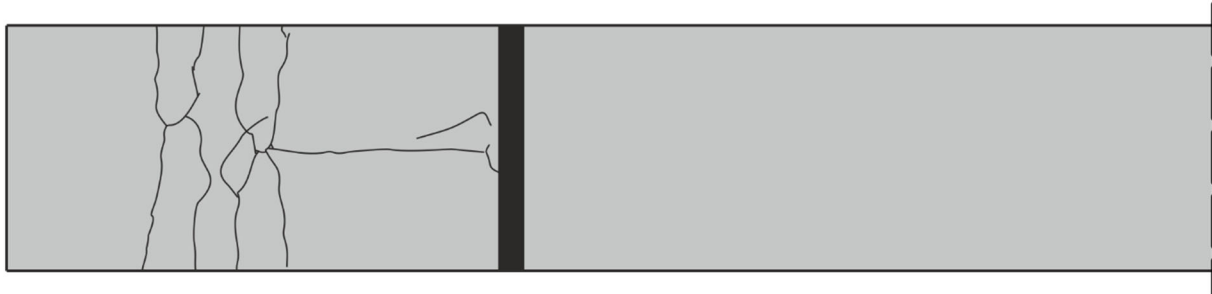


Bild 280 B9.2 Rissbild

Beim Erreichen der Maximalkraft von  $F_{\max} = 954,5 \text{ kN}$  und einer Durchbiegung von  $31,60 \text{ mm}$  ist der maßgebende Biegeschubriss deutlich geöffnet. Anschließend kommt es zu einem Fließplateau in der Lastverformungskurve bis der Balken aufgrund eines Verankerungsbruchs der Zugbewehrung versagt (Bild 281).

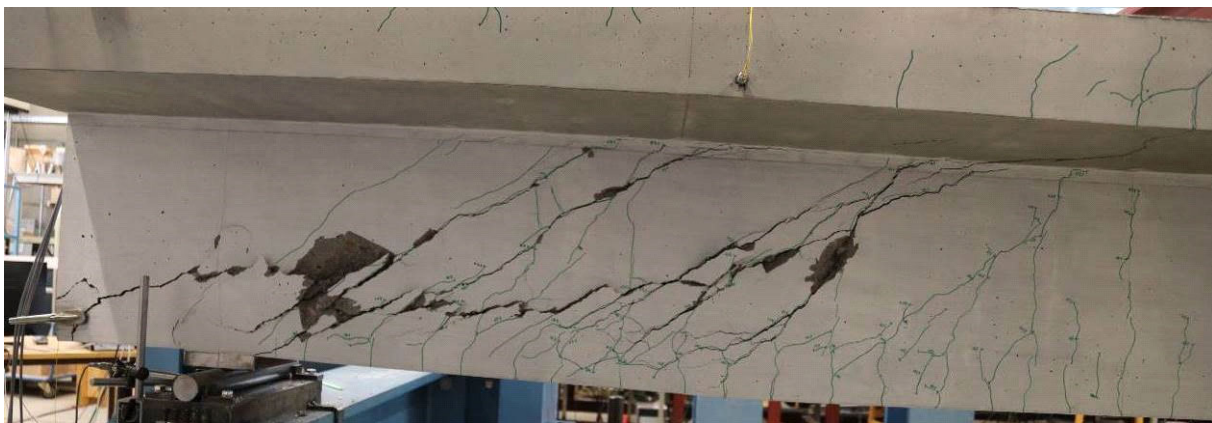
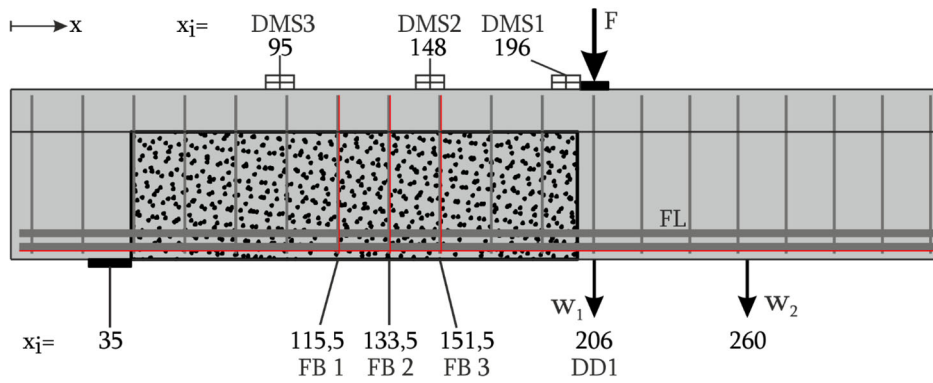
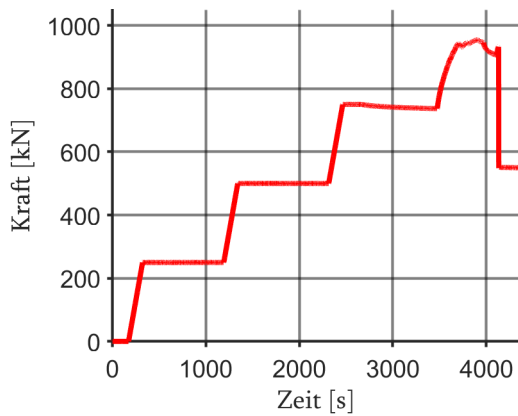


Bild 281 B9.2 Verankerungsbruch und maßgebender Biegeschubriss (gespiegelt)

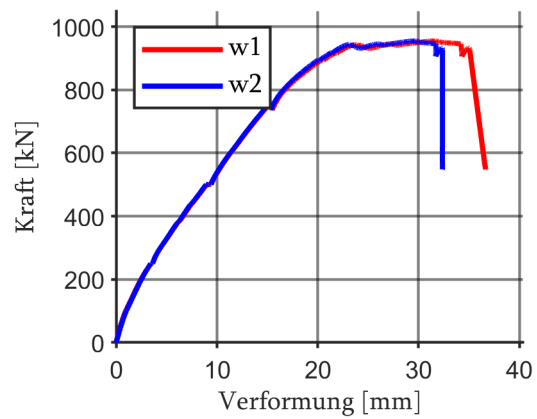
Bild 282 zeigt den Messaufbau. Die gemessenen Werte finden sich in den Bildern 284-287. Die Messwerte der faseroptischen Sensoren an der Längs- (FL) und der Bügelbewehrung (FB1-FB3) sind in Bild 287 grafisch dargestellt.



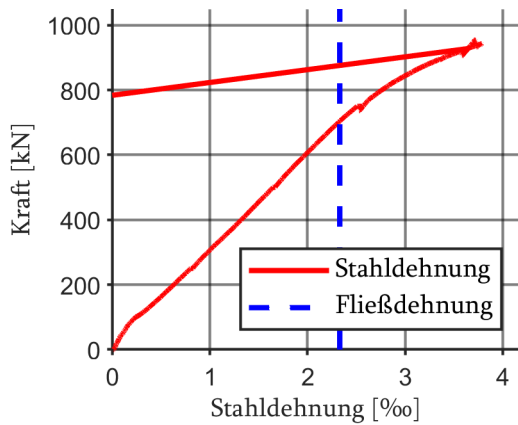
**Bild 282 B9.2 - Lage der DMS und des DD1 entlang der Längsachse**



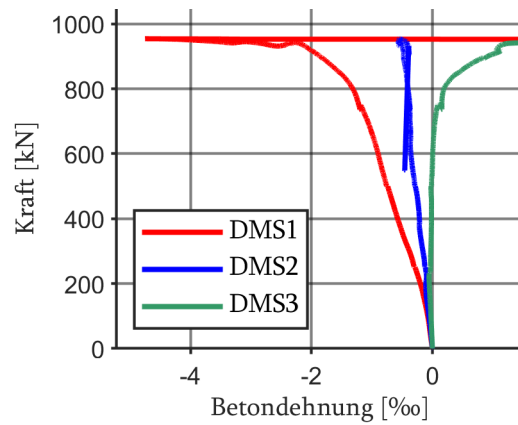
**Bild 283 B9.2 Kraft-Zeit-Diagramm**



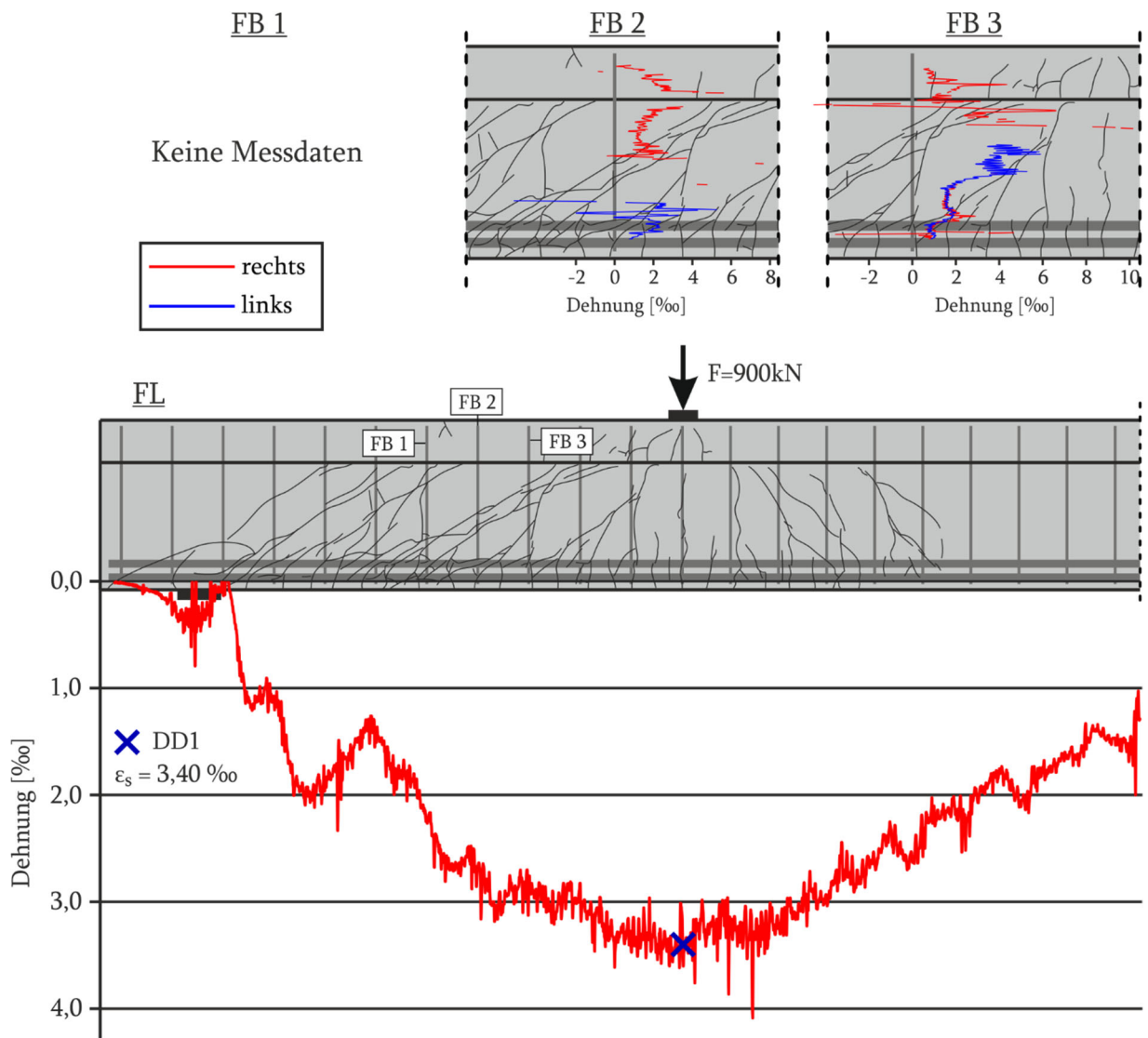
**Bild 284 B9.2 Kraft-Verformungs-Diagramm**



**Bild 285 B9.2 Kraft-Stahldehnungs-Diagramm**

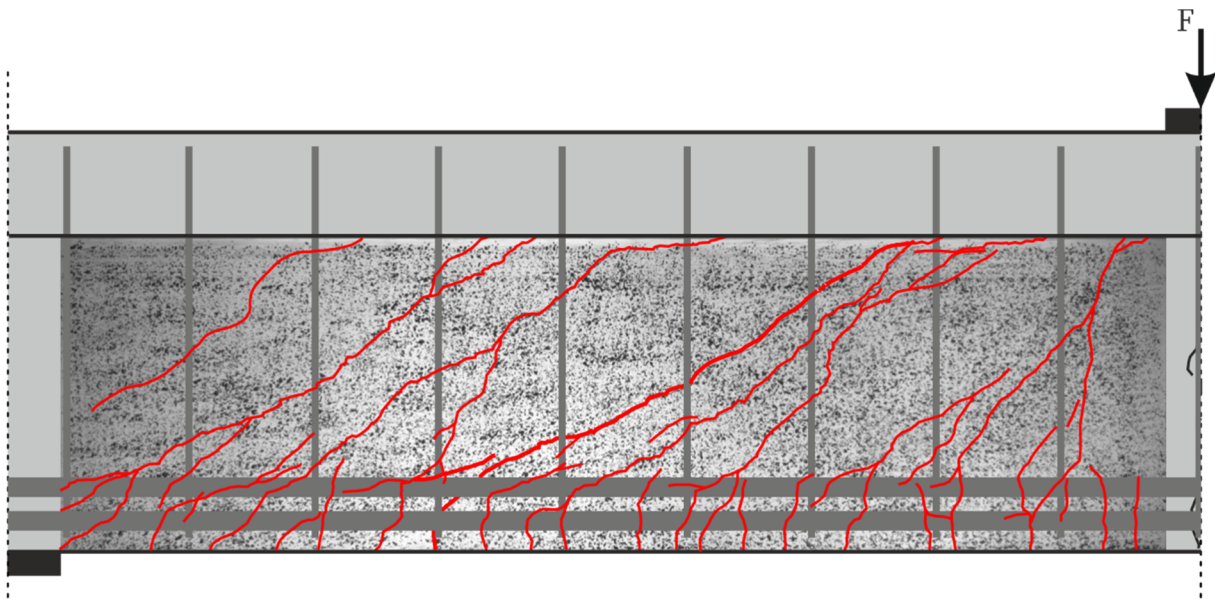


**Bild 286 B9.2 Kraft-Betondehnungs-Diagramm**

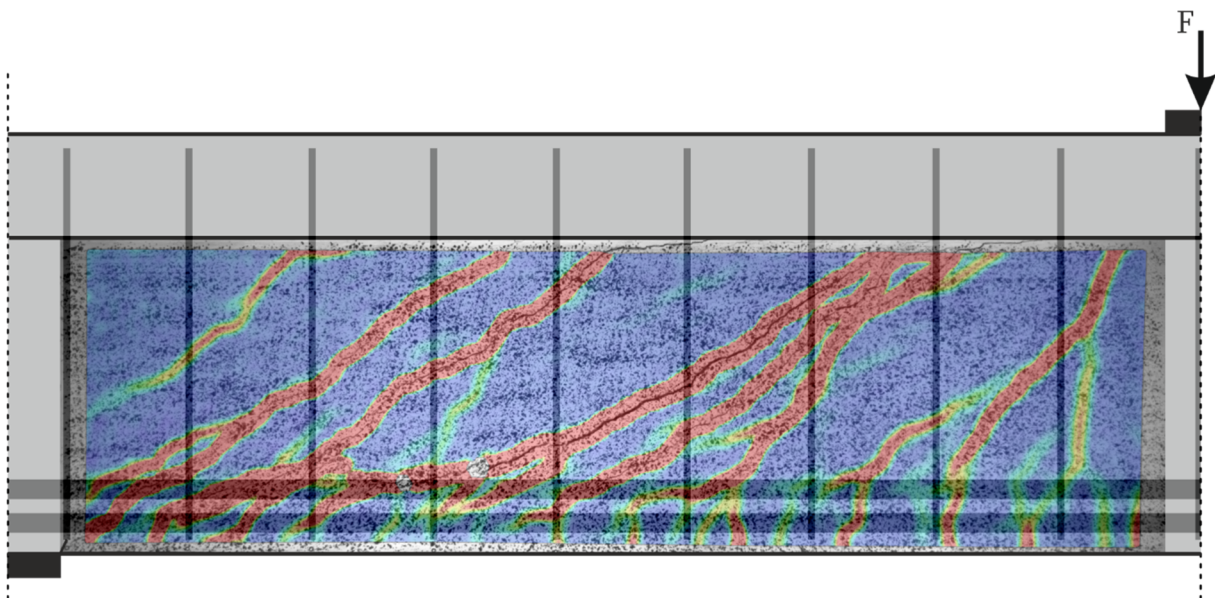


**Bild 287 B9.2 Faseroptische und Dehnungsmessungen bei der Last  $F = 900\text{kN}$**

Bild 288 zeigt das photogrammetrische Messfeld mit dem ausgebildeten Rissbild. In Bild 289 sind die Hauptzugdehnungen grafisch dargestellt.

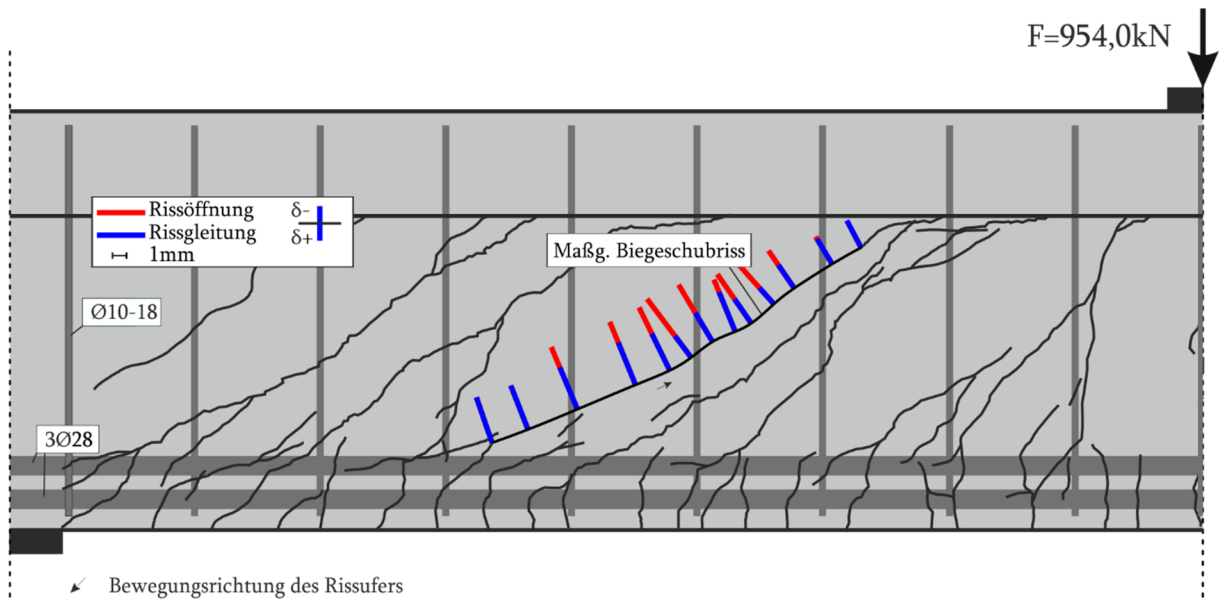


**Bild 288** B9.2 Photogrammetrisches Messfeld mit Rissbildung nach  $F = 954,0$  kN

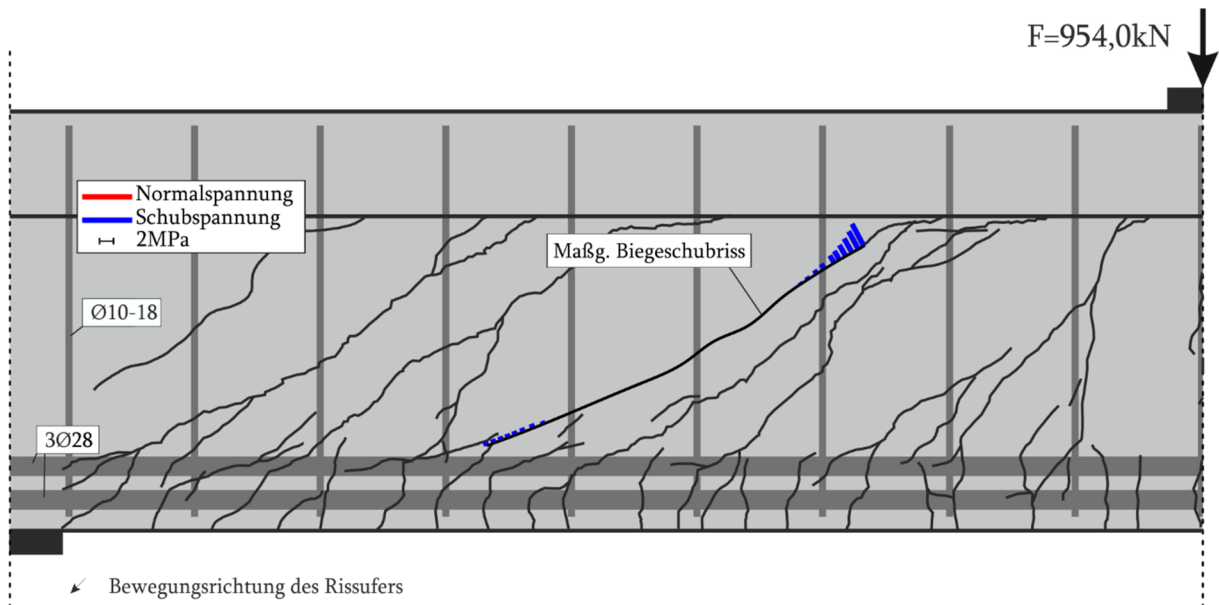


**Bild 289** B9.2 Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen nach  $F = 954,0$  kN

Die Risskinematik des Versuchs bei Maximallast ist in Bild 290 für den maßgebenden Biegeschubrisse dargestellt. Die Rissöffnung ist mit  $w = 5$  mm besonders groß. Die Rissgleitung ist in diesem Falls ungewöhnlich, weil sie über die gesamte Risslänge hohe negative Werte von maximal  $-3,8$  mm besitzt.



**Bild 290 B9.2 Risskinematik bei  $F = 954,0$  kN**



**Bild 291 B9.2 Rissspannung bei  $F = 954,0$  kN**

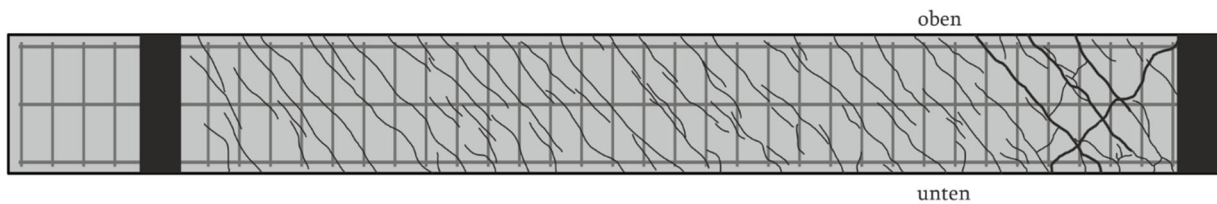
**Tabelle 26 B9.2 Querkraftanteil der Rissreibung am gesamten Querkraftabtrag für den maßgebenden Biegeschubriss bei  $F = 954,0$  kN**

|                 | Gesamt | Walraven | Li     | Gambarova | Guidotti | Cavangis |
|-----------------|--------|----------|--------|-----------|----------|----------|
| Querkraft [kN]  | 591,5  | -47,1    | -359,2 | -215,2    | -9,2     | -1,3     |
| Kraftanteil [%] | 100    | -8,0     | -60,7  | -36,4     | -1,5     | -0,2     |

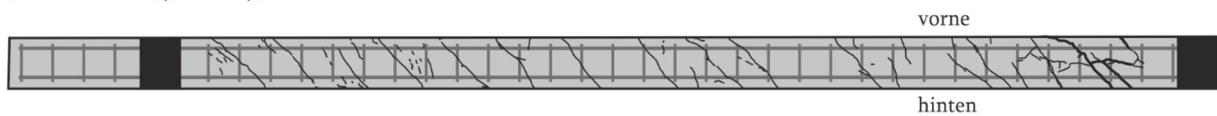
### 6.2.21 B10

Beim Balken B10 beginnt die Rissbildung bei einem Torsionsmoment von  $T = 8,8 \text{ kNm}$  und einer Verdrillung von  $0,19 \text{ }^\circ/\text{m}$ . Bei weiterer Verformung folgt eine Phase der Rissbildung bis zu einer Verdrillung von etwa  $1,02 \text{ }^\circ/\text{m}$ . Hierbei ist keine weitere Laststeigerung vorhanden. Nachdem dieser Zustand durchlaufen und die Rissbildung über die gesamte Balkenlänge vollzogen wurde, kann die Last wieder gesteigert werden. Daraufhin entstehen weitere Risse in einem geringeren Ausmaß, wie in Bild 292 zu sehen ist. Die Risse bilden sich annähernd unter einem Winkel von  $45^\circ$  und entwickeln sich umlaufend.

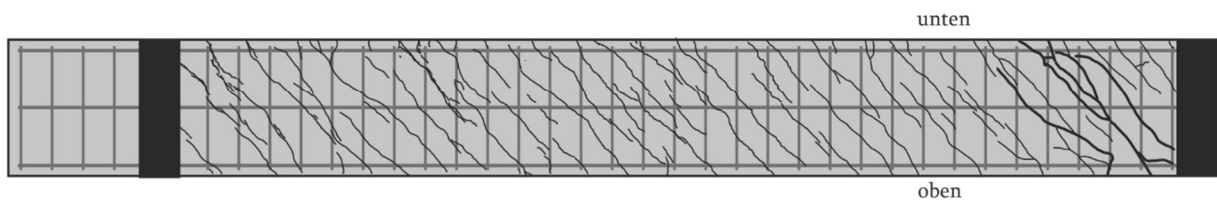
#### Vorderseite ohne Muster



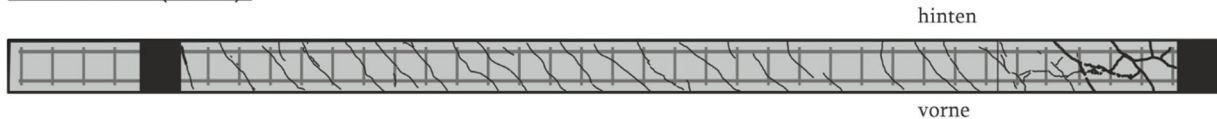
#### Draufsicht (unten):



#### Rückseite mit Muster

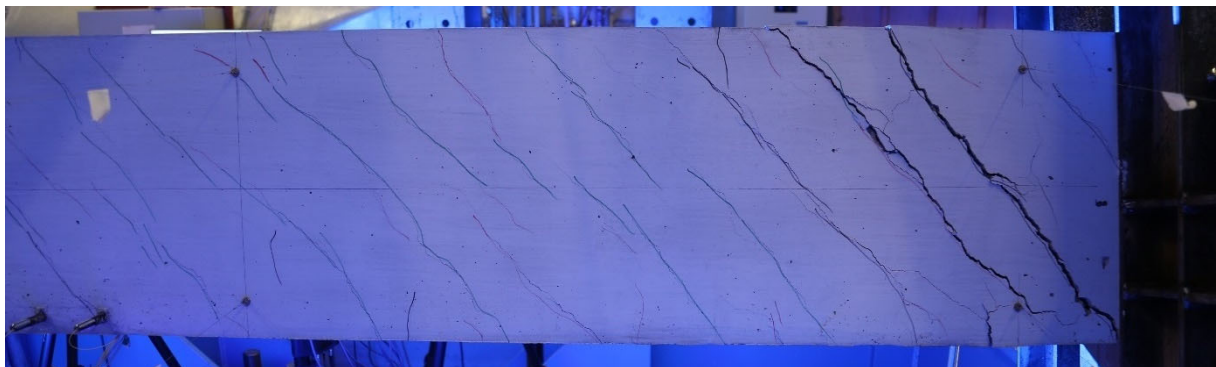


#### Draufsicht (oben):



#### **Bild 292 B10 Rissbild**

Vor dem Erreichen des maximalen Torsionsmoments von  $T_{\text{max}} = 17,9 \text{ kNm}$  und einer Verdrillung von  $3,92 \text{ }^\circ/\text{m}$  nimmt die Steifigkeit des Balkens bereits ab. Dies ist auf die starke Rissöffnung zurückzuführen. Nachdem die Maximallast erreicht wird, fällt die Last ab und es kommt zu einer stetigen Lastabnahme. Die Verdrillung konzentriert sich im Einspannbereich (Bild 293).



**Bild 293 B10 Versagen an der Lasteinleitung**

Bild 294 zeigt den Messaufbau. Die gemessenen Werte finden sich in den Bildern 295-298. Die Darstellung der Messwerte der faseroptischen Sensoren an der Längs- (FL1, FL2) und der Bügelbewehrung (FB1, FB2) sind in Bild 299 grafisch dargestellt. Bild 300 zeigt die Hauptzugdehnungen im Messfeld.

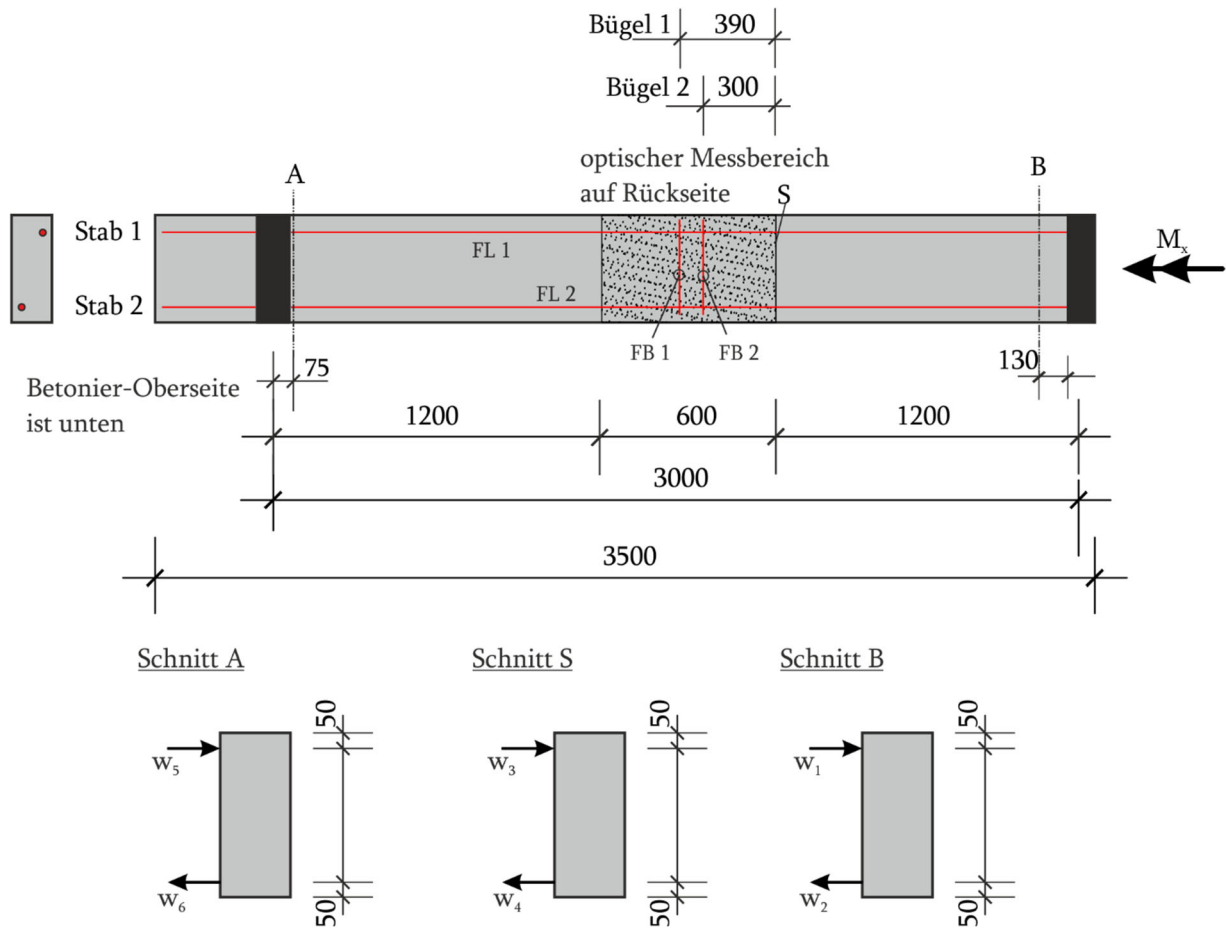
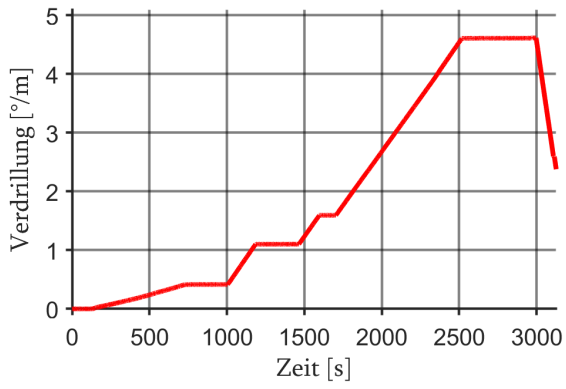
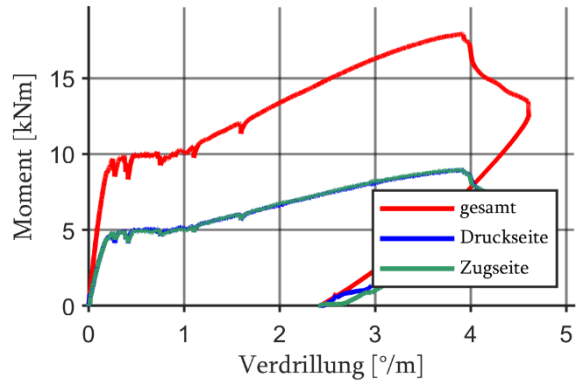


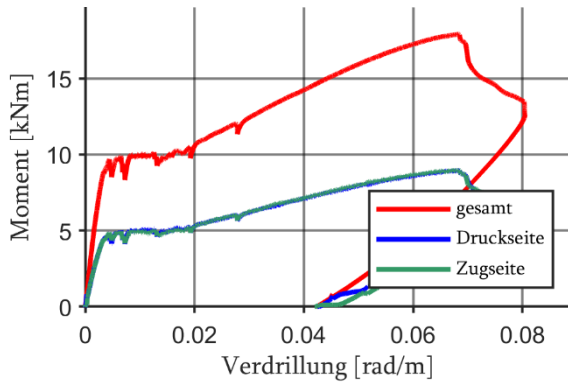
Bild 294 B10 - Lage der Messelemente entlang der Längsachse



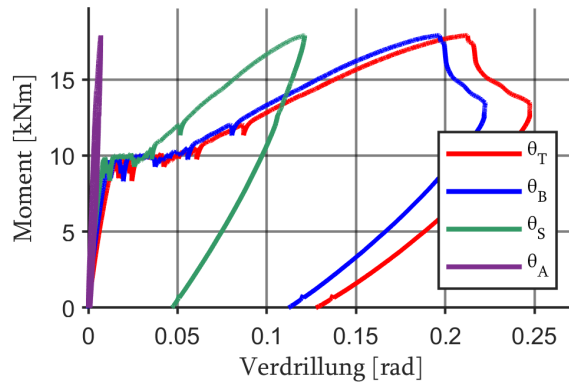
**Bild 295 B10 Verdrillung-Zeit-Diagramm**



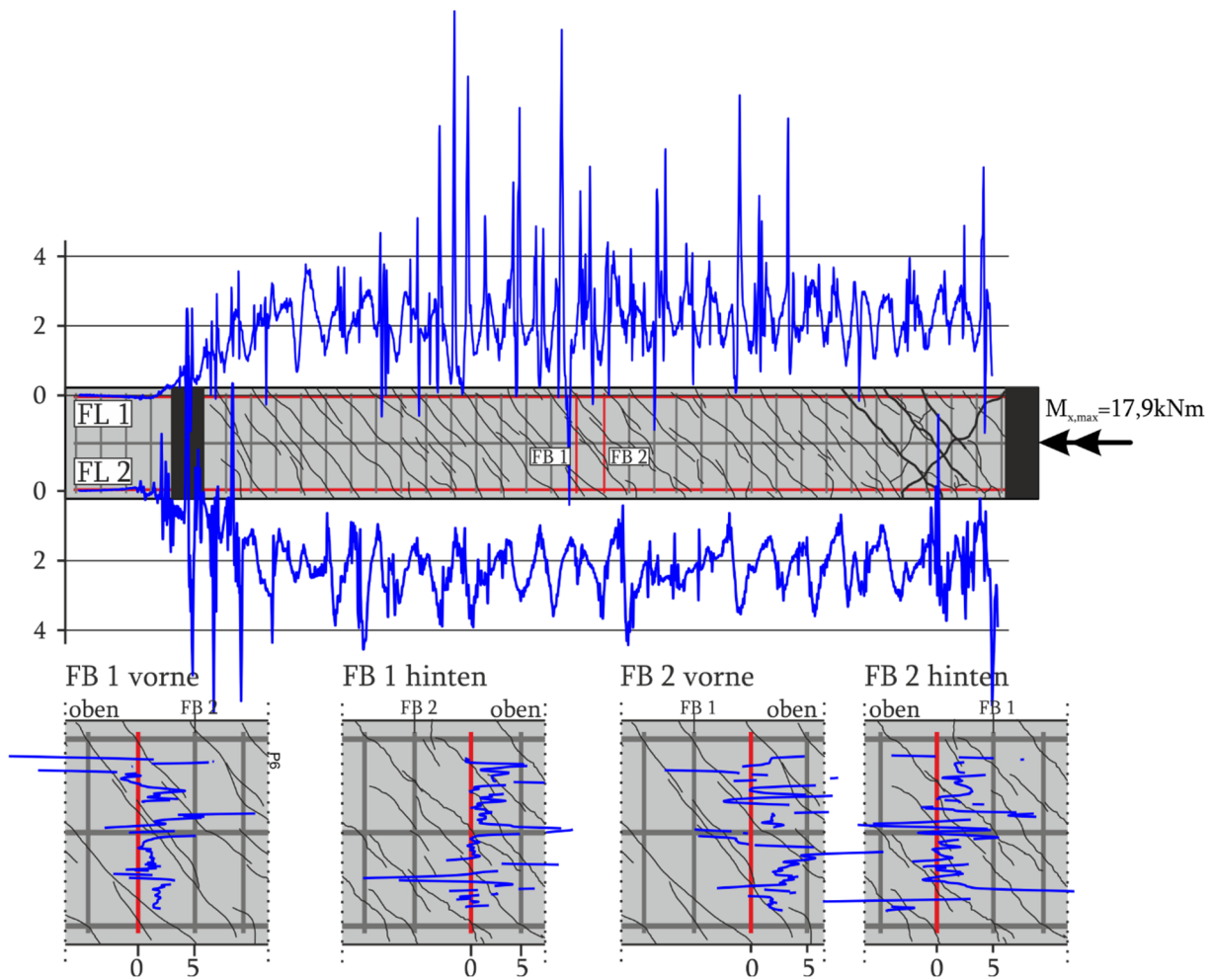
**Bild 296 B10 Momentverdrillungskurve in °/m**



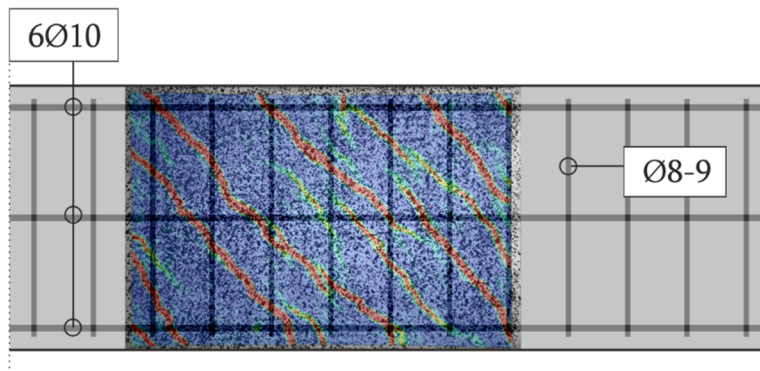
**Bild 297 B10 Momentverdrillungskurve in rad/m**



**Bild 298 B10 Verdrillung des Balkens**



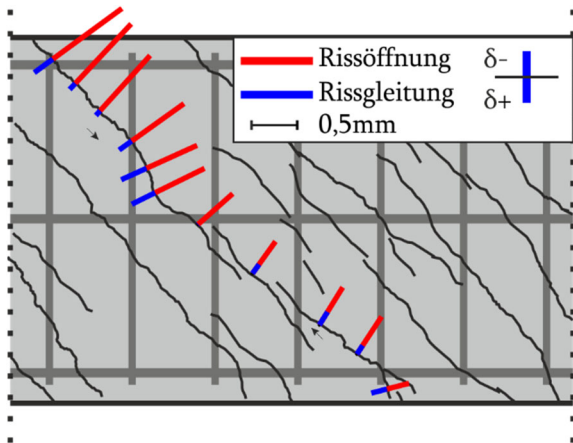
**Bild 299 B10 Faseroptische und Dehnungsmessungen bei der Maximallast  $T_{\max} = 17,9$  kNm**



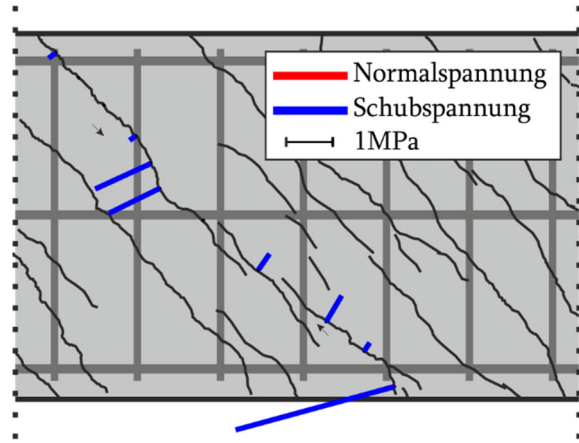
**Bild 300 B10 Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen bei  $T_{\max} = 17,9$  kNm**

Die Risskinematik des Versuchs bei maximalem Torsionsmoment  $T_{\max} = 17,9$  kNm ist in Bild 301 für den maßgebenden Riss dargestellt. Dieser besteht aus drei Einzelrissen. Im oberen Rissabschnitt liegen die größten Rissöffnungen von bis 0,95 mm sowie eine maximalen Rissgleitung von bis zu 0,3 mm in den steilen Rissabschnitten vor. Zum unteren Rand nimmt die Rissöffnung ab.

Bild 302 zeigt die Rissspannungen. Diese liegen meist unter 1 MPa und erreichen in einigen Bereichen Spannungen von bis zu 1,2 MPa. Am unteren Rand ist eine Spannungsspitze von 3,5 MPa vorhanden.



**Bild 301 B10 Risskinematik bei  $T_{\max}$  für einen ausgewählten Riss im Messfeld**

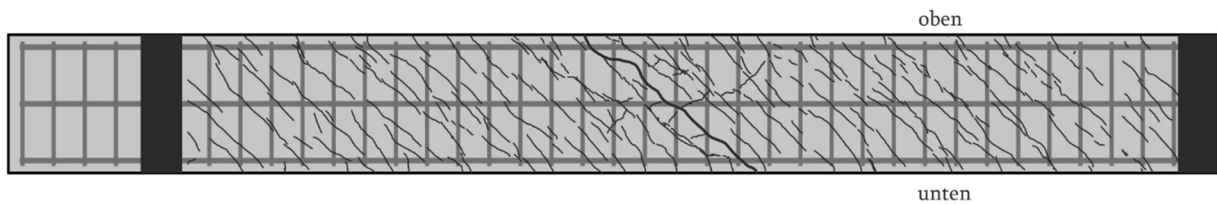


**Bild 302 B10 Rissspannung bei  $T_{\max}$  für einen ausgewählten Riss im Messfeld**

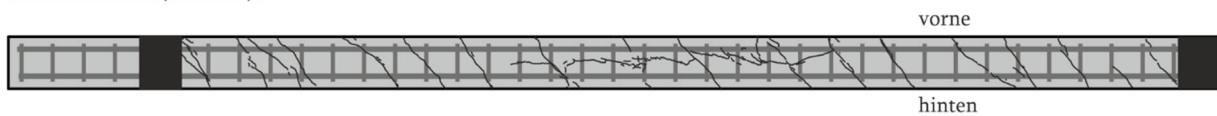
### 6.2.22 B11

Der Torsionsbalken B11 beginnt die Rissbildung bei etwa  $T = 9,4 \text{ kNm}$  und einer Verdrillung von  $0,19 \text{ }^\circ/\text{m}$ . Bei weiterer Verformung folgt eine Phase der Rissbildung bis zu einer Verdrillung von etwa  $0,49 \text{ }^\circ/\text{m}$ . Hierbei ist nur eine geringe Laststeigerung möglich. Nachdem dieser Zustand durchlaufen und die Rissbildung über die gesamte Balkenlänge vollzogen wurde, beginnt die Laststeigerung. Daraufhin entstehen weitere Risse in einem geringeren Ausmaß, wie in Bild 303 zu sehen ist. Die Risse entstehen annähernd unter einem Winkel von  $45^\circ$  und entwickeln sich umlaufend.

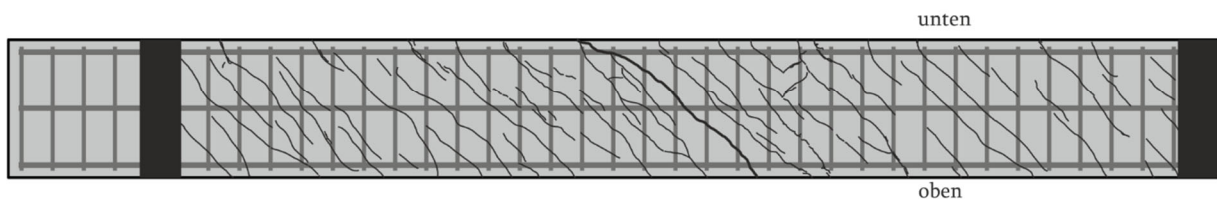
#### Vorderseite ohne Muster



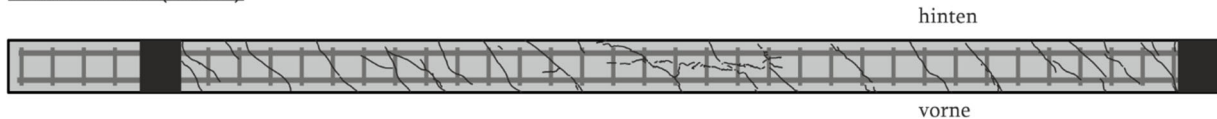
#### Draufsicht (unten)



#### Rückseite mit Muster

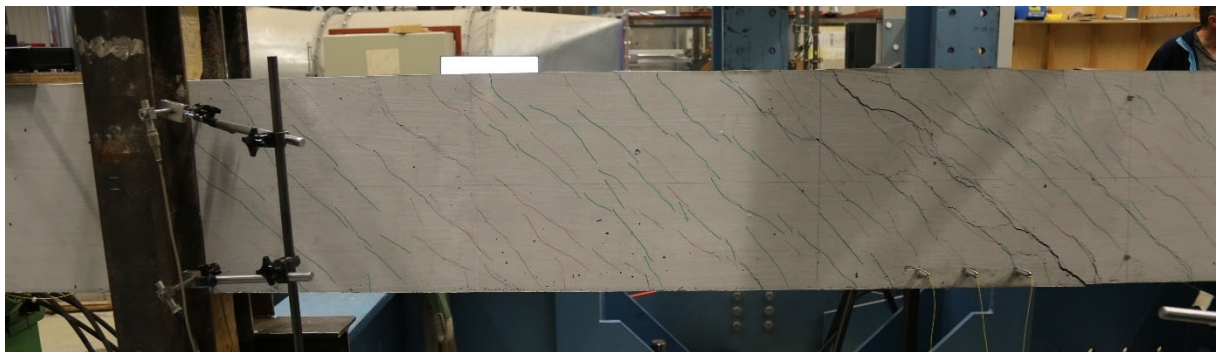


#### Draufsicht (oben)



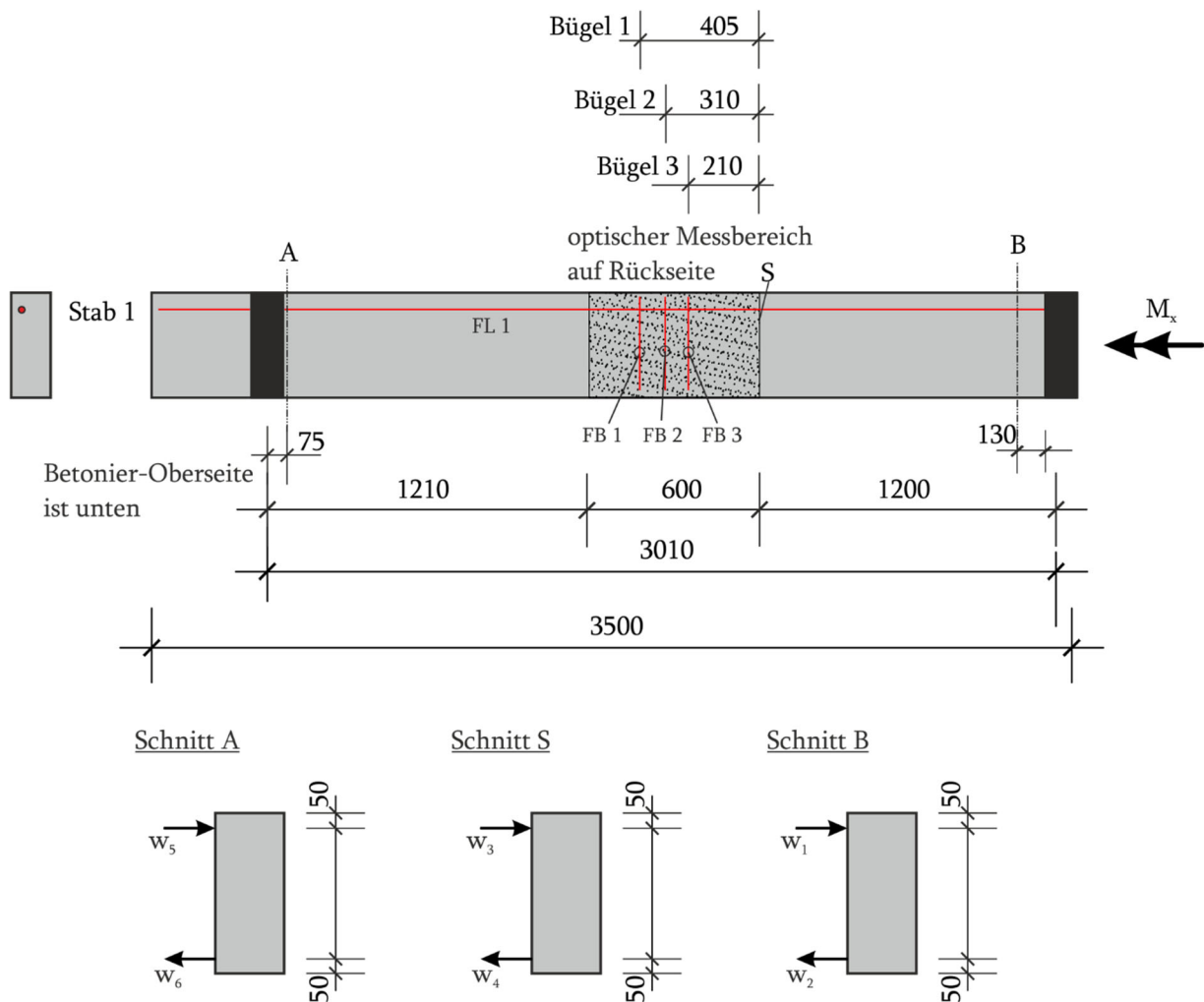
### **Bild 303 B11 Rissbild**

Vor dem Erreichen des maximalen Torsionsmomentes von  $T_{\max} = 27,2 \text{ kNm}$  und einer Verdrillung von  $3,03 \text{ }^\circ/\text{m}$  nimmt die Steifigkeit des Torsionsbalkens bereits ab. Dies ist auf die starke Rissöffnung im Versagensbereich zurückzuführen. Nachdem die Maximallast erreicht wird, fällt die Last geringfügig ab und daraufhin kommt ein Fließplateau. Die Verdrillung konzentriert sich im Versagensbereich (Bild 304).



**Bild 304 B11 Rissbild und Versagen in Feldmitte**

Bild 305 zeigt den Messaufbau und dessen Positionierung bei der Versuchsdurchführung. Die aufgezeichneten Werte finden sich in den Bildern 306-309. Die Messwerte der faseroptischen Sensoren an der Längsbewehrung (FL) und der Bügelbewehrung (FB1-FB3) sind in Bild 310 grafisch dargestellt. In Bild 311 sind die Hauptzugdehnungen im Messfeld dargestellt.



**Bild 305 B11 - Lage der DMS und des DD1 entlang der Längsachse**

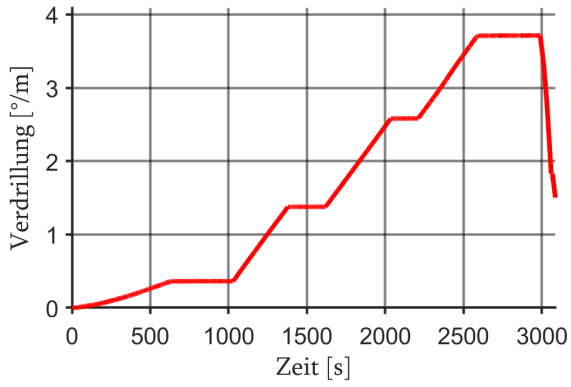


Bild 306 B11 Verdrillungs-Zeit-Diagramm

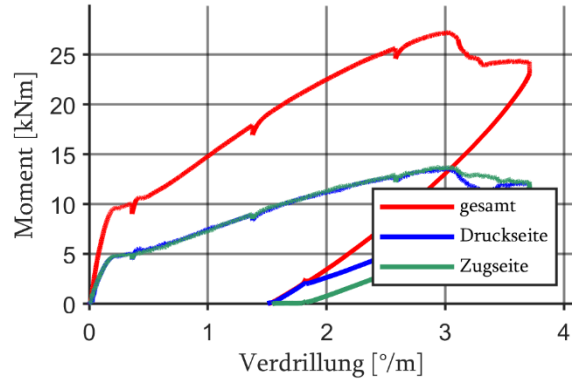


Bild 307 B11 Momentverdrillungskurve in  $^{\circ}/m$

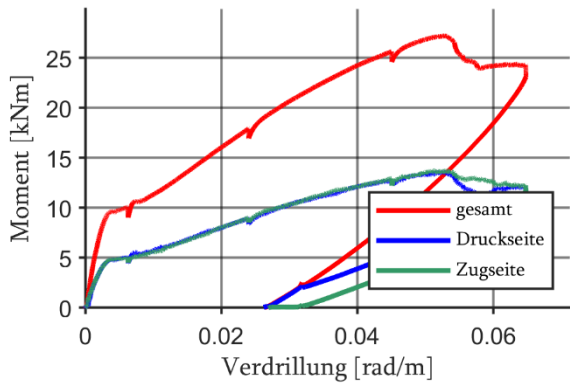


Bild 308 B11 Momentverdrillungskurve in  $rad/m$

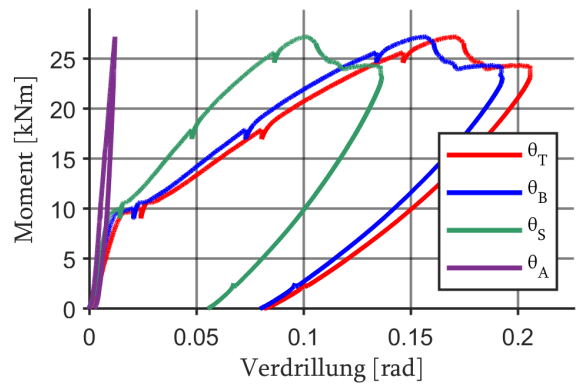


Bild 309 B11 Balkenverformung, Verformungskurven der einzelnen Wegaufnahme

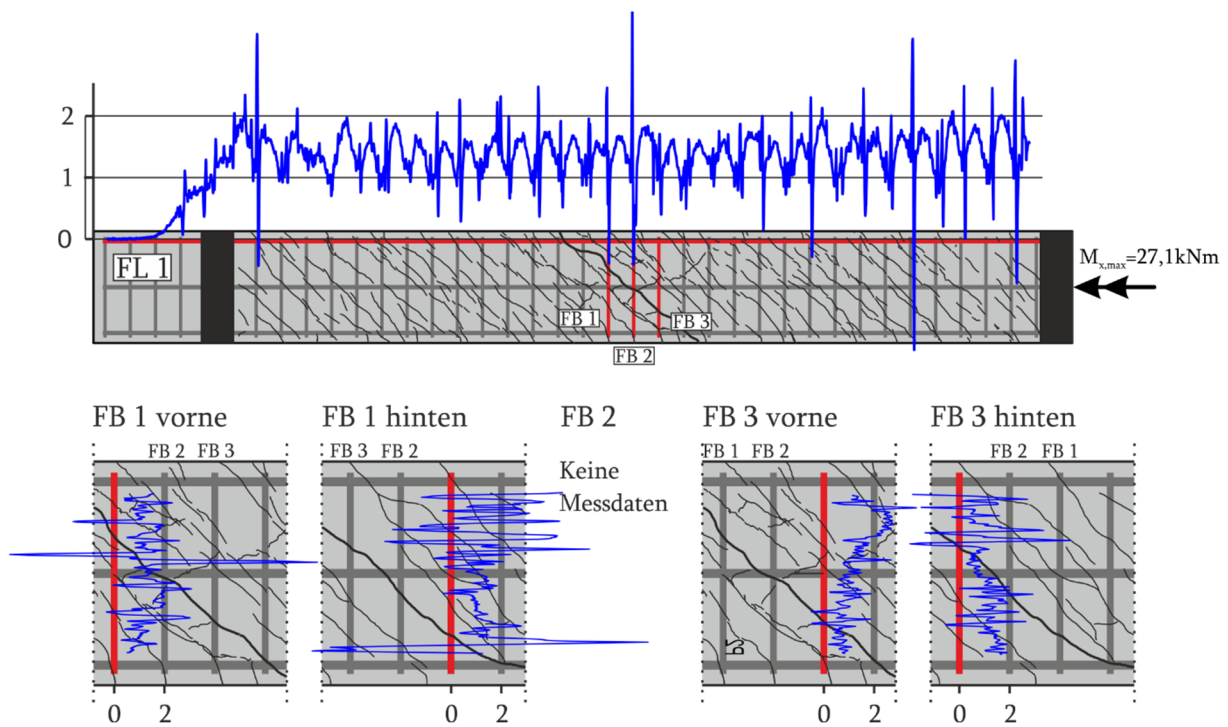
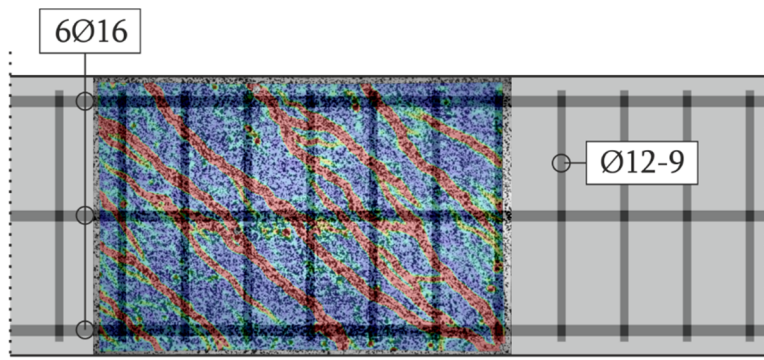


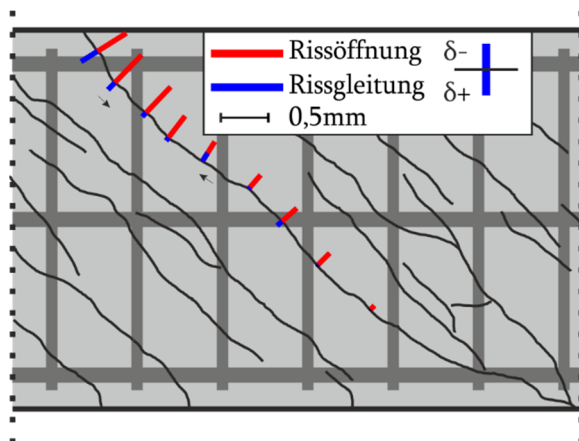
Bild 310 B11 Faseroptische und Dehnungsmessungen bei der Maximallast  $T = 27,1 \text{ kNm}$



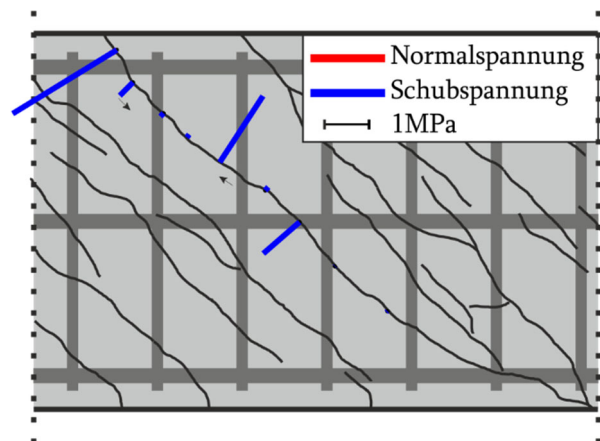
**Bild 311 B11 Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen bei  $T_{\max} = 27,2$  kNm**

Die Risskinematik des Versuchs bei Maximallast ist in Bild 312 für den maßgebenden Riss dargestellt. Im oberen Rissabschnitt liegen Rissöffnungen von bis 0,4 mm vor und einer maximalen Rissgleitung von bis zu 0,2 mm in den steilen Rissabschnitten. Zum unteren Rissabschnitt nimmt die Rissöffnung und auch Rissgleitung ab. Bei Diesem Versuch tritt das Versagen im Messbereich der Photogrammetrie auf.

In Bild 313 sind die Rissspannungen zu sehen. Diese liegen in den meisten Rissabschnitten weit unter 1 MPa und an einigen Abschnitten bei etwa  $\pm 2$  MPa.



**Bild 312 B11 Risskinematik bei  $T_{\max}$  für ausgewählten Riss im Messfeld**

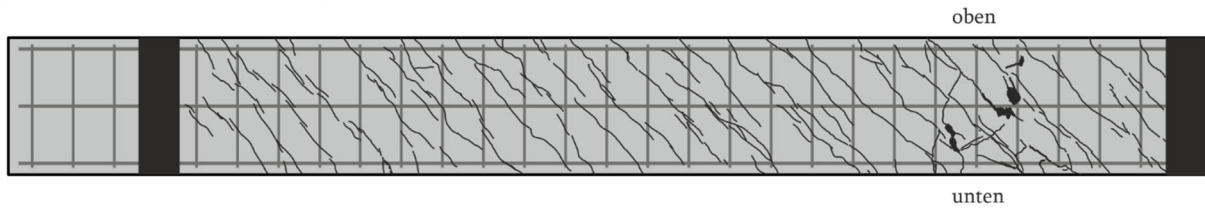


**Bild 313 B11 Rissspannung bei  $T_{\max}$  für ausgewählten Riss im Messfeld**

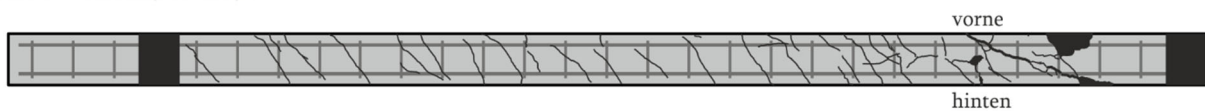
### 6.2.23 B12

Beim Torsionsbalken B12 beginnt die Rissbildung bei etwa  $T = 9,5 \text{ kNm}$  und einer Verdrillung von  $0,21 \text{ ‰/m}$ . Bei weiterer Verformung folgt ein Zustand der Rissbildung bis zu einer Verdrillung von etwa  $0,77 \text{ ‰/m}$ . Hierbei ist nur eine geringe Laststeigerung möglich. Nachdem dieser Zustand durchlaufen und die Rissbildung über die gesamte Balkenlänge vollzogen wurde, beginnt die Laststeigerung. Daraufhin entstehen weitere Risse in einem geringeren Ausmaß, wie in Bild 314 zu sehen ist. Die Risse entstehen annähernd unter einem Winkel von  $45^\circ$  und entwickeln sich umlaufend.

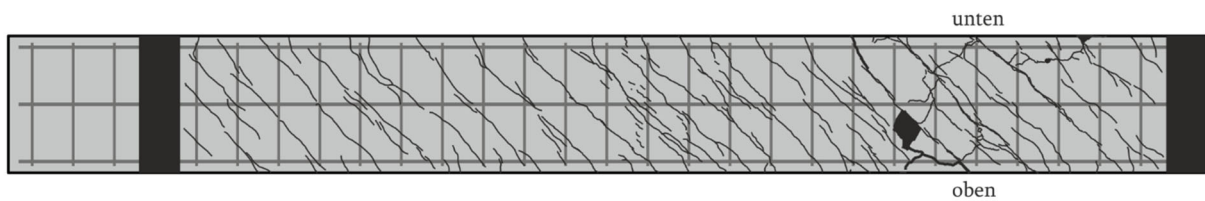
#### Vorderseite ohne Muster



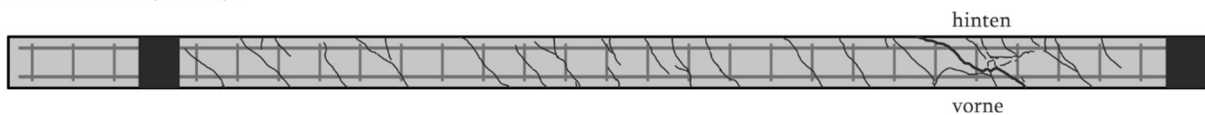
#### Draufsicht (unten):



#### Rückseite mit Muster



#### Draufsicht (oben):



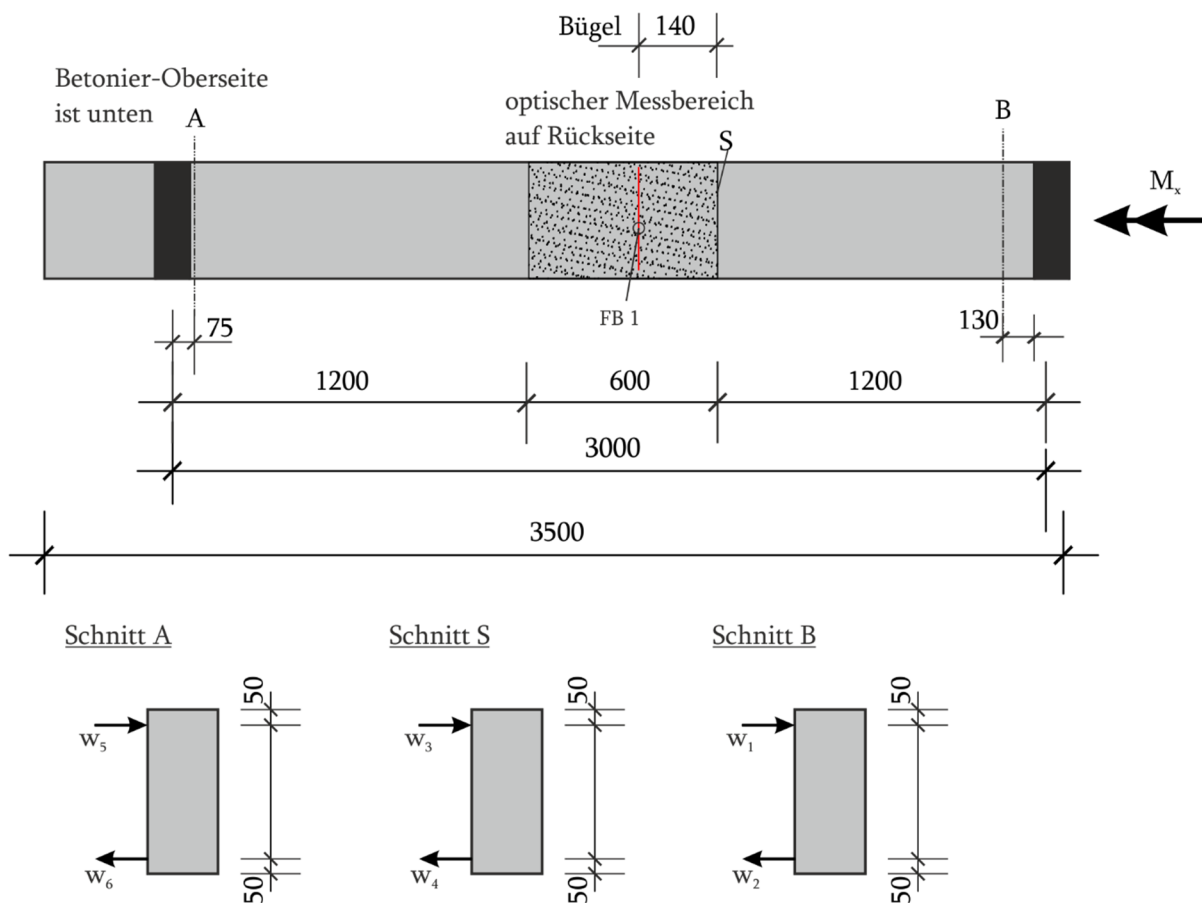
#### **Bild 314 B12 Rissbild**

Vor dem Erreichen der Maximallast von  $T_{\max} = 17,8 \text{ kNm}$  und einer Verdrillung von  $3,44 \text{ ‰/m}$  nimmt die Steifigkeit des Torsionsbalkens bereits ab. Dies ist auf die starke Rissöffnung im Versagensbereich zurückzuführen. Nachdem die Maximallast erreicht wird, kommt es zu einem spröden Versagen. Die Last fällt deutlich ab, da es zu einem Betondruckbruch kommt (Bild 315).



**Bild 315 B12 Versagen im Bereich der Lasteinleitung**

Bild 316 zeigt den Messaufbau. Die aufgezeichneten Werte finden sich in den Bildern 317-320. Die Messwerte der faseroptischen Sensoren an der Bügelbewehrung (FB1) sind in Bild 321 dargestellt. Die übrigen Sensoren sind vor Versuchsbeginn bereits ausgefallen. In Bild 321 sind die Hauptzugdehnungen grafisch dargestellt.



**Bild 316 B12 - Lage der DMS und des DD1 entlang der Längsachse**

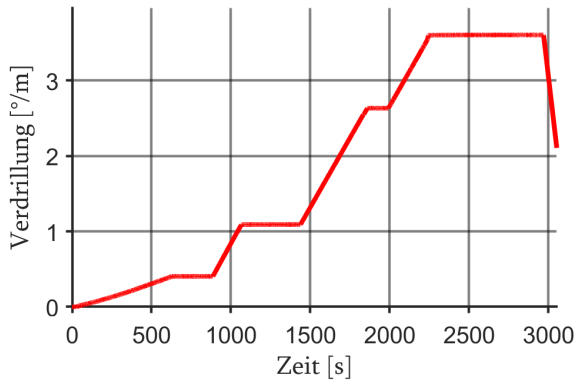


Bild 317 B12 Verdrillungs-Zeit-Diagramm

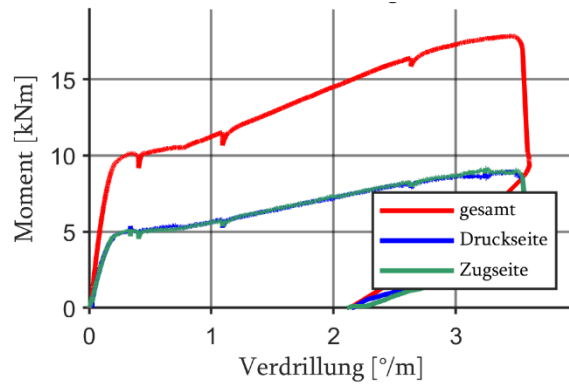


Bild 318 B12 Momentverdrillungskurve in  $^{\circ}/m$

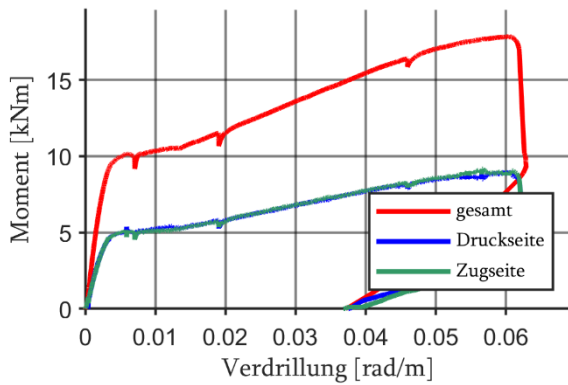


Bild 319 B12 Momentverdrillungskurve in  $rad/m$

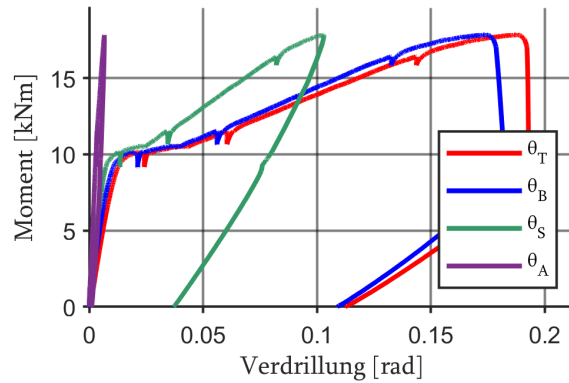
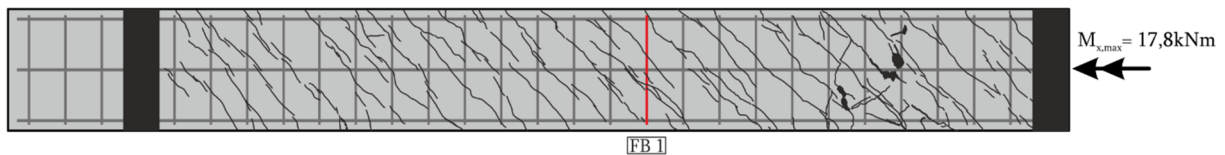
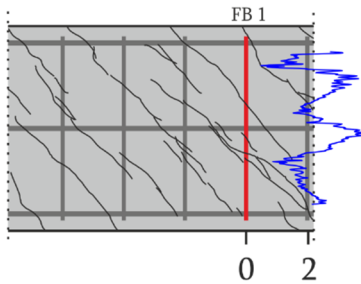


Bild 320 B12 Balkenverformung, Verformungskurven der einzelnen Wegaufnehmer



FB 1 vorne



FB 1 hinten

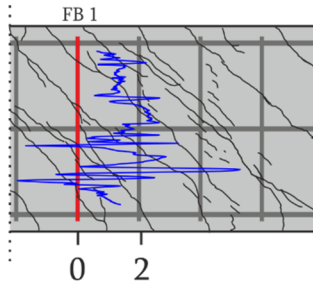
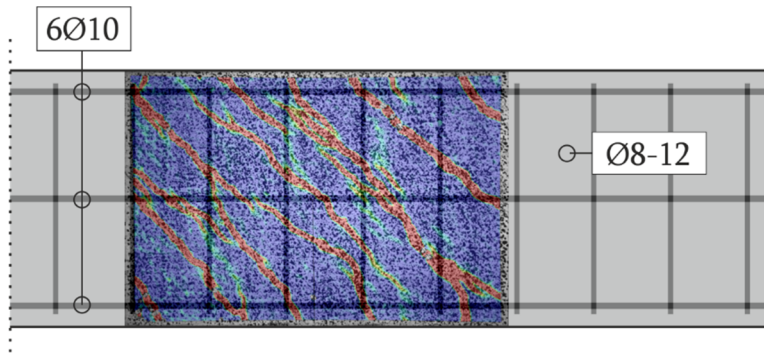


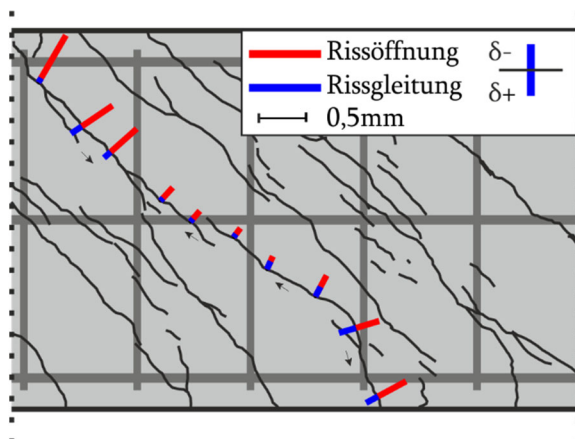
Bild 321 B12 Faseroptische und Dehnungsmessungen bei der Maximallast  $T_{max} = 17,8 \text{ kNm}$



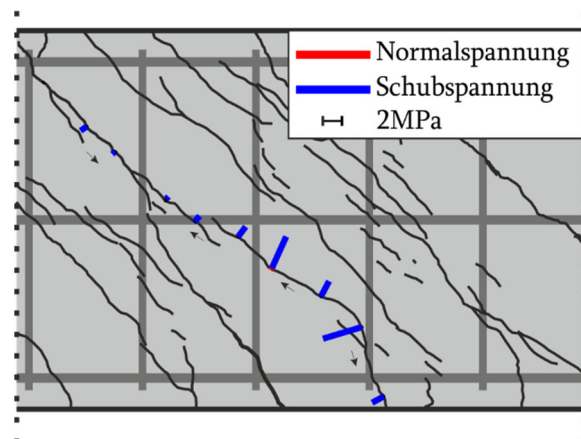
**Bild 322 B12 Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen**

Die Risskinematik des Versuchs bei Maximallast ist in Bild 323 für den maßgebenden Riss dargestellt. Im oberen Rissabschnitt liegen die maximalen Rissöffnungen von bis 0,58 mm vor und einer maximalen Rissgleitung von bis zu 0,14 mm in den steilen Rissabschnitten. Der mittlere Riss entsteht zu einem späteren Zeitpunkt und in diesen Bereich sind die Rissöffnungen zum einen geringer und zum anderen sind die Rissgleitungen negativ. Im unteren Rissabschnitt kommt es zu einem steilen Rissabschnitt, in dem die Rissneigung deutlich zunimmt und auch die Rissgleitung.

In Bild 324 sind die Rissspannungen zu sehen. Diese liegen in den oberen Rissabschnitten weit unter einem MPa und im unteren Rissabschnitt bei etwa  $\pm 2$  MPa und in einzelnen Punkten bei  $\pm 4$  MPa.



**Bild 323 B12 Risskinematik bei  $T_{max}$  für ausgewählten Riss im Messfeld**

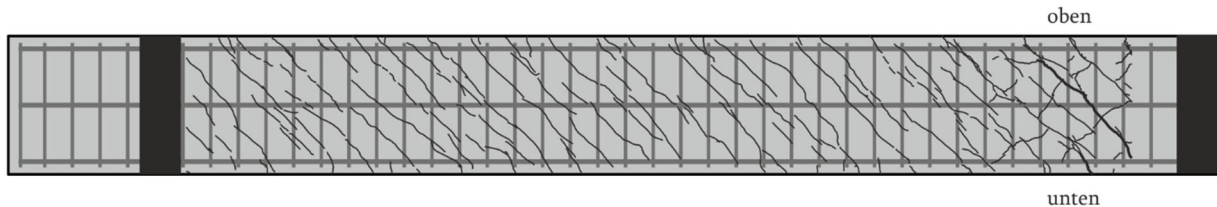


**Bild 324 B12 Rissspannung bei  $T_{max}$  für , ausgewählten Riss im Messfeld**

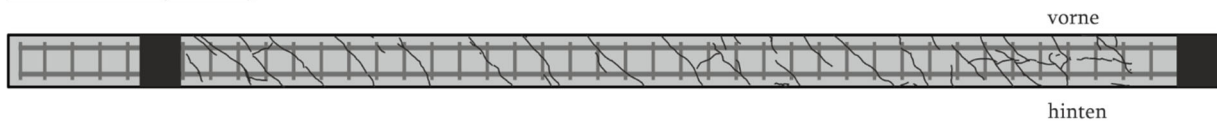
### 6.2.24 B13

Der Torsionsbalken B13 beginnt die Rissbildung bei etwa  $T = 10,2 \text{ kNm}$  und einer Verdrillung von  $0,22 \text{ }^\circ/\text{m}$ . Der Rissbildungsphase ist in diesem Fall nicht so deutlich erkennbar wie in vorherigen Versuchen. Bei etwa  $0,4 \text{ }^\circ/\text{m}$  scheint die Phase abgeschlossen zu sein. Anschließend beginnt die Laststeigerung. Daraufhin entstehen weitere Risse in einem geringeren Ausmaß, wie in Bild 325 zu sehen ist. Die Risse bilden sich annähernd unter einem Winkel von  $45^\circ$  und entwickeln sich umlaufend.

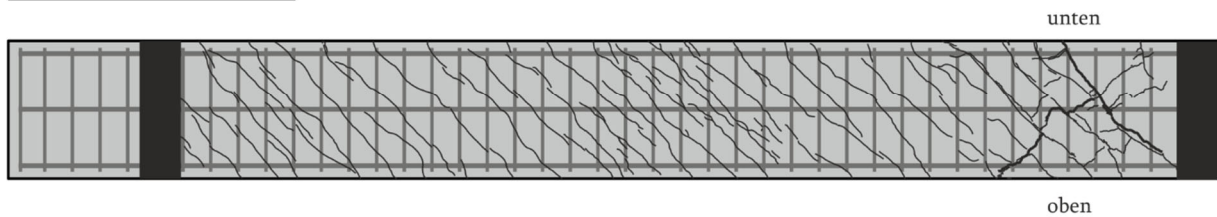
#### Vorderseite ohne Muster



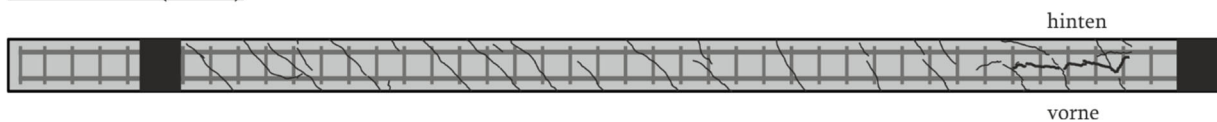
#### Draufsicht (unten)



#### Rückseite mit Muster

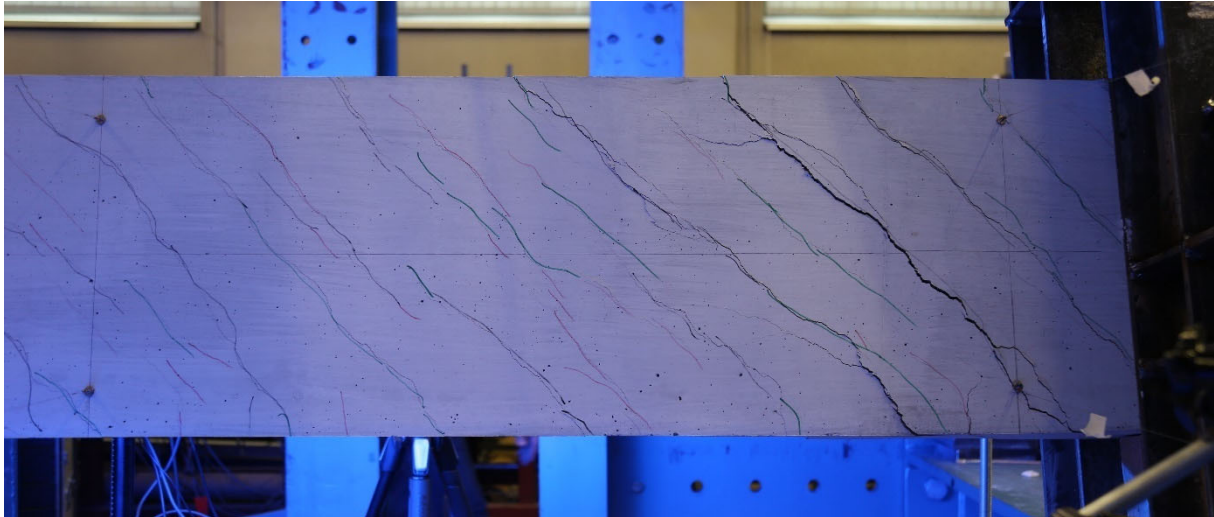


#### Draufsicht (oben)



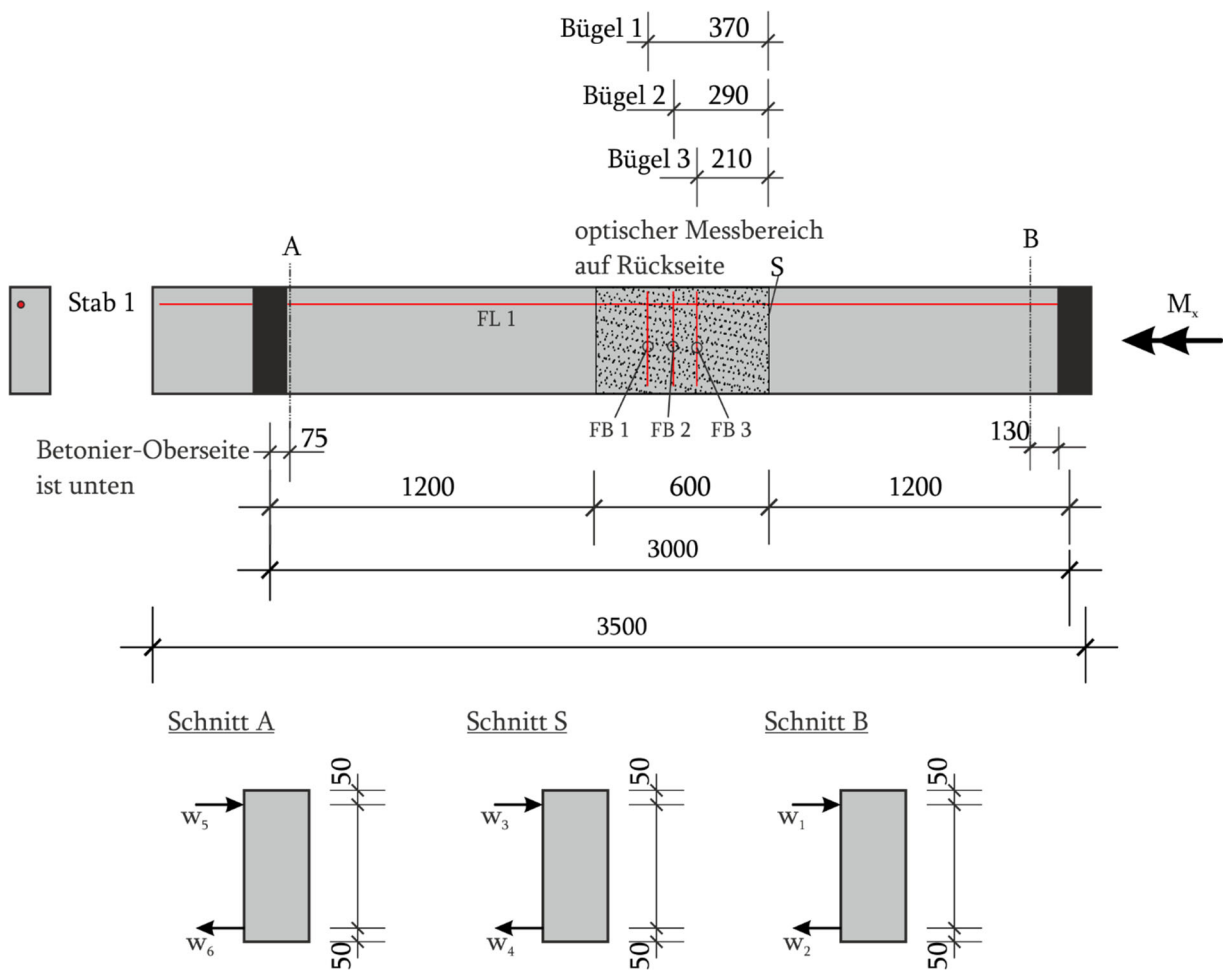
### **Bild 325 B13 Rissbild**

Vor dem Erreichen der Maximallast von  $T_{\max} = 24,1 \text{ kNm}$  und einer Verdrillung von  $2,97 \text{ }^\circ/\text{m}$  nimmt die Steifigkeit des Torsionsbalkens bereits ab. Dies ist auf die starke Rissöffnung im Versagensbereich zurückzuführen. Nachdem die Maximallast erreicht wird, fällt die Last geringfügig ab und daraufhin kommt ein Fließplateau. Die Verdrillung konzentriert sich im Versagensbereich (Bild 326).

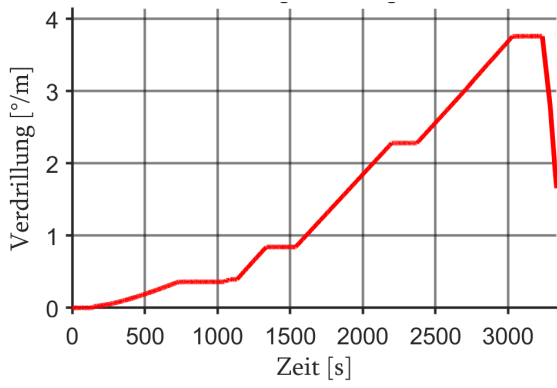


**Bild 326 B13 Versagen im Bereich der Lasteinleitung**

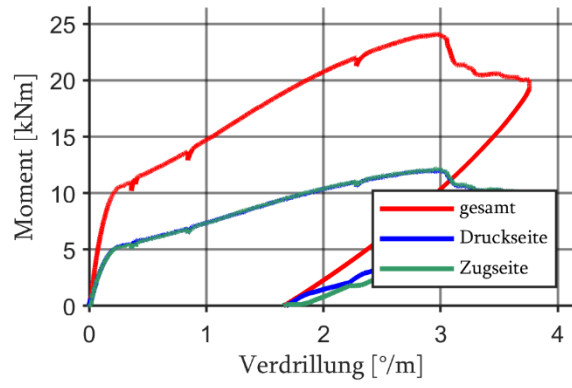
Bild 327 zeigt den Messaufbau. Die aufgezeichneten Werte finden sich in den Bildern 328-331. Die Messwerte der faseroptischen Sensoren an der Längs- (FL) und der Bügelbewehrung (FB1-FB3) sind in Bild 332 grafisch dargestellt. Bild 333 zeigt die Hauptzugdehnungen im Messfeld.



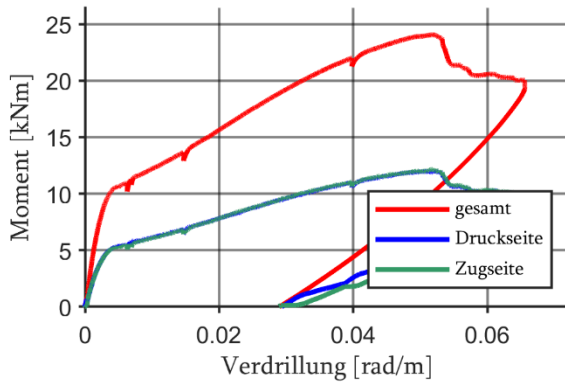
**Bild 327 B13 - Lage der DMS und des DD1 entlang der Längsachse**



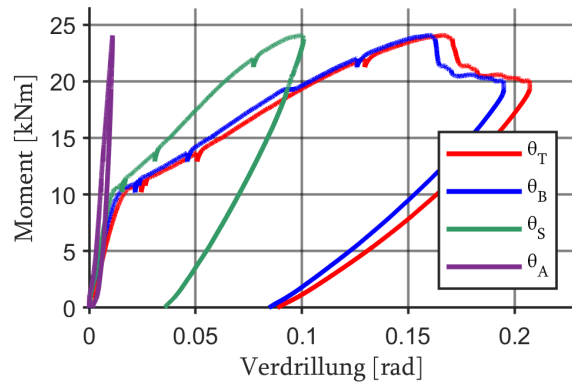
**Bild 328 B13 Verdrillung-Zeit-Diagramm**



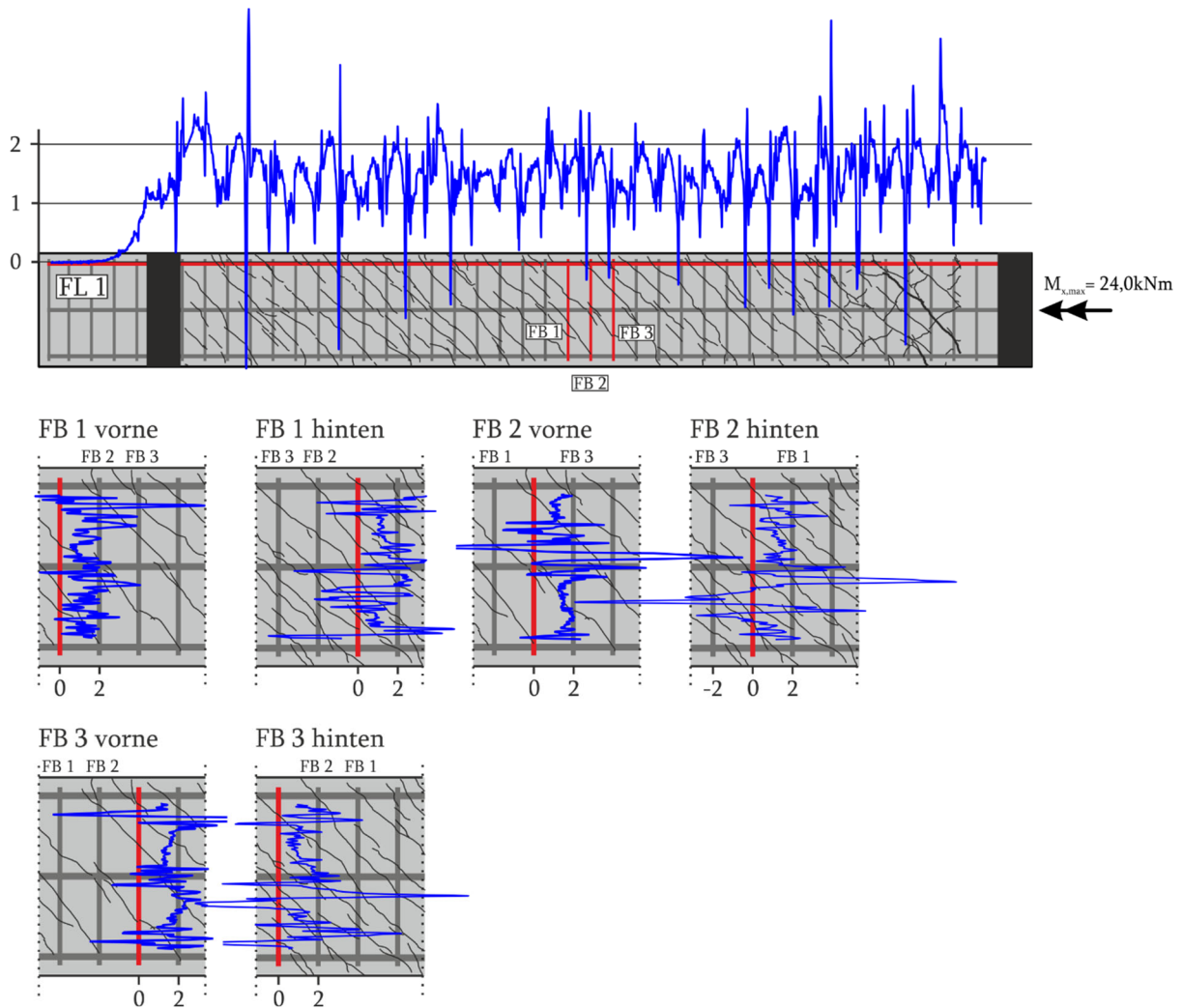
**Bild 329 B13 Momentverdrillungskurve in °/m**



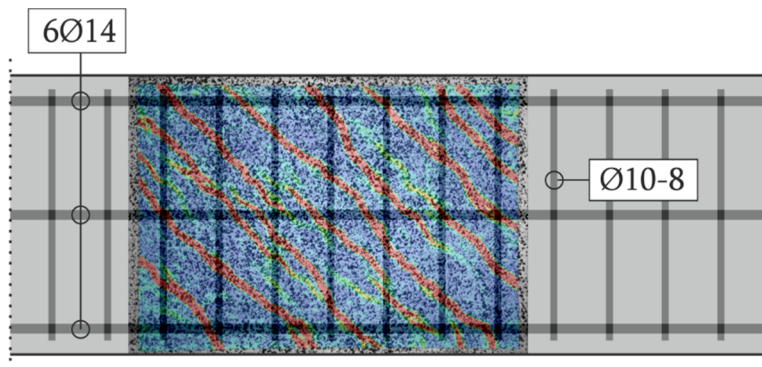
**Bild 330 B13 Momentverdrillungskurve in rad/m**



**Bild 331 B13 Balkenverformung, Verformungskurven der einzelnen Wegaufnehmer**



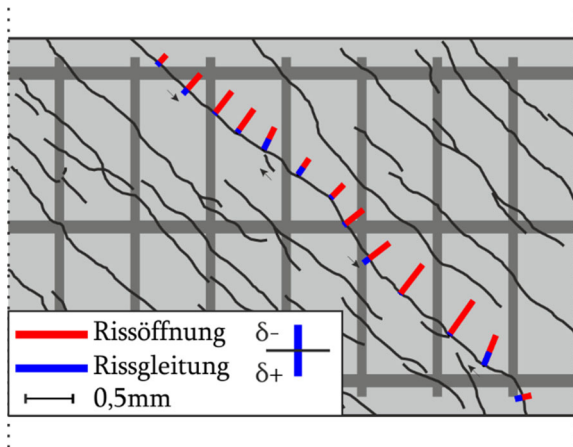
**Bild 332 B13 Faseroptische und Dehnungsmessungen bei der Maximallast  $T_{\max} = 24,1 \text{ kNm}$**



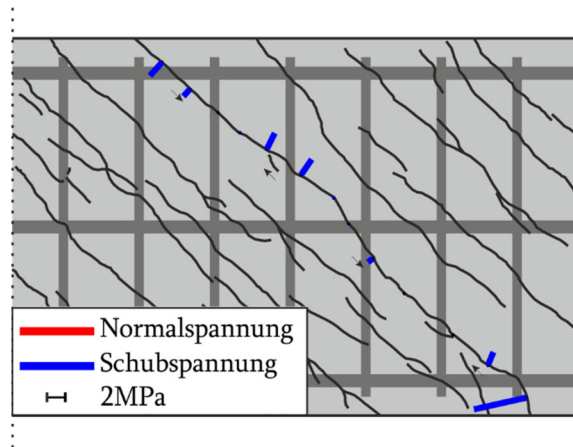
**Bild 333 B13 Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen**

Die Kinematik des maßgebenden Risses bei Maximallast ist in Bild 334 dargestellt. Der Riss ist annähernd gleichmäßig geöffnet. Die Rissöffnungen liegen zwischen 0,2 – 0,4 mm. Die Rissgleitung weist geringe Werte auf und alterniert um Null.

In Bild 335 sind die Rissspannungen zu sehen. Die Rissspannungen liegen im Bereich von  $\pm 2 \text{ MPa}$ . Im Bereich der unteren Eckbewehrung kommt es zu einer Spannungsspitze.



**Bild 334 B13 Risskinematik bei  $T_{\max}$  für ausgewählten Riss im Messfeld**

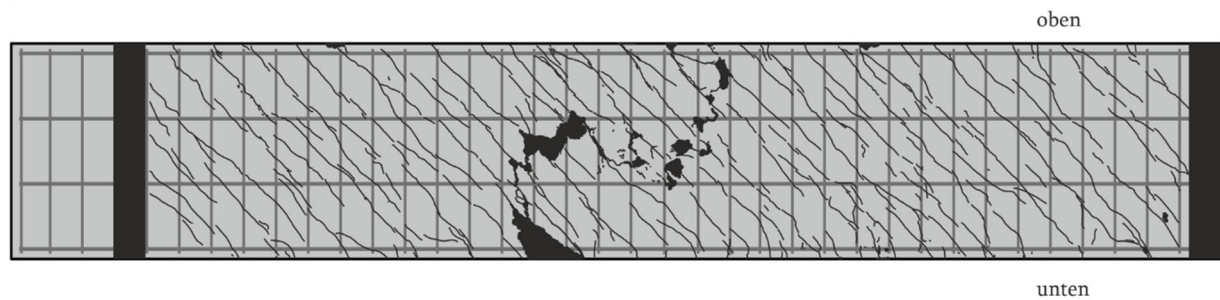


**Bild 335 B13 Rissspannung bei  $T_{\max}$  für ausgewählten Riss im Messfeld**

### 6.2.25 B14

Beim Balken B14 beginnt die Rissbildung bei etwa  $T = 20,9 \text{ kNm}$  und einer Verdrillung von  $0,17 \text{ }^\circ/\text{m}$ . Bei weiterer Verformung folgt ein Zustand der Rissbildung bis zu einer Verdrillung von etwa  $0,81 \text{ }^\circ/\text{m}$ . Hierbei ist nur eine sehr geringe Laststeigerung möglich. Nachdem dieser Zustand durchlaufen wurde und die Rissbildung über die gesamte Balkenlänge vollzogen wurde, beginnt eine Laststeigerung. Daraufhin bilden sich weitere Risse in einem geringeren Ausmaß, wie in Bild 336 zu sehen ist. Die Risse entstehen annähernd unter einem Winkel von  $45^\circ$  und entwickeln sich umlaufend.

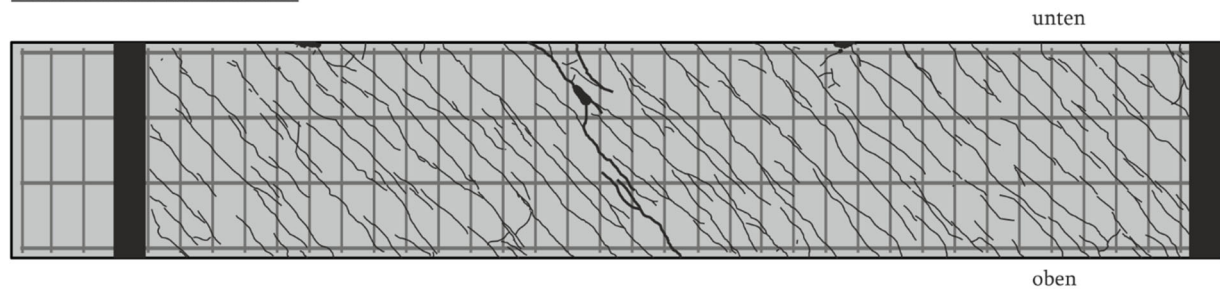
#### Vorderseite ohne Muster



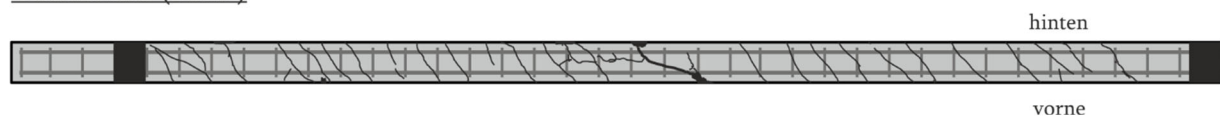
#### Draufsicht (unten)



#### Rückseite mit Muster



#### Draufsicht (oben)

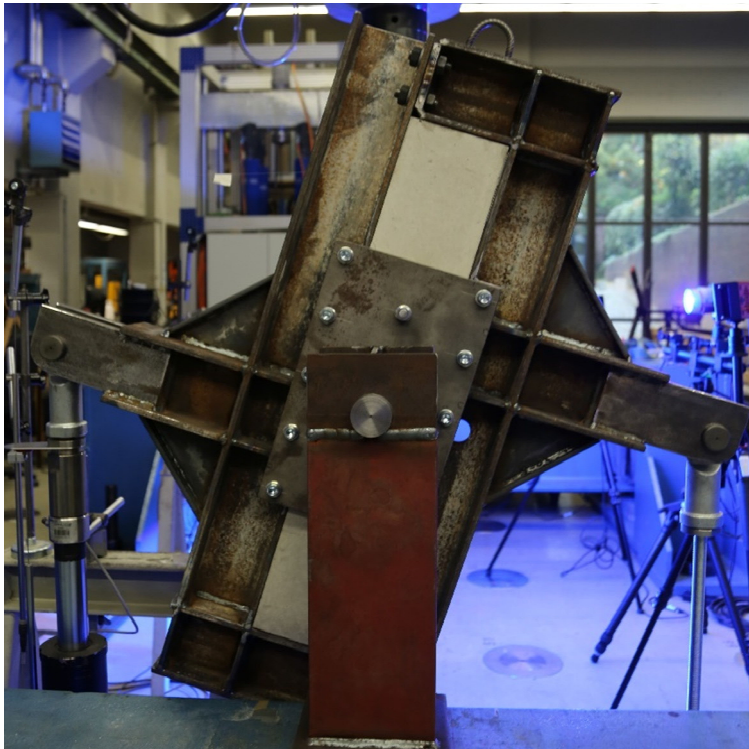


**Bild 336 B14 Rissbild**

Vor dem Erreichen der Maximallast von  $T_{\max} = 54,9 \text{ kNm}$  und einer Verdrillung von  $3,91 \text{ }^\circ/\text{m}$  nimmt die Steifigkeit des Torsionsbalkens bereits ab. Dies kann auf die starke Rissöffnung im Versagensbereich zurückgeführt werden. Nachdem die Maximallast erreicht wird, kommt es zu einem spröden Versagen. Die Last fällt deutlich ab, da es zu einem Betondruckbruch kommt (Bild 337).



**Bild 337 B14 Versagen in Balkenmitte**



**Bild 338 B14 Balkenverdrehung an der Lasteinleitung**

Bild 339 zeigt den Messaufbau. Die aufgezeichneten Werte finden sich in den Bildern 340-343. Die Messwerte der faseroptischen Sensoren an der Längsbewehrung (FL1, FL2) und der Bügelbewehrung (FB1, FB2) sind in Bild 344 grafisch dargestellt. Bild 345 zeigt die Hauptzugdehnungen im Messfeld.

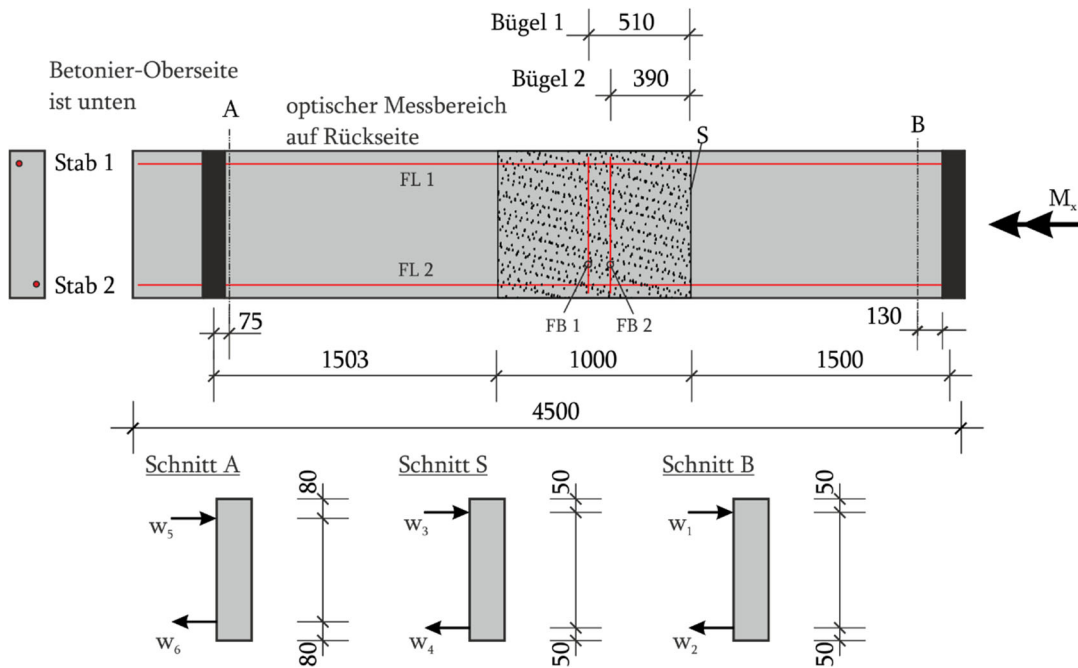


Bild 339 B14 - Lage der DMS und des DD1 entlang der Längsachse

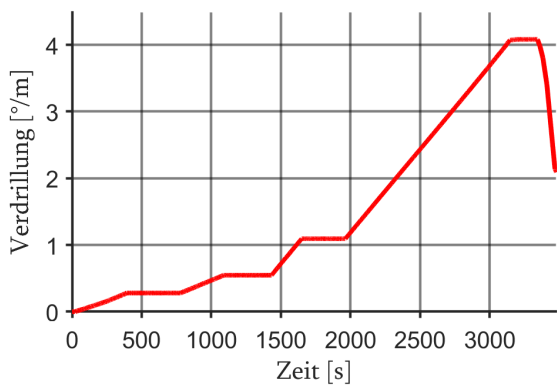


Bild 340 B14 Verdrillung-Zeit-Diagramm

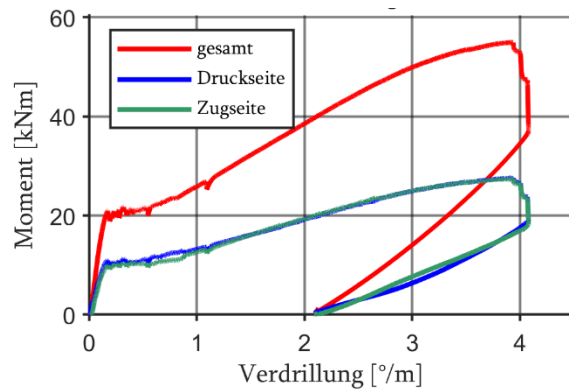
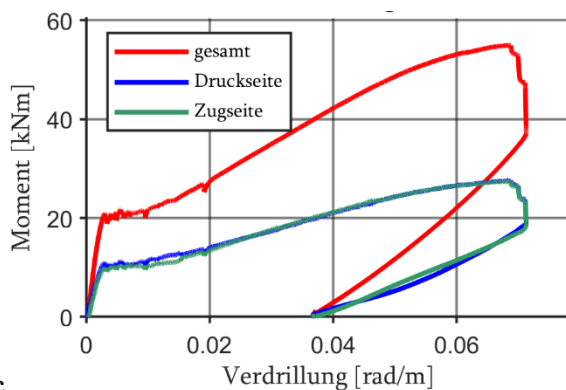


Bild 341 B14 Momentverdrillungskurve in °/m



c

Bild 342 B14 Momentverdrillungskurve in rad/m

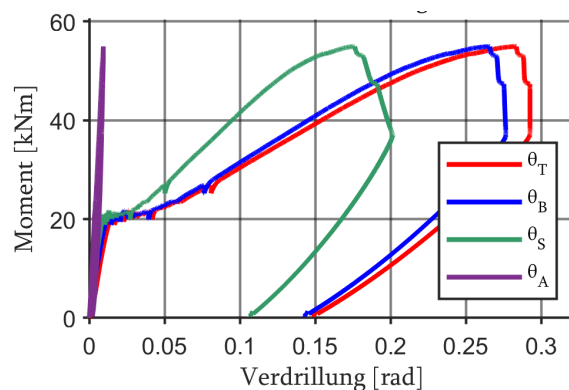
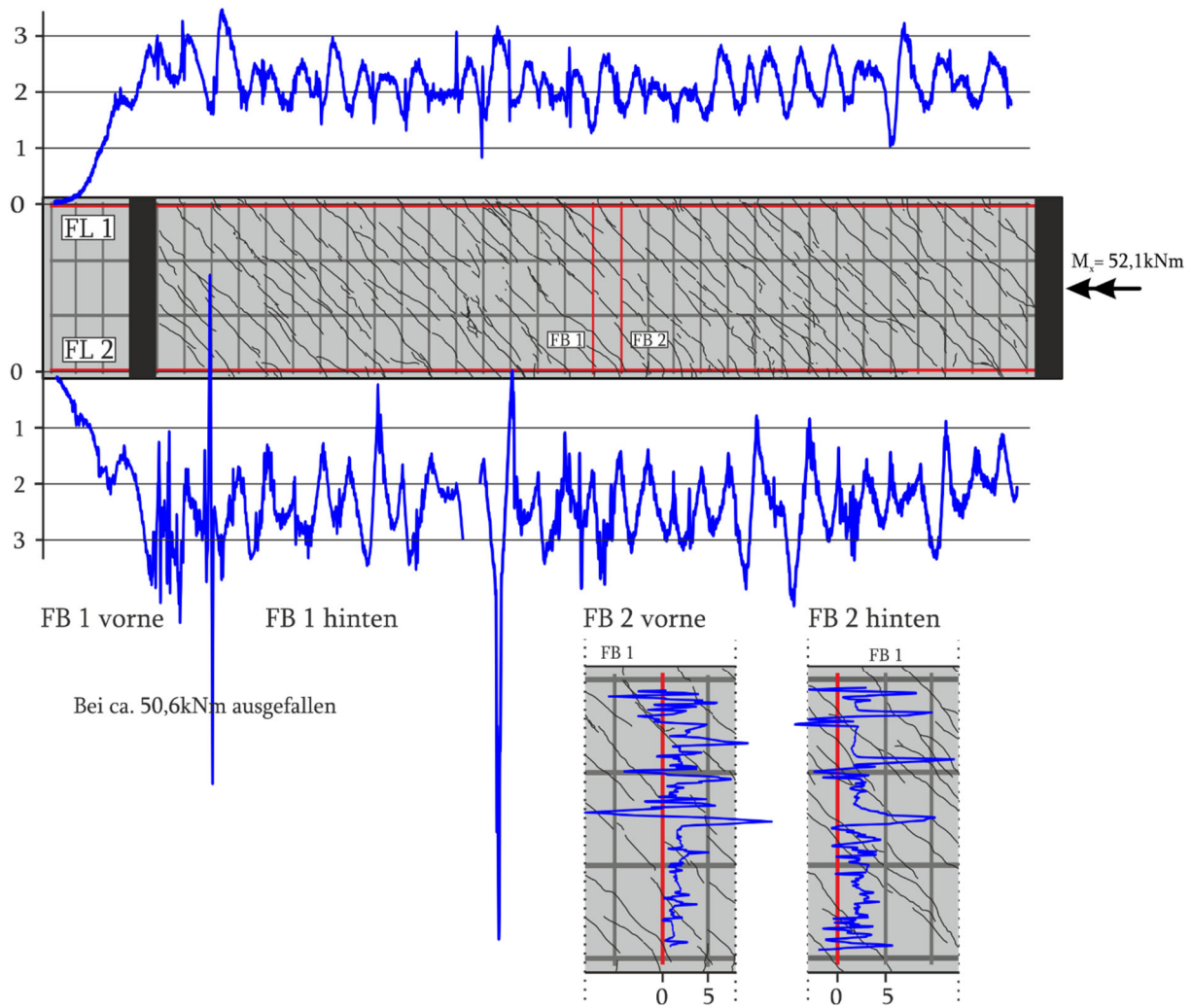
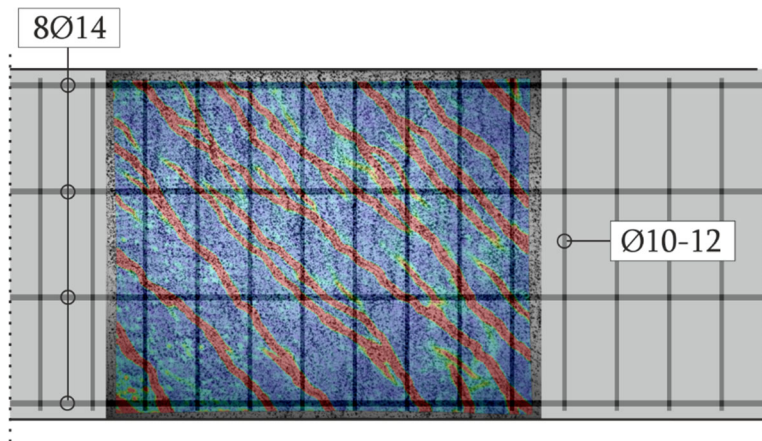


Bild 343 B14 Balkenverformung, Verformungskurven der einzelnen Wegaufnehmer



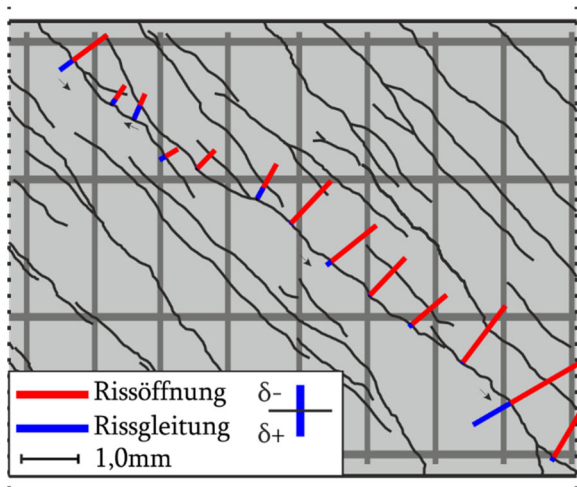
**Bild 344 B14 Faseroptische und Dehnungsmessungen bei der Maximallast  $T = 52,1$  kNm**



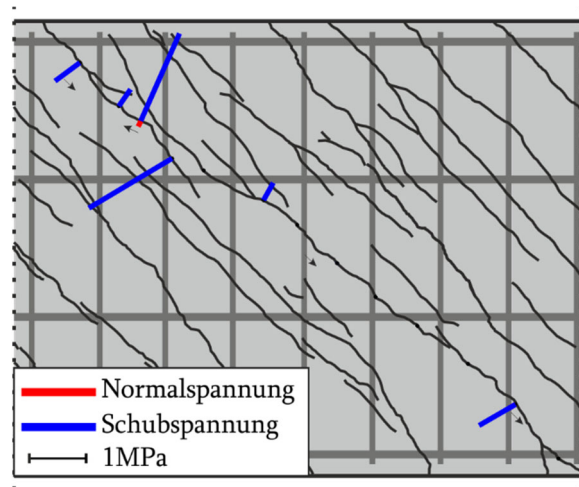
**Bild 345 B14 Photogrammetrisches Messfeld mit Hauptzugdehnungen**

Die Risskinematik des Versuchs bei Maximallast ist in Bild 346 für den maßgebenden Riss dargestellt. Dieser besteht aus drei Einzelrissen. Im oberen Rissabschnitt liegen relativ geringe Rissöffnungen von 0,3 bis 0,76 mm und einer maximalen Rissgleitung von  $\pm 0,3$  mm vor. Im mittleren Rissabschnitt betragen die Rissöffnungen zwischen 0,5 bis 1,0 mm. Es treten sehr geringe Rissgleitungen auf. Der untere Rissabschnitt weist große Rissöffnung und sehr geringe Rissgleitungen auf. Die Rissöffnungen liegen zwischen 0,8 und 1,4 mm und die Rissgleitung bereichsweise bei 0,76 mm.

In Bild 347 sind die Rissspannungen zu sehen. Diese liegen in den meisten Bereichen weit unter einem MPa und können als untergeordneter Tragmechanismus angesehen werden. Im oberen Rissabschnitt kommt es in wenigen Bereichen zu hohen Schubspannungen.



**Bild 346** B14 Risskinematik bei  $T_{\max}$  für ausgewählten Riss im Messfeld



**Bild 347** B14 Rissspannung bei  $T_{\max}$  für ausgewählten Riss im Messfeld

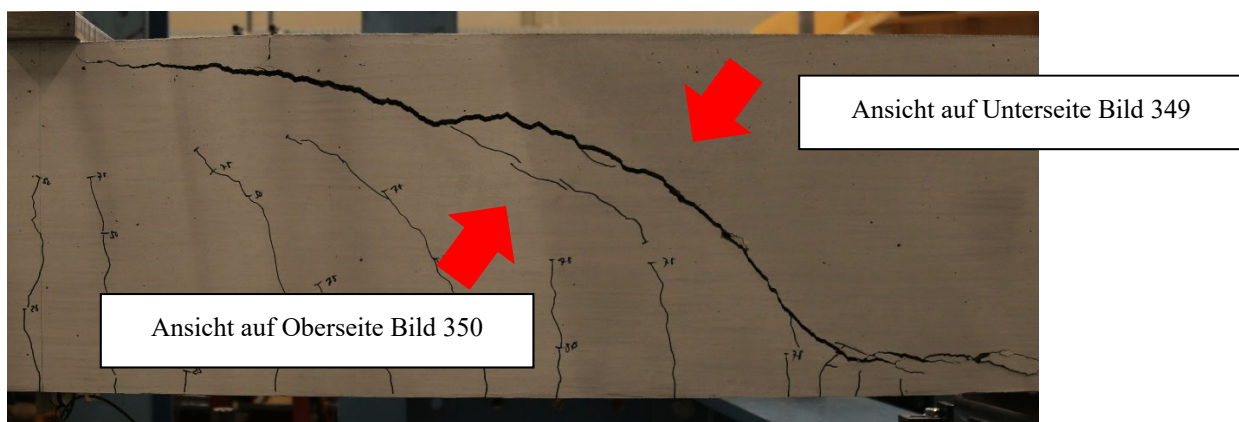
### 6.3 Untersuchung der Rissoberflächen

Zur Überprüfung der Spannungsübertragung über Risse hinweg, scheint es notwendig, auch die Rissoberfläche der Versuchsbalken zu betrachten.

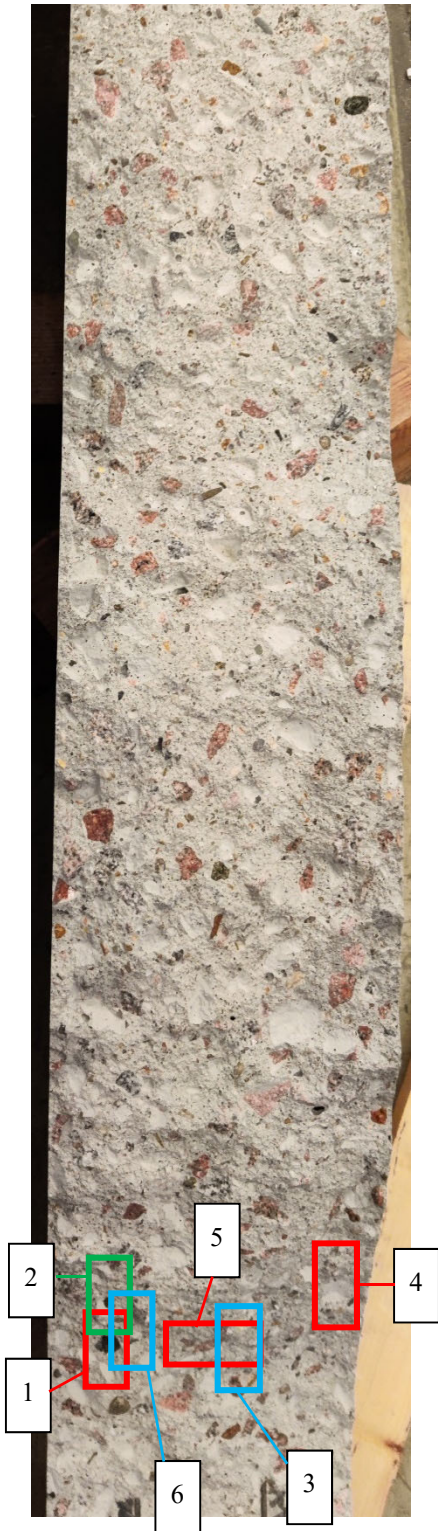
Die Rissoberflächen werden visuell untersucht. Hierzu kommen ein Mikroskop und eine Kamera, mit der Nahaufnahmen möglich sind, zum Einsatz. Hierbei sollen mögliche Kontaktpunkte identifiziert werden. Im Anschluss werden die Rissoberflächen mittels ARAMIS photogrammetrisch aufgenommen, um die Rauigkeit zu bestimmen. Diese Untersuchungen erfolgen an ausgewählten Versuchen.

Abschließend werden Schubversuche an den Rissoberflächen der Versuche B3.2 und B5.1 senkrecht zu ihrer Bauteilachse durchgeführt. Dazu werden Aufnahmen vor und nach dem Versuch gemacht.

#### 6.3.1 B1.1



**Bild 348 B1.1 Ansichten auf die Rissoberflächen**



**Bild 349 B1.1 Rissoberfläche Unterseite**



**Bild 350 B1.1 Rissoberfläche Oberseite**



**Bild 351 B1.1 Unterseite 1**



**Bild 352 B1.1 Oberseite 1**



**Bild 353 B1.1 Unterseite 2**



**Bild 354 B1.1 Oberseite 2**



**Bild 355 B1.1 Unterseite 3**



**Bild 356 B1.1 Oberseite 3**



**Bild 357 B1.1 Unterseite 4**



**Bild 358 B1.1 Oberseite 4**



**Bild 359 B1.1 Unterseite 5 (geneigt)**

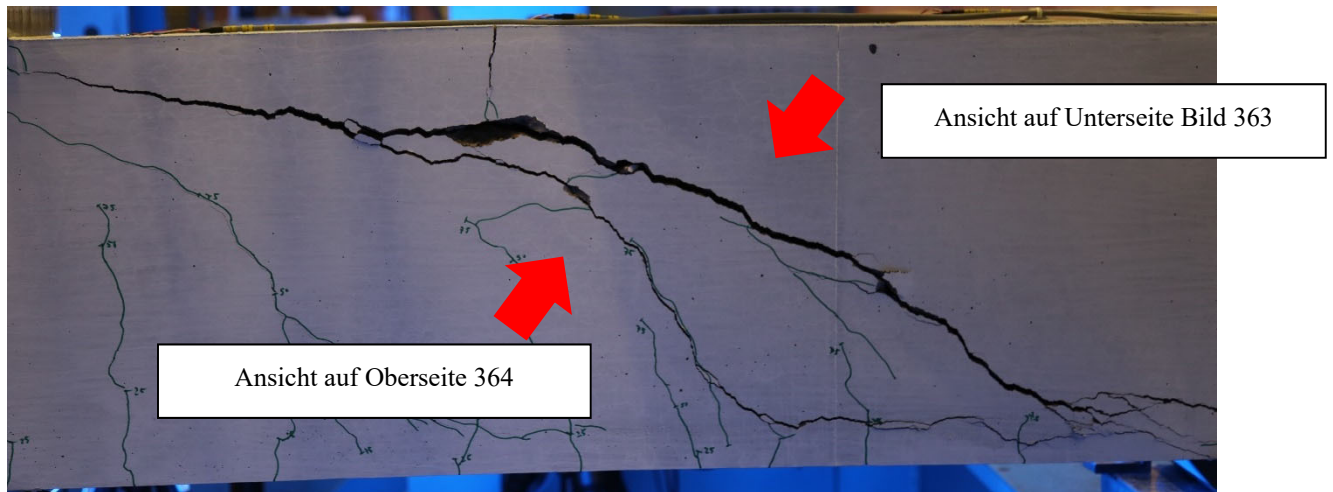


**Bild 360 B1.1 Oberseite 5**

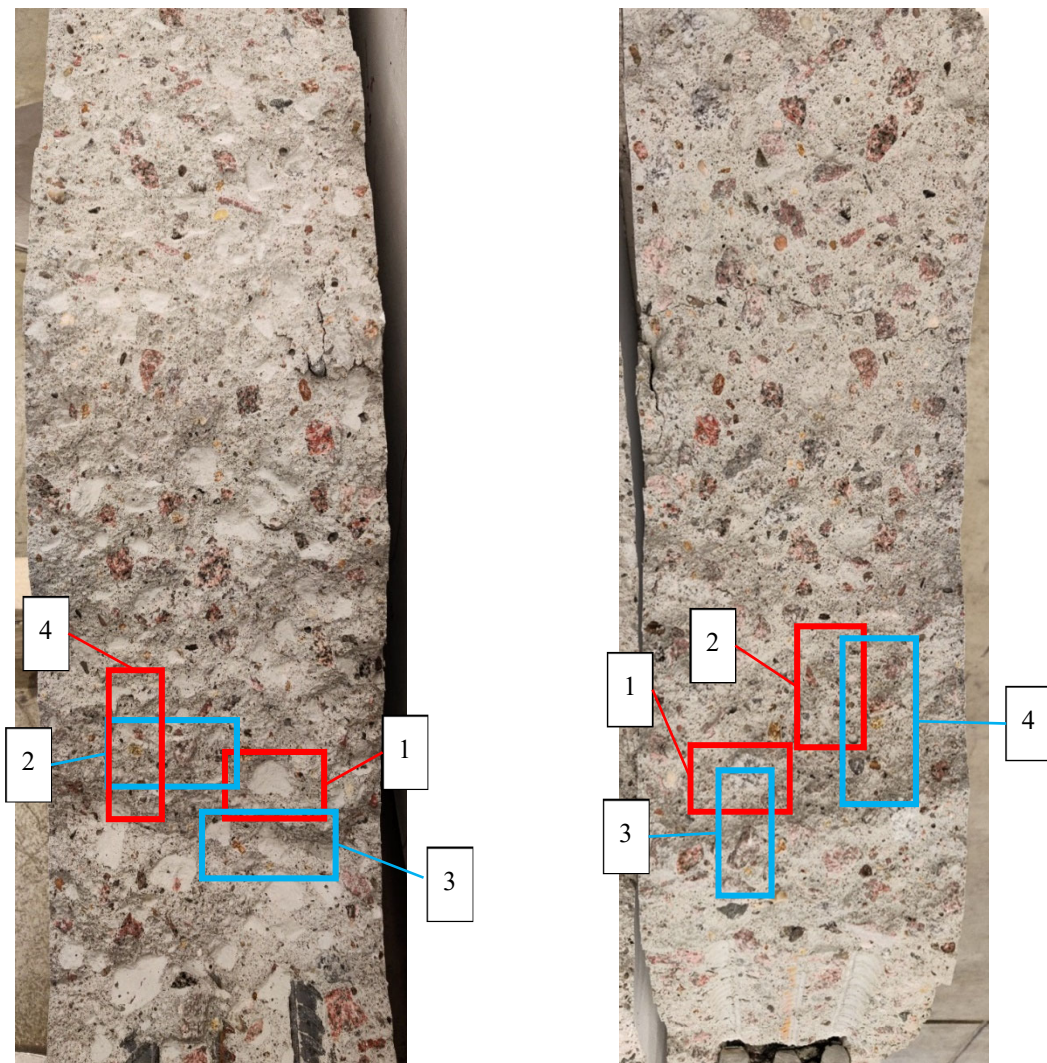


**Bild 361 B1.1 Unterseite 6**

6.3.2 B1.2

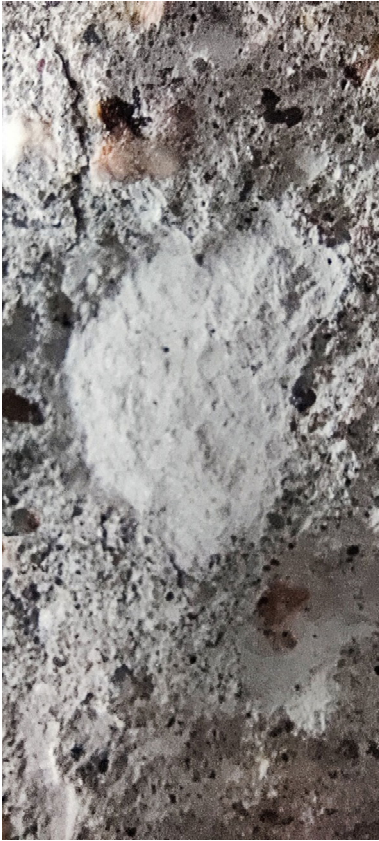


**Bild 362 B1.2 Ansichten auf Rissoberflächen**



**Bild 363 B1.2 Rissoberfläche Unterseite**

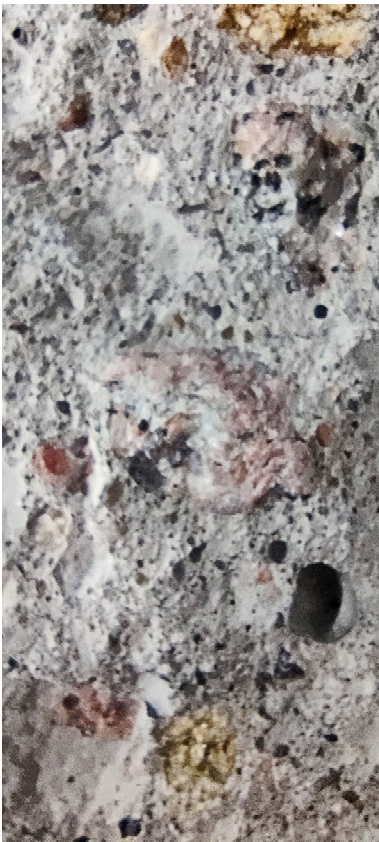
**Bild 364 B1.2 Rissoberfläche Oberseite**



**Bild 365 B1.2 Unterseite 1 (geneigt)**



**Bild 366 B1.2 Oberseite 1 (geneigt)**



**Bild 367 B1.2 Unterseite 2 (geneigt)**



**Bild 368 B1.2 Oberseite 2**



**Bild 369 B1.2 Unterseite 3 (geneigt)**



**Bild 370 B1.2 Oberseite 3 (geneigt)**

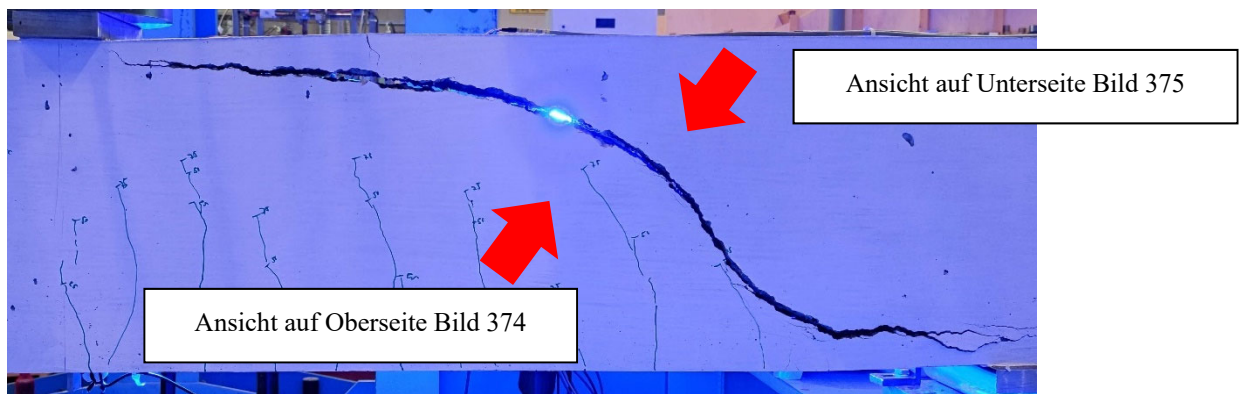


**Bild 371 B1.2 Unterseite 4**

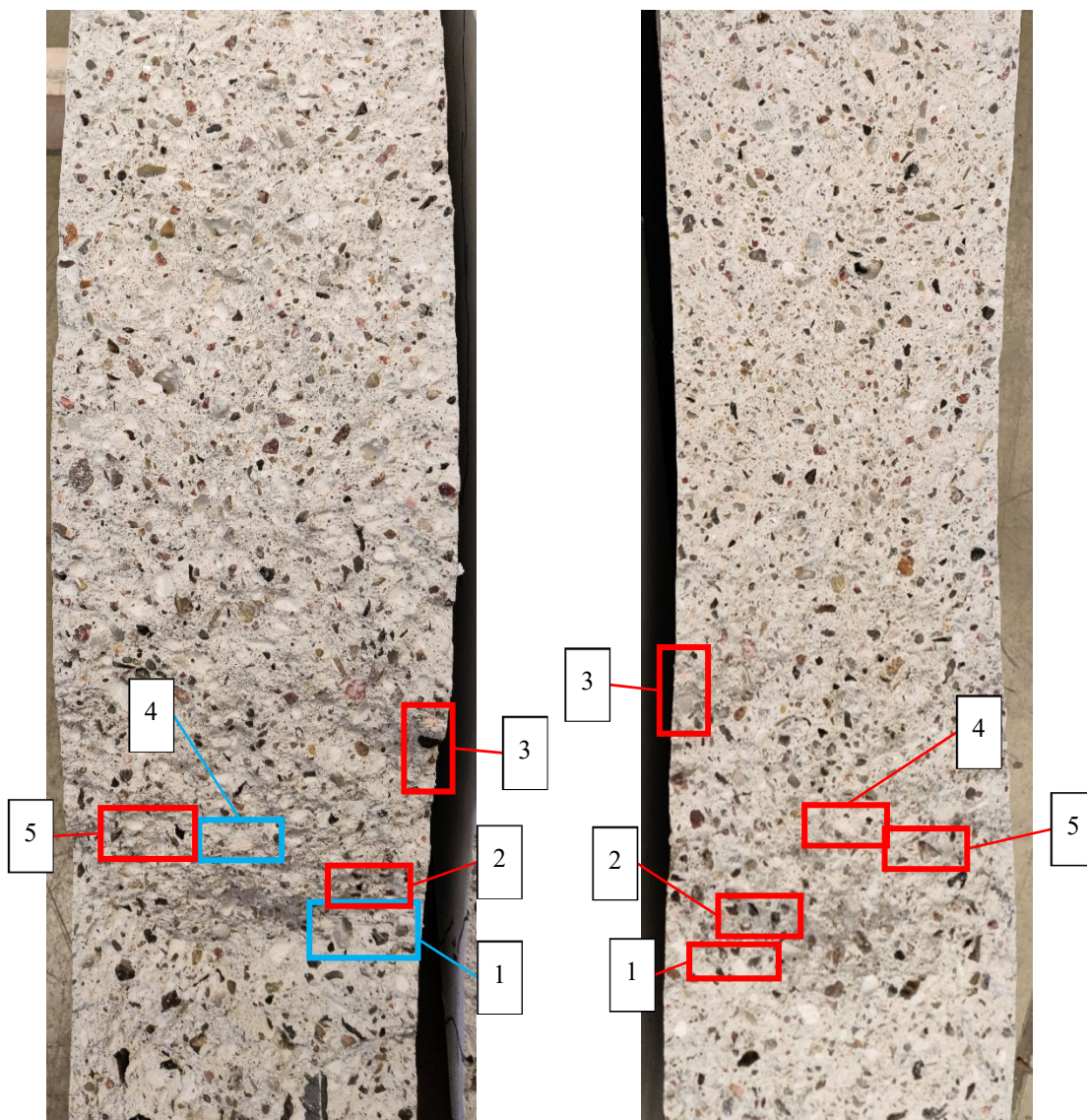


**Bild 372 B1.2 Oberseite 4**

6.3.3 B2.1



**Bild 373 B2.1 Ansichten auf Rissoberflächen**



**Bild 374 B2.1 Rissoberfläche Unterseite**

**Bild 375 B2.1 Rissoberfläche Oberseite**



**Bild 376 B2.1 Unterseite 1 (geneigt)**



**Bild 377 B2.1 Oberseite 1 (geneigt)**



**Bild 378 B2.1 Unterseite 2 (geneigt)**



**Bild 379 B2.1 Oberseite 2 (geneigt)**



**Bild 380 B2.1 Unterseite 3**



**Bild 381 B2.1 Oberseite 3**



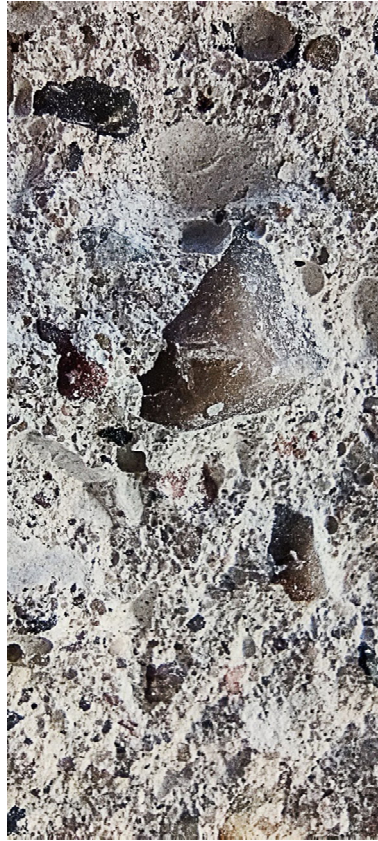
**Bild 382 B2.1 Unterseite 4 (geneigt)**



**Bild 383 B2.1 Oberseite 4 (geneigt)**

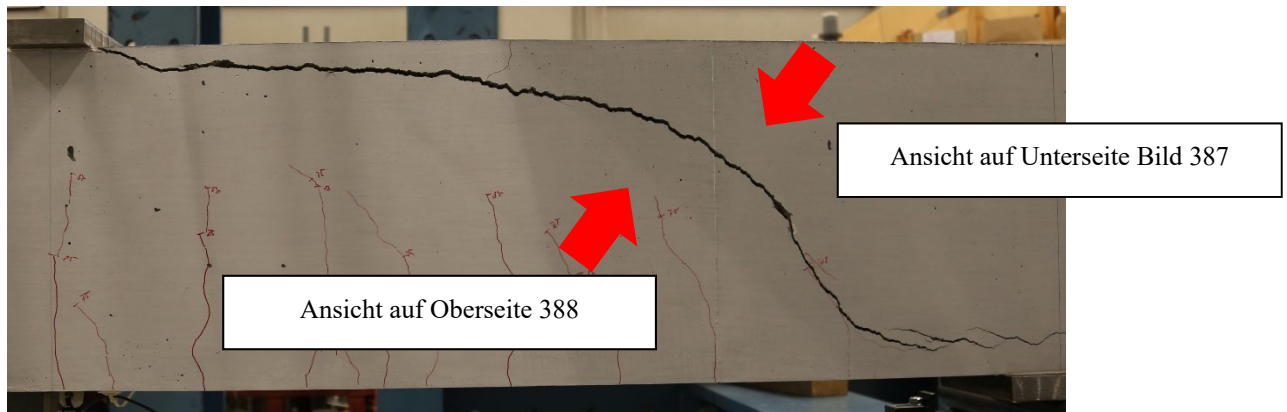


**Bild 384 B2.1 Unterseite 5 (geneigt)**



**Bild 385 B2.1 Oberseite 5 (geneigt)**

6.3.4 B2.2



**Bild 386 B2.2 Ansichten auf Rissoberflächen**



**Bild 387 B2.2 Rissoberfläche Unterseite**

**Bild 388 B2.2 Rissoberfläche Oberseite**



**Bild 389 B2.2 Unterseite 1 (geneigt)**



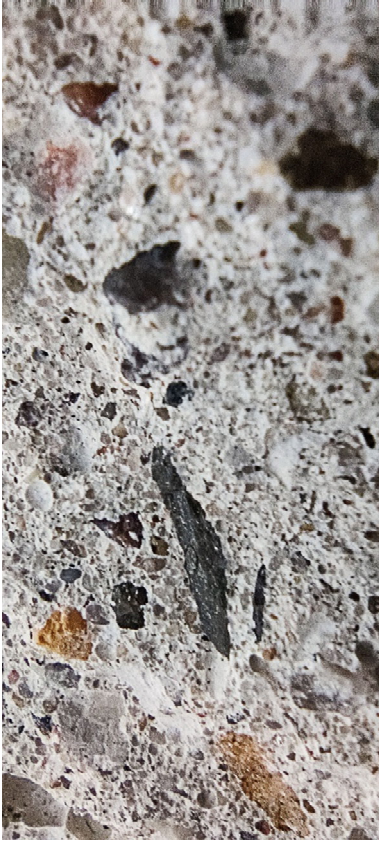
**Bild 390 B2.2 Oberseite 1 (geneigt)**



**Bild 391 B2.2 Unterseite 2 (geneigt)**



**Bild 392 B2.2 Oberseite 2 (geneigt)**



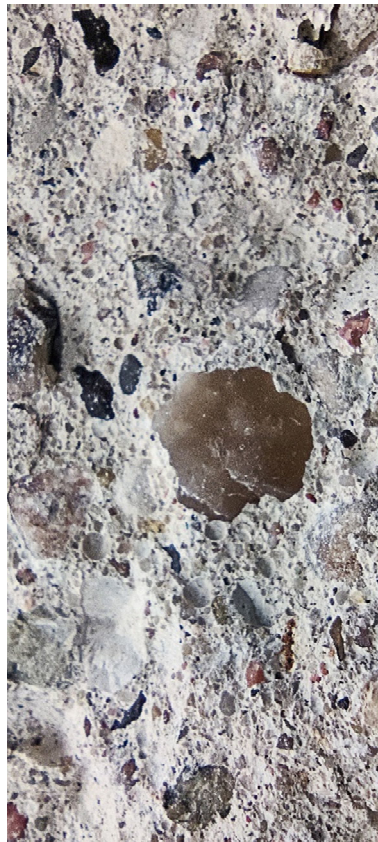
**Bild 393 B2.2 Unterseite 3 (geneigt)**



**Bild 394 B2.2 Oberseite 3 (geneigt)**

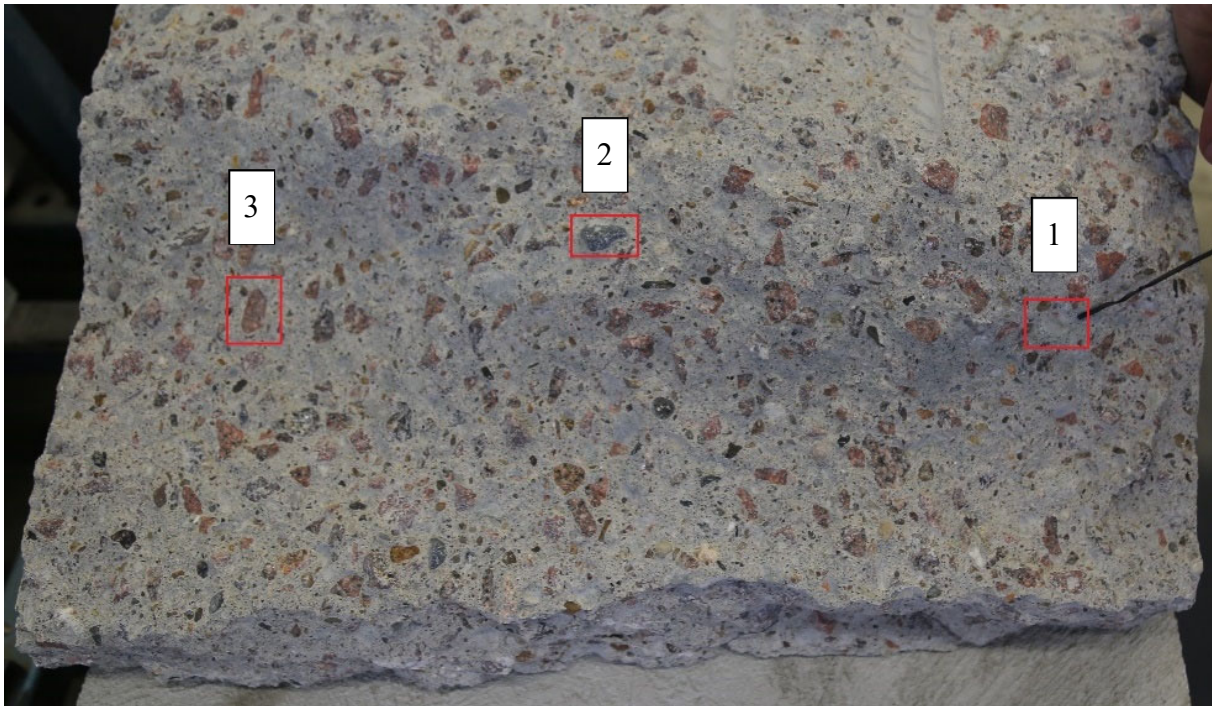


**Bild 395 B2.2 Unterseite 4 (geneigt)**

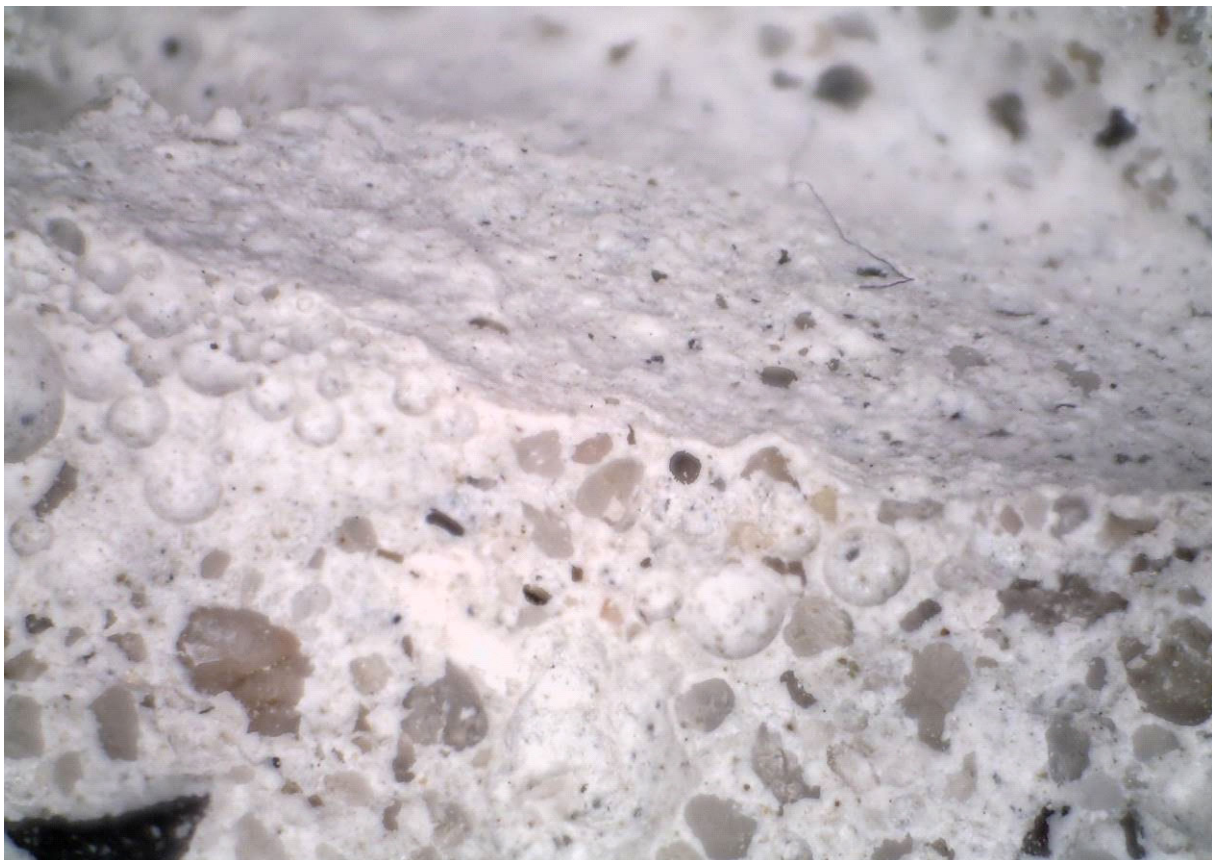


**Bild 396 B2.2 Oberseite 4 (geneigt)**

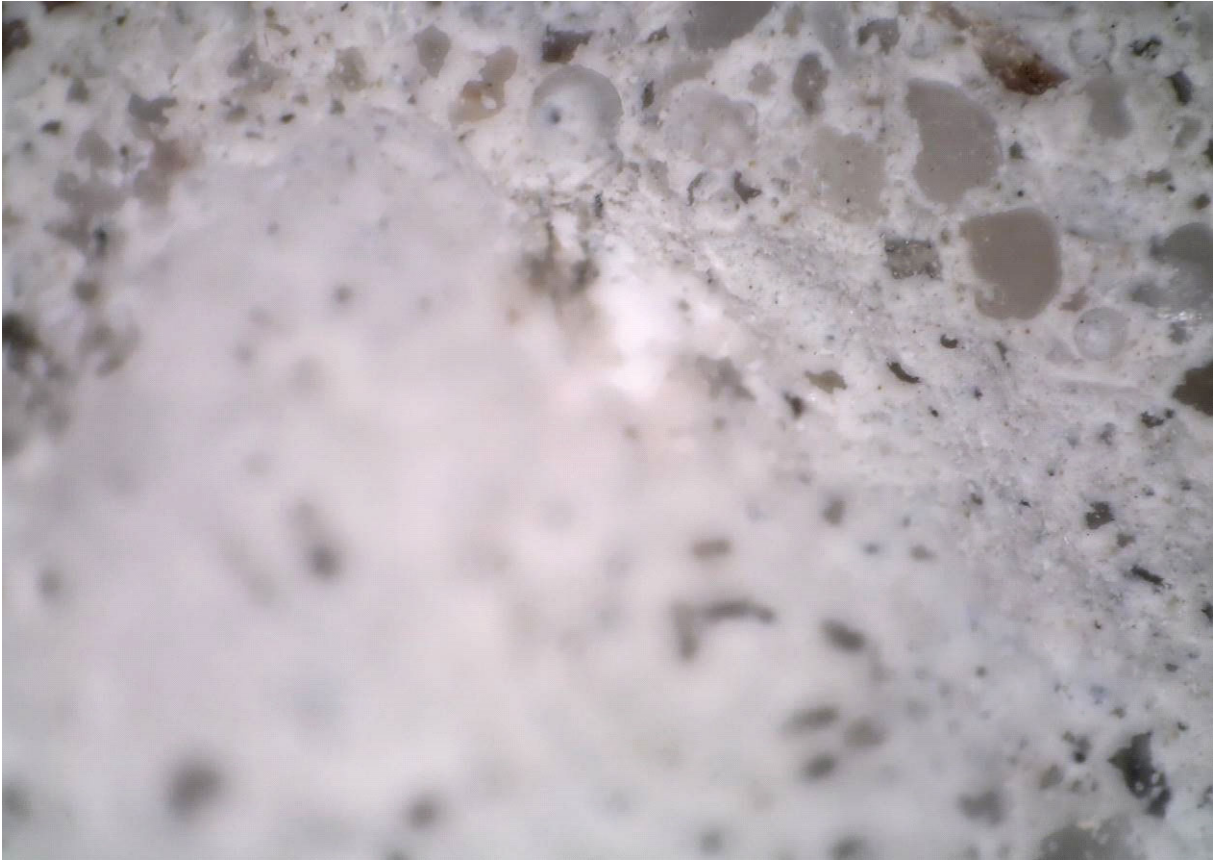
6.3.5 B3.1



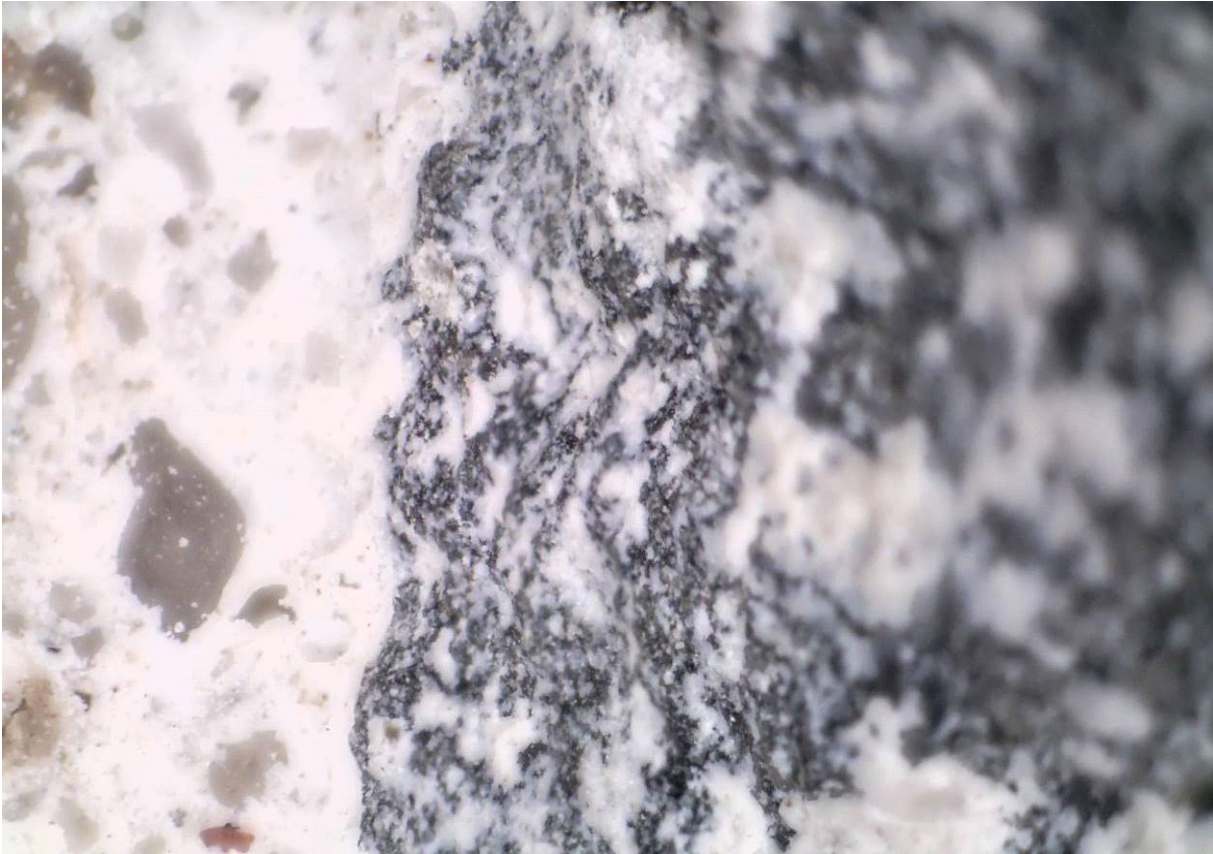
**Bild 397 B3.1 Rissoberfläche der Oberseite**



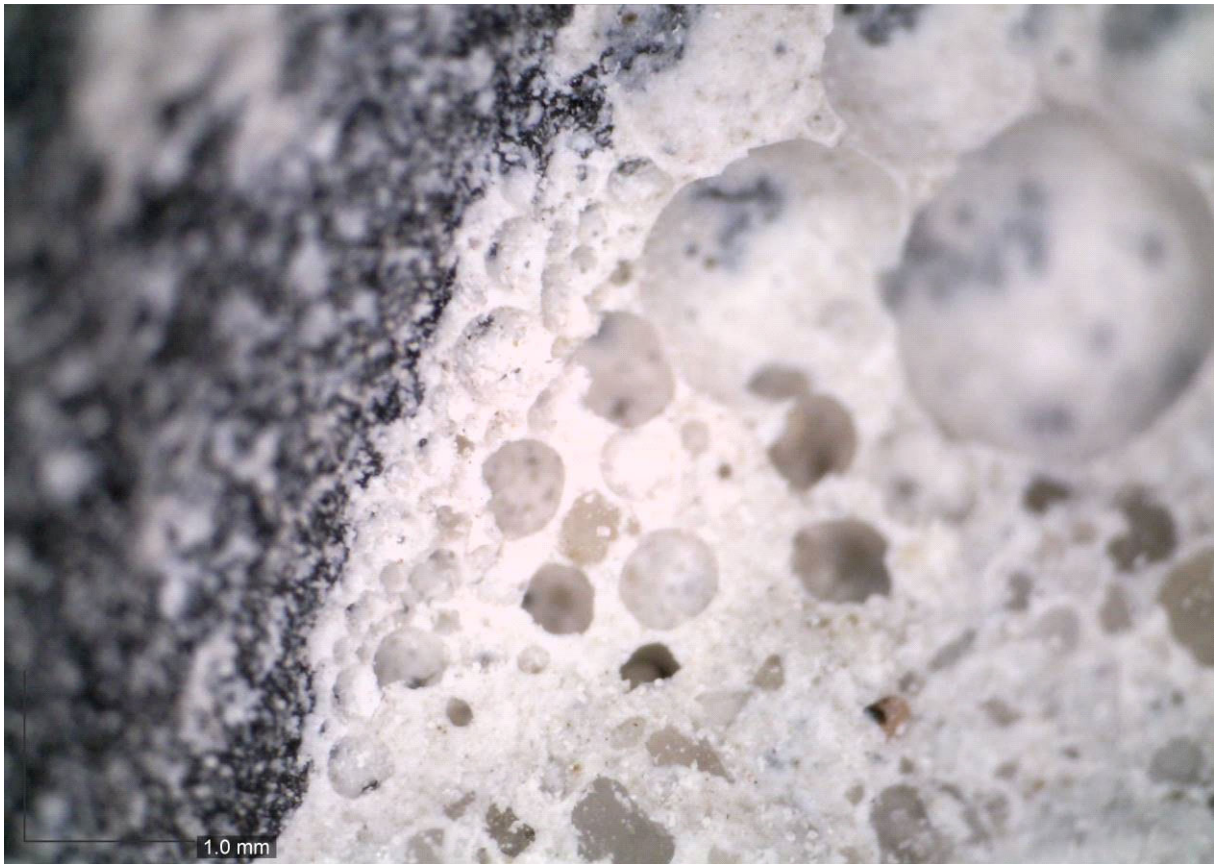
**Bild 398 Bereich 1, Rand der Vertiefung**



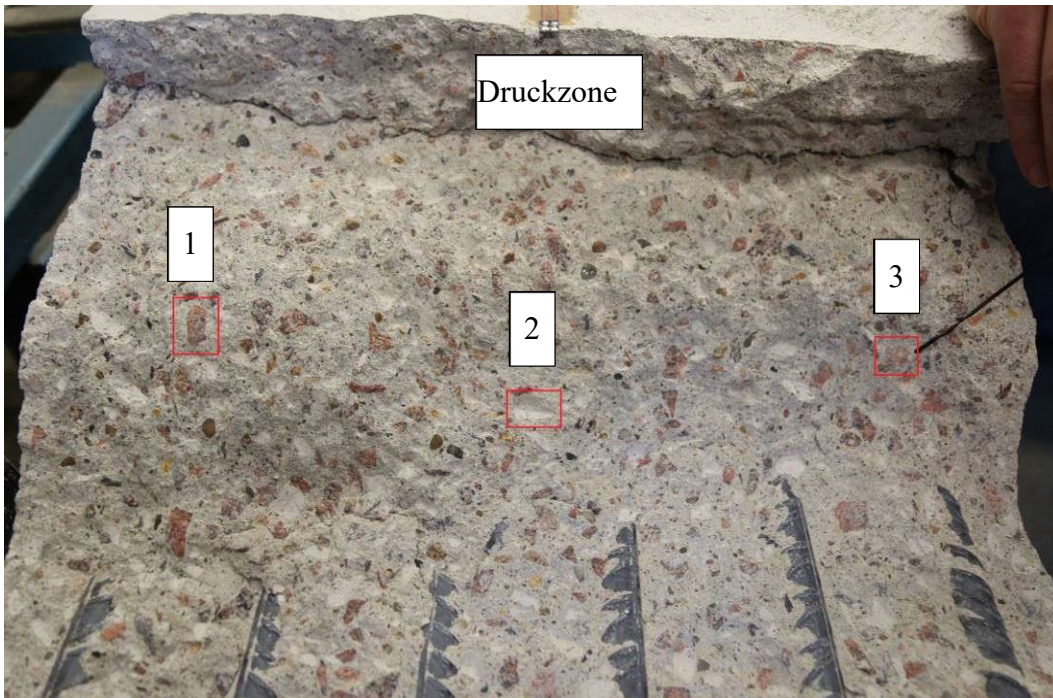
**Bild 399 Bereich 1, Rand der Vertiefung**



**Bild 400 Bereich 2, Einbettung des Kornes in die Zementmatrix**



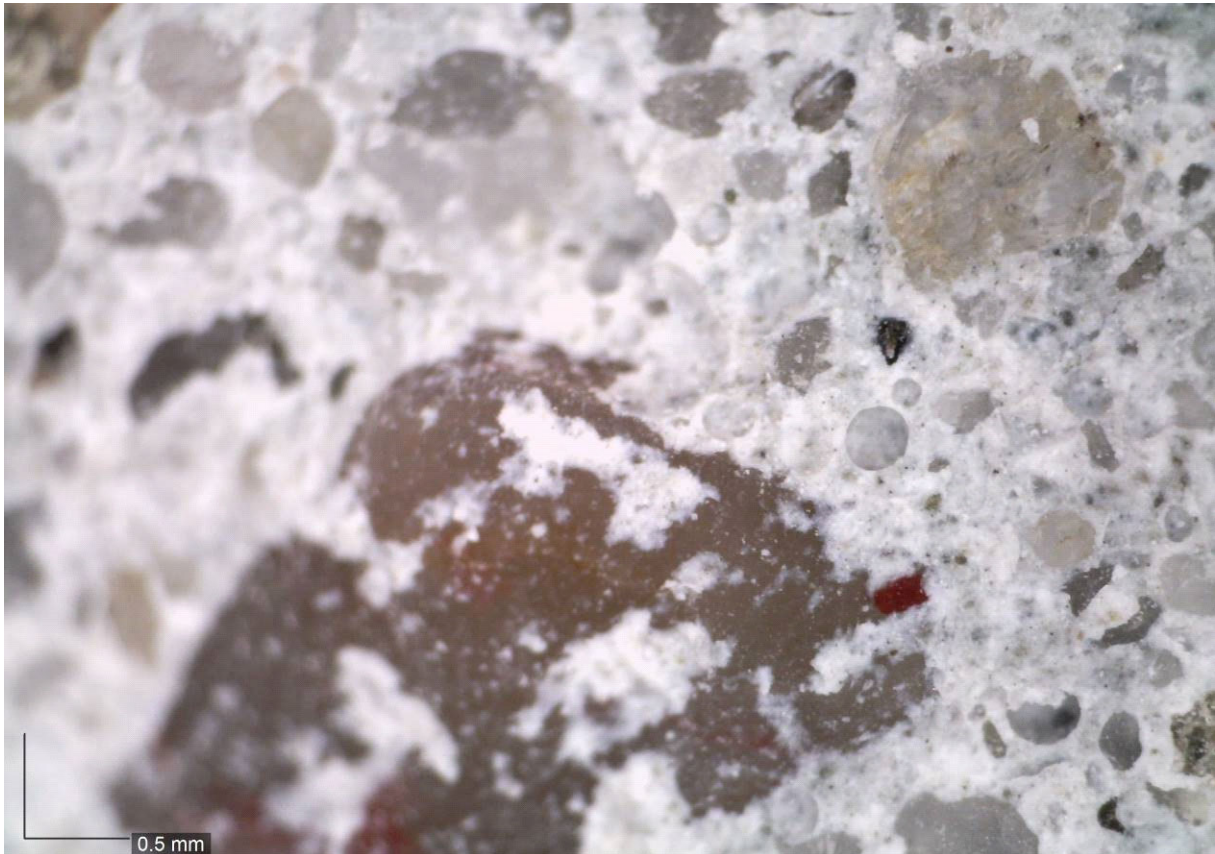
**Bild 401 Bereich 2, Einbettung des Korn in die Zementmatrix**



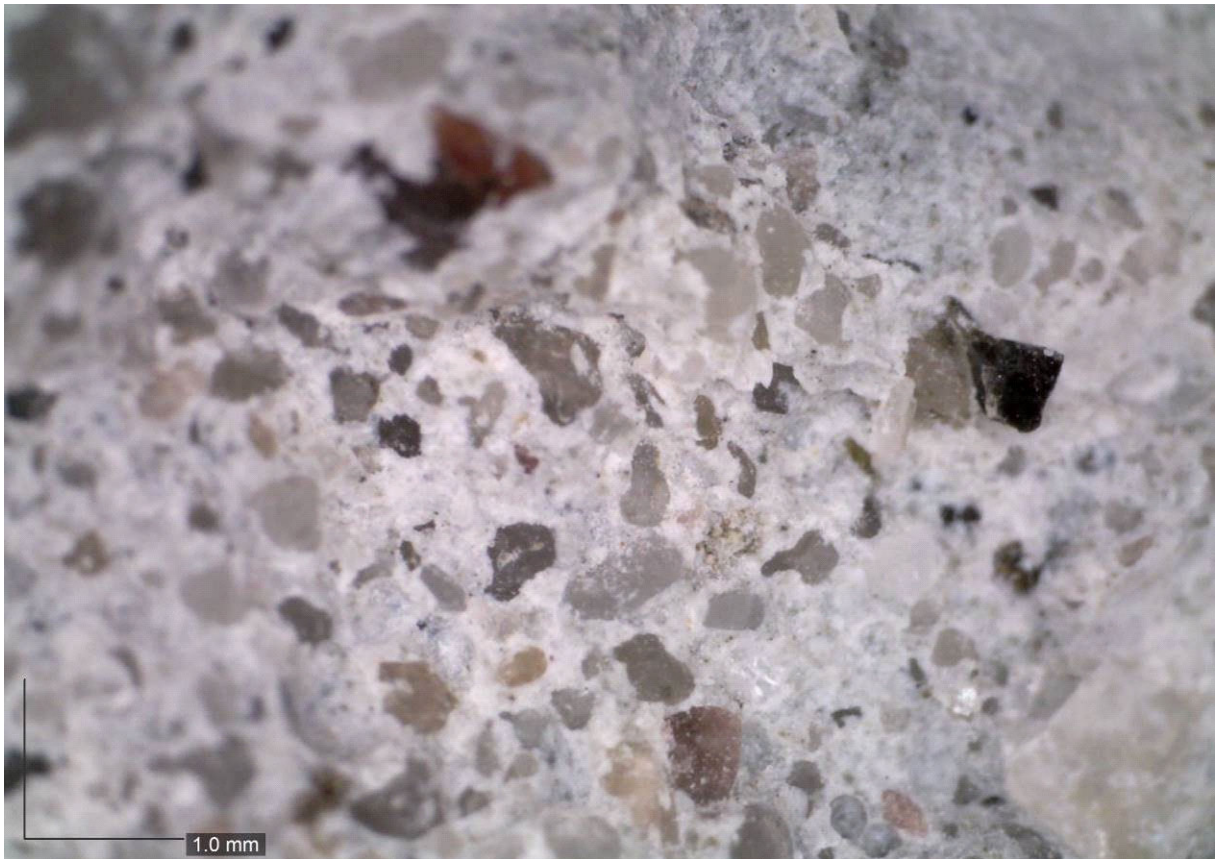
**Bild 402 B3.1 Rissoberfläche der Unterseite**



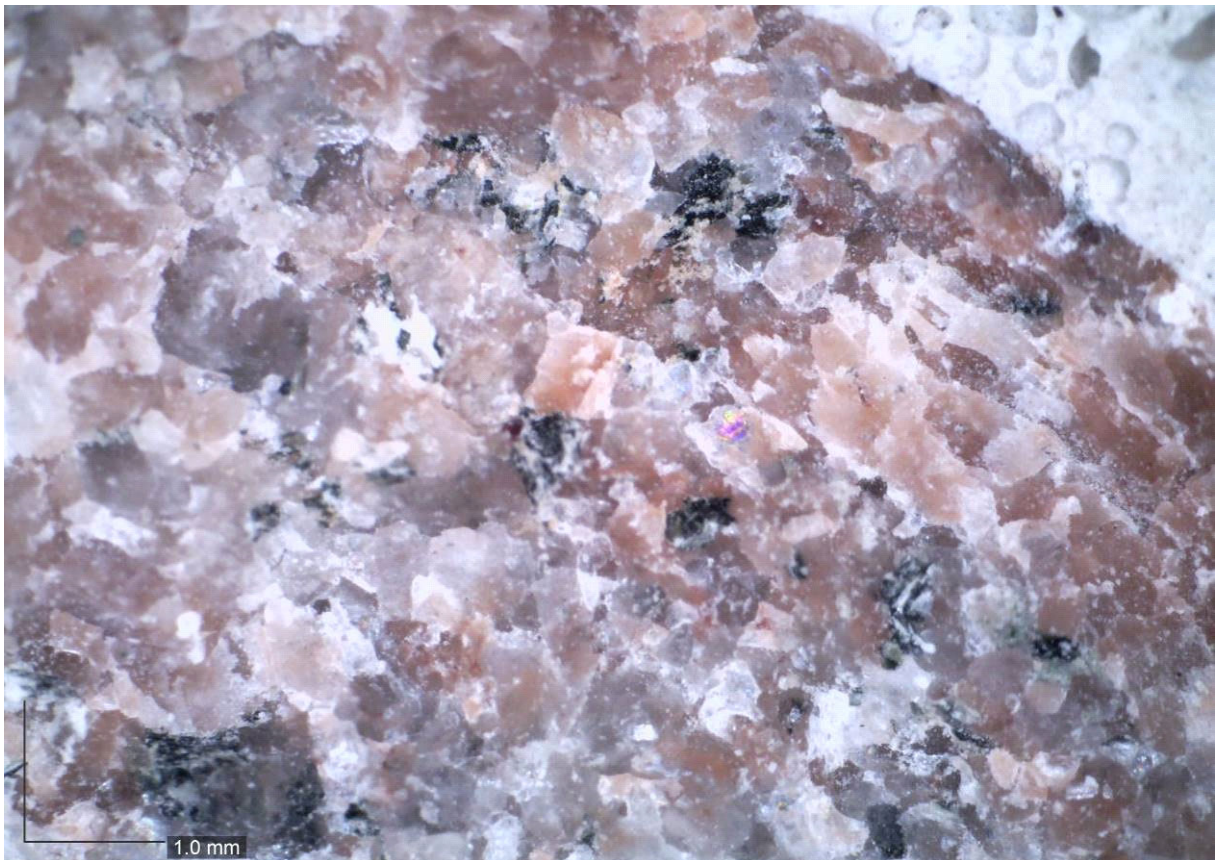
**Bild 403 Bereich 1, Einbettung des roten Korn in die Zementmatrix**



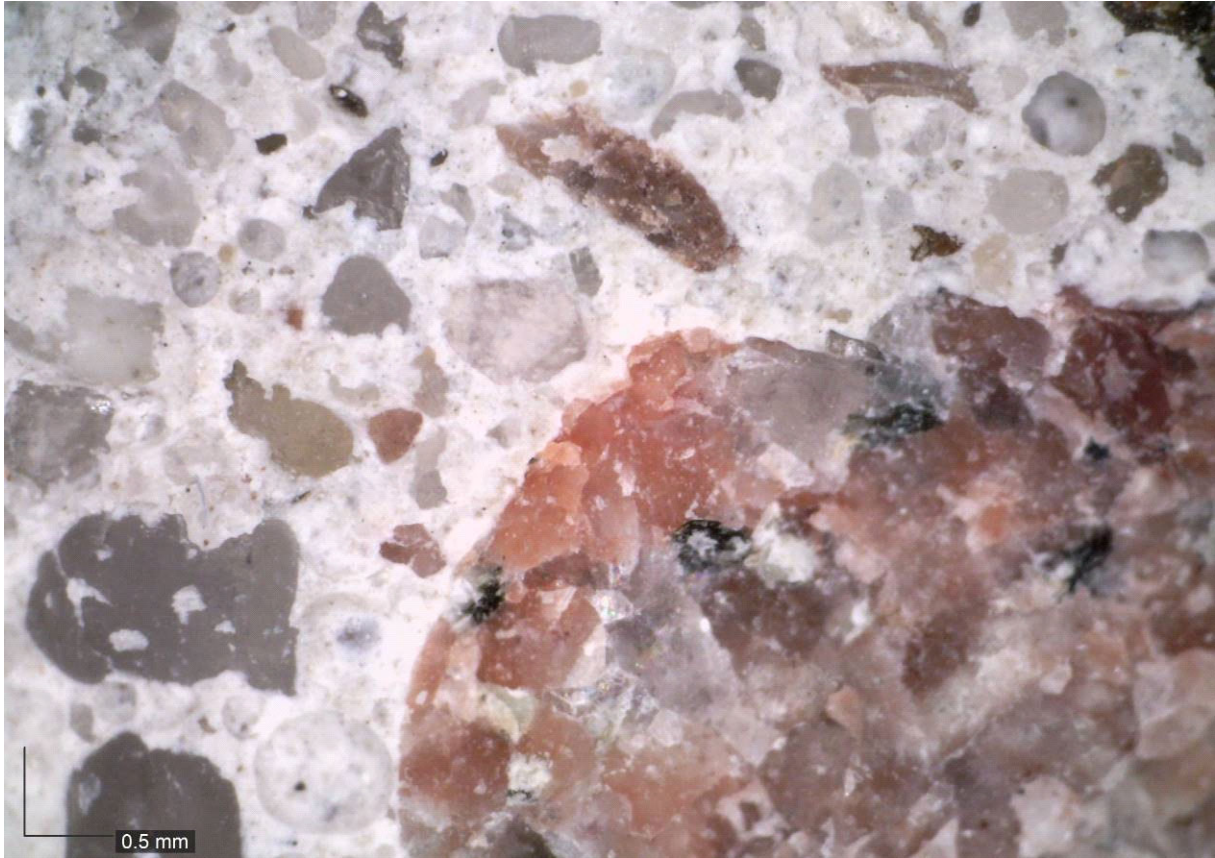
**Bild 404 Bereich 2, Vertiefung**



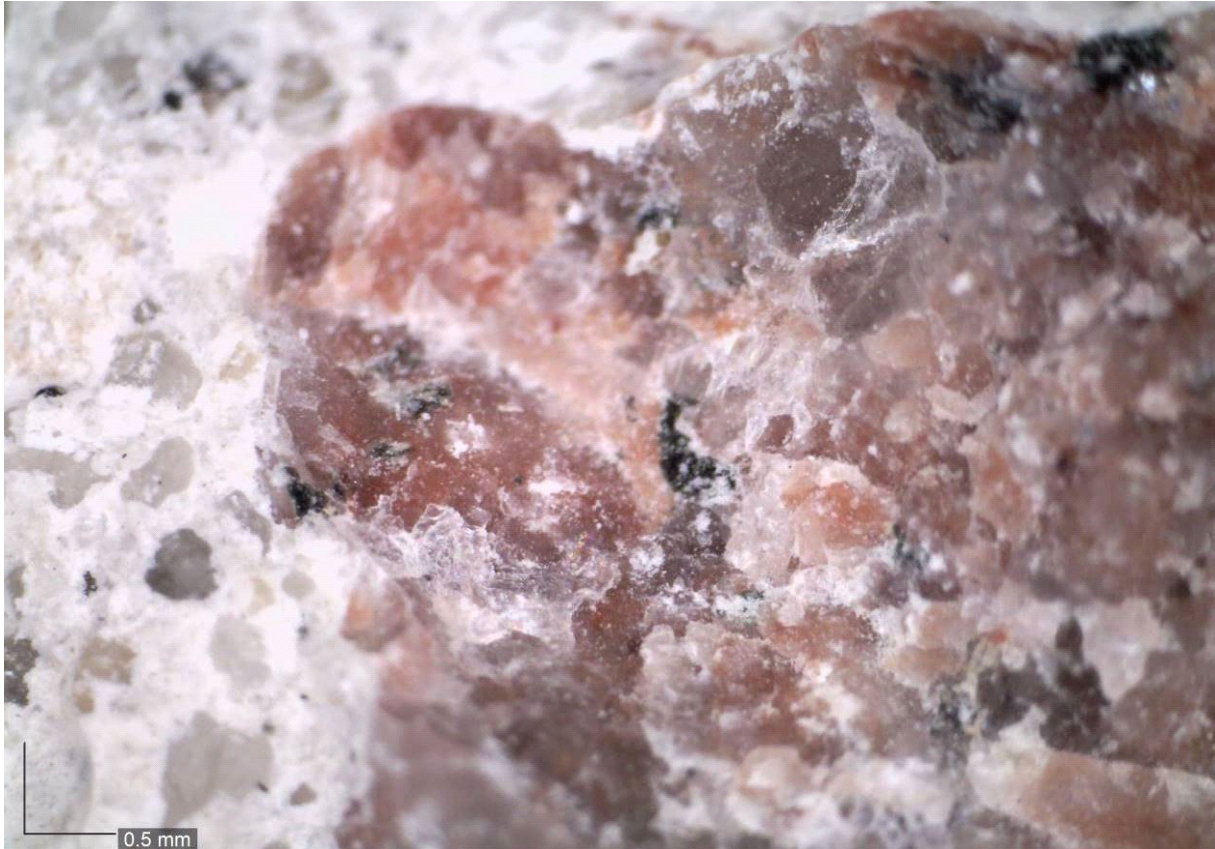
**Bild 405 Bereich 2, Vertiefung**



**Bild 406 Bereich 3, Bruchfläche des Kornes auf der Ober- und Unterseite**

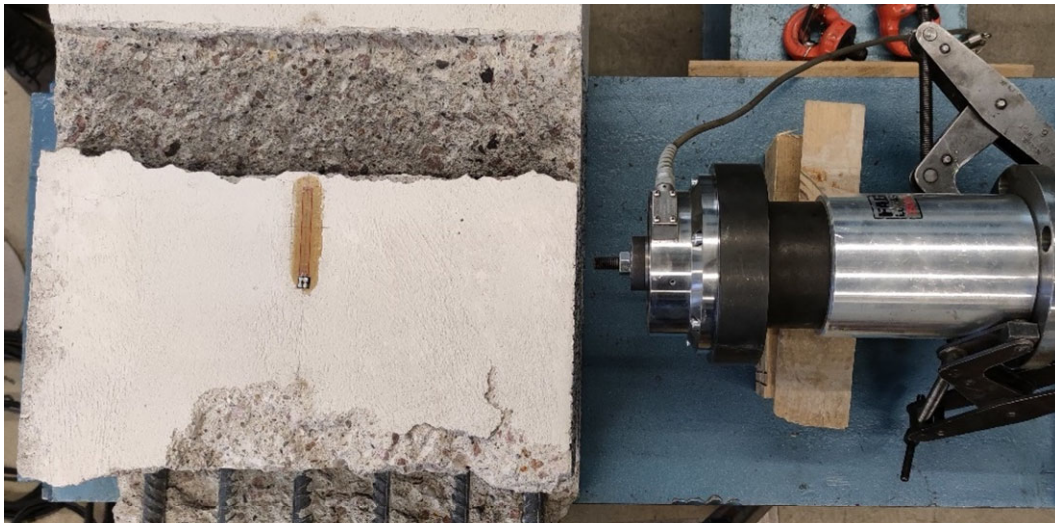


**Bild 407 Bereich 3, Bruchfläche des Kornes auf der Ober- und Unterseite**



**Bild 408 Bereich 3, Bruchfläche des Kornes auf der Ober- und Unterseite**

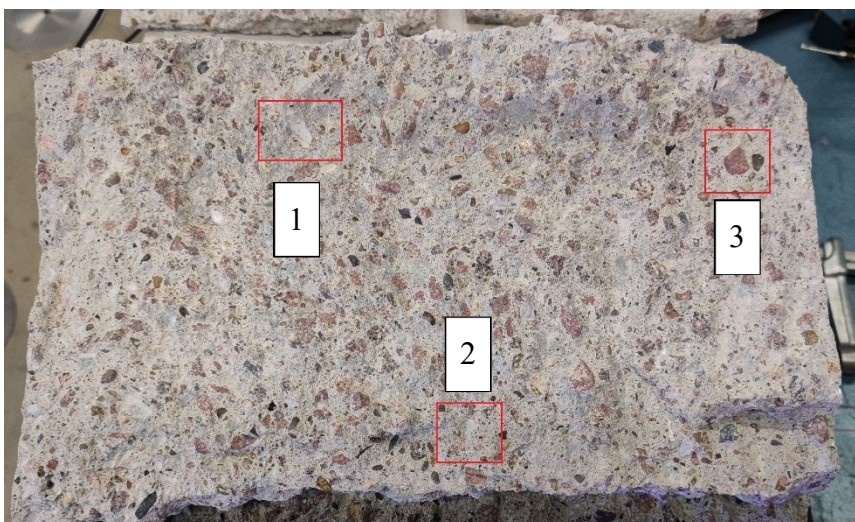
6.3.6 B3.2



**Bild 409 B3.2 Versuchszustand für Schubversuch aus der Draufsicht**



**Bild 410 B3.2 Versuchszustand für Schubversuch mit Auflast aus der Seitenansicht**



**Bild 411 B3.2 Übersicht der oberen Rissoberfläche**



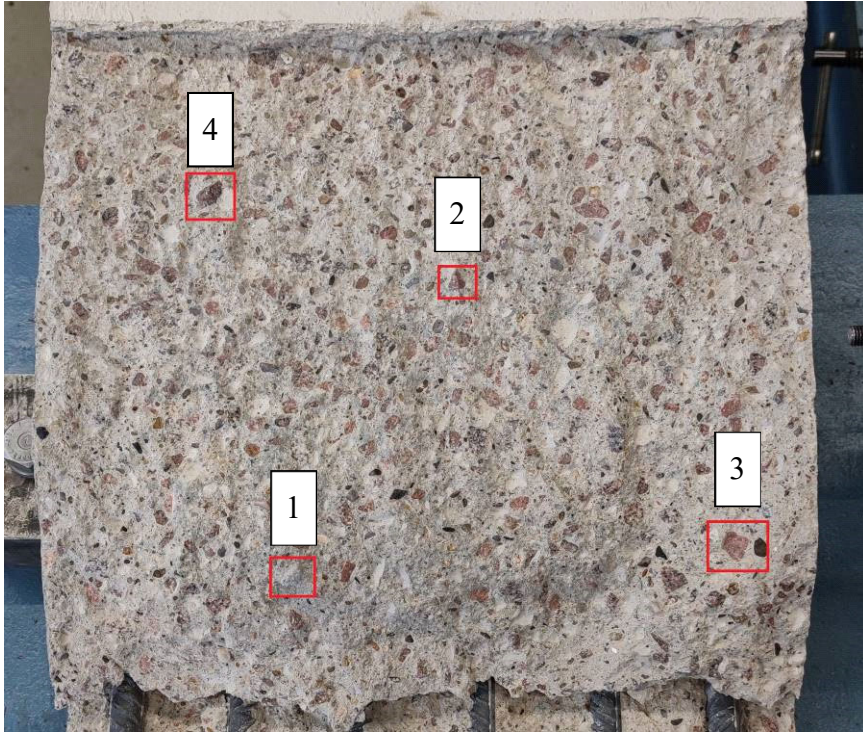
**Bild 412 Bereich 1, Vertiefung**



**Bild 413 Bereich 3, Einbettung eines Korns**



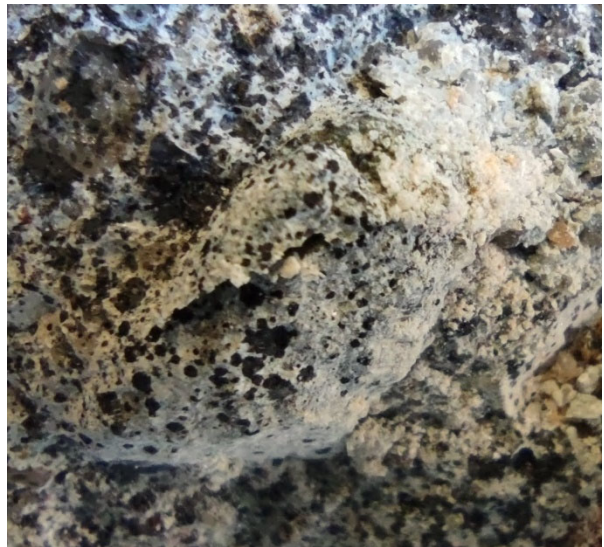
**Bild 414 Bereich 3 nach Versuchsdurchführung**



**Bild 415 B3.2 Übersicht der unteren Rissoberfläche**



**Bild 416 Bereich 1, Einbettung des Korns**



**Bild 417 Bereich 1, nach Schubversuch**



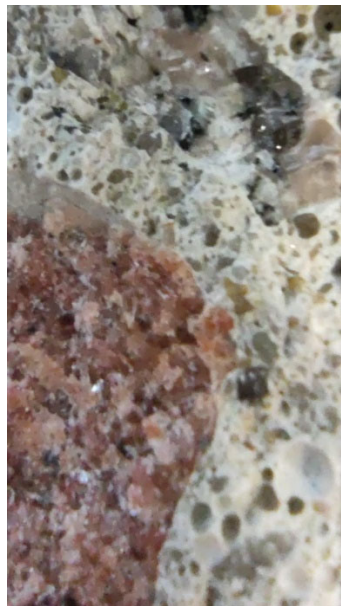
**Bild 418 Bereich 2, Einbettung des Korns**



**Bild 419 Bereich 2, nach Schubversuch**



**Bild 420 Bereich 3**



**Bild 421 Bereich 3**



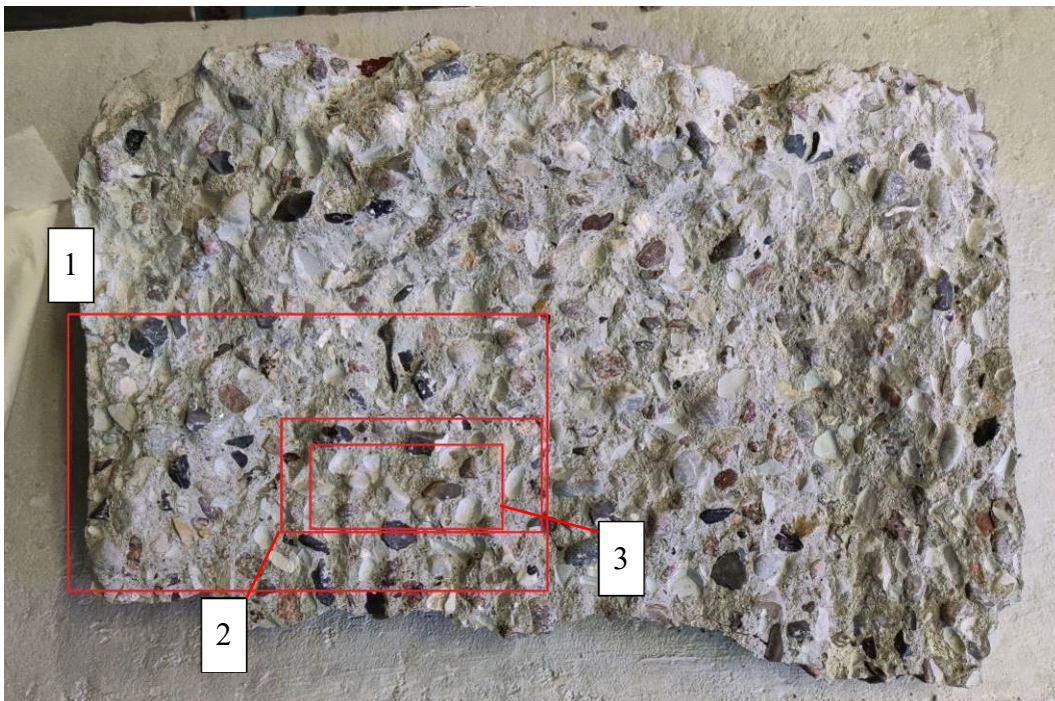
**Bild 422 Bereich 3, nach Belastung**



**Bild 423 Bereich 4 Einbettung Korn**

### 6.3.7 B5.1

Versuchsaufbau wie bei B3.2



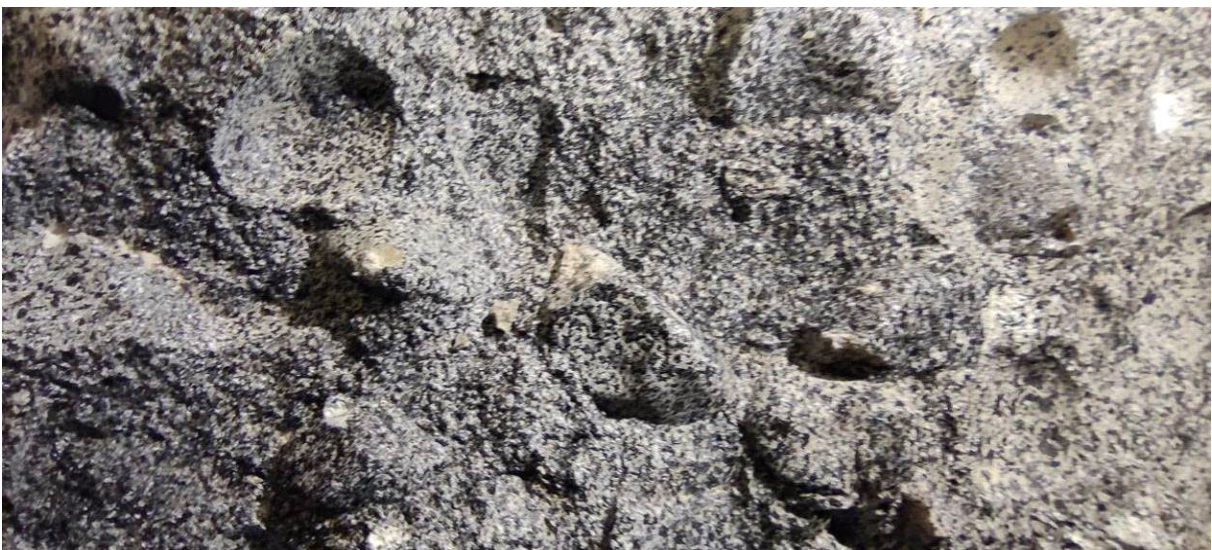
**Bild 424 B5.1 Übersicht der oberen Rissoberfläche**



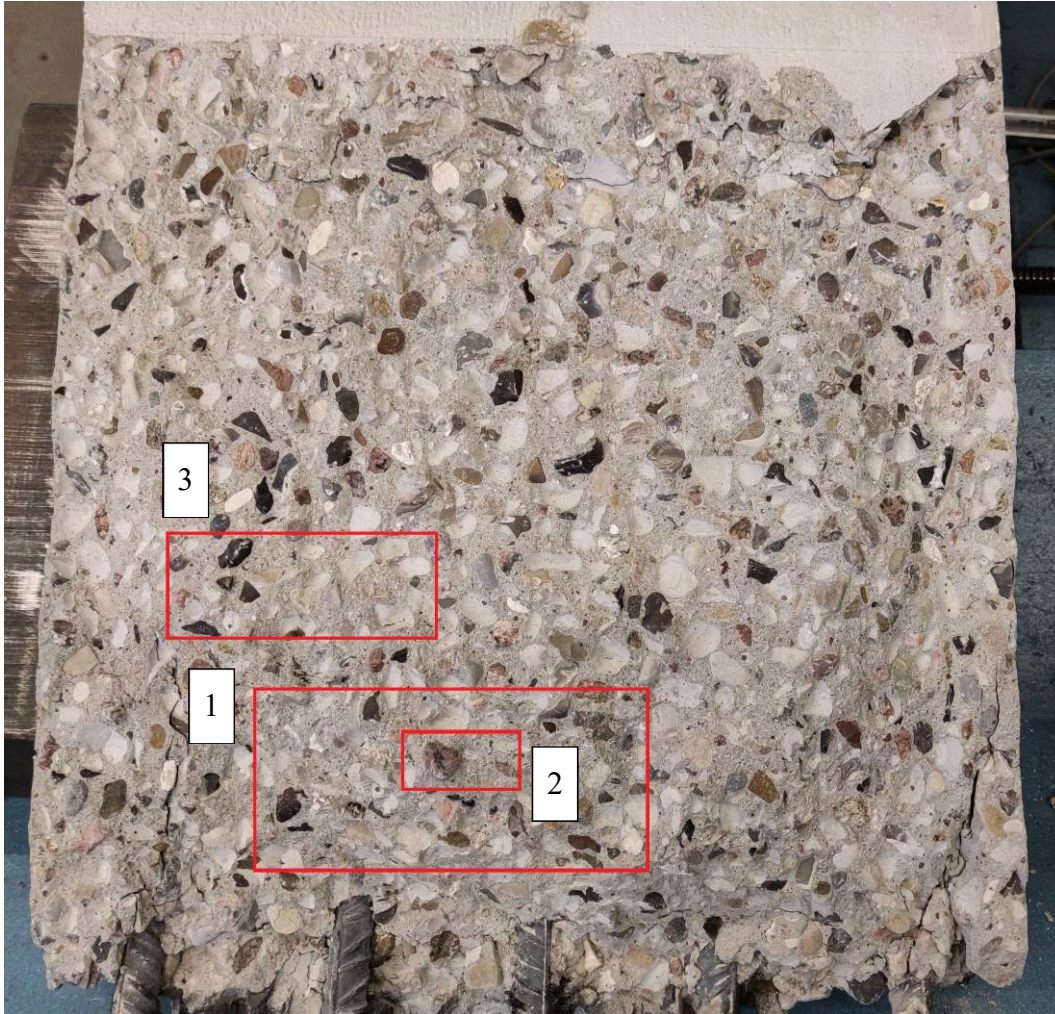
**Bild 425 Bereich 1**



**Bild 426 Bereich 2**



**Bild 427 Bereich 3**



**Bild 428 B5.1 Übersicht der unteren Rissoberfläche**



**Bild 429 Bereich 1, nach Schubversuch**



**Bild 430 Bereich 2, nach Schubversuch**



**Bild 431 Bereich 3, nach Schubversuch**



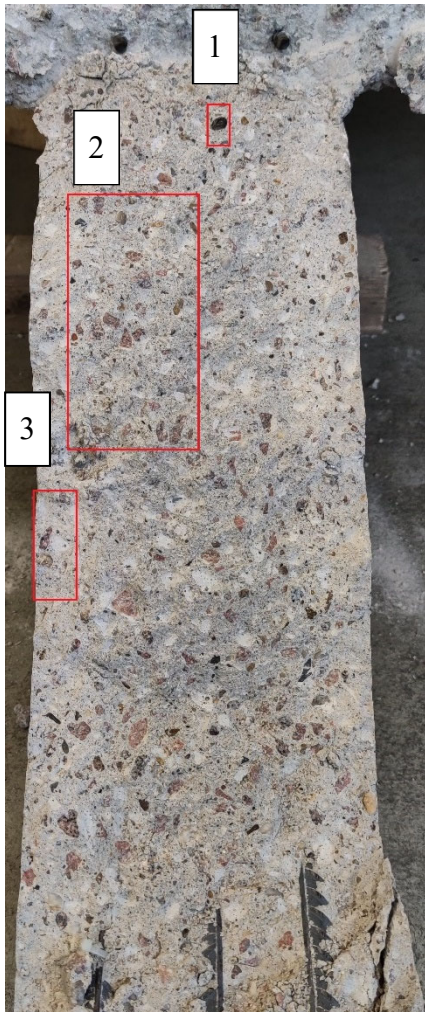
**Bild 432 Übersicht der oberen Rissoberfläche**



**Bild 433 Bereich 1**



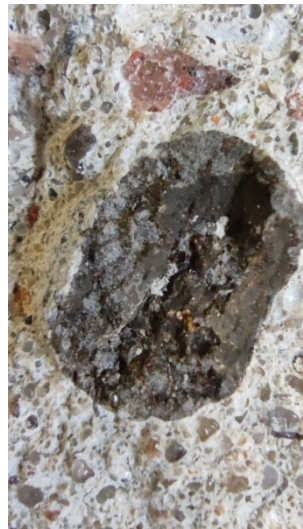
**Bild 434 Bereich 2**



**Bild 435 Übersicht der oberen Rissoberfläche**



**Bild 436 Bereich 3**



**Bild 437 Bereich 1**



**Bild 438 Bereich 2**

6.3.9 B7.2.2



**Bild 439 B7.2.2 obere Rissoberfläche**



**Bild 440 B7.2.2 untere Rissoberfläche**

## 6.4 Daten zu Versuchsdurchführungen

|                 |                                      |            |            |                 |            |            |
|-----------------|--------------------------------------|------------|------------|-----------------|------------|------------|
| Nr.             | Balken ohne Querkraftbewehrung       | B1         | B2         | B3              | B4         | B5         |
| Typ             |                                      | I          | I          | II              | II         | II         |
| Beton           |                                      | TB II      | EH I.II    | TB I            | EH I.I     | EH II      |
| Betoniert am    |                                      | 07.05.2021 | 01.04.2021 | 23.09.2020      | 11.12.2020 | 01.02.2021 |
| RILEM am        |                                      | 04.06.2021 | 29.04.2021 | 21.10.2020      | 12.01.2021 | 01.03.2021 |
| Alter RILEM [d] |                                      | 28         | 28         | 28              | 32         | 28         |
| Parameter am    |                                      | 03.06.2021 | 19.05.2021 | 16.11.2020      | 19.01.2021 | 18.03.2021 |
| Alter [d]       |                                      | 27         | 48         | 54              | 39         | 45         |
| 1. Versuch am   | 02.06.2021                           | 20.05.2021 | 09.03.2021 | 12.03.2021      | 17.03.2021 |            |
| Alter [d]       | 26                                   | 49         | 167        | 91              | 44         |            |
| 2. Versuch am   | 03.06.2021                           | 21.05.2021 | 10.03.2021 | 16.03.2021      | 19.03.2021 |            |
| Alter [d]       | 27                                   | 50         | 168        | 95              | 46         |            |
| Nr.             | Plattenbalken mit Querkraftbewehrung | B6         | B7         | B7 <sup>3</sup> | B8         | B9         |
| Typ             |                                      | III        | III        | III             | III        | IV         |
| Beton           |                                      | TB I       | TB I       | TB I            | EH I.I     | TB II      |
| Betoniert am    |                                      | 23.09.2020 | 23.09.2020 | 23.09.2020      | 11.12.2020 | 07.05.2021 |
| RILEM am        |                                      | 21.10.2020 | 21.10.2020 | 21.10.2020      | 12.01.2021 | 04.06.2021 |
| Alter [d]       |                                      | 28         | 28         | 28              | 32         | 28         |
| Parameter am    |                                      | 16.11.2020 | 16.11.2020 | 16.11.2020      | 19.01.2021 | 03.06.2021 |
| Alter [d]       |                                      | 54         | 54         | 54              | 39         | 27         |
| 1. Versuch am   | 13.11.2020                           | 27.11.2020 | 13.01.2021 | 19.01.2021      | 17.06.2021 |            |
| Alter [d]       | 51                                   | 65         | 112        | 39              | 41         |            |
| 2. Versuch am   | 17.11.2020                           | 01.12.2020 | 12.01.2021 | 21.01.2021      | 18.06.2021 |            |
| Alter [d]       | 55                                   | 69         | 111        | 41              | 42         |            |
| Nr.             | Balken unter Torsionsbeanspruchung   | B10        | B11        | B12             | B13        | B14        |
| Typ             |                                      | V          | V          | V               | V          | VI         |
| Beton           |                                      | TB I       | EH III     | TB II           | TB II      | TB I       |
| Betoniert am    |                                      | 23.09.2020 | 01.02.2021 | 07.05.2021      | 07.05.2021 | 23.09.2020 |
| RILEM am        |                                      | 21.10.2020 | 01.03.2021 | 04.06.2021      | 04.06.2021 | 21.10.2020 |
| Alter [d]       |                                      | 28         | 28         | 28              | 28         | 28         |
| Parameter am    |                                      | 16.11.2020 | 28.10.2021 | 03.06.2021      | 03.06.2021 | 16.11.2020 |
| Alter [d]       | 54                                   | 269        | 27         | 27              | 54         |            |
| Versuch am      | 22.10.2021                           | 21.10.2021 | 22.10.2021 | 21.10.2021      | 20.10.2021 |            |
| Alter [d]       | 394                                  | 262        | 168        | 167             | 392        |            |

<sup>3</sup> Wiederbelastungsversuche

## 6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Materialprüfung, sowie der Versuche, werden im Folgenden in tabellarischer Form dargestellt.

**Tabelle 27 Versuchsergebnisse der Rechteckbalkenversuche B1-B5**

| Nr.           |                      | Balken<br>ohne<br>Querkraft-<br>bewehrung | B1         | B2         | B3         | B4         | B5         |
|---------------|----------------------|---|------------|------------|------------|------------|------------|
| $d$           | [m]                  |   | 0,37       | 0,37       | 0,17       | 0,17       | 0,17       |
| $a_g$         | [mm]                 |   | 16         | 8          | 16         | 8          | 16         |
| $f_{cm}$      | [N/mm <sup>2</sup> ] |   | 45,6       | 33,7       | 43,1       | 40,4       | 52,0       |
| $f_{ct,sp}$   | [N/mm <sup>2</sup> ] |   | 3,55       | 3,16       | 3,35       | 3,53       | 4,34       |
| $E_{c.0}$     | [N/mm <sup>2</sup> ] |   | 28.290     | 23.353     | 27.670     | 26.127     | 30.060     |
| $E_{c.s}$     | [N/mm <sup>2</sup> ] |   | 32.940     | 26.443     | 31.477     | 29.350     | 34.787     |
| $G_f$         | [N/m]                |   | 102,1      | 76,4       | 95,3       | 75,3       | 139,7      |
| $R_{m,sl}$    | [MPa]                |   | 648,1      | 648,1      | 648,1      | 648,1      | 648,1      |
| $A_{sl}$      | [cm <sup>2</sup> ]   |   | 3Ø20       | 3Ø20       | 6Ø20       | 5Ø20       | 5Ø20       |
|               |                      |   | 9,42       | 9,42       | 18,80      | 15,70      | 15,70      |
| $\rho_{sl}$   | [%]                  |   | 16,97      | 16,97      | 24,58      | 20,52      | 20,52      |
| $\omega_{sl}$ | [-]                  |   | 0,24       | 0,33       | 0,37       | 0,33       | 0,26       |
|               |                      |   | 1. Versuch |            |            |            |            |
| $F_{max}$     | [kN]                 |   | 106,7      | 108,4      | 172,8      | 154,2      | 162,7      |
| $V_{max}$     | [kN]                 |   | 69,7       | 70,8       | 142,4      | 127,1      | 134,1      |
| $V_{Wal}$     | [kN]                 |   | 0,8 (1%)   | 13,7 (19%) | 26,0 (18%) | 9,2 (7%)   | 17,3 (13%) |
| $v_1$         | [√MPa]               |   | 0,186      | 0,220      | 0,284      | 0,261      | 0,243      |
| $v_2$         | [-]                  |   | 0,028      | 0,038      | 0,043      | 0,041      | 0,034      |
|               |                      |   | 2. Versuch |            |            |            |            |
| $F_{max}$     | [kN]                 |   | 109,0      | 100,0      | 172,0      | 166,8      | 149,7      |
| $V_{max}$     | [kN]                 |   | 71,2       | 65,3       | 141,8      | 137,5      | 123,4      |
| $V_{Wal}$     | [kN]                 |   | -0,9 (-1%) | 8,5 (13%)  | -14,4*     | 16,4 (12%) | 39,5 (32%) |
| $v_1$         | [√MPa]               | 0,190                                     | 0,203      | 0,282      | 0,283      | 0,224      |            |
| $v_2$         | [-]                  | 0,028                                     | 0,035      | 0,043      | 0,044      | 0,031      |            |

$$v_1 = \frac{V_{max}}{b \cdot d \cdot \sqrt{f_{cm}}}; v_2 = \frac{V_{max}}{b \cdot d \cdot f_{cm}}$$

\* Negative Rissreibung, die im flachen Rissabschnitt im Bereich der Rissspitze auftritt.  
Nicht plausibles Ergebnis

**Tabelle 28 Versuchsergebnisse der Plattenbalkenversuche B6-B9**

| Nr.           |                      | Plattenbalken<br>mit Querkraft-<br>bewehrung | B6            | B7            | B7 <sup>4</sup> | B8             | B9      |  |
|---------------|----------------------|--|---------------|---------------|-----------------|----------------|---------|--|
| $d$           | [m]                  |  | 0,332         | 0,362         |                 | 0,362          | 0,532   |  |
| $a_g$         | [mm]                 |  | 16            | 16            |                 | 8              | 16      |  |
| $f_{cm}$      | [N/mm <sup>2</sup> ] |  | 43,1          | 43,1          |                 | 38,0           | 45,6    |  |
| $f_{ct,sp}$   | [N/mm <sup>2</sup> ] |  | 3,35          | 3,35          |                 | 3,17           | 3,55    |  |
| $E_{c.0}$     | [N/mm <sup>2</sup> ] |  | 27.670        | 27.670        |                 | 25.217         | 28.290  |  |
| $E_{c.s}$     | [N/mm <sup>2</sup> ] |  | 31.477        | 31.477        |                 | 29.140         | 32.940  |  |
| $G_f$         | [N/m]                |  | 95,3          | 95,3          |                 | 75,3           | 102,1   |  |
| $R_{m,sw}$    | [MPa]                |  | 612,7         | 629,2         |                 | 629,2          | 612,7   |  |
| $a_{sw}$      | [cm <sup>2</sup> /m] |  | Ø10-100       | Ø8-300        |                 | Ø8-300         | Ø10-180 |  |
|               |                      |  | 15,71         | 3,33          |                 | 3,33           | 8,78    |  |
| $\rho_{sw}$   | [%o]                 |  | 7,86          | 1,67          |                 | 1,67           | 4,39    |  |
| $\omega_{sw}$ | [-]                  |  | 0,11          | 0,02          |                 | 0,03           | 0,06    |  |
| $R_{m,sl}$    | [MPa]                |  | 673,8         | 648,1         |                 | 648,1          | 651,1   |  |
| $A_{sl}$      | [cm <sup>2</sup> ]   |  | 6Ø28          | 3Ø20          |                 | 3Ø20           | 6Ø28    |  |
|               |                      |  | 36,9          | 9,42          |                 | 9,42           | 36,9    |  |
| $\rho_{sl}$   | [%o]                 |  | 11,11         | 2,60          |                 | 2,60           | 6,94    |  |
| $\omega_{sl}$ | [-]                  |  | 0,17          | 0,04          |                 | 0,04           | 0,10    |  |
|               |                      |  | 1. Versuch    |               |                 |                |         |  |
| $F_{max}$     | [kN]                 |  | 696,7         | 235,6         | 239,9           | 235,5          | 954,3   |  |
| $V_{max}$     | [kN]                 | 474,7  | 153,8         | 156,6         | 153,8           | 623,1          |         |  |
| $V_{Wal}$     | [kN]                 | 147,1<br>(31%)                               | 33,5<br>(22%) | 38,6<br>(25%) | 52,6<br>(34%)   | 66,8<br>(11%)  |         |  |
| $v_1$         | [√MPa]               | 1,089  | 0,324         | 0,329         | 0,345           | 0,867          |         |  |
| $v_2$         | [-]                  | 0,166  | 0,049         | 0,050         | 0,056           | 0,128          |         |  |
|               |                      |  | 2. Versuch    |               |                 |                |         |  |
| $F_{max}$     | [kN]                 | 735,3  | 237,8         | 240,1         | 236,0           | 954,5          |         |  |
| $V_{max}$     | [kN]                 | 501,0  | 155,3         | 156,8         | 154,1           | 623,2          |         |  |
| $V_{Wal}$     | [kN]                 | 82,5<br>(16%)                                | 25,4<br>(16%) | 29,0<br>(18%) | 0,0<br>(0%)     | -47,1<br>(-8%) |         |  |
| $v_1$         | [√MPa]               | 1,149  | 0,327         | 0,330         | 0,345           | 0,867          |         |  |
| $v_2$         | [-]                  | 0,175  | 0,050         | 0,050         | 0,056           | 0,128          |         |  |

<sup>4</sup> Wiederbelastungsversuche

**Tabelle 29 Versuchsergebnisse der Torsionsversuche B10-B14**

| Nr.           |                      | Balken unter<br>Torsions-<br>beanspruchung | B10    | B11    | B12    | B13    | B14     |
|---------------|----------------------|--|--------|--------|--------|--------|---------|
| $a_g$         | [mm]                 |  | 16     | 16     | 16     | 16     | 16      |
| $f_{cm}$      | [N/mm <sup>2</sup> ] |  | 45,6   | 65,1   | 57,1   | 57,1   | 45,6    |
| $f_{ct,sp}$   | [N/mm <sup>2</sup> ] |  | 3,84   | 4,47   | 4,17   | 4,17   | 3,84    |
| $E_{c,0}$     | [N/mm <sup>2</sup> ] |  | 26.823 | 31.773 | 32.437 | 32.437 | 26.823  |
| $E_{c,s}$     | [N/mm <sup>2</sup> ] |  | 30.930 | 34.807 | 36.437 | 36.437 | 30.930  |
| $G_f$         | [N/m]                |  | 95,3   | 145,5  | 195,2  | 195,2  | 95,3    |
| $R_{m,sw}$    | [MPa]                |  | 629,2  | 642,5  | 629,2  | 612,7  | 612,7   |
| $a_{sw}$      | [cm <sup>2</sup> /m] |  | Ø8-90  | Ø12-90 | Ø8-120 | Ø10-80 | Ø10-120 |
| $\rho_w$      | [‰]                  |  | 5,56   | 12,56  | 4,17   | 9,88   | 6,58    |
| $\omega_{sw}$ | [-]                  |  | 7,75   | 16,33  | 5,81   | 13,24  | 8,80    |
| $\omega_{sl}$ | [-]                  |  | 0,11   | 0,16   | 0,06   | 0,14   | 0,12    |
| $R_{m,sl}$    | [MPa]                |  | 612,7  | 636,8  | 612,7  | 652,5  | 652,5   |
| $A_{sl}$      | [cm <sup>2</sup> ]   |  | 6Ø10   | 6Ø16   | 6Ø10   | 6Ø14   | 8Ø14    |
| $\rho_l$      | [‰]                  |  | 4,71   | 12,1   | 4,71   | 9,24   | 12,3    |
| $\omega_{sl}$ | [-]                  |  | 7,85   | 20,17  | 7,85   | 15,40  | 10,25   |
| $T_{max}$     | [kNm]                |  | 0,11   | 0,20   | 0,08   | 0,18   | 0,15    |
|               |                      | 17,9                                       | 27,2   | 17,8   | 24,1   | 54,9   |         |

$$\omega_{sl} = \frac{A_{sl}}{b_{eff} \cdot d} \cdot \frac{f_y}{f_{cm}} \quad (\text{Querkraft})$$

$$\omega_{sw} = \frac{A_{sw}}{b_{eff} \cdot d} \cdot \frac{f_y}{f_{cm}} \quad (\text{Querkraft})$$

$$\omega_{sl} = \frac{A_{sl}}{A_{c,a}} \cdot \frac{f_y}{f_{cm}} ; A_{c,a} = h \cdot b \quad (\text{Torsion})$$

$$\omega_{sw} = \frac{A_{sw} \cdot u_k}{A_{c,a} \cdot s_w} \cdot \frac{f_y}{f_{cm}} \quad \text{nach (Zedler 2011)} \quad (\text{Torsion})$$

## 7 Numerische Berechnungen

Die numerischen Berechnungen erfolgen mit dem Programm ATENA Studio x64 der Fa. Červenka Consulting mit der Version 5.6.1.18606. Die Modellierung erfolgt mit dem Programm GiD 14.0.5. Die Balken werden dreidimensional gemäß den Planunterlagen mit einer mittleren Kantenlänge von 2-3 cm in den Versagensbereichen modelliert. Darüber hinaus besitzen die Elemente die doppelte Größe. Dies gilt ebenfalls für die Lasteinleitungsplatte als auch für die Auflagerplatten. Die Längs- und Bügelbewehrung wird als eindimensionaler Fachwerkstab modelliert.

Die angesetzten Materialparameter entsprechen dabei den Messungen, die in Tabelle 27-Tabelle 29 zusammengefasst sind. Die einaxiale Betonzugfestigkeit ergibt sich nach Norm aus der gemessenen Spaltzugfestigkeit multipliziert mit dem Faktor 0,9. Abweichend zur gemessenen Bruchenergie  $G_F$  wird eine Formel für die Berechnung genutzt, da es bei einigen Betonmischungen zu Ausreißern und stark schwankenden Ergebnissen kam. Hierbei kommt die Formel nach Rimmel (1995) zur Anwendung.

$$G_F = 0,0307 \cdot f_{ctm} \cdot 1000 \quad [\text{N/m}] \quad (12)$$

Im Folgenden werden die Lastverformungskurven, Traglasten und Rissbilder dargestellt.

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass anhand der Lastverformungskurven und auch der Rissbilder eine überaus gute Übereinstimmung zwischen den Versuchen und der Simulation erzielt werden kann. Daher ist davon auszugehen, dass die Simulationen sich für zukünftige Untersuchungen zum Querkraftabtrag eignen. Es gibt jedoch einige Besonderheiten in den Versuchen, die durch Simulationen zum derzeitigen Zeitpunkt nicht abgebildet werden können.

### Ausnahmen:

- B3.1: Das Rissbild hat sich günstig ausgebildet, wodurch nach dem Entstehen des maßgebenden Biegeschubrisses die Traglast deutlich überschritten werden kann,
- B5: Trotz deutlich höherer Betondruck- und -zugspannungen im Vergleich zu B3 und B4 ergeben sich zum Teil niedrigere Traglasten,
- B6: Querkraft- und Biegetragfähigkeit der zweilagigen Bewehrung kann nicht adäquat simuliert werden,
- B8: Bügelriss konnte nicht abgebildet werden,
- B9: Wie bei B6,
- B12: Die hohen Betonkennwerte ließen im Vergleich zu B10 eine höhere Traglast vermuten.

## 7.1 B1

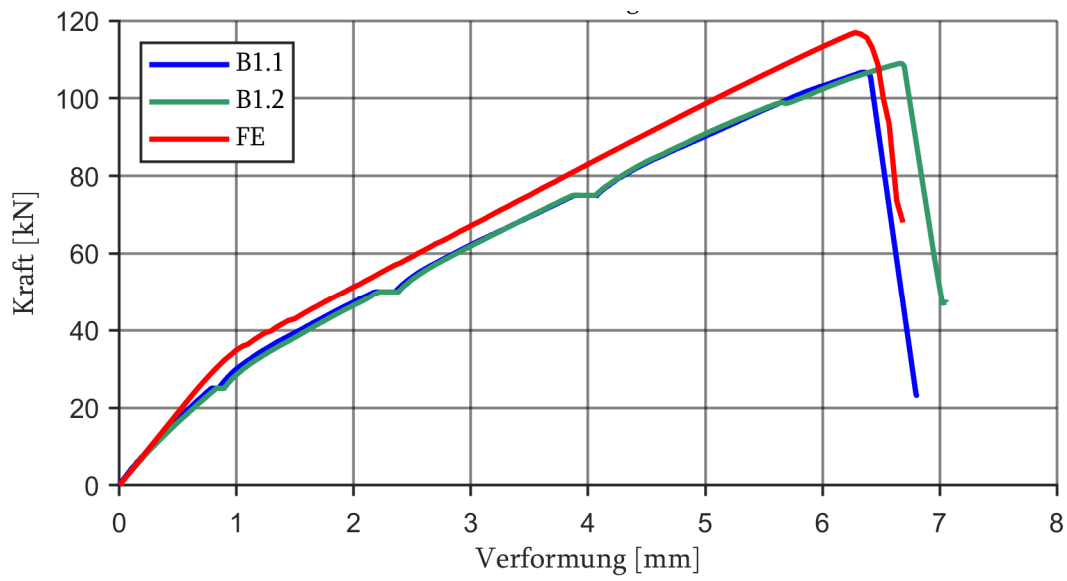


Bild 441 B1 Lastverformungskurven nach der FE-Berechnung und den Versuchen

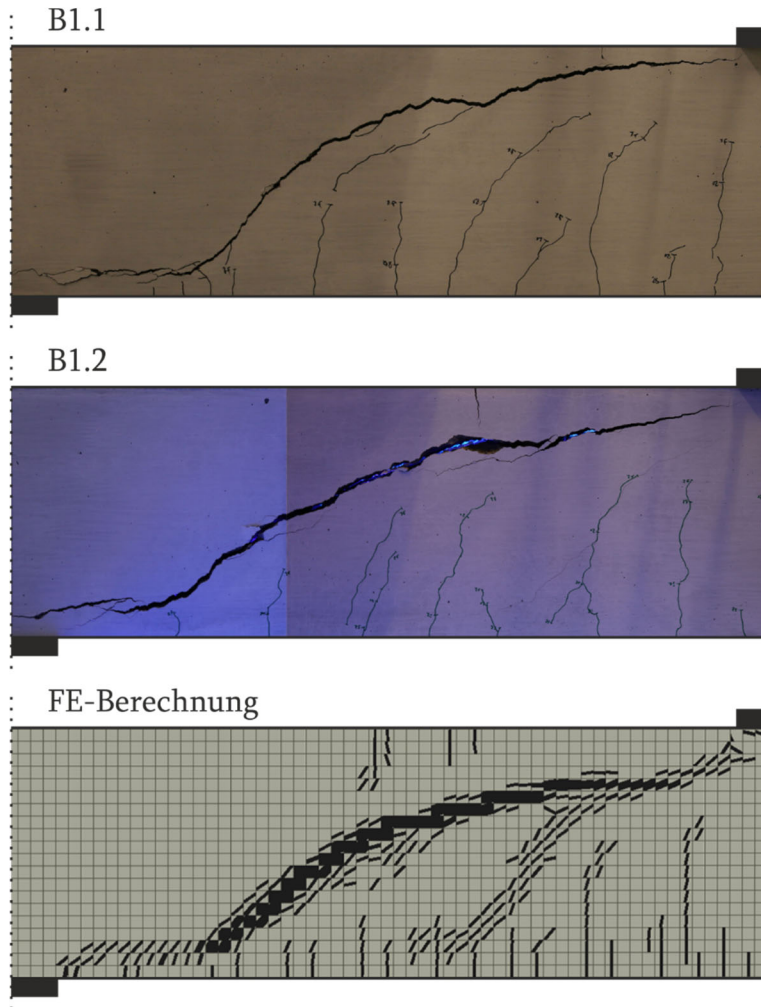


Bild 442 B1 Vergleich der Rissbilder zwischen den Versuchen und der FE-Berechnung im Grenzzustand

## 7.2 B2

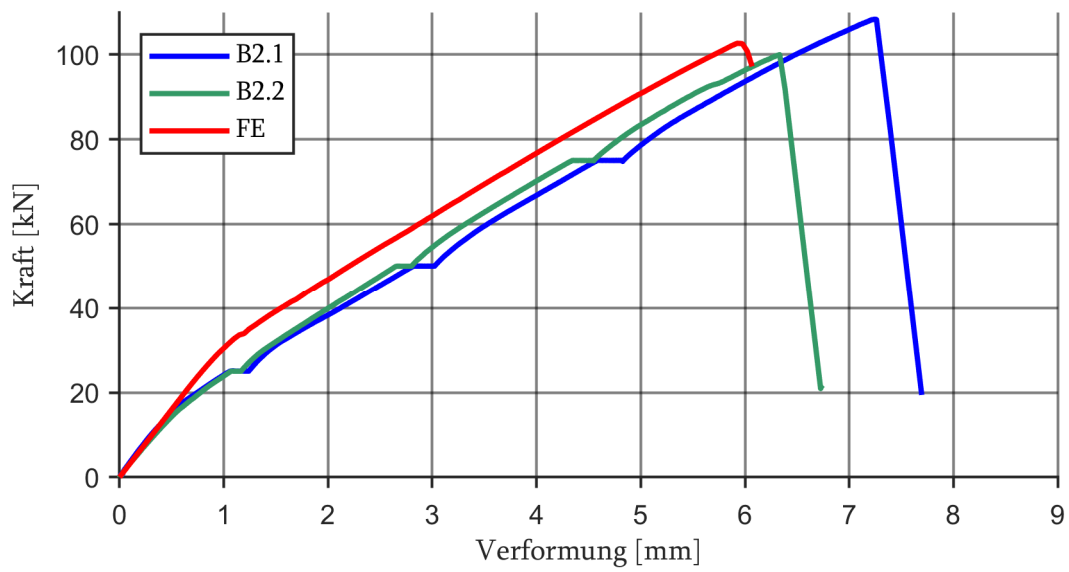


Bild 443 B2 Lastverformungskurven nach der FE-Berechnung und den Versuchen

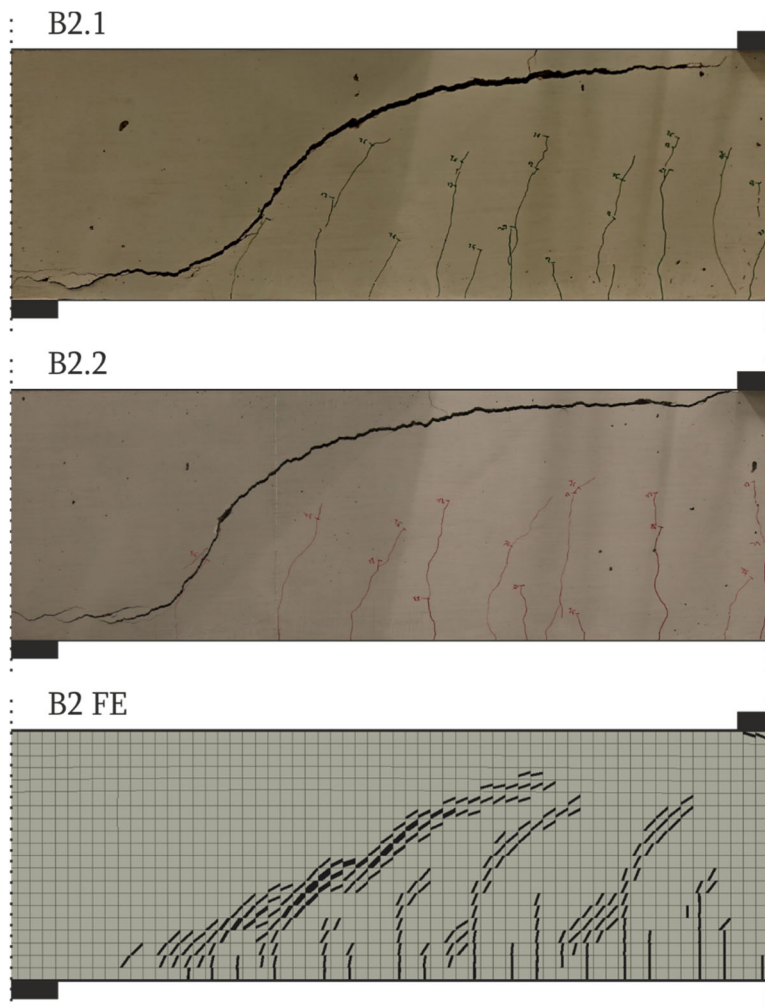
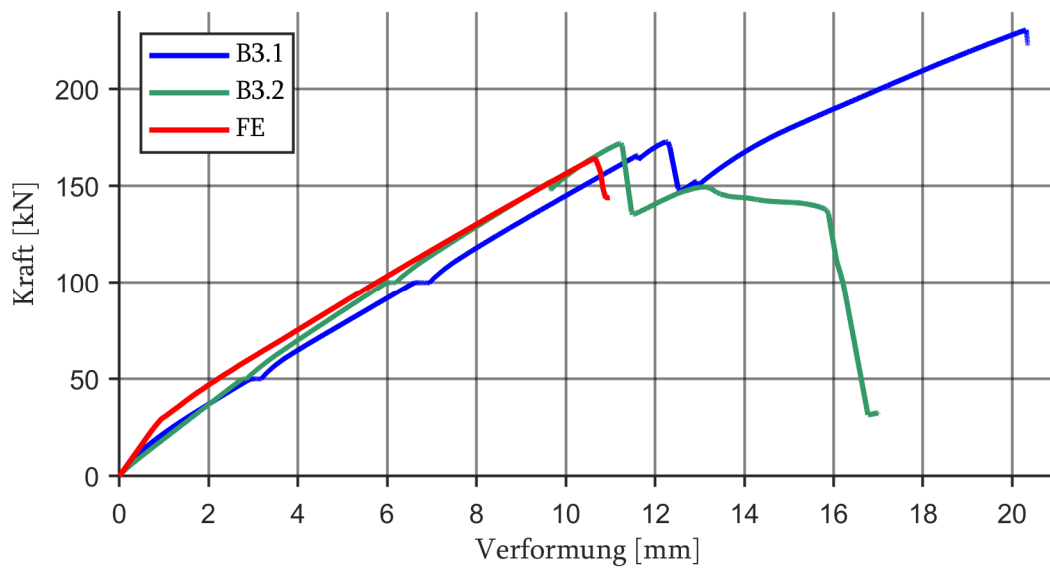
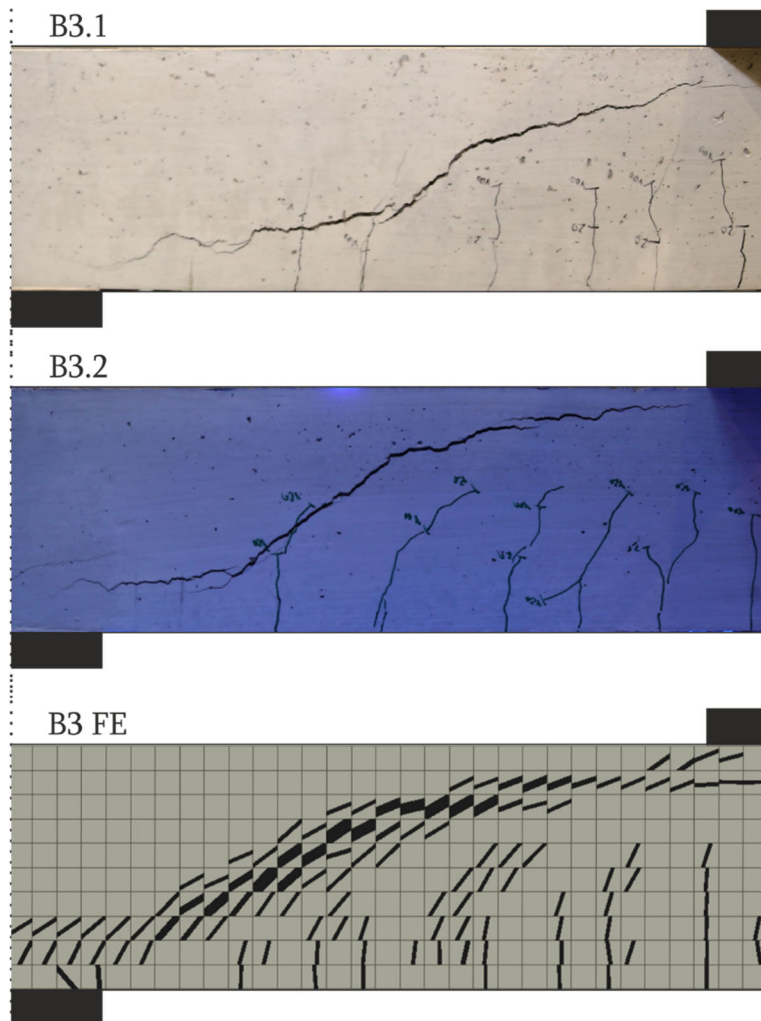


Bild 444 B2 Vergleich der Rissbilder zwischen den Versuchen und der FE-Berechnung

### 7.3 B3

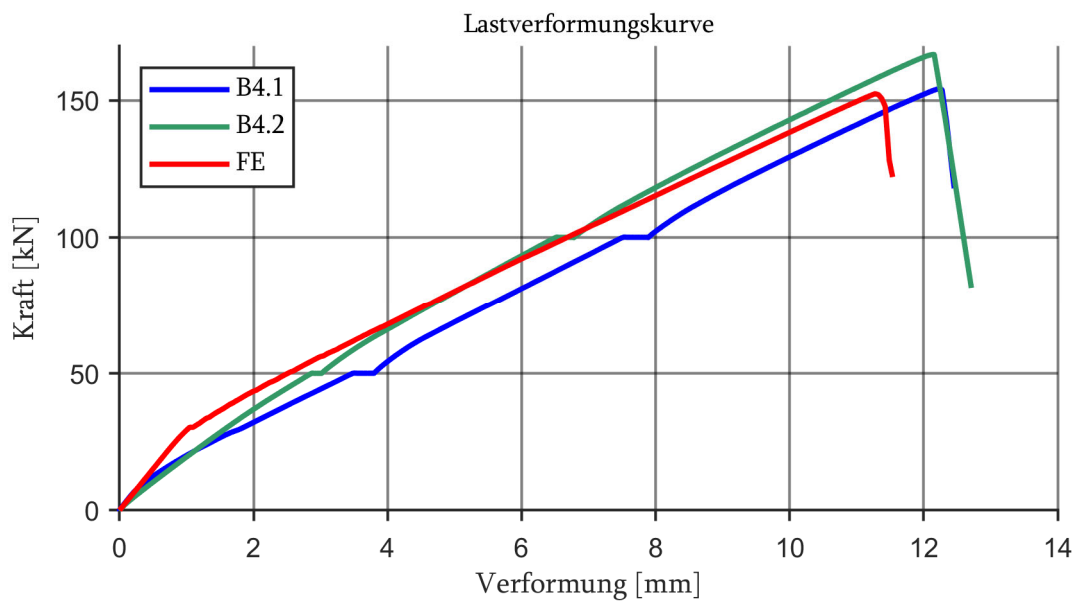


**Bild 445 B3 Lastverformungskurven der FE-Berechnung und den Versuchen**

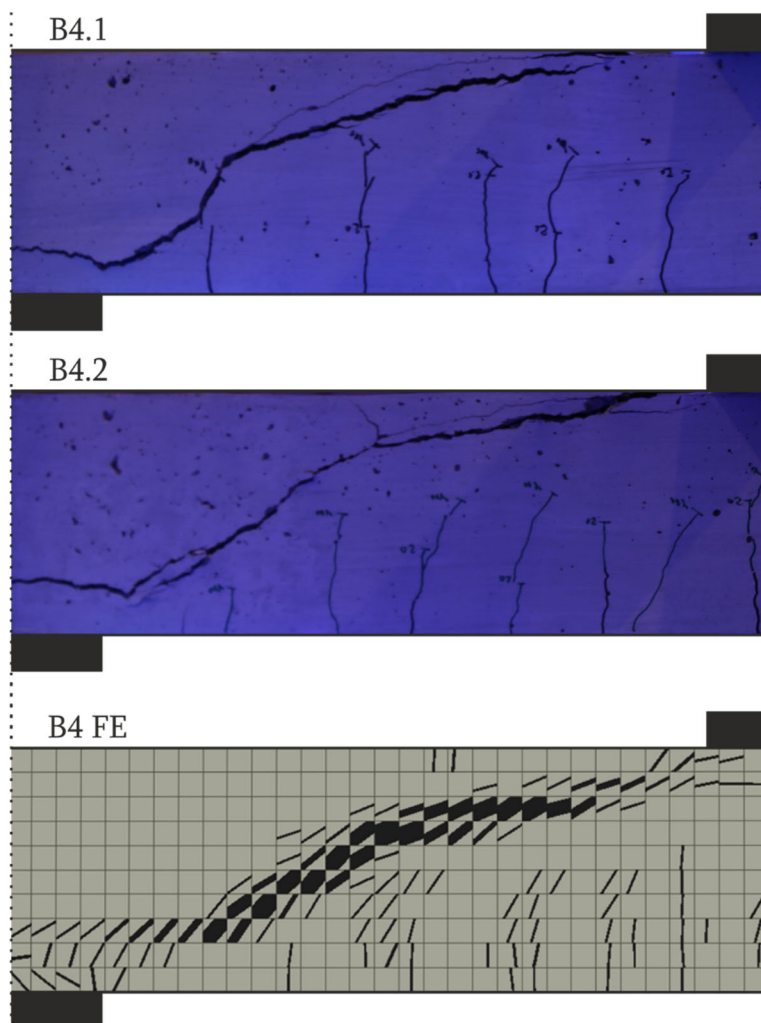


**Bild 446 B3 Vergleich der Rissbilder zwischen den Versuchen und der FE-Berechnung**

## 7.4 B4

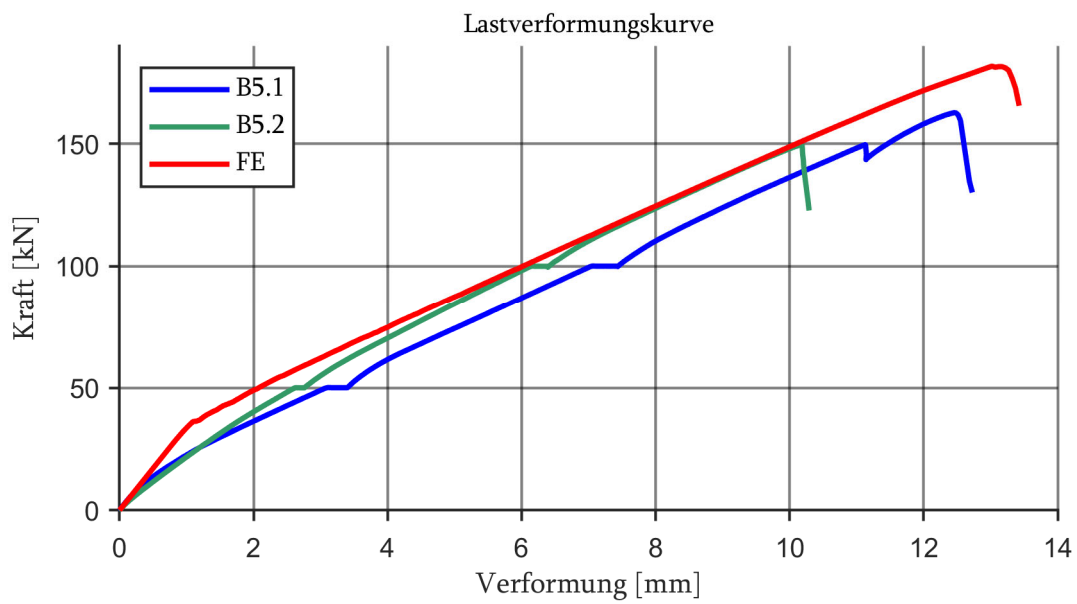


**Bild 447 B4 Lastverformungskurven der FE-Berechnung und den Versuchen**

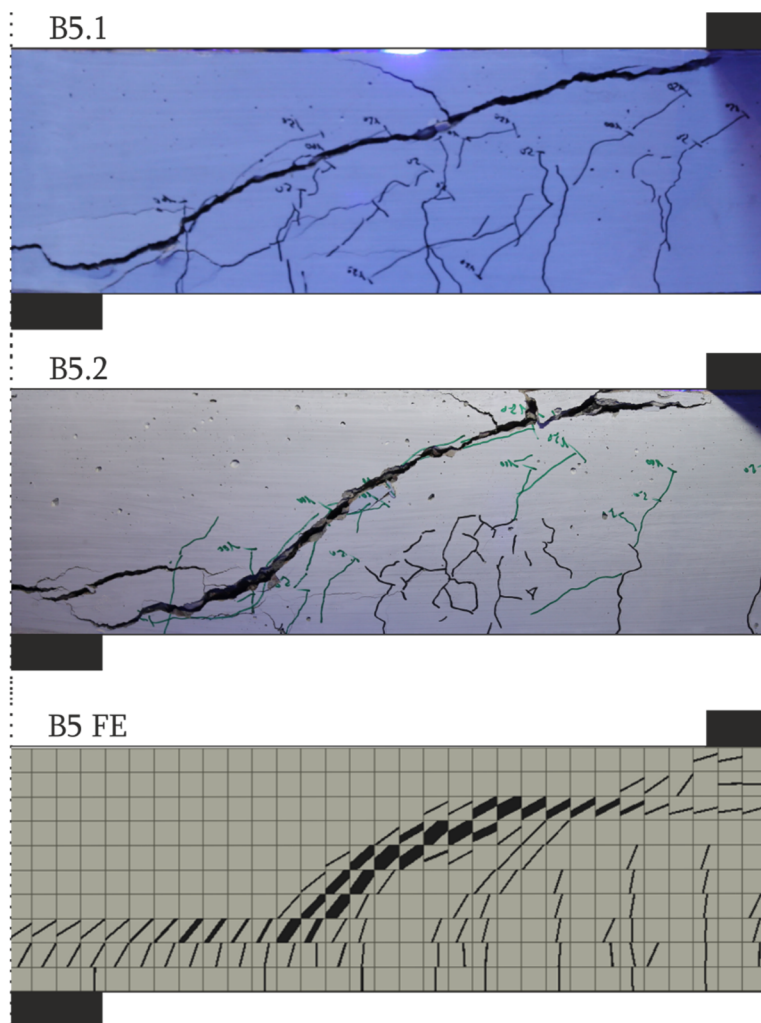


**Bild 448 B4 Vergleich der Rissbilder zwischen den Versuchen und der FE-Berechnung**

## 7.5 B5

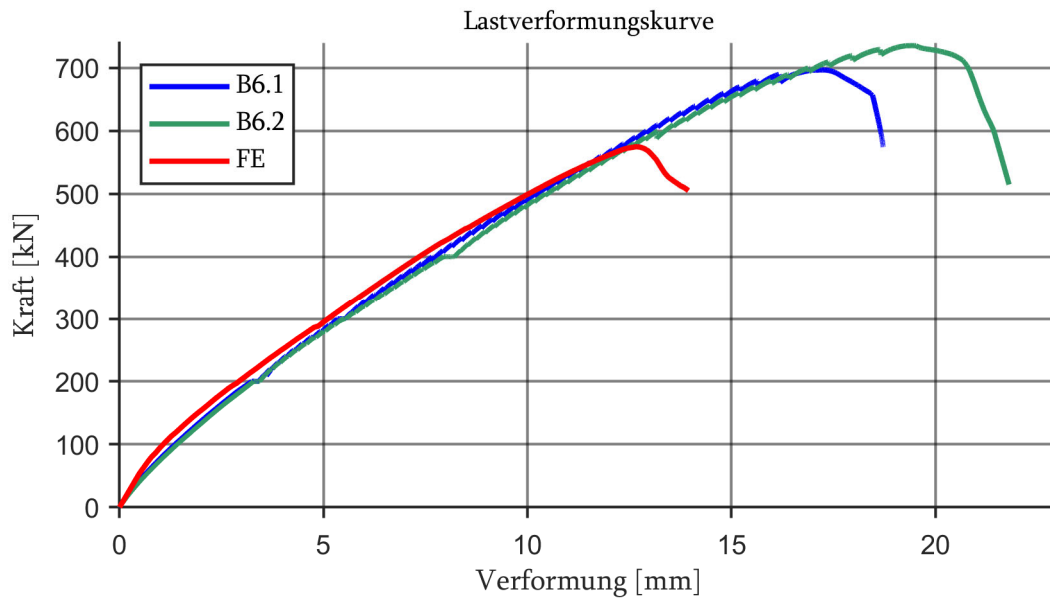


**Bild 449 B5 Lastverformungskurven der FE-Berechnung und den Versuchen**

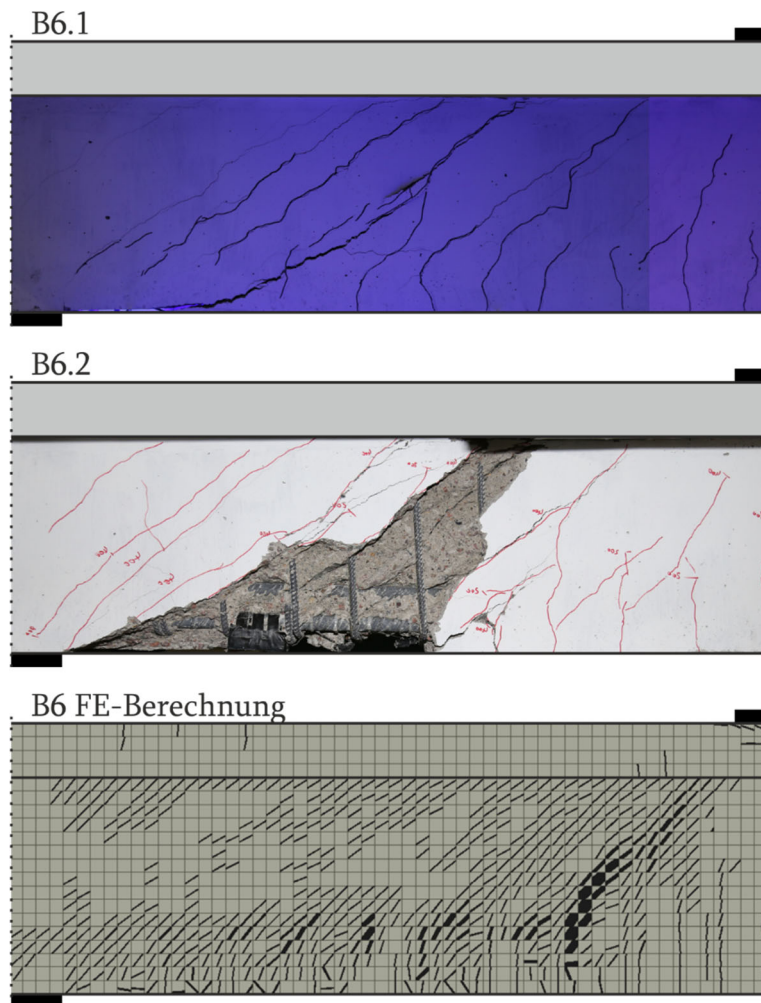


**Bild 450 B5 Vergleich der Rissbilder zwischen den Versuchen und der FE-Berechnung**

## 7.6 B6

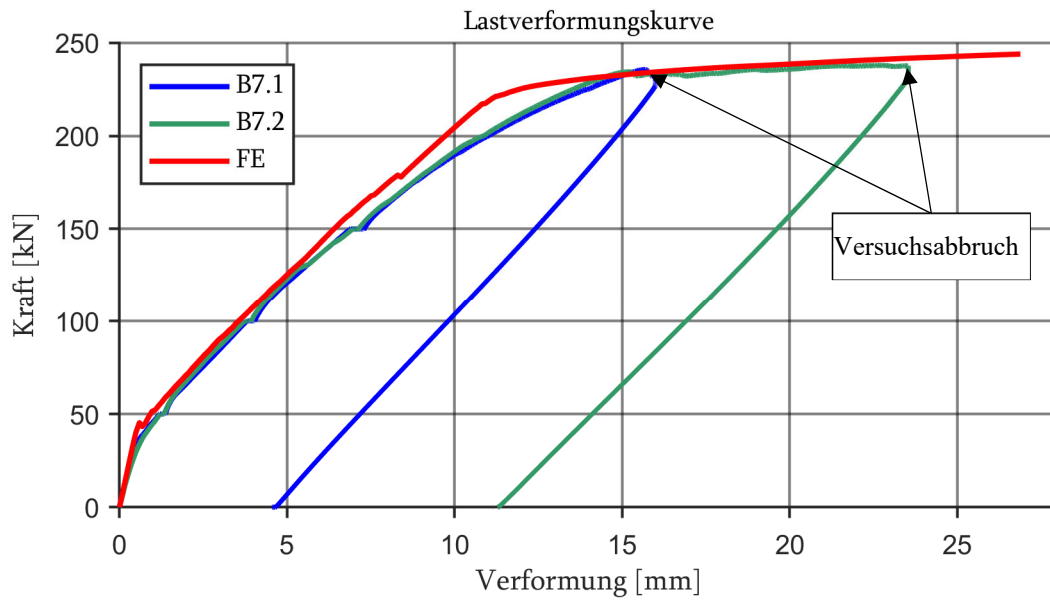


**Bild 451 B6 Lastverformungskurven der FE-Berechnung und den Versuchen**

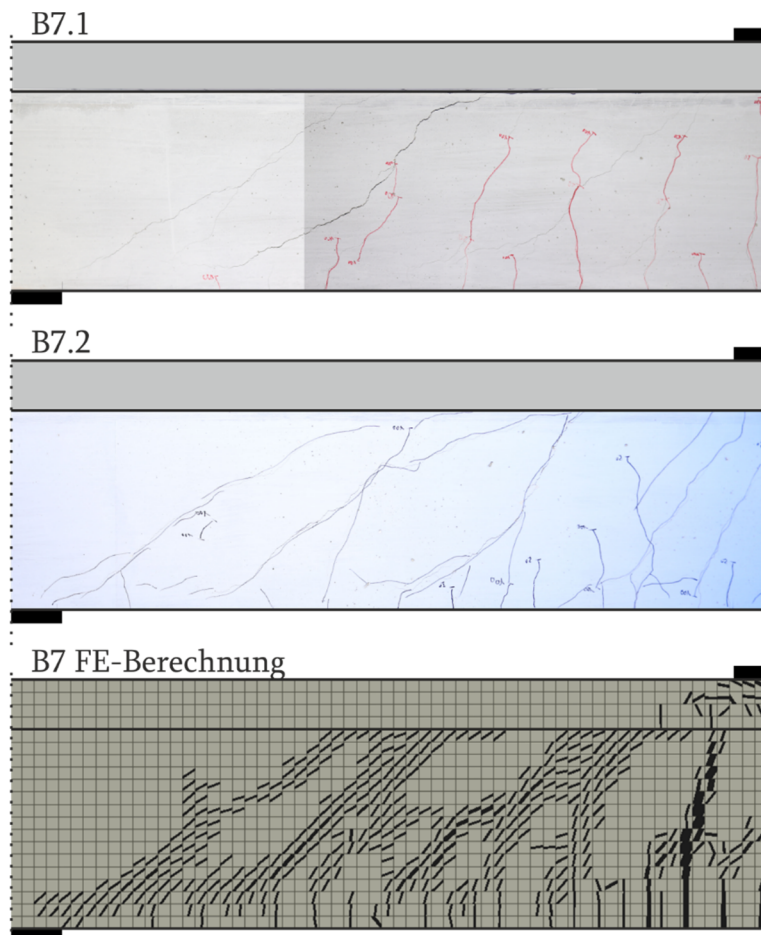


**Bild 452 B Vergleich der Rissbilder zwischen den Versuchen und der FE-Berechnung**

## 7.7 B7



**Bild 453 B7 Lastverformungskurven der FE-Berechnung und den Versuchen**



**Bild 454 B7 Vergleich der Rissbilder zwischen den Versuchen und der FE-Berechnung**

## 7.8 B8

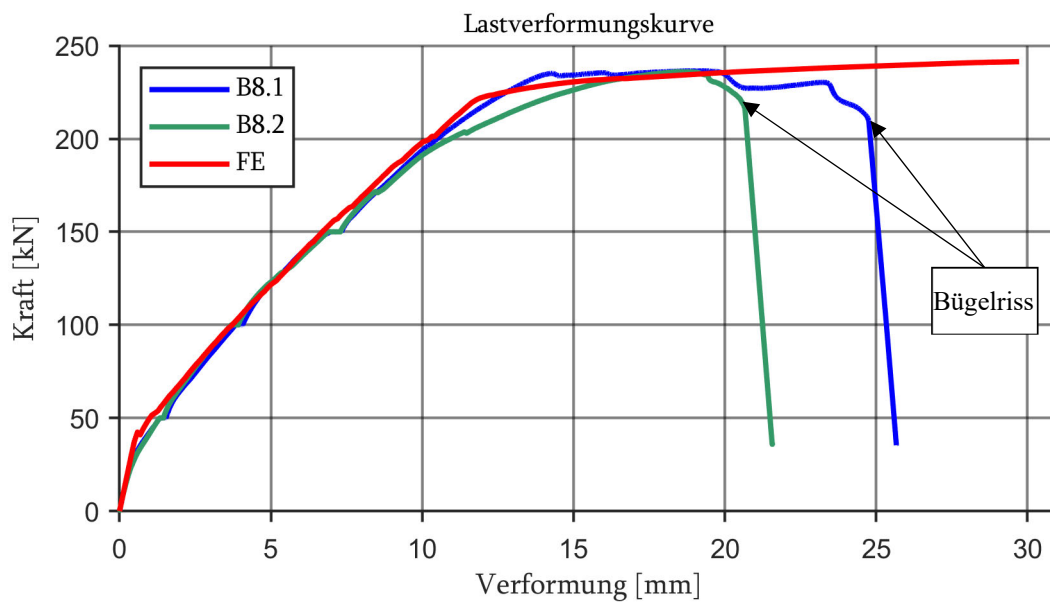


Bild 455 B8 Lastverformungskurven der FE-Berechnung und den Versuchen

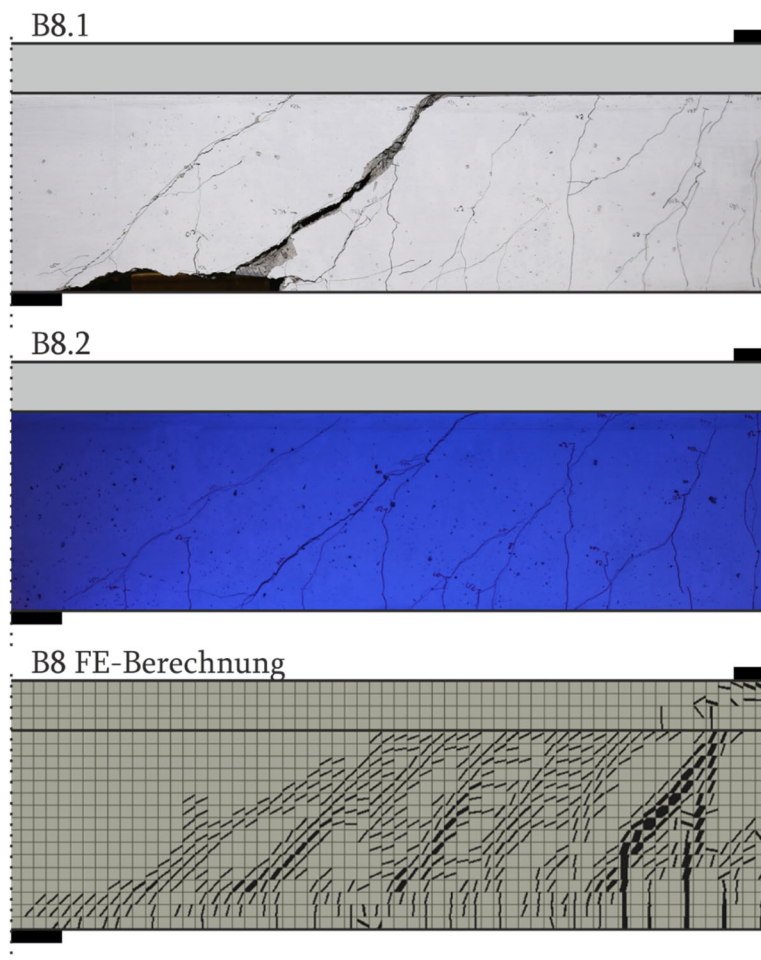


Bild 456 B8 Vergleich der Rissbilder zwischen den Versuchen und der FE-Berechnung

## 7.9 B9

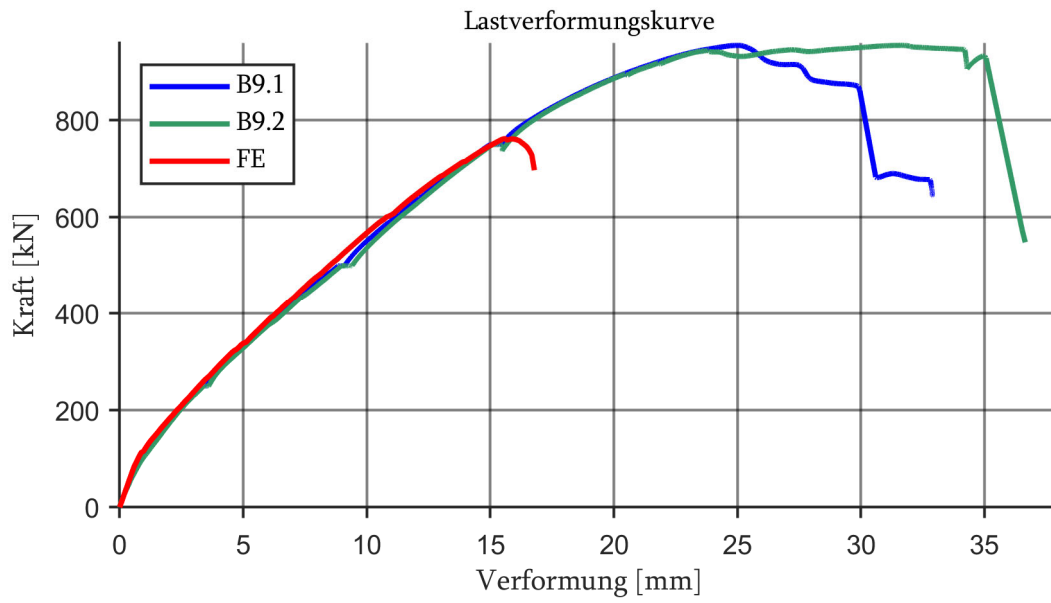


Bild 457 B9 Lastverformungskurven der FE-Berechnung und den Versuchen

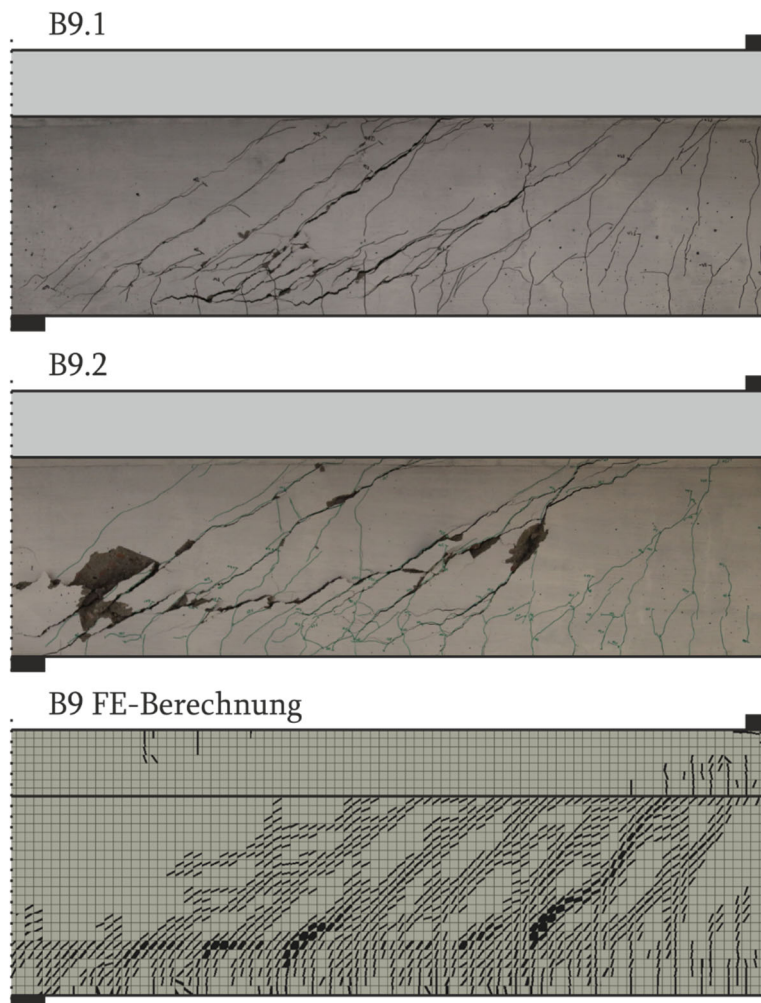
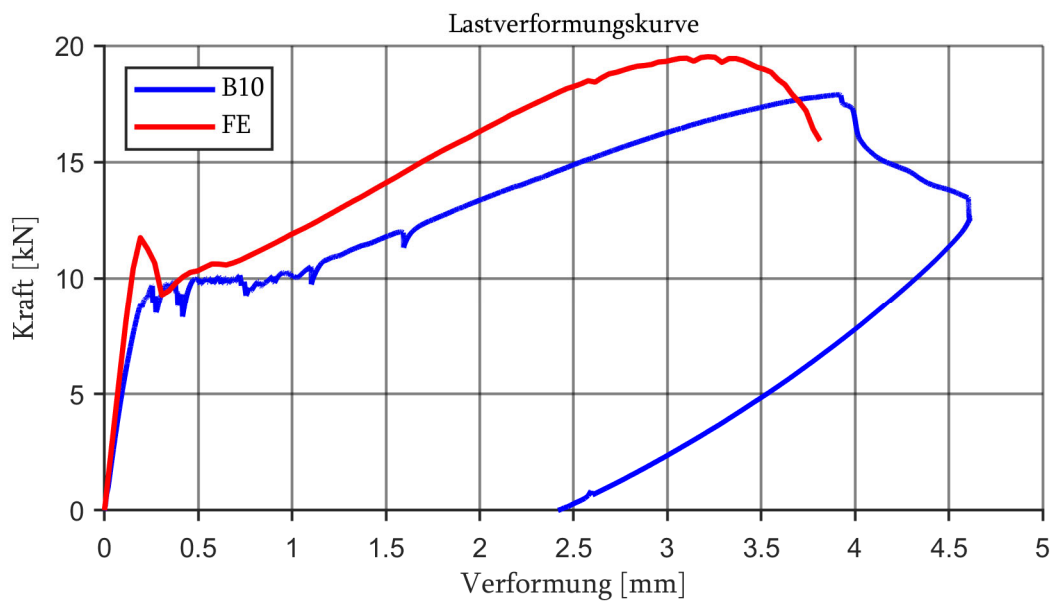
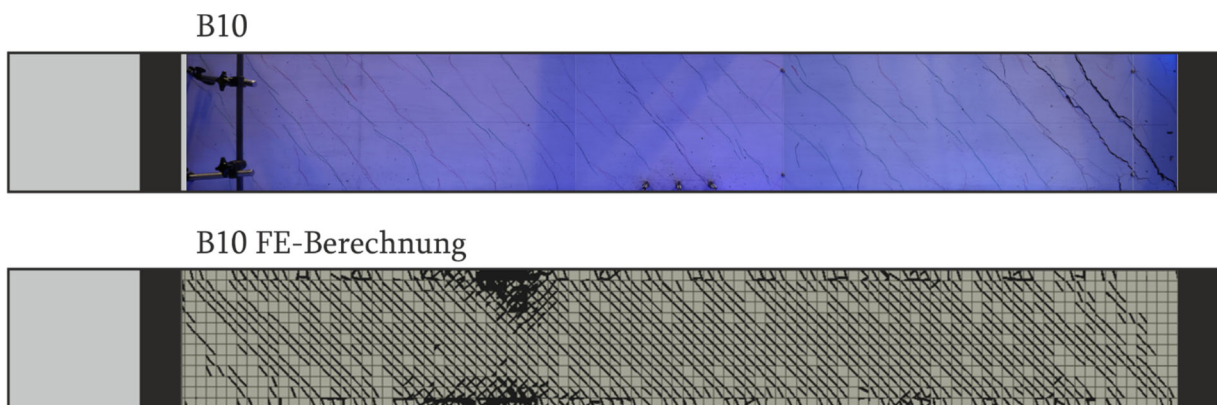


Bild 458 B9 Vergleich der Rissbilder zwischen den Versuchen und der FE-Berechnung

## 7.10 B10

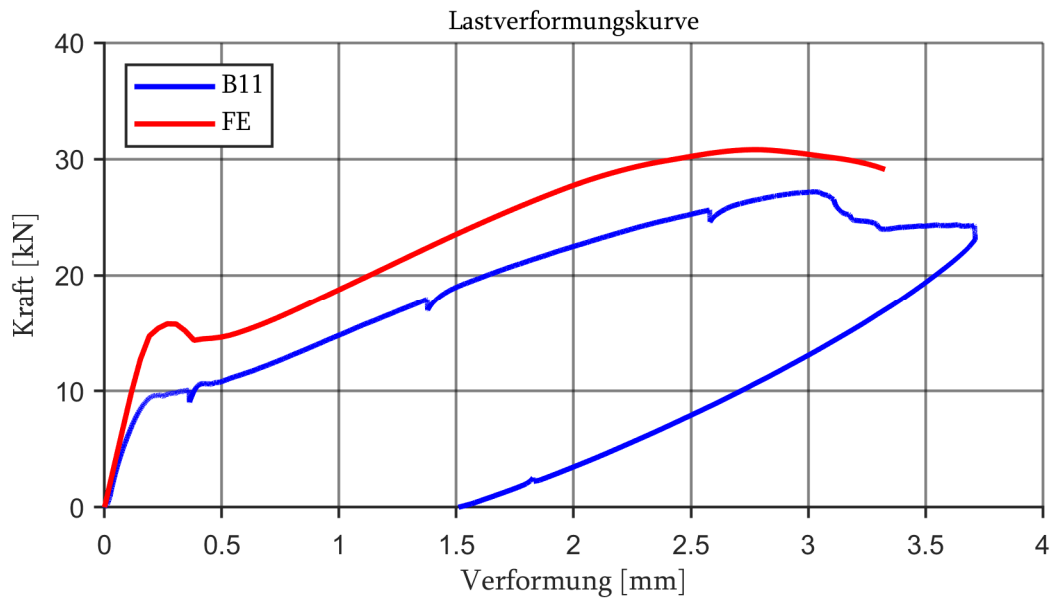


**Bild 459** B10 Lastverformungskurven der FE-Berechnung und des Versuches

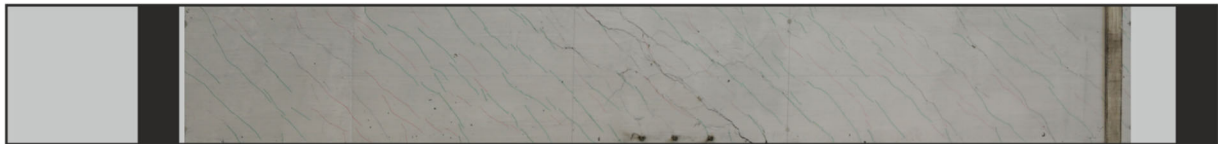


**Bild 460** B10 Vergleich der Rissbilder zwischen dem Versuch und der FE-Berechnung

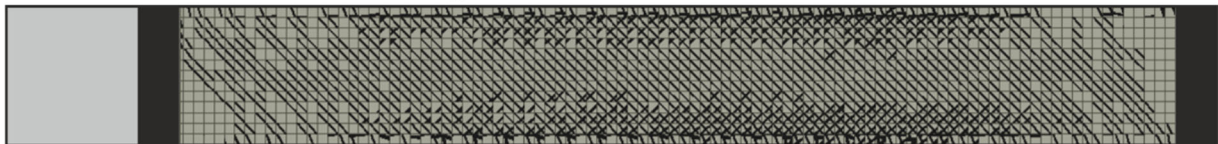
## 7.11 B11



**Bild 461** B11 Lastverformungskurven der FE-Berechnung und des Versuches  
B11

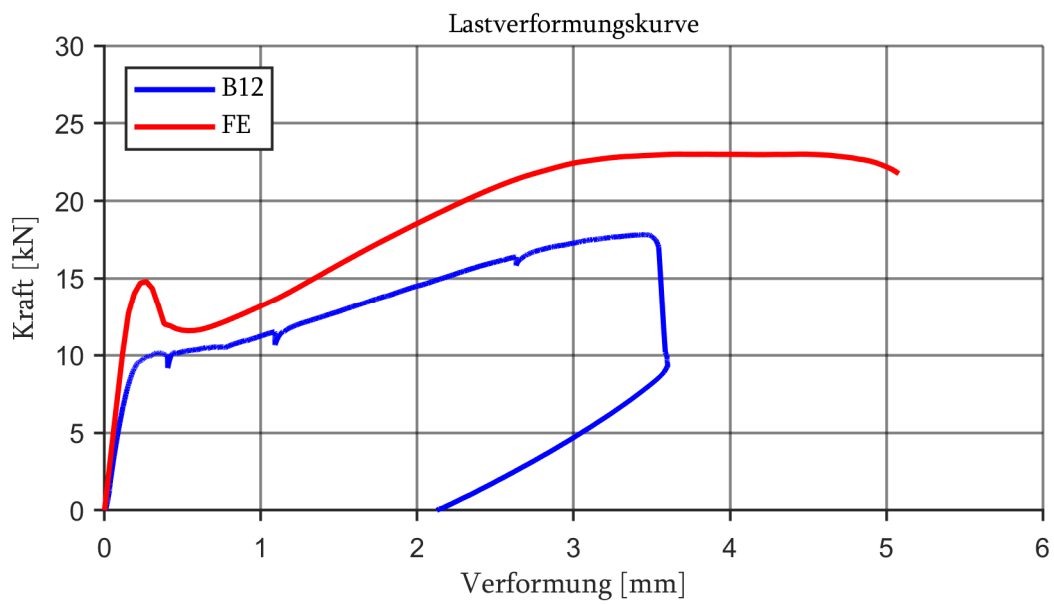


B11 FE-Berechnung

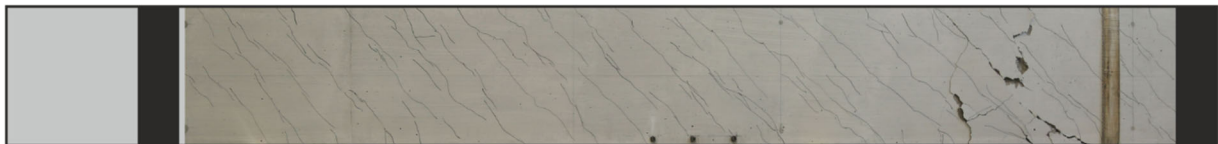


**Bild 462** B11 Vergleich der Rissbilder zwischen dem Versuch und der FE-Berechnung

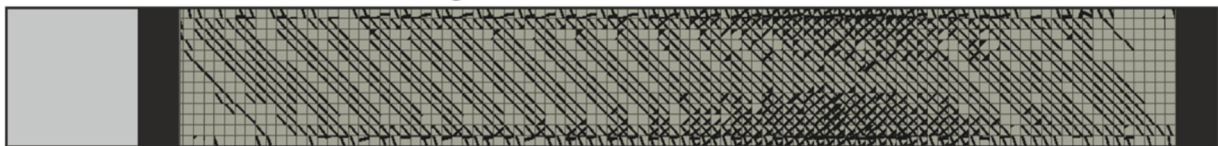
## 7.12 B12



**Bild 463** B12 Lastverformungskurven der FE-Berechnung und des Versuches  
B12

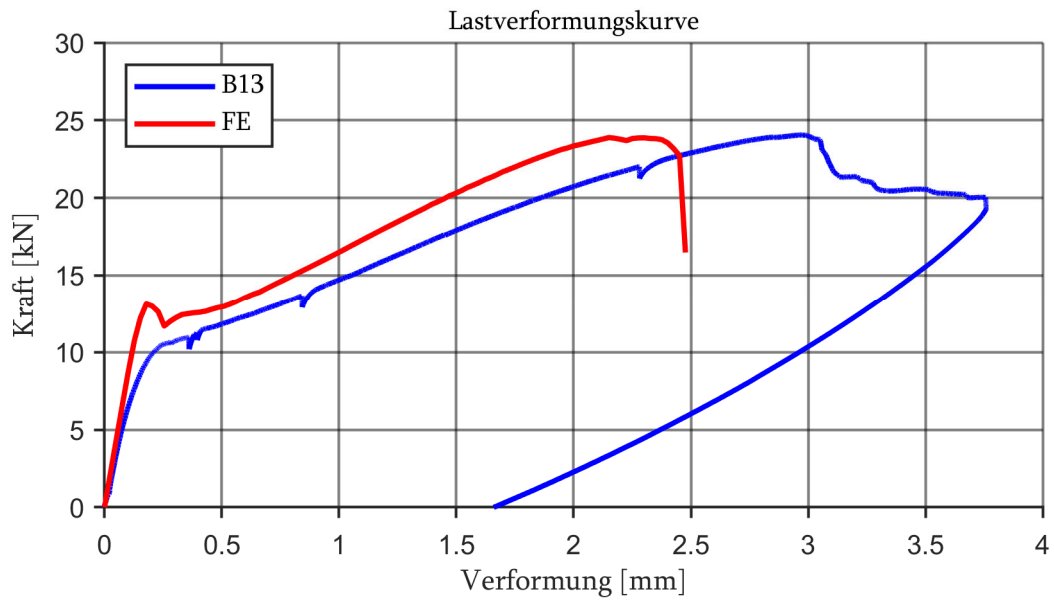


B12 FE-Berechnung

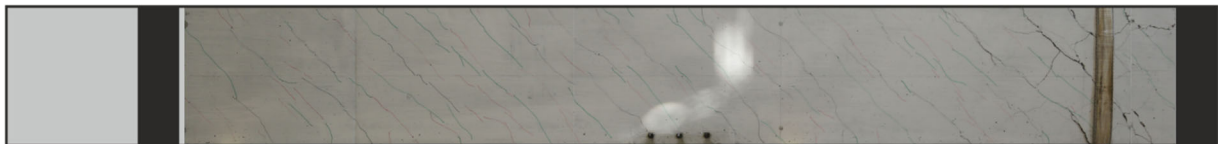


**Bild 464** B12 Vergleich der Rissbilder zwischen dem Versuch und der FE-Berechnung

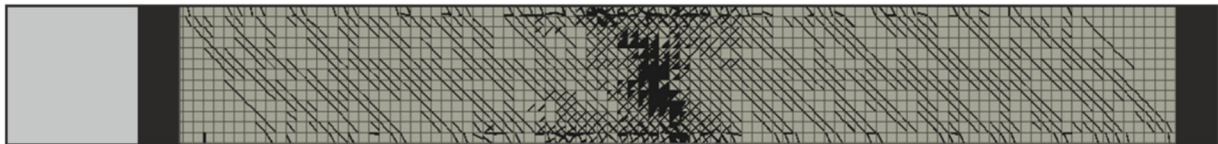
### 7.13 B13



**Bild 465 B13 Lastverformungskurven der FE-Berechnung und des Versuches**  
B13

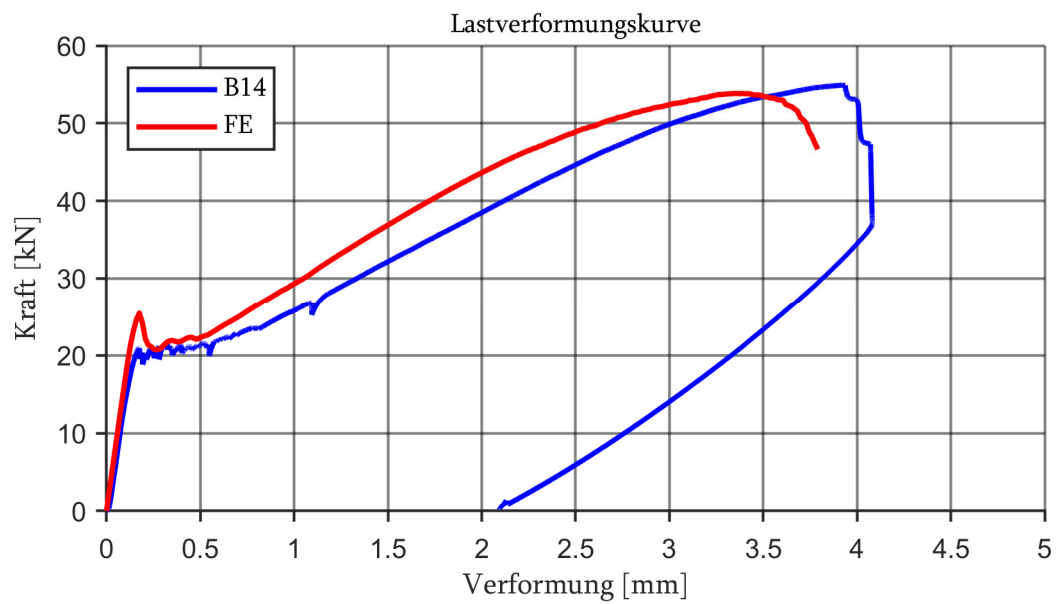


B13 FE-Berechnung



**Bild 466 B13 Vergleich der Rissbilder zwischen dem Versuch und der FE-Berechnung**

## 7.14 B14

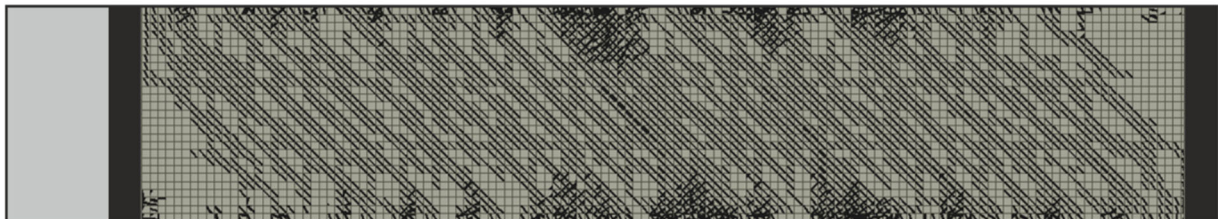


**Bild 467** B14 Lastverformungskurven der FE-Berechnung und des Versuches

B14



B14



**Bild 468** B14 Vergleich der Rissbilder zwischen dem Versuch und der FE-Berechnung

## 8 Risskinematik

In diesem Kapitel werden die beobachteten Risskinematiken bei maximaler Belastung aufgegriffen und Besonderheiten dargestellt.

B1: Im ersten sowie im zweiten Versuch entstand der maßgebende Biegeschubriss erst bei einer Last von ca.  $0,94 \cdot F_{\max}$ . Bis zu Belastung hatte sich der Biegeschubriss noch nicht abgedreht und somit lag nahezu nur eine Rissöffnung vor und die übertragenen Kräfte lagen nahe Null.

B2: Anders als bei B1 waren die maßgebenden Biegeschubrissse weiter ausgebildet und waren an der Risspitze abgeflacht. Infolge dessen sowie durch den beginnenden Längsriss entlang der Biegebewehrung traten Rissgleitungen auf.

B3.1: Der maßgebender Biegeschubriss entstand nah an der Lasteinleitung. Daraufhin konnte die Beanspruchung deutlich erhöht werden.

B3.2 & B4.1: Die negative Risskraft resultierte aus der negativen Rissgleitung an der Risspitze. Das Ergebnis ist nicht plausibel.

B5.1: Der maßgebende Biegeschubriss änderte seinen Verlauf. Es entstand eine neue Rissabzweigung.

B5.2: Der maßgebende Schubriss entwickelte sich nicht aus einem Biegeriss.

B6: Es trat eine ausgeprägte Risskinematik auf. Die Querkraftanteile durch die Spannungsübertragung im Riss lagen nach dem Modell von Walraven bei 31 % und 17 %.

B7.1: Über den gesamten Riss hinweg wurden in unterschiedlichen Größenordnungen Rissspannungen übertragen. Beim Erstversuch lag der Querkraftanteil über Rissreibung bei 22 %. Bei Wiederbelastungsversuch lag der Anteil bei 25 %.

B7.2: Die Spannungsübertragung erfolgt nur in einem kurzen steilen Rissabschnitt, wobei der Anteil an der Querkraft 16 % beträgt, bei Wiederbelastung 19 %.

B8.1: In Bügelnähe entstand ein steiler Rissabschnitt, über den Rissspannungen übertragen wurden. Der Querkraftanteil durch Rissreibung lag bei 34 %.

B8.2: Es traten große Rissöffnungen auf, wodurch keine Kontaktpunkte zwischen den Rissoberflächen auftreten konnten. Die Tragfähigkeit war identisch wie beim Versuch B8.1 und B7.

B9.1: Über die gesamte Risslänge wurden Spannungen übertragen, die einen Anteil von 11 % der gesamten Querkraft ausmachen.

B9.2: Es lag eine negative Rissgleitung vor. Am maßgebenden Schubriss wird der Steg auseinandergezogen. Daraus ergibt sich eine negative Querkraftkomponente. Die Tragfähigkeit ist identisch zum Erstversuch B9.1.

B10–B14: Die Torsionsbalken wiesen im globalen Tragverhalten keine signifikanten Rissgleitungen auf. Es kam lokal zu Kontaktstellen.

## 9 Erkenntnisse / Beobachtungen

- B1 & B2, B4 & B5 und B7 & B8 haben marginale Unterschiede in der Tragfähigkeit bei unterschiedlichem Größtkorndurchmesser. Somit hatte der Größtkorndurchmesser keinen bzw. nur einen geringen Einfluss auf die Querschnittstragfähigkeit.
- Eine signifikante Rissgleitung tritt nahe des Grenzzustandes erst auf, wenn sich ein Biegeriss neigt und zum Biegeschubriss ausbildet sowie ein horizontaler Riss entlang der Längsbewehrung entstanden ist  
→ Bei unbewehrten Bauteilen tritt der Riss entlang der Biegebewehrung erst kurz vor dem Versagen auf.
- Die Neigung des maßgebenden Biegeschubrisses wird durch den Bügelbewehrungsgrad beeinflusst.
- Die flachen Balken (B3-B5) konnten nach der Bildung des Biegeschubrisses noch eine Last von mindestens  $0,77 \cdot F_{\max}$  aufnehmen. In diesem Tragfähigkeitsverlust ist die Rissprozesszone ebenfalls enthalten. Einzige Ausnahme stellt der Versuch B4.2. Bei diesem versagte die Druckzone simultan und die Tragfähigkeit fiel auf  $0,50 \cdot F_{\max}$  ab.
- Bei Torsionsversuchen verschieben sich die Rissflanken nicht signifikant gegeneinander, weshalb von geringen Rissreibungsspannungen auszugehen ist. Jedoch war während der Versuche ein lautes Knistern zu vernehmen, was auf das Verdrillen des Kerns zurückgeführt werden kann.
- Die Rissgleitung korreliert stark mit der Rissneigung.
- Die Rissoberflächen weisen keine markanten Kontaktpunkte auf. Die Mikroskopaufnahmen zeigten, dass in der Kontaktzone der Körner (positive und negative Seite) keine Verformungen auf. Die eingeschlossenen Luftblasen waren intakt. Die Körner wurden sauber aus der Matrix herausgelöst. Untersucht wurde lediglich der Versuch B3.1 (siehe Kap.6.3.5).

## Literatur

- Bazant Z. P., Gambarova P. (1980): Rough cracks in reinforced concrete. *ASCE J Struct Div* 106(4):819–842.
- Cavagnis F., Fernández Ruiz M., Muttoni A. (2018a): A mechanical model for failures in shear of members without transverse reinforcement based on development of a critical shear crack. *Engineering Structures* 157:300–315. 10.1016/j.engstruct.2017.12.004.
- Cavagnis F., Fernández Ruiz M., Muttoni A. (2018b): An analysis of the shear-transfer actions in reinforced concrete members without transverse reinforcement based on refined experimental measurements. *Structural Concrete* 19(1):49–64. 10.1002/suco.201700145.
- Gambarova P. G., Karakoç C. (1983): A new approach to the analysis of the confinement role in regularly cracked concrete elements.
- GOM GmbH (2020): Grundlagen der digitalen Bildkorrelation und Dehnungsberechnung. Technische Dokumentation.
- Guidotti R. (2010): Poinçonnement des planchers-dalles avec colonnes superposées fortement sollicitées. Dissertation, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Huber T., Huber P., Fasching S., Vill M., Kollegger J. (2020): Querkrafttragverhalten von Stahlbetonbauteilen mit aufgebogenen Bewehrungsstäben auf Basis photogrammetrischer Messungen. *Bauingenieur* 95(6):181–193.
- Konertz D., Löschmann J., Clauß F., Mark P. (2019): Faseroptische Messung von Dehnungs- und Temperaturfeldern. *Bauingenieur* 94(7/8).
- Li B., Maekawa K., Okamura H. (1989): Contact density model for stress transfer across cracks in concrete. *Journal of the Faculty of Engineering, the University of Tokyo*(1):9–52.
- Maurer R., Gleich P., Zilch K., Dunkelberg D. (2014): Querkraftversuch an einem Durchlaufträger aus Spannbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 109(10):654–665. 10.1002/best.201400054.
- Paulay T., Loeber P. J. (1974): Shear transfer by aggregate interlock. *Special Publication* 42:1–16.
- REMMELE G. (1995): Zum Zug- und Schubtragverhalten von Bauteilen aus hochfestem Beton. In: *Deutscher Ausschuss fuer Stahlbeton*. 444.
- RILEM Recommendation (1985): Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. *Materials and structures* 18(106):285–290.
- Samiec D. (2011): Verteilte faseroptische Temperatur- und Dehnungsmessung mit sehr hoher Ortsauflösung. *Photonik*(6):34–37.
- Tasevski D., Ruiz M. F., Muttoni A. (2020): Influence of Load Duration on Shear Strength of Reinforced Concrete Members. *ACI Structural Journal* 117(2):157–170.
- Walraven J. C. (1981): Fundamental analysis of aggregate interlock. *Journal of Structural Division* 107(11):2245–2270.
- Zedler T. (2011): Zum Tragverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbalken unter Torsion. Dissertation, Ruhr Universität Bochum.

# Anlage A: Betonprüfungen (Druck, Zug, E-Modul, Bruchenergie)

## 9.1 A.1 – 1. Betonage: Transportbeton (=TB I) zu B3, B6

Herstellung am 23.09.2020

**Prüfung am 16.11.2020, Alter 55 Tage**

Zylinder  $\varnothing$  150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

### Dichte, Druckfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $F$<br>[kN] | $f_c$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|-------------|-------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |             |                               |
| 1            | 150,0         | 297,6 | 12,151      | 2311                           | 753         | 42,6                          |
| 2            | 150,0         | 299,3 | 12,289      | 2323                           | 755         | 42,7                          |
| 3            | 150,0         | 300,2 | 12,373      | 2332                           | 777         | 44,0                          |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2322</b>                    |             | <b>43,1</b>                   |

### Dichte, Spaltzugfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $F$<br>[kN]  | $f_{ct,sp}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|--------------|-------------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |              |                                     |
| 1            | 150,0         | 298,6 | 12,287      | 2329                           | 228,0        | 3,24                                |
| 2            | 150,0         | 299,3 | 12,220      | 2310                           | 248,0        | 3,52                                |
| 3            | 150,0         | 298,7 | 12,256      | 2322                           | 231,0        | 3,28                                |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2320</b>                    | <b>235,7</b> | <b>3,35</b>                         |

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 16.11.2020

### Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $\sigma_a$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\sigma_b$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\varepsilon_{a,0}$<br>[mm/m] | $\varepsilon_{b,0}$<br>[mm/m] | $E_{c,0}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |                                    |                                    |                               |                               |                                   |
| 1            | 150,0         | 298,1 | 12,130      | 2303                           | 14,4                               | 4,3                                | 0,498                         | 0,139                         | 28.030                            |
| 2            | 150,0         | 298,3 | 12,095      | 2294                           | 14,4                               | 4,3                                | 0,506                         | 0,140                         | 27.490                            |
| 3            | 150,0         | 299,5 | 12,155      | 2297                           | 14,4                               | 4,3                                | 0,505                         | 0,139                         | 27.490                            |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2298</b>                    |                                    |                                    |                               |                               | <b>27.670</b>                     |

| Probe<br>Nr. | $\varepsilon_{a,3}$<br>[mm/m] | $\varepsilon_{b,3}$<br>[mm/m] | $E_{c,s}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $F_a$<br>[kN] | $F_b$<br>[kN] | $F$<br>[kN] | $f_c$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-------------|-------------------------------|
|              |                               |                               |                                   |               |               |             |                               |
| 2            | 0,515                         | 0,194                         | 31.340                            | 254,0         | 76,2          | 731         | 41,4                          |
| 3            | 0,516                         | 0,194                         | 31.250                            | 254,0         | 76,2          | 703         | 39,8                          |
| Mittelwert:  |                               |                               | <b>31.477</b>                     |               |               |             | <b>41,0</b>                   |

## 9.2 1. Betonage: Transportbeton (=TB I) zu B10, B14

Herstellung am 23.09.2020

**Prüfung am 28.10.2021, Alter 400 Tage**

Zylinder  $\varnothing$  150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Dichte, Druckfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $F$<br>[kN] | $f_c$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|-------------|-------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |             |                               |
| 1            | 150,0         | 299,8 | 12,093      | 2283                           | 823         | 46,6                          |
| 2            | 150,0         | 299,2 | 12,122      | 2293                           | 822         | 46,5                          |
| 3            | 150,0         | 299,4 | 12,042      | 2276                           | 770         | 43,6                          |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2322</b>                    |             | <b>45,6</b>                   |

Dichte, Spaltzugfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $F$<br>[kN]  | $f_{ct,sp}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|--------------|-------------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |              |                                     |
| 1            | 150,0         | 299,0 | 12,174      | 2304                           | 228,0        | 3,89                                |
| 2            | 150,0         | 298,6 | 12,047      | 2283                           | 266,0        | 3,78                                |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2320</b>                    | <b>235,7</b> | <b>3,84</b>                         |

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 16.11.2020

Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $\sigma_a$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\sigma_b$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\varepsilon_{a,0}$<br>[mm/m] | $\varepsilon_{b,0}$<br>[mm/m] | $E_{c,0}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |                                    |                                    |                               |                               |                                   |
| 1            | 150,0         | 299,0 | 12,043      | 2279                           | 15,2                               | 4,5                                | 0,543                         | 0,150                         | 27.070                            |
| 2            | 150,0         | 298,8 | 11,940      | 2261                           | 15,2                               | 4,5                                | 0,550                         | 0,156                         | 27.000                            |
| 3            | 150,0         | 299,0 | 11,957      | 2263                           | 15,2                               | 4,5                                | 0,557                         | 0,154                         | 26.400                            |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2268</b>                    |                                    |                                    |                               |                               | <b>26.823</b>                     |

| Probe<br>Nr. | $\varepsilon_{a,3}$<br>[mm/m] | $\varepsilon_{b,3}$<br>[mm/m] | $E_{c,S}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $F_a$<br>[kN] | $F_b$<br>[kN] | $F$<br>[kN] | $f_c$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-------------|-------------------------------|
|              |                               |                               |                                   |               |               |             |                               |
| 2            | 0,561                         | 0,216                         | 30.840                            | 268,0         | 80,0          | 776         | 43,9                          |
| 3            | 0,564                         | 0,222                         | 31.110                            | 268,0         | 80,0          | 791         | 44,8                          |
| Mittelwert:  |                               |                               | <b>30.930</b>                     |               |               |             | <b>43,9</b>                   |

## Biegebalken nach RILEM Recommendation (1985)

Balken 1 war mir zu Testzwecken und ist ohne Werte.

Balken 2 und 3 hergestellt am 23.09.2020, getestet am 21.10.2020, Alter 28 Tage

Balken 4 und 5 hergestellt am 23.09.2020, getestet am 23.10.2020, Alter 30 Tage

| Nr. | $L$   | $l$ | $b$   | $h$   | $b_{\text{Lig}}$ | $h_{\text{Lig}}$ | $A_{\text{Lig}}$ | $A_{\text{Lig}}$ | $m_{\text{Balken}}$ | $m_1$  | $m_2$ | $m$   |
|-----|-------|-----|-------|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|--------|-------|-------|
|     | mm    | mm  | mm    | mm    | mm               | mm               | mm <sup>2</sup>  | m <sup>2</sup>   | kg                  | kg     | kg    | kg    |
| 2   | 841,0 | 800 | 103,2 | 101,4 | 103,2            | 52,9             | 5459,28          | 0,00545928       | 19,908              | 18,937 | 0,36  | 19,66 |
| 3   | 840,5 | 800 | 100,5 | 101,5 | 100,5            | 50,2             | 5045,10          | 0,00504510       | 19,579              | 18,636 | 0,36  | 19,36 |
| 4   | 840,5 | 800 | 101,6 | 100,4 | 101,6            | 50,2             | 5100,32          | 0,00510032       | 19,670              | 18,722 | 0,36  | 19,44 |
| 5   | 841,5 | 800 | 101,0 | 101,0 | 101,0            | 50,8             | 5130,80          | 0,00513080       | 19,766              | 18,791 | 0,36  | 19,51 |

| Nr. | $\delta_0$  | $W_0$    | $G_F$            | $F_{\text{max}}$ | $t(F_{\text{max}})$ | $v_{\text{Weg}}$ | Kerbe                     |
|-----|-------------|----------|------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------------|
|     | m           | N/m      | J/m <sup>2</sup> | N                | s (ca.)             | mm/s             |                           |
| 2   | 0,001203520 | 0,340125 | 104,81           | 1030,9           | 12                  | 0,02             | gesägt                    |
| 3   | 0,000918950 | 0,249467 | 84,03            | 878,6            | 22                  | 0,012            | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
| 4   | 0,001054290 | 0,248661 | 88,18            | 815,7            | 40                  | 0,005            | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
| 5   | 0,001042640 | 0,335537 | 104,29           | 1034,2           | 46                  | 0,005            | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
|     |             | Mittel   | <b>95,33</b>     |                  |                     |                  |                           |

$$m = m_1 + 2 \cdot m_2$$

$$G_F = (W_0 + m \cdot g \cdot \delta_0) / A_{\text{lig}}$$

$A_{\text{lig}}$  = Bruchfläche projiziert auf Ebene senkrecht zur Balkenachse

$m_1$  = Gewicht zwischen den Auflagern, berechnet mit Balkengewicht und multipliziert mit  $1/l$

$m_2$  = Gewicht des Teils der Belastungseinrichtung, welches nicht an der Maschine befestigt ist. In diesem Fall nur der Vierkantstahl, der auf dem Balken lag (560g), abzüglich der Federkraft der Wegaufnehmer (je 100g)

### 9.3 A.2 - 2. Betonage: Eigene Herstellung (EH I.I) zu B8

Herstellung am 11.12.2020

**Prüfung am 13.01.2021, Alter 39 Tage**

Zylinder  $\varnothing$  150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Dichte, Druckfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $F$<br>[kN] | $f_c$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|-------------|-------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |             |                               |
| 1            | 150,0         | 298,6 | 11,662      | 2210                           | 655         | 37,1                          |
| 2            | 150,0         | 298,5 | 11,676      | 2213                           | 669         | 37,9                          |
| 3            | 150,0         | 298,2 | 11,696      | 2220                           | 691         | 39,1                          |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2214</b>                    |             | <b>38,0</b>                   |

Dichte, Spaltzugfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $F$<br>[kN]  | $f_{ct,sp}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|--------------|-------------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |              |                                     |
| 1            | 150,0         | 299,0 | 11,752      | 2224                           | 243,4        | 3,45                                |
| 2            | 150,0         | 297,1 | 11,682      | 2210                           | 202,7        | 2,88                                |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2220</b>                    | <b>223,1</b> | <b>3,17</b>                         |

-Mögliche Abweichung aufgrund  
mäßiger Verdichtung

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 16.11.2020

Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $\sigma_a$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\sigma_b$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\epsilon_{a,0}$<br>[mm/m] | $\epsilon_{b,0}$<br>[mm/m] | $E_{c,0}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |                                    |                                    |                            |                            |                                   |
| 1            | 150,0         | 299,2 | 11,713      | 2215                           | 12,7                               | 3,8                                | 0,481                      | 0,127                      | 25.070                            |
| 2            | 150,0         | 297,3 | 11,776      | 2241                           | 12,7                               | 3,8                                | 0,468                      | 0,124                      | 25.790                            |
| 3            | 150,0         | 298,7 | 11,698      | 2216                           | 12,7                               | 3,8                                | 0,489                      | 0,131                      | 24.790                            |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2224</b>                    |                                    |                                    |                            |                            | <b>25.217</b>                     |

| Probe<br>Nr. | $\epsilon_{a,3}$<br>[mm/m] | $\epsilon_{b,3}$<br>[mm/m] | $E_{c,s}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $F_a$<br>[kN] | $F_b$<br>[kN] | $F$<br>[kN] | $f_c$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-------------|-------------------------------|
|              |                            |                            |                                   |               |               |             |                               |
| 2            | 0,481                      | 0,185                      | 29.980                            | 224,0         | 67,2          | 703         | 39,8                          |
| 3            | 0,504                      | 0,195                      | 28.720                            | 224,0         | 67,2          | 658         | 37,2                          |
| Mittelwert:  |                            |                            | <b>29.140</b>                     |               |               |             | <b>38,6</b>                   |

## 9.4 2. Betonage: Eigene Herstellung (EH I.I) zu B4

Herstellung am 11.12.2020

**Prüfung am 18.03.2021, Alter 97 Tage**

### Dichte, Druckfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $F$<br>[kN] | $f_c$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|-------------|-------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |             |                               |
| 1            | 150,0         | 299,4 | 11,598      | 2192                           | 704         | 39,8                          |
| 2            | 150,0         | 299,4 | 11,546      | 2182                           | 723         | 40,9                          |
| 3            | 150,0         | 299,7 | 11,614      | 2193                           | 717         | 40,6                          |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2189</b>                    |             | <b>40,4</b>                   |

### Dichte, Spaltzugfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $F$<br>[kN]  | $f_{ct,sp}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|--------------|-------------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |              |                                     |
| 1            | 150,0         | 298,8 | 11,649      | 2206                           | 245,0        | 3,48                                |
| 2            | 150,0         | 298,2 | 11,544      | 2191                           | 247,0        | 3,52                                |
| 3            | 150,0         | 298,1 | 11,594      | 2201                           | 252,0        | 3,59                                |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2200</b>                    | <b>248,0</b> | <b>3,53</b>                         |

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 16.11.2020

### Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $\sigma_a$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\sigma_b$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\varepsilon_{a,0}$<br>[mm/m] | $\varepsilon_{b,0}$<br>[mm/m] | $E_{c,0}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |                                    |                                    |                               |                               |                                   |
| 1            | 150,0         | 298,0 | 11,598      | 2202                           | 13,5                               | 4,0                                | 0,490                         | 0,131                         | 26.250                            |
| 2            | 150,0         | 298,4 | 11,587      | 2197                           | 13,5                               | 4,0                                | 0,494                         | 0,134                         | 25.170                            |
| 3            | 150,0         | 297,3 | 11,499      | 2189                           | 13,5                               | 4,0                                | 0,498                         | 0,135                         | 25.960                            |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2196</b>                    |                                    |                                    |                               |                               | <b>26.127</b>                     |

| Probe<br>Nr. | $\varepsilon_{a,3}$<br>[mm/m] | $\varepsilon_{b,3}$<br>[mm/m] | $E_{c,S}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $F_a$<br>[kN] | $F_b$<br>[kN] | $F$<br>[kN] | $f_c$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-------------|-------------------------------|
|              |                               |                               |                                   |               |               |             |                               |
| 2            | 0,506                         | 0,186                         | 29.440                            | 238,0         | 71,5          | 734,0       | 41,5                          |
| 3            | 0,509                         | 0,186                         | 29.170                            | 238,0         | 71,5          | 731,6       | 41,4                          |
| Mittelwert:  |                               |                               | <b>29.350</b>                     |               |               |             | <b>416</b>                    |

## Biegebalken nach RILEM Recommendation (1985)

Balken 1 hergestellt am 11.12.2020, getestet 08.01.2021, Alter 28 Tage

Balken 2 hergestellt am 11.12.2020, getestet 11.01.2021, Alter 31 Tage

Balken 3, 4 und 5 hergestellt am 11.12.2020, getestet 12.01.2021, Alter 32 Tage

Balken 1 und 2 ungültig. Balken 1 wurde extrem langsam belastet. Balken 2 wurde nach Erreichen von  $F_{\max}$  durch die Federenergie des Prüfrahmens belastet.

| Nr. | $L$ | $l$ | $b$   | $h$   | $b_{\text{Lig}}$ | $h_{\text{Lig}}$ | $A_{\text{Lig}}$ | $A_{\text{Lig}}$ | $m_{\text{Balken}}$ | $m_1$ | $m_2$ | $m$   |
|-----|-----|-----|-------|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|-------|-------|-------|
|     | mm  | mm  | mm    | mm    | mm               | mm               | mm <sup>2</sup>  | m <sup>2</sup>   | kg                  | kg    | kg    | kg    |
| 1   | 840 | 800 | 102,2 | 101,0 | 102,2            | 50,7             | 5184,5           | 0,0052           | 19,41               | 18,49 | 0,36  | 19,21 |
| 2   | 840 | 800 | 101,9 | 101,9 | 101,9            | 51,7             | 5268,2           | 0,0053           | 19,41               | 18,49 | 0,36  | 19,21 |
| 3   | 840 | 800 | 101,0 | 101,2 | 101,0            | 55,6             | 5110,6           | 0,0051           | 19,42               | 18,50 | 0,36  | 19,22 |
| 4   | 840 | 800 | 100,5 | 100,6 | 100,5            | 50,8             | 5105,4           | 0,0051           | 19,21               | 18,30 | 0,36  | 19,02 |
| 5   | 840 | 800 | 101,6 | 101,6 | 101,6            | 51,7             | 5130,8           | 0,0051           | 19,32               | 18,40 | 0,36  | 19,12 |

| Nr. | $\delta_0$ | $W_0$    | $G_F$            | $F_{\max}$ | $t(F_{\max})$ | $v_{\text{Weg}}$ | Kerbe                     |
|-----|------------|----------|------------------|------------|---------------|------------------|---------------------------|
|     | m          | N/m      | J/m <sup>2</sup> | N          | s (ca.)       | mm/s             |                           |
| 1   | 0,001009   | 0,216899 | 78,55            | 703        | 520           | 0,002            | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
| 2   | 0,000959   | 0,230148 | 77,98            | 768        | 85            | 0,005            | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
| 3   | 0,000985   | 0,215406 | 78,48            | 725        | 53            | 0,005            | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
| 4   | 0,0009165  | 0,158940 | 64,62            | 640        | 50            | 0,005            | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
| 5   | 0,000983   | 0,210915 | 77,04            | 717        | 55            | 0,005            | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
|     |            | Mittel   | <b>75,33</b>     |            |               |                  |                           |

$$m = m_1 + 2 \cdot m_2$$

$$G_F = (W_0 + m \cdot g \cdot \delta_0) / A_{\text{lig}}$$

$A_{\text{lig}}$  = Bruchfläche projiziert auf Ebene senkrecht zur Balkenachse

$m_1$  = Gewicht zwischen den Auflagern, berechnet mit Balkengewicht und multipliziert mit  $1/l$

$m_2$  = Gewicht des Teils der Belastungseinrichtung, welches nicht an der Maschine befestigt ist. In diesem Fall nur der Vierkantstahl, der auf dem Balken lag (560g), abzüglich der Federkraft der Wegaufnehmer (je 100g)

### 9.5 A.3 – 3. Betonage: Eigene Herstellung (EH II) zu B5

Herstellung am 01.02.2021

**Prüfung am 18.03.2021, Alter 45 Tage**

Zylinder  $\varnothing$  150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Dichte, Druckfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $F$<br>[kN] | $f_c$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|-------------|-------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |             |                               |
| 1            | 150,0         | 298,8 | 12,310      | 2.331                          | 893         | 50,5                          |
| 2            | 150,0         | 298,6 | 12,331      | 2.337                          | 935         | 52,9                          |
| 3            | 150,0         | 298,7 | 12,279      | 2.326                          | 930         | 52,6                          |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2.331</b>                   |             | <b>52,0</b>                   |

Dichte, Spaltzugfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $F$<br>[kN]  | $f_{ct,sp}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|--------------|-------------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |              |                                     |
| 1            | 150,0         | 298,7 | 12,326      | 2.335                          | 321,0        | 4,56                                |
| 2            | 150,0         | 300,0 | 12,392      | 2.337                          | 291,0        | 4,12                                |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2.340</b>                   | <b>306,0</b> | <b>4,34</b>                         |

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 18.03.2021

Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $\sigma_a$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\sigma_b$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\epsilon_{a,0}$<br>[mm/m] | $\epsilon_{b,0}$<br>[mm/m] | $E_{c,0}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |                                    |                                    |                            |                            |                                   |
| 1            | 150,0         | 299,0 | 12,345      | 2.336                          | 17,3                               | 5,2                                | 0,552                      | 0,159                      | 30.740                            |
| 2            | 150,0         | 298,8 | 12,282      | 2.326                          | 17,3                               | 5,2                                | 0,516                      | 0,143                      | 32.390                            |
| 3            | 150,0         | 299,8 | 12,321      | 2.326                          | 17,3                               | 5,2                                | 0,561                      | 0,159                      | 30.050                            |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2.329</b>                   |                                    |                                    |                            |                            | <b>30.060</b>                     |

| Probe<br>Nr. | $\epsilon_{a,3}$<br>[mm/m] | $\epsilon_{b,3}$<br>[mm/m] | $E_{c,s}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $F_a$<br>[kN] | $F_b$<br>[kN] | $F$<br>[kN] | $f_c$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-------------|-------------------------------|
|              |                            |                            |                                   |               |               |             |                               |
| 2            | 0,526                      | 0,194                      | 36.390                            | 305,0         | 91,5          | 943,5       | 53,4                          |
| 3            | 0,573                      | 0,214                      | 33.650                            | 305,0         | 91,5          | 905,0       | 51,2                          |
| Mittelwert:  |                            |                            | <b>34.787</b>                     |               |               |             | <b>52,5</b>                   |

## Biegebalken nach RILEM Recommendation (1985)

Balken hergestellt am 01.02.2021, getestet 01.03.2021, Alter 28 Tage

Balken 3: Da der Messbereich der Wegaufnehmer kurz vor Ende des Versuchs überschritten wurde, wurde  $\delta_0$  anhand des Maschinenweges ermittelt.

| Nr. | $L$<br>mm | $l$<br>mm | $b$<br>mm | $h$<br>mm | $b_{\text{Lig}}$<br>mm | $h_{\text{Lig}}$<br>mm | $A_{\text{Lig}}$<br>mm <sup>2</sup> | $A_{\text{Lig}}$<br>m <sup>2</sup> | $m_{\text{Balken}}$<br>kg | $m_1$<br>kg | $m_2$<br>kg | $m$<br>kg |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|-------------|-------------|-----------|
| 1   | 840       | 800       | 103,1     | 101,8     | 103,1                  | 51,8                   | 5340,58                             | 0,0053                             | 20,49                     | 19,51       | 0,36        | 20,23     |
| 2   | 839       | 800       | 103,6     | 100,6     | 103,6                  | 51,0                   | 5283,60                             | 0,0053                             | 20,33                     | 19,38       | 0,36        | 20,10     |
| 3   | 840       | 800       | 103,3     | 102,4     | 103,3                  | 51,9                   | 5361,27                             | 0,0054                             | 20,73                     | 19,74       | 0,36        | 20,46     |

| Nr. | $\delta_0$<br>m | $W_0$<br>N/m | $G_F$<br>J/m <sup>2</sup> | $F_{\text{max}}$<br>N | $t(F_{\text{max}})$<br>s (ca.) | $v_{\text{Weg}}$<br>mm/s | Kerbe                     |
|-----|-----------------|--------------|---------------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 1   | 0,0016084       | 0,418242     | 138,09                    | 1133                  | 60                             | 0,005                    | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
| 2   | 0,00144095      | 0,314359     | 113,29                    | 998                   | 60                             | 0,005                    | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
| 3   | 0,00222235      | 0,453359     | 167,77                    | 1072                  | 60                             | 0,005                    | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
|     |                 | Mittel       | <b>139,72</b>             |                       |                                |                          |                           |

$$m = m_1 + 2 \cdot m_2$$

$$G_F = (W_0 + m \cdot g \cdot \delta_0) / A_{\text{Lig}}$$

$A_{\text{Lig}}$  = Bruchfläche projiziert auf Ebene senkrecht zur Balkenachse

$m_1$  = Gewicht zwischen den Auflagern, berechnet mit Balkengewicht und multipliziert mit  $1/l$

$m_2$  = Gewicht des Teils der Belastungseinrichtung, welches nicht an der Maschine befestigt ist. In diesem Fall nur der Vierkantstahl, der auf dem Balken lag (560g), abzüglich der Federkraft der Wegaufnehmer (je 100g)

## 9.6 A.4 – 4. Betonage: Eigene Herstellung (EH III) zu B11

Herstellung am 01.02.2021

**Prüfung am 28.10.2021, Alter 269 Tage**

Zylinder  $\varnothing$  150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Dichte, Druckfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $F$<br>[kN] | $f_c$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|-------------|-------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |             |                               |
| 1            | 150,0         | 299,4 | 12,288      | 2.323                          | 1127        | 63,8                          |
| 2            | 150,0         | 297,9 | 12,246      | 2.326                          | 1173        | 66,4                          |
| 3            | 150,0         | 298,4 | 12,289      | 2.330                          | 1151        | 65,1                          |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2,326</b>                   |             | <b>65,1</b>                   |

Dichte, Spaltzugfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $F$<br>[kN]  | $f_{ct,sp}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|--------------|-------------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |              |                                     |
| 1            | 150,0         | 300,0 | 12,339      | 2.327                          | 299,0        | 4,23                                |
| 2            | 150,0         | 298,2 | 12,257      | 2.326                          | 306,0        | 4,36                                |
| 3            | 150,0         | 299,0 | 12,316      | 2.331                          | 339,0        | 4,81                                |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2.330</b>                   | <b>314,7</b> | <b>4,47</b>                         |

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 18.03.2021

Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $\sigma_a$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\sigma_b$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\varepsilon_{a,0}$<br>[mm/m] | $\varepsilon_{b,0}$<br>[mm/m] | $E_{c,0}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |                                    |                                    |                               |                               |                                   |
| 1            | 150,0         | 300,0 | 12,330      | 2.326                          | 21,7                               | 6,5                                | 0,672                         | 0,194                         | 31.730                            |
| 2            | 150,0         | 299,7 | 12,323      | 2.327                          | 21,7                               | 6,5                                | 0,671                         | 0,189                         | 31.460                            |
| 3            | 150,0         | 300,5 | 12,379      | 2.331                          | 21,7                               | 6,5                                | 0,664                         | 0,192                         | 32.130                            |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2.328</b>                   |                                    |                                    |                               |                               | <b>31.773</b>                     |

| Probe<br>Nr. | $\varepsilon_{a,3}$<br>[mm/m] | $\varepsilon_{b,3}$<br>[mm/m] | $E_{c,s}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $F_a$<br>[kN] | $F_b$<br>[kN] | $F$<br>[kN] | $f_c$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-------------|-------------------------------|
|              |                               |                               |                                   |               |               |             |                               |
| 2            | 0,681                         | 0,246                         | 34.860                            | 383,0         | 115,0         | 1167        | 66,0                          |
| 3            | 0,675                         | 0,238                         | 34.700                            | 383,0         | 115,0         | 1183        | 66,9                          |
| Mittelwert:  |                               |                               | <b>34.807</b>                     |               |               |             | <b>65,9</b>                   |

## Biegebalken nach RILEM Recommendation (1985)

Balken hergestellt am 01.02.2021, getestet 01.03.2021, Alter 28 Tage

**Balken 1-3 wurden nach  $F_{\max}$  durch die Federenergie des Prüfrahmens zu schnell belastet.**

Aufgrund der benötigten Zeit bis Höchstlast bei Balken 1 wurde die Geschwindigkeit für Balken 2 und Balken 3 erhöht.

Balken 3: Da der Messbereich der Durchbiegungsmessung kurz vor Ende des Versuchs überschritten wurde, wurde  $\delta_0$  anhand des Maschinenweges ermittelt.

| Nr. | $L$ | $l$ | $b$   | $h$   | $b_{\text{Lig}}$ | $h_{\text{Lig}}$ | $A_{\text{Lig}}$ | $A_{\text{Lig}}$ | $m_{\text{Balken}}$ | $m_1$ | $m_2$ | $m$   |
|-----|-----|-----|-------|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|-------|-------|-------|
|     | mm  | mm  | mm    | mm    | mm               | mm               | mm <sup>2</sup>  | m <sup>2</sup>   | kg                  | kg    | kg    | kg    |
| 1   | 840 | 800 | 102,8 | 102,5 | 102,8            | 51,8             | 5325,04          | 0,0053           | 20,66               | 19,68 | 0,36  | 20,40 |
| 2   | 839 | 800 | 102,6 | 103,2 | 102,6            | 52,6             | 5396,76          | 0,0054           | 20,57               | 19,59 | 0,36  | 20,31 |
| 3   | 840 | 800 | 103,5 | 102,1 | 103,5            | 51,4             | 5130,80          | 0,0051           | 20,64               | 19,66 | 0,36  | 20,38 |

| Nr. | $\delta_0$ | $W_0$    | $G_F$            | $F_{\max}$ | $t(F_{\max})$ | $v_{\text{Weg}}$ | Kerbe                     |
|-----|------------|----------|------------------|------------|---------------|------------------|---------------------------|
|     | m          | N/m      | J/m <sup>2</sup> | N          | s (ca.)       | mm/s             |                           |
| 1   | 0,00120405 | 0,387303 | 117,97           | 1299       | 74            | 0,005            | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
| 2   | 0,00123710 | 0,403909 | 120,52           | 1353       | 60            | 0,006            | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
| 3   | 0,00223305 | 0,539304 | 192,11           | 1338       | 60            | 0,006            | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
|     |            | Mittel   | <b>143,53</b>    |            |               |                  |                           |

$$m = m_1 + 2 \cdot m_2$$

$$G_F = (W_0 + m \cdot g \cdot \delta_0) / A_{\text{lig}}$$

$A_{\text{lig}}$  = Bruchfläche projiziert auf Ebene senkrecht zur Balkenachse

$m_1$  = Gewicht zwischen den Auflagern, berechnet mit Balkengewicht und multipliziert mit  $1/l$

$m_2$  = Gewicht des Teils der Belastungseinrichtung, welches nicht an der Maschine befestigt ist. In diesem Fall nur der Vierkantstahl, der auf dem Balken lag (560g), abzüglich der Federkraft der Wegaufnehmer (je 100g)

## 9.7 A.5 – 5. Betonage: Eigene Herstellung (EH I,II) zu B2

Herstellung am 01.04.2021

**Prüfung am 19.05.2021, Alter 48 Tage**

Zylinder  $\varnothing$  150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Dichte, Druckfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $F$<br>[kN] | $f_c$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|-------------|-------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |             |                               |
| 1            | 150,0         | 297,9 | 11,507      | 2.186                          | 582         | 32,9                          |
| 2            | 150,0         | 298,5 | 11,471      | 2.175                          | 600         | 34,0                          |
| 3            | 150,0         | 298,1 | 11,553      | 2.193                          | 602         | 34,1                          |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2.185</b>                   |             | <b>33,7</b>                   |

Dichte, Spaltzugfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $F$<br>[kN]  | $f_{ct,sp}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|--------------|-------------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |              |                                     |
| 1            | 150,0         | 298,3 | 11,529      | 2.187                          | 221,0        | 3,14                                |
| 2            | 150,0         | 298,0 | 11,557      | 2.195                          | 211,0        | 3,01                                |
| 3            | 150,0         | 297,8 | 11,660      | 2.216                          | 233,0        | 3,32                                |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2.200</b>                   | <b>221,7</b> | <b>3,16</b>                         |

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 18.03.2021

Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $\sigma_a$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\sigma_b$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\varepsilon_{a,0}$<br>[mm/m] | $\varepsilon_{b,0}$<br>[mm/m] | $E_{c,0}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |                                    |                                    |                               |                               |                                   |
| 1            | 150,0         | 298,7 | 11,551      | 2.188                          | 11,2                               | 3,4                                | 0,463                         | 0,124                         | 23.170                            |
| 2            | 150,0         | 297,9 | 11,451      | 2.175                          | 11,2                               | 3,4                                | 0,466                         | 0,126                         | 23.100                            |
| 3            | 150,0         | 298,2 | 11,507      | 2.184                          | 13,5                               | 5,4                                | 0,463                         | 0,124                         | 23.790                            |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2.182</b>                   |                                    |                                    |                               |                               | <b>23.353</b>                     |

| Probe<br>Nr. | $\varepsilon_{a,3}$<br>[mm/m] | $\varepsilon_{b,3}$<br>[mm/m] | $E_{c,s}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $F_a$<br>[kN] | $F_b$<br>[kN] | $F$<br>[kN] | $f_c$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-------------|-------------------------------|
|              |                               |                               |                                   |               |               |             |                               |
| 2            | 0,480                         | 0,181                         | 26.270                            | 198,3         | 59,5          | 587,4       | 33,2                          |
| 3            | 0,475                         | 0,173                         | 26.700                            | 238,0         | 95,5          | 620,4       | 35,1                          |
| Mittelwert:  |                               |                               | <b>26.443</b>                     |               |               |             | <b>34,0</b>                   |

## Biegebalken nach RILEM Recommendation (1985)

Balken hergestellt am 01.04.2021, getestet 29.04.2021, Alter 28 Tage

Balken 4: Keine Berücksichtigung für die Berechnung des Mittelwertes, weil die Lagerung nicht unter Wasser erfolgte, sondern der des Versuchskörpers entsprach.

| Nr. | $L$<br>mm | $l$<br>mm | $b$<br>mm | $h$<br>mm | $b_{\text{Lig}}$<br>mm | $h_{\text{Lig}}$<br>mm | $A_{\text{Lig}}$<br>mm <sup>2</sup> | $A_{\text{Lig}}$<br>m <sup>2</sup> | $m_{\text{Balken}}$<br>kg | $m_1$<br>kg | $m_2$<br>kg | $m$<br>kg |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|-------------|-------------|-----------|
| 1   | 840       | 800       | 102,8     | 103,0     | 102,8                  | 52,5                   | 5397,00                             | 0.0054                             | 19,3                      | 18,38       | 0.36        | 19,10     |
| 2   | 840       | 800       | 100,6     | 100,6     | 100,7                  | 50,6                   | 5095,42                             | 0.0051                             | 18,85                     | 17,95       | 0.36        | 18,67     |
| 3   | 840       | 800       | 101,5     | 101,5     | 101,3                  | 51,5                   | 5216,95                             | 0.0052                             | 19,25                     | 18,33       | 0.36        | 19,05     |
| 4   | 840       | 800       | 101,6     | 101,6     | 102,3                  | 51,4                   | 5258,22                             | 0,0053                             | 18,75                     | 17,86       | 0,36        | 18,58     |

| Nr. | $\delta_0$<br>m | $W_0$<br>N/m | $G_F$<br>J/m <sup>2</sup> | $F_{\text{max}}$<br>N | $t(F_{\text{max}})$<br>s (ca.) | $v_{\text{Weg}}$<br>mm/s | Kerbe                     |
|-----|-----------------|--------------|---------------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 1   | 0,00110910      | 0,215079     | 78,36                     | 758                   | 52                             | 0,005                    | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
| 2   | 0,00118845      | 0,158789     | 73,89                     | 631                   | 42                             | 0,005                    | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
| 3   | 0,00101330      | 0,212059     | 76,95                     | 765                   | 55                             | 0,005                    | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
| 4   | 0,00101330      | 0,387082     | 134,73                    | 809                   | 60                             | 0,005                    | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
|     |                 | Mittel       | <b>76,4</b>               |                       |                                |                          |                           |

$$m = m_1 + 2 \cdot m_2$$

$$G_F = (W_0 + m \cdot g \cdot \delta_0) / A_{\text{lig}}$$

$A_{\text{lig}}$  = Bruchfläche projiziert auf Ebene senkrecht zur Balkenachse

$m_1$  = Gewicht zwischen den Auflagern, berechnet mit Balkengewicht und multipliziert mit  $1/l$

$m_2$  = Gewicht des Teils der Belastungseinrichtung, welches nicht an der Maschine befestigt ist. In diesem Fall nur der Vierkantstahl, der auf dem Balken lag (560g), abzüglich der Federkraft der Wegaufnehmer (je 100g)

## 9.8 A.6 – 6. Betonage: Transportbeton (TB II) zu B1, B9

Herstellung am 07.05.2021

**Prüfung am 19.05.2021, Alter 48 Tage**

Zylinder  $\varnothing$  150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Dichte, Druckfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $F$<br>[kN] | $f_c$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|-------------|-------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |             |                               |
| 1            | 150,0         | 297,3 | 12,459      | 2.371                          | 810         | 45,8                          |
| 2            | 150,0         | 297,9 | 12,394      | 2.354                          | 790         | 44,7                          |
| 3            | 150,0         | 297,3 | 12,399      | 2.360                          | 820         | 46,4                          |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2.362</b>                   |             | <b>45,6</b>                   |

Dichte, Spaltzugfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $F$<br>[kN]  | $f_{ct,sp}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|--------------|-------------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |              |                                     |
| 1            | 150,0         | 297,9 | 12,396      | 2.355                          | 250,0        | 3,56                                |
| 2            | 150,0         | 298,5 | 12,446      | 2.359                          | 243,0        | 3,46                                |
| 3            | 150,0         | 297,6 | 12,454      | 2.368                          | 254,0        | 3,62                                |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2.360</b>                   | <b>249.0</b> | <b>3,55</b>                         |

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 18.03.2021

Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $\sigma_a$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\sigma_b$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\varepsilon_{a,0}$<br>[mm/m] | $\varepsilon_{b,0}$<br>[mm/m] | $E_{c,0}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |                                    |                                    |                               |                               |                                   |
| 1            | 150,0         | 297,0 | 12,216      | 2.328                          | 15,2                               | 4,5                                | 0,524                         | 0,144                         | 27.940                            |
| 2            | 150,0         | 297,8 | 12,443      | 2.364                          | 15,2                               | 4,5                                | 0,513                         | 0,145                         | 28.850                            |
| 3            | 150,0         | 297,7 | 12,305      | 2.339                          | 15,5                               | 4,5                                | 0,526                         | 0,148                         | 28.080                            |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2.344</b>                   |                                    |                                    |                               |                               | <b>28.290</b>                     |

| Probe<br>Nr. | $\varepsilon_{a,3}$<br>[mm/m] | $\varepsilon_{b,3}$<br>[mm/m] | $E_{c,s}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $F_a$<br>[kN] | $F_b$<br>[kN] | $F$<br>[kN] | $f_c$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-------------|-------------------------------|
|              |                               |                               |                                   |               |               |             |                               |
| 2            | 0,522                         | 0,206                         | 33.590                            | 268,0         | 80,4          | 770,7       | 43,6                          |
| 3            | 0,535                         | 0,211                         | 32.770                            | 268,0         | 80,4          | 780,1       | 44,1                          |
| Mittelwert:  |                               |                               | <b>32.940</b>                     |               |               |             | <b>43,6</b>                   |

## 9.9 6. Betonage: Transportbeton (TB II) zu B12, B13

Herstellung am 07.05.2021

**Prüfung am 28.10.2021, Alter 174 Tage**

Zylinder  $\varnothing$  150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper

Dichte, Druckfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $F$<br>[kN] | $f_c$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|-------------|-------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |             |                               |
| 1            | 150,0         | 298,6 | 12,349      | 2.340                          | 1023        | 57,9                          |
| 2            | 150,0         | 297,8 | 12,312      | 2.340                          | 1000        | 56,6                          |
| 3            | 150,0         | 297,8 | 12,217      | 2.321                          | 1004        | 56,8                          |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2.334</b>                   |             | <b>57,1</b>                   |

Dichte, Spaltzugfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $F$<br>[kN]  | $f_{ct,sp}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|--------------|-------------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |              |                                     |
| 1            | 150,0         | 298,0 | 12,422      | 2.359                          | 281,0        | 4,00                                |
| 2            | 150,0         | 298,4 | 12,407      | 2.353                          | 305,0        | 4,34                                |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2.360</b>                   | <b>293,0</b> | <b>4,17</b>                         |

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 18.03.2021

Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

| Probe<br>Nr. | Maße<br>[mm]  |       | $m$<br>[kg] | $\rho$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $\sigma_a$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\sigma_b$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\epsilon_{a,0}$<br>[mm/m] | $\epsilon_{b,0}$<br>[mm/m] | $E_{c,0}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|---------------|-------|-------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
|              | $\varnothing$ | $h$   |             |                                |                                    |                                    |                            |                            |                                   |
| 1            | 150,0         | 297,7 | 12,340      | 2.346                          | 19,0                               | 5,7                                | 0,572                      | 0,165                      | 32.670                            |
| 2            | 150,0         | 297,9 | 12,307      | 2.338                          | 19,0                               | 5,7                                | 0,561                      | 0,155                      | 32.750                            |
| 3            | 150,0         | 297,6 | 12,319      | 2.342                          | 19,0                               | 5,7                                | 0,589                      | 0,172                      | 31.890                            |
| Mittelwert:  |               |       |             | <b>2.342</b>                   |                                    |                                    |                            |                            | <b>32.437</b>                     |

| Probe<br>Nr. | $\epsilon_{a,3}$<br>[mm/m] | $\epsilon_{b,3}$<br>[mm/m] | $E_{c,s}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $F_a$<br>[kN] | $F_b$<br>[kN] | $F$<br>[kN] | $f_c$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|--------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|---------------|---------------|-------------|-------------------------------|
|              |                            |                            |                                   |               |               |             |                               |
| 2            | 0,567                      | 0,208                      | 37.040                            | 336,0         | 101,0         | 1036        | 58,6                          |
| 3            | 0,598                      | 0,229                      | 36.040                            | 336,0         | 101,0         | 991         | 56,1                          |
| Mittelwert:  |                            |                            | <b>36.707</b>                     |               |               |             | <b>57,3</b>                   |

## Biegebalken nach RILEM Recommendation (1985)

Balken hergestellt am 07.05.2021, getestet 04.06.2021, Alter 28 Tage

Balken 4 wurde nicht unter Wasser gelagert, sondern wie der zugehörige Versuchskörper; im Mittelwert nicht berücksichtigt

| Nr. | $L$<br>mm | $l$<br>mm | $b$<br>mm | $h$<br>mm | $b_{\text{Lig}}$<br>mm | $h_{\text{Lig}}$<br>mm | $A_{\text{Lig}}$<br>mm <sup>2</sup> | $A_{\text{Lig}}$<br>m <sup>2</sup> | $m_{\text{Balken}}$<br>kg | $m_1$<br>kg | $m_2$<br>kg | $m$<br>kg |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|-------------|-------------|-----------|
| 1   | 840       | 800       | 101,6     | 102,5     | 101,6                  | 52,1                   | 5293,4                              | 0,0053                             | 20,51                     | 19,53       | 0,36        | 20,25     |
| 2   | 840       | 800       | 102,2     | 101,4     | 102,2                  | 51,1                   | 5222,4                              | 0,0052                             | 20,35                     | 19,38       | 0,36        | 20,10     |
| 3   | 840       | 800       | 101,6     | 102,9     | 101,6                  | 52,7                   | 5354,3                              | 0,0054                             | 20,44                     | 19,47       | 0,36        | 20,19     |
| 4   | 840       | 800       | 101,7     | 102,7     | 101,7                  | 52,5                   | 5339,3                              | 0,0053                             | 20,37                     | 19,40       | 0,36        | 20,12     |

| Nr. | $\delta_0$<br>m | $W_0$<br>N/m | $G_F$<br>J/m <sup>2</sup> | $F_{\text{max}}$<br>N | $t(F_{\text{max}})$<br>s (ca.) | $v_{\text{Weg}}$<br>mm/s | Kerbe                     |
|-----|-----------------|--------------|---------------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 1   | 0,000983        | 0,297007     | 93,01                     | 938                   | 62                             | 0,005                    | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
| 2   | 0,001236        | 0,353408     | 114,36                    | 1010                  | 67                             | 0,005                    | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
| 3   | 0,001256        | 0,280506     | 98,84                     | 816                   | 51                             | 0,005                    | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
| 4   | 0,001721        | 0,493741     | 156,11                    | 793                   | 71                             | 0,005                    | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
|     |                 | Mittel       | <b>102,07</b>             |                       |                                |                          |                           |

$$m = m_1 + 2 \cdot m_2$$

$$G_F = (W_0 + m \cdot g \cdot \delta_0) / A_{\text{lig}}$$

$A_{\text{lig}}$  = Bruchfläche projiziert auf Ebene senkrecht zur Balkenachse

$m_1$  = Gewicht zwischen den Auflagern, berechnet mit Balkengewicht und multipliziert mit  $1/l$

$m_2$  = Gewicht des Teils der Belastungseinrichtung, welches nicht an der Maschine befestigt ist. In diesem Fall nur der Vierkantstahl, der auf dem Balken lag (560g), abzüglich der Federkraft der Wegaufnehmer (je 100g)

## Biegebalken nach RILEM Recommendation (1985)

Balken hergestellt am 07.05.2021, getestet 26.10.2021, Alter 172 Tage

Balken zugehörig zu B12 und B13.

Die Balken wurden nicht unter Wasser gelagert, sondern wie der zugehörige Versuchskörper.

| Nr. | $L$<br>mm | $l$<br>mm | $b$<br>mm | $h$<br>mm | $b_{\text{Lig}}$<br>mm | $h_{\text{Lig}}$<br>mm | $A_{\text{Lig}}$<br>mm <sup>2</sup> | $A_{\text{Lig}}$<br>m <sup>2</sup> | $m_{\text{Balken}}$<br>kg | $m_1$<br>kg | $m_2$<br>kg | $m$<br>kg |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|-------------|-------------|-----------|
| 1   | 839       | 800       | 101,5     | 101,1     | 101,5                  | 51,1                   | 5186,65                             | 0,0052                             | 20,01                     | 19,08       | 0,360       | 19,80     |
| 2   | 840       | 800       | 101,1     | 101,0     | 101,9                  | 50,6                   | 5156,14                             | 0,0052                             | 20,12                     | 19,16       | 0,360       | 19,88     |

| Nr. | $\delta_0$<br>m | $W_0$<br>N/m | $G_F$<br>J/m <sup>2</sup> | $F_{\text{max}}$<br>N | $t(F_{\text{max}})$<br>s (ca.) | $v_{\text{Weg}}$<br>mm/s | Kerbe                     |
|-----|-----------------|--------------|---------------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 1   | 0,002114050     | 0,441808     | 164,35                    | 895                   | 75                             | 0,005                    | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
| 2   | 0,002326450     | 0,711882     | 226,07                    | 960                   | 63                             | 0,006                    | Keil mit 15°, Spitze R2,5 |
|     |                 | Mittel       | <b>195,21</b>             |                       |                                |                          |                           |

$$m = m_1 + 2 \cdot m_2$$

$$G_F = (W_0 + m \cdot g \cdot \delta_0) / A_{\text{lig}}$$

$A_{\text{lig}}$  = Bruchfläche projiziert auf Ebene senkrecht zur Balkenachse

$m_1$  = Gewicht zwischen den Auflagern, berechnet mit Balkengewicht und multipliziert mit  $1/l$

$m_2$  = Gewicht des Teils der Belastungseinrichtung, welches nicht an der Maschine befestigt ist. In diesem Fall nur der Vierkantstahl, der auf dem Balken lag (560g), abzüglich der Federkraft der Wegaufnehmer (je 100g)

# Anlage B: Siebversuche

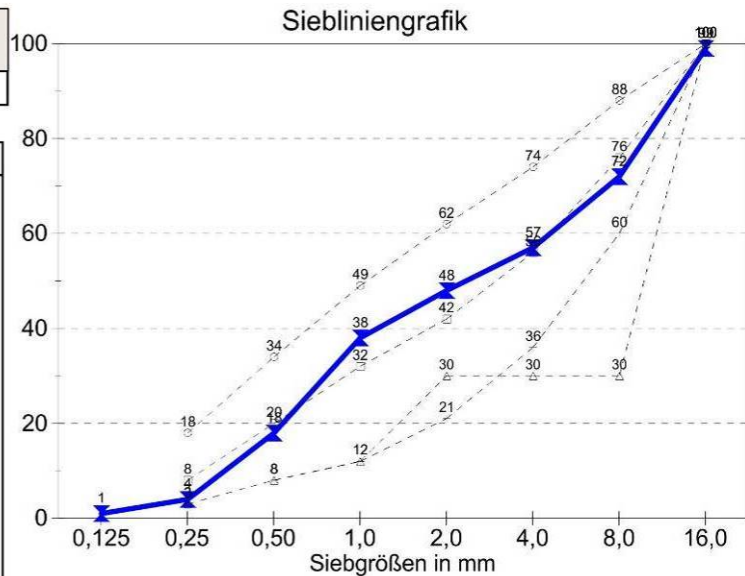
## 9.10 B.1 Transportbeton I zu B3, B6, B7, B10, B14

**Betonlabor Süderelbe GmbH & Co.KG**  
 WPK - Prüfstelle  
 Fünfhausener Landweg 130 21079 Hamburg  
 Tel. 040 / 76 706 144 Fax 040 / 76 706 480 Zentrale 040 / 76 706 0

Sieblinie **01G-482032K**

Sieblinienbereich BC 16 **K1**  
 Werk : ROBA Neuland-Beton-Harburg

Art und Herkunft  
 Natursand 0/2 CEMEX  
 EI-O-EI-OF  
 Kies 2/8 Zeithain  
 EI-S  
 Gletsanda 8/16 FY HH- Midgard  
 EI



### 1. ZUSAMMENSETZUNG DER KORNGRUPPEN

| Korn-<br>gruppe | Durchgänge in % durch die Siebe in mm |      |      |      |      |       |       |       |       |  |
|-----------------|---------------------------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|--|
|                 | 0,125                                 | 0,25 | 0,50 | 1,0  | 2,0  | 4,0   | 8,0   | 16,0  | 31,5  |  |
| 0/2             | 0,8                                   | 8,1  | 38,0 | 78,0 | 97,8 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |  |
| 2/8             | 0,1                                   | 0,1  | 0,1  | 1,0  | 6,0  | 39,0  | 98,0  | 100,0 | 100,0 |  |
| 8/16            | 0,7                                   | 0,7  | 0,7  | 0,8  | 1,0  | 3,0   | 13,0  | 96,0  | 100,0 |  |

### 2. BERECHNUNG DER SIEBLINIE

| Korn-<br>gruppe | Anteil<br>in % | Durchgänge in % durch die Siebe in mm |      |      |      |      |      |      |      |       |  |
|-----------------|----------------|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|--|
|                 |                | 0,125                                 | 0,25 | 0,50 | 1,0  | 2,0  | 4,0  | 8,0  | 16,0 | 31,5  |  |
| 0/2             | 48             | 0,4                                   | 3,9  | 18,2 | 37,4 | 46,9 | 48,0 | 48,0 | 48,0 | 48,0  |  |
| 2/8             | 20             | 0,0                                   | 0,0  | 0,0  | 0,2  | 1,2  | 7,8  | 19,6 | 20,0 | 20,0  |  |
| 8/16            | 32             | 0,2                                   | 0,2  | 0,2  | 0,3  | 0,3  | 1,0  | 4,2  | 30,7 | 32,0  |  |
| Summe           | 100            | 0,6                                   | 4,1  | 18,4 | 37,9 | 48,4 | 56,8 | 71,8 | 98,7 | 100,0 |  |
| Rückstand %     |                | 99,4                                  | 95,9 | 81,6 | 62,1 | 51,6 | 43,2 | 28,2 | 1,3  | 0,0   |  |

### 3. IST-SIEBLINIE ( gerundete Werte)

|  |   |   |    |    |    |    |    |    |     |
|--|---|---|----|----|----|----|----|----|-----|
|  | 1 | 4 | 18 | 38 | 48 | 57 | 72 | 99 | 100 |
|--|---|---|----|----|----|----|----|----|-----|

Kennwert  
nach  
Rundung  
3,64  
 DSumme  
536

Hamburg, den 09.12.2020

  
 WPK - Prüfstelle  
 Betonlabor Süderelbe  
 Hamburg  
 Prüfstellenleiter

## Anlage C: Zugversuch des Bewehrungsstahls

Zugversuche durchgeführt vom 04.08. bis 06.08.2021 an der 500kN Zug-Prüfmaschine.

Versuchsdurchführung in Anlehnung an:

- DIN EN ISO 6892-1:2009 Metallische Werkstoffe - Zugversuch Verfahren A22
- DIN EN ISO 15630-1 Stähle für die Bewehrung und das Vorspannen von Beton - Prüfverfahren

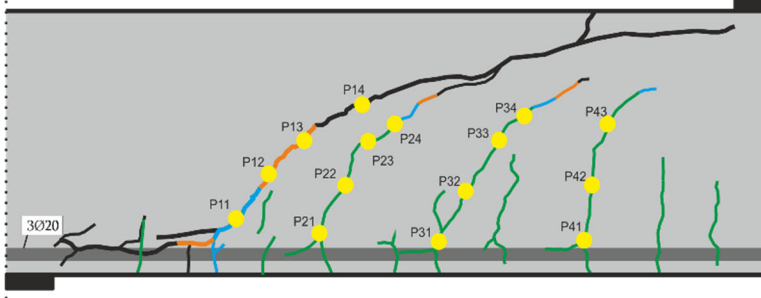
| Bewehrungsstab | Nr.    | $R_m$        | $R_{p0,2}$   | $R_{eH}$     | $R_{eL}$     | $R_m/R_e$    | Duktilitätsklasse |
|----------------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------------|
|                |        | [MPa]        | [MPa]        | [MPa]        | [MPa]        |              |                   |
| Ø8<br>WZ 1/26  | 1      | 618,3        | 544,7        | -            | -            | 1,135        | B                 |
|                | 2      | 646,1        | 568,6        | -            | -            | 1,136        | B                 |
|                | 3      | 620,3        | 548,7        | -            | -            | 1,130        | B                 |
|                | 4      | 632,2        | 554,7        | -            | -            | 1,140        | B                 |
|                | Mittel | <b>629,2</b> | <b>554,2</b> | -            | -            | <b>1,135</b> |                   |
| Ø10<br>WZ 1/16 | 1      | 606,4        | 522,3        | -            | -            | 1,161        | B                 |
|                | 2      | 602,5        | 523,6        | -            | -            | 1,151        | B                 |
|                | 3      | 612,7        | 526,1        | -            | -            | 1,165        | B                 |
|                | 4      | 611,5        | 527,4        | -            | -            | 1,159        | B                 |
|                | 5      | 614,0        | 526,1        | -            | -            | 1,167        | B                 |
|                | Mittel | <b>612,7</b> | <b>526,5</b> | -            | -            | <b>1,164</b> |                   |
| Ø12<br>WZ 1/17 | 1      | 645,4        | 574,7        | -            | -            | 1,123        | B                 |
|                | 2      | 635,7        | 546,4        | -            | -            | 1,163        | B                 |
|                | 3      | 646,3        | 557,0        | -            | -            | 1,160        | B                 |
|                | 4      | 632,2        | 555,3        | -            | -            | 1,139        | B                 |
|                | Mittel | <b>642,5</b> | <b>559,4</b> | -            | -            | <b>1,149</b> |                   |
| Ø14<br>WZ 7/32 | 1      | 651,3        | -            | 572,7        | 551,9        | 1,137        | B                 |
|                | 2      | 657,1        | -            | 579,9        | 555,8        | 1,133        | B                 |
|                | 3      | 650,6        | -            | 570,8        | 547,4        | 1,140        | B                 |
|                | 4      | 651,3        | -            | 574,7        | 554,5        | 1,133        | B                 |
|                | 5      | 651,9        | -            | 572,7        | 546,8        | 1,138        | B                 |
|                | Mittel | <b>652,5</b> | -            | <b>574,2</b> | <b>551,3</b> | <b>1,136</b> |                   |
| Ø16<br>WZ 7/32 | 1      | 634,8        | -            | 554,7        | 532,3        | 1,144        | B                 |
|                | 2      | 631,3        | -            | 549,3        | 530,3        | 1,149        | B                 |
|                | 3      | 649,8        | -            | 566,2        | 543,3        | 1,148        | B                 |
|                | 4      | 634,8        | -            | 556,7        | 533,8        | 1,140        | B                 |
|                | 5      | 633,3        | -            | 555,7        | 533,8        | 1,140        | B                 |
|                | Mittel | <b>636,8</b> | -            | <b>556,5</b> | <b>534,7</b> | <b>1,144</b> |                   |

| Bewehrungsstab       | Nr.    | $R_m$        | $R_{p0,2}$ | $R_{eH}$     | $R_{eL}$     | $R_m/R_e$    | Duktilitätsklasse |
|----------------------|--------|--------------|------------|--------------|--------------|--------------|-------------------|
|                      |        | [MPa]        | [MPa]      | [MPa]        | [MPa]        |              |                   |
| Ø20<br>WZ 7/32       | 1      | 647,1        | -          | 543,3        | 526,1        | 1,191        | B                 |
|                      | 2      | 647,8        | -          | 545,2        | 526,4        | 1,188        | B                 |
|                      | 3      | 647,8        | -          | 546,2        | 525,8        | 1,186        | B                 |
|                      | 4      | 647,5        | -          | 547,5        | 529,3        | 1,183        | B                 |
|                      | 5      | 650,3        | -          | 546,5        | 535,7        | 1,190        | B                 |
|                      | Mittel | <b>648,1</b> | -          | <b>545,7</b> | <b>528,7</b> | <b>1,188</b> |                   |
| Ø28 T III<br>WZ 7/32 | 1      | 677,4        | -          | 565,6        | 560,4        | 1,198        | B                 |
|                      | 2      | 669,2        | -          | 570,9        | 557,6        | 1,172        | B                 |
|                      | 3      | 670,9        | -          | 574,0        | 563,6        | 1,169        | B                 |
|                      | 4      | 670,0        | -          | 572,1        | 560,1        | 1,171        | B                 |
|                      | 5      | 681,7        | -          | 575,8        | 573,9        | 1,184        | B                 |
|                      | Mittel | <b>673,8</b> | -          | <b>571,7</b> | <b>563,1</b> | <b>1,179</b> |                   |
| Ø28 T IV<br>WZ 9/72  | 1      | 648,7        | -          | 532,8        | 521,9        | 1,218        | B                 |
|                      | 2      | 652,6        | -          | 533,8        | 524,7        | 1,223        | B                 |
|                      | 3      | 651,9        | -          | 532,3        | 524,2        | 1,225        | B                 |
|                      | 4      | 653,7        | -          | 536,9        | 527,4        | 1,218        | B                 |
|                      | Mittel | <b>651,1</b> | -          | <b>533,0</b> | <b>523,6</b> | <b>1,222</b> |                   |

Grau ausgeschriebene Versuchswerte entsprechen nicht der Gültigkeit der Normen und werden für die Mittelwertberechnung nicht herangezogen.

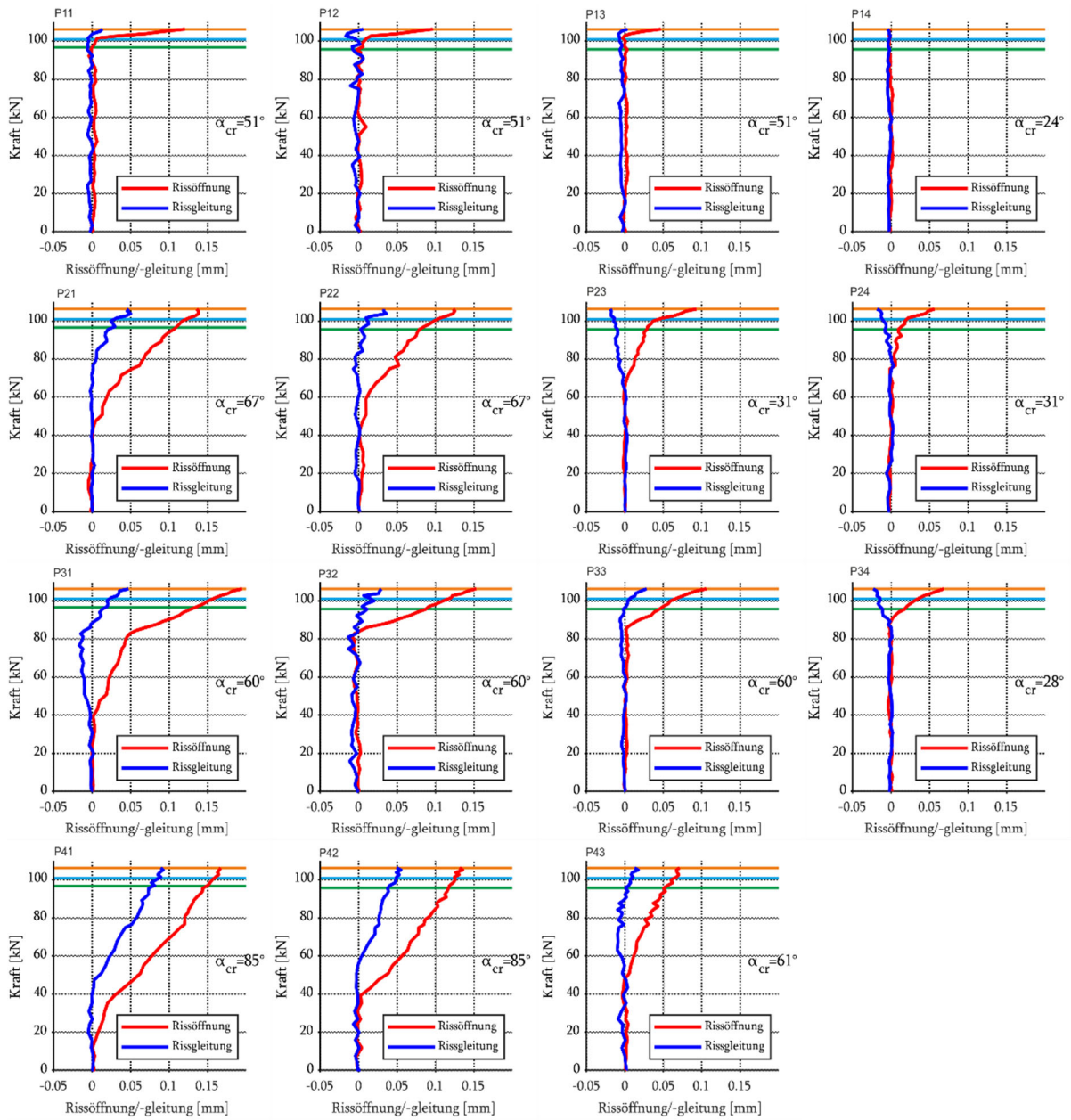
# Anlage D: Rissgleitung und Rissöffnung an ausgewählten Punkten

B1.1

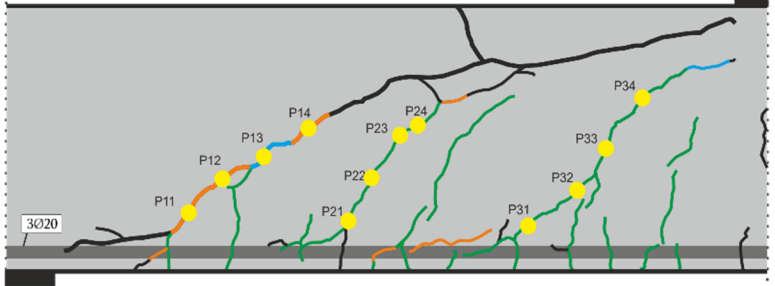


0,9  $F_{max} = 95,6$  kN  
 0,95  $F_{max} = 101,6$  kN  
 1,0  $F_{max} = 106,3$  kN

$d = 0,37$  m  
 $f_{cm} = 45,6$  MPa  
 $f_{ct,sp} = 3,55$  MPa  
 $E_{c,0} = 28.290$  MPa  
 $a_g = 16$  mm  
 $A_{sl} = 9,42$  cm<sup>2</sup>  
 $\rho_l = 1,70$  %

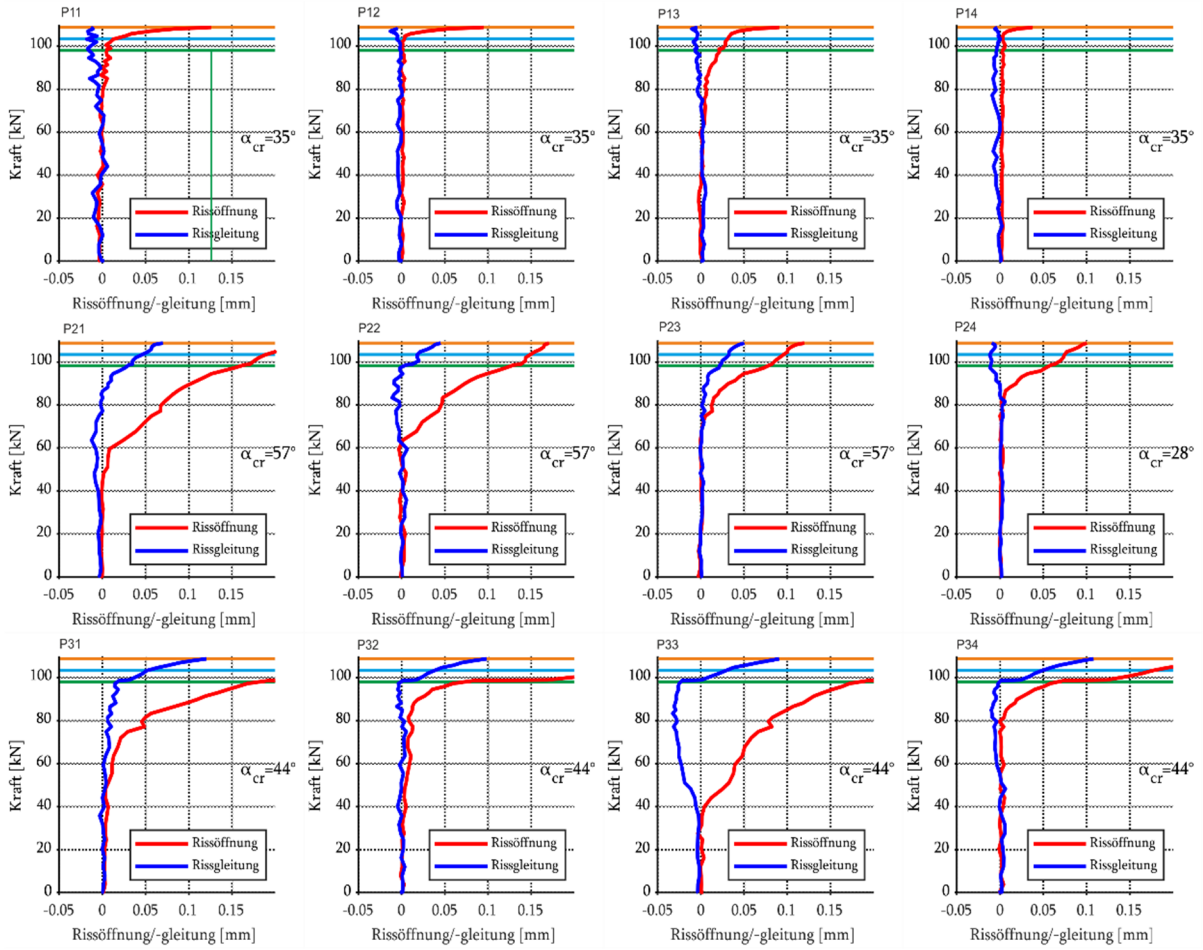


# B1.2

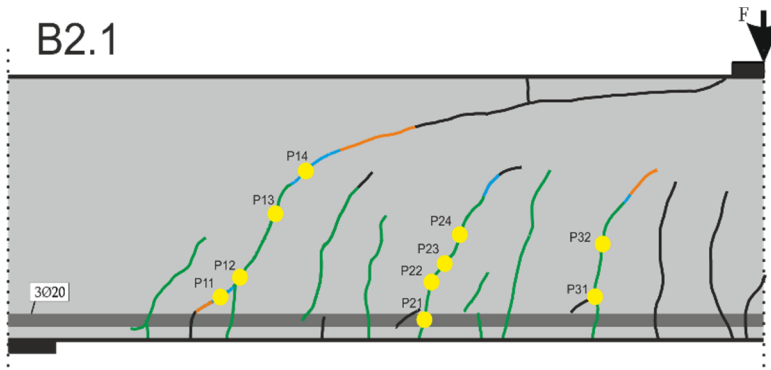


0,9  $F_{max} = 98,6$  kN  
 0,95  $F_{max} = 103,3$  kN  
 1,0  $F_{max} = 108,8$  kN

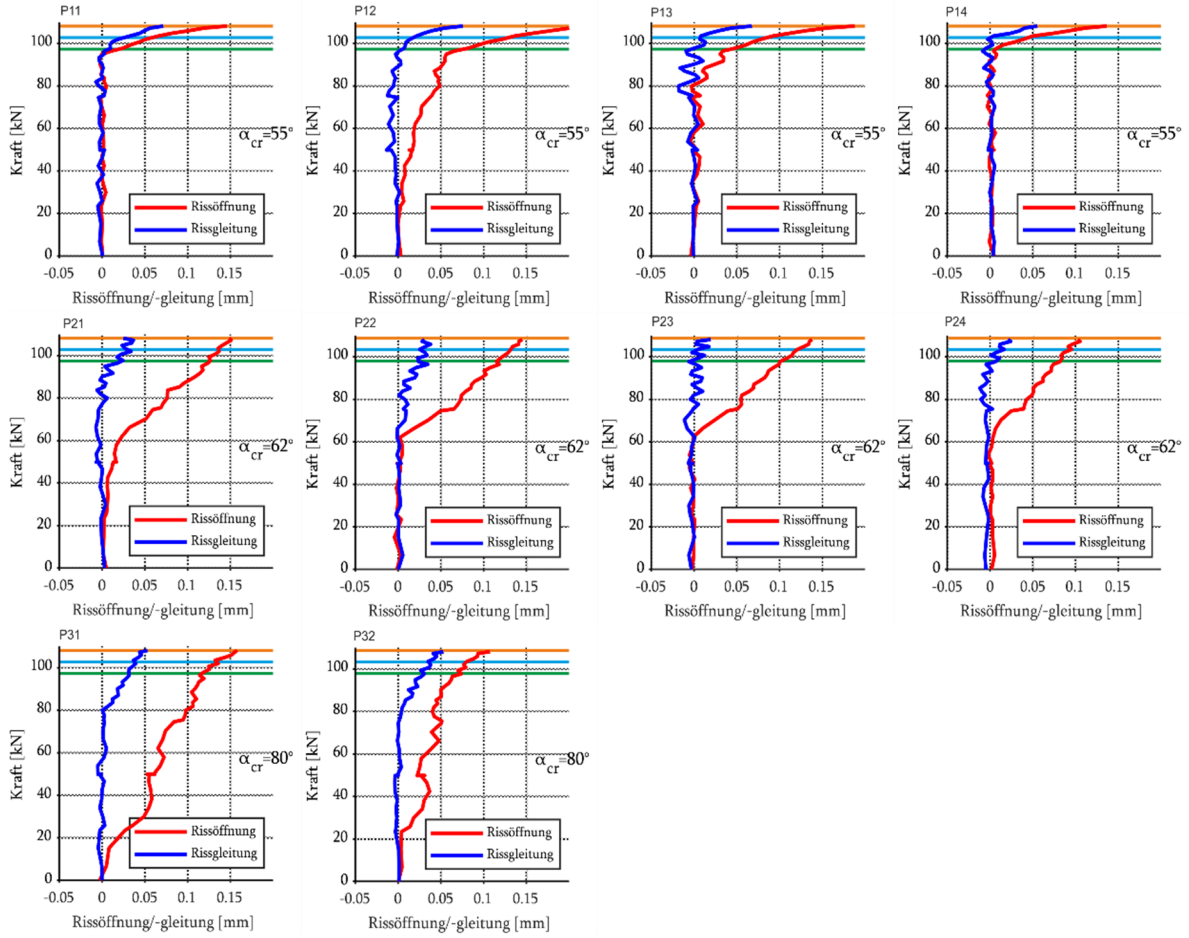
$d = 0,37$  m  
 $f_{cm} = 45,6$  MPa  
 $f_{ct,sp} = 3,55$  MPa  
 $E_{c,0} = 28.290$  MPa  
 $a_g = 16$  mm  
 $A_{sl} = 9,42$  cm<sup>2</sup>  
 $\rho_l = 1,70$  %



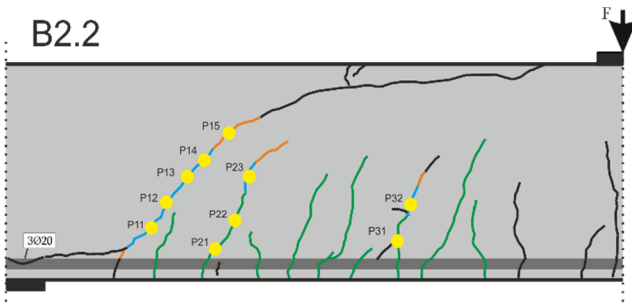
# B2.1



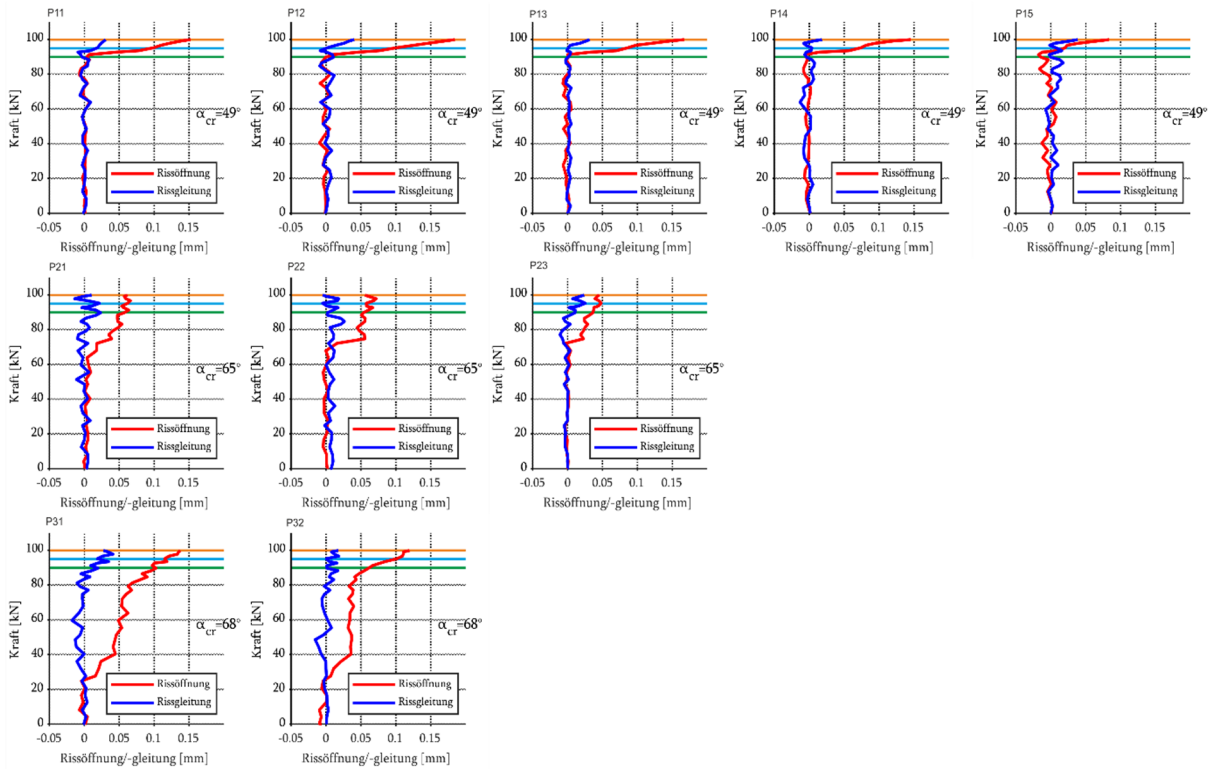
|                                   |                                |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| 0,9 $F_{max} = 97,7 \text{ kN}$   | $d = 0,37 \text{ m}$           |
| 0,95 $F_{max} = 103,5 \text{ kN}$ | $f_{cm} = 33,7 \text{ MPa}$    |
| 1,0 $F_{max} = 108,2 \text{ kN}$  | $f_{ct,sp} = 3,16 \text{ MPa}$ |
|                                   | $E_{c,0} = 23.353 \text{ MPa}$ |
|                                   | $a_g = 8 \text{ mm}$           |
|                                   | $A_{sl} = 9,42 \text{ cm}^2$   |
|                                   | $\rho_l = 1,70 \text{ \%}$     |



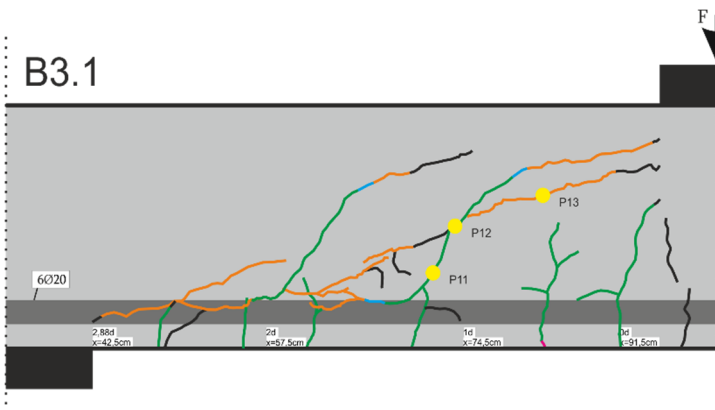
## B2.2



|                  |         |               |                      |
|------------------|---------|---------------|----------------------|
| 0,9 $F_{max}$ =  | 89,7 kN | $d$ =         | 0,37 m               |
| 0,95 $F_{max}$ = | 95,1 kN | $f_{cm}$ =    | 33,7 MPa             |
| 1,0 $F_{max}$ =  | 99,8 kN | $f_{ct,sp}$ = | 3,16 MPa             |
|                  |         | $E_{c,0}$ =   | 23.353 MPa           |
|                  |         | $a_g$ =       | 8 mm                 |
|                  |         | $A_{sl}$ =    | 9,42 cm <sup>2</sup> |
|                  |         | $\rho_l$ =    | 1,70 %               |

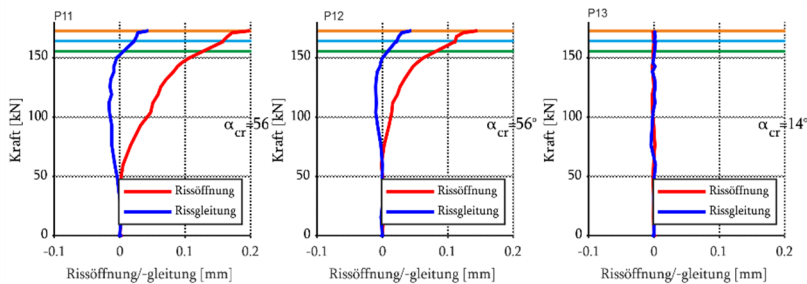


## B3.1

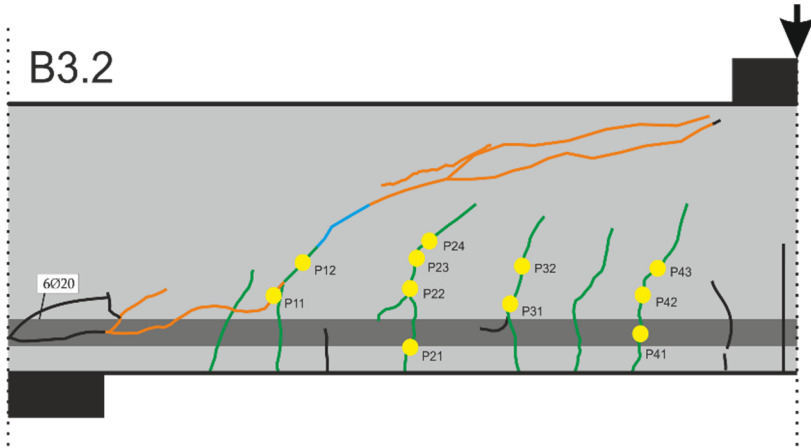


|                  |          |
|------------------|----------|
| 0,9 $F_{max}$ =  | 149,9 kN |
| 0,95 $F_{max}$ = | 163,2 kN |
| 1,0 $F_{max}$ =  | 172,7 kN |

|               |                      |
|---------------|----------------------|
| $d$ =         | 0,17 m               |
| $f_{cm}$ =    | 43,1 MPa             |
| $f_{ct,sp}$ = | 3,35 MPa             |
| $E_{c,0}$ =   | 27.670 MPa           |
| $a_g$ =       | 16 mm                |
| $A_{sl}$ =    | 18,8 cm <sup>2</sup> |
| $\rho_l$ =    | 2,46 %               |

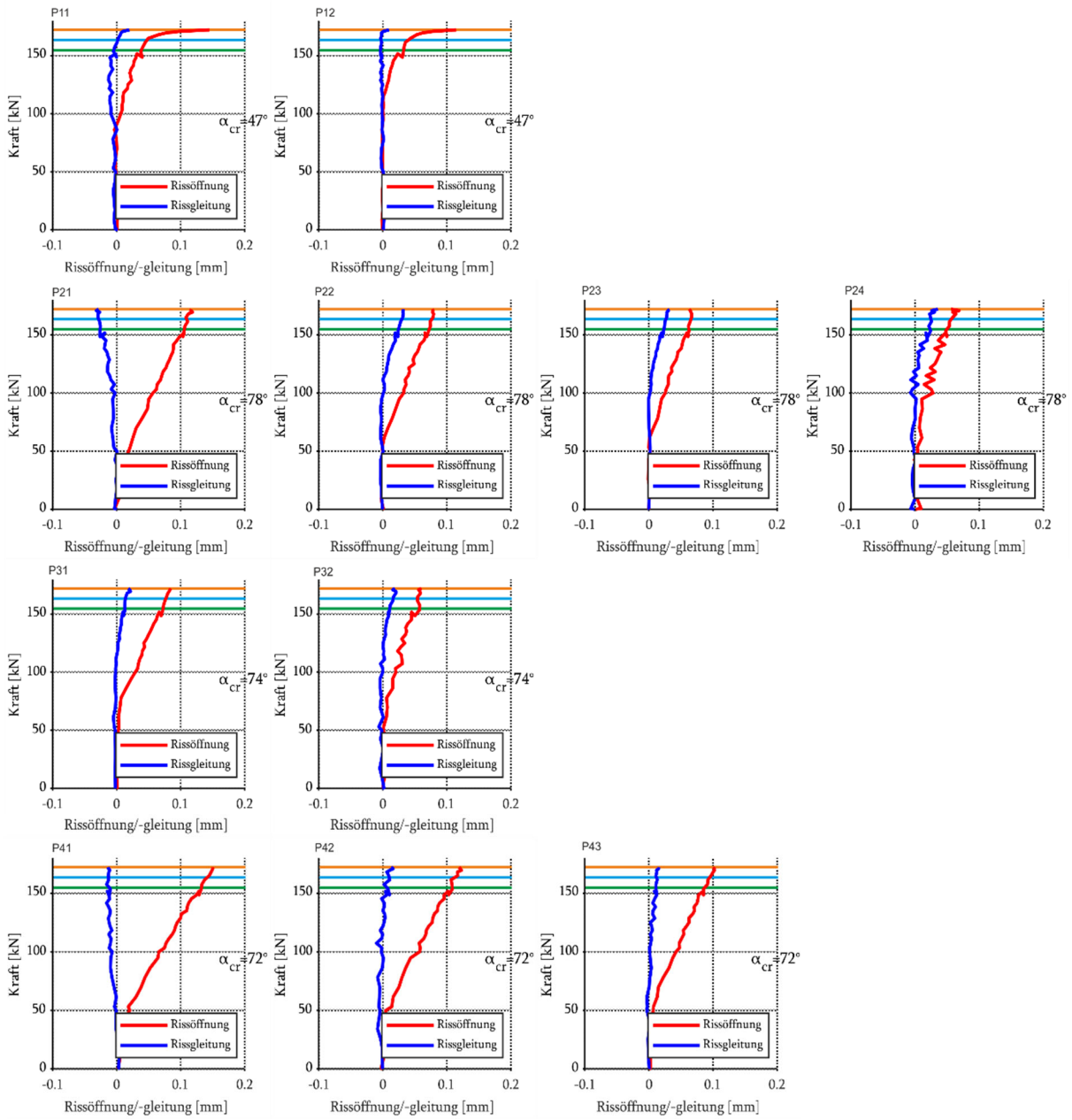


# B3.2

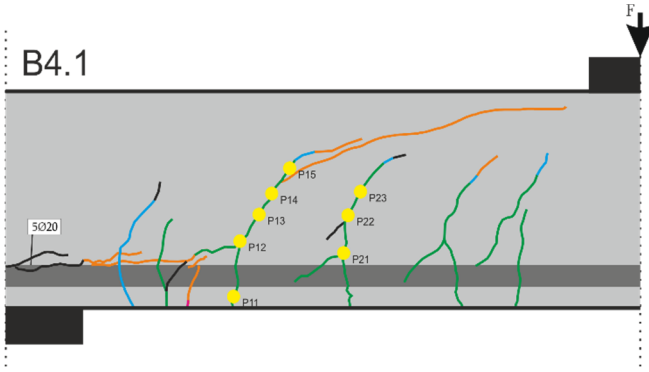


0,9  $F_{max} = 153,6$  kN  
 0,95  $F_{max} = 164,8$  kN  
 1,0  $F_{max} = 172,2$  kN

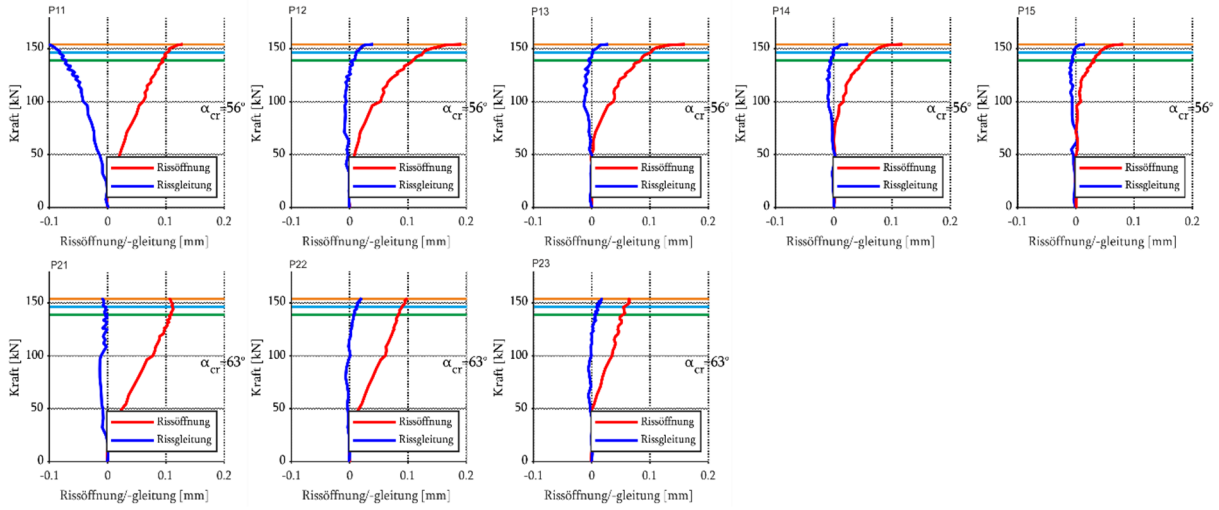
$d = 0,17$  m  
 $f_{cm} = 43,1$  MPa  
 $f_{ct,sp} = 3,35$  MPa  
 $E_{c,0} = 27.670$  MPa  
 $a_g = 16$  mm  
 $A_{sl} = 18,8$  cm<sup>2</sup>  
 $\rho_l = 2,46$  %



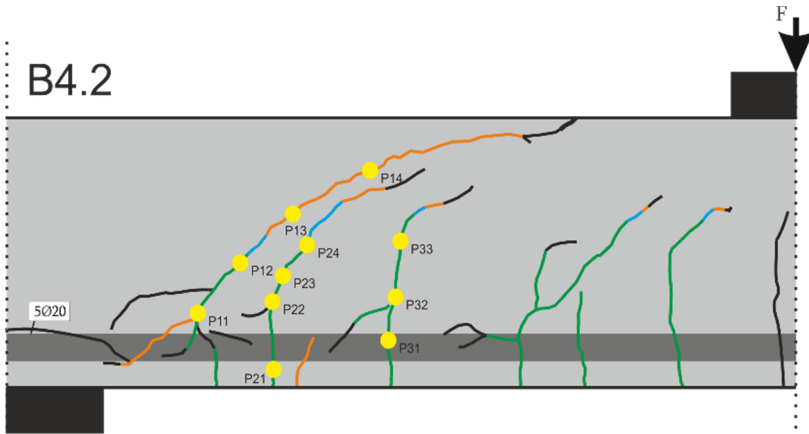
# B4.1



0,9  $F_{max} = 139,1$  kN  
 0,95  $F_{max} = 146,0$  kN  
 1,0  $F_{max} = 154,2$  kN  
  
 $d = 0,17$  m  
 $f_{cm} = 40,4$  MPa  
 $f_{ct,sp} = 3,53$  MPa  
 $E_{c,0} = 26.127$  MPa  
 $a_g = 8$  mm  
 $A_{sl} = 15,7$  cm<sup>2</sup>  
 $\rho_l = 2,05$  %

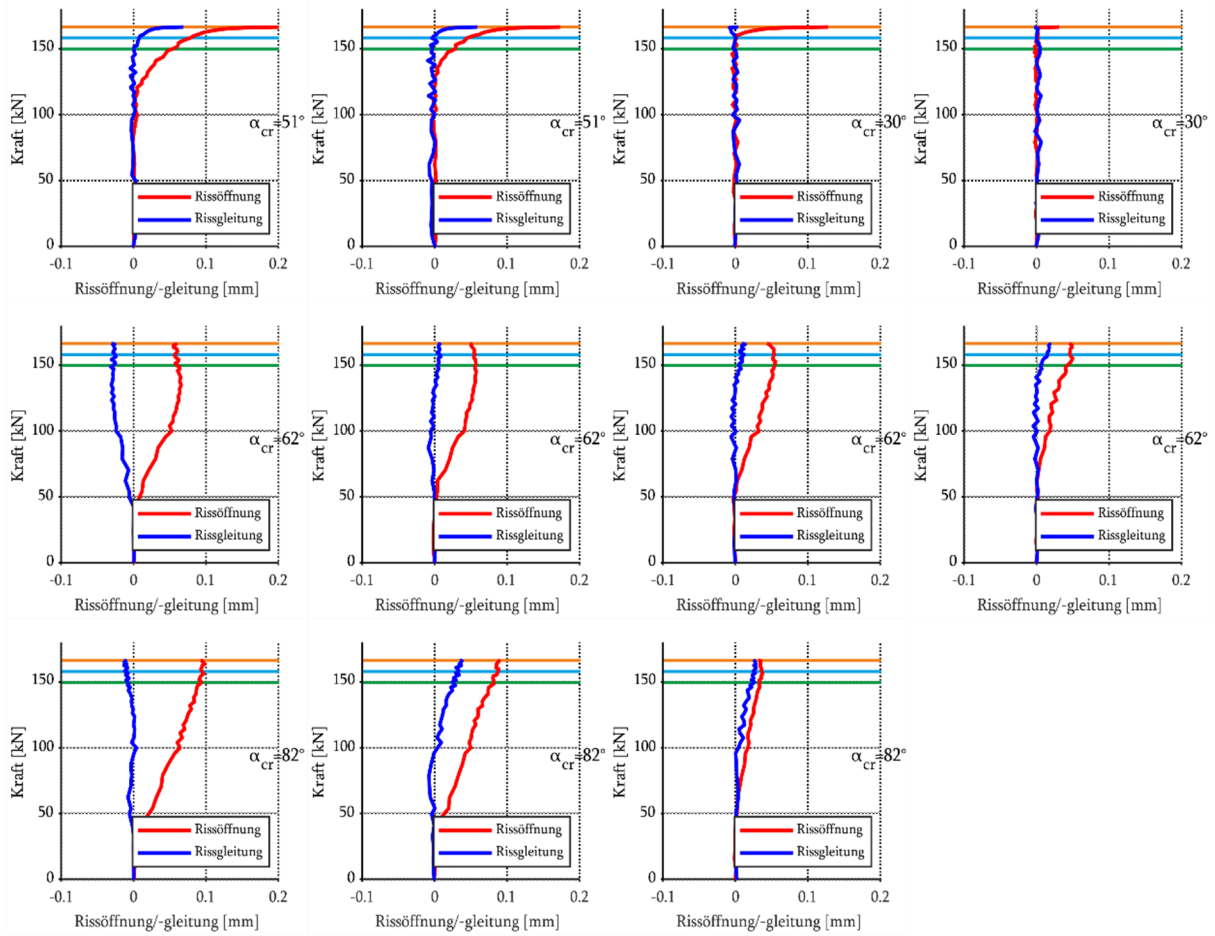


# B4.2

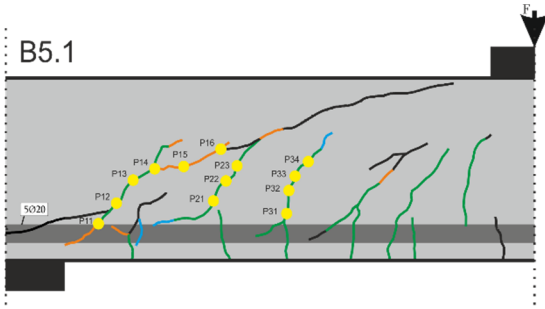


0,9  $F_{max} = 149,9$  kN  
 0,95  $F_{max} = 158,1$  kN  
 1,0  $F_{max} = 166,4$  kN

$d = 0,17$  m  
 $f_{cm} = 40,4$  MPa  
 $f_{ct,sp} = 3,53$  MPa  
 $E_{c,0} = 26.127$  MPa  
 $a_g = 8$  mm  
 $A_{sl} = 15,7$  cm<sup>2</sup>  
 $\rho_l = 2,05$  %

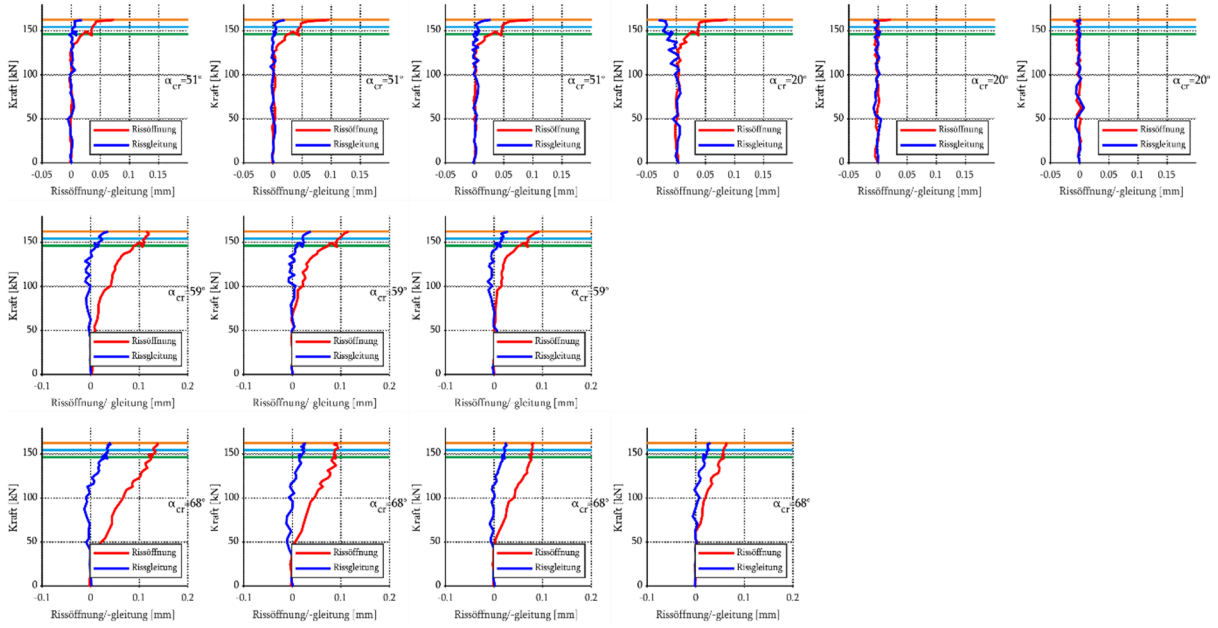


# B5.1

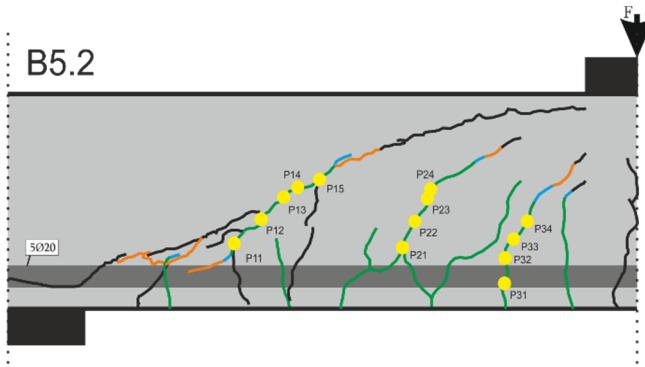


0,9  $F_{max} = 144,8 \text{ kN}$   
 0,95  $F_{max} = 154,9 \text{ kN}$   
 1,0  $F_{max} = 162,5 \text{ kN}$

$d = 0,17 \text{ m}$   
 $f_{cm} = 52,0 \text{ MPa}$   
 $f_{ct,sp} = 4,34 \text{ MPa}$   
 $E_{c,0} = 30.060 \text{ MPa}$   
 $a_g = 16 \text{ mm}$   
 $A_{sl} = 15,7 \text{ cm}^2$   
 $\rho_l = 2,05 \text{ \%}$

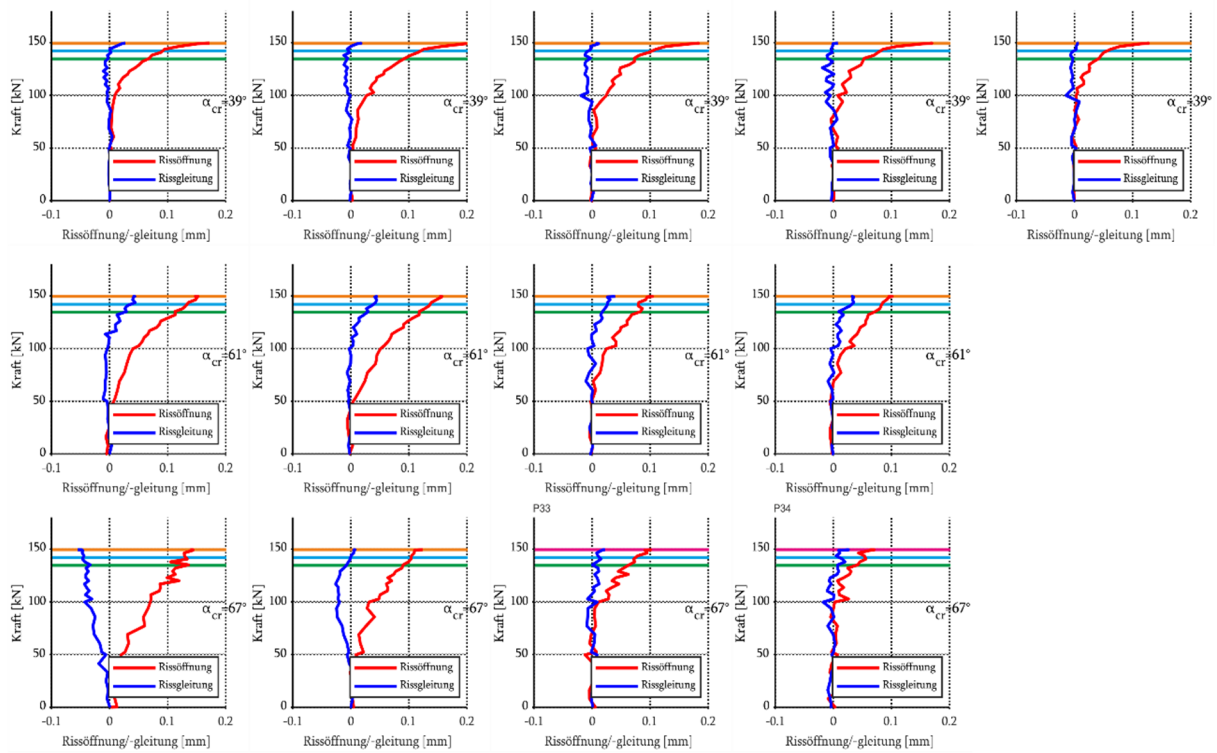


# B5.2

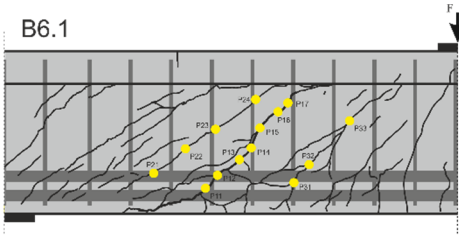


0,9  $F_{max} = 135,2 \text{ kN}$   
 0,95  $F_{max} = 143,8 \text{ kN}$   
 1,0  $F_{max} = 149,0 \text{ kN}$

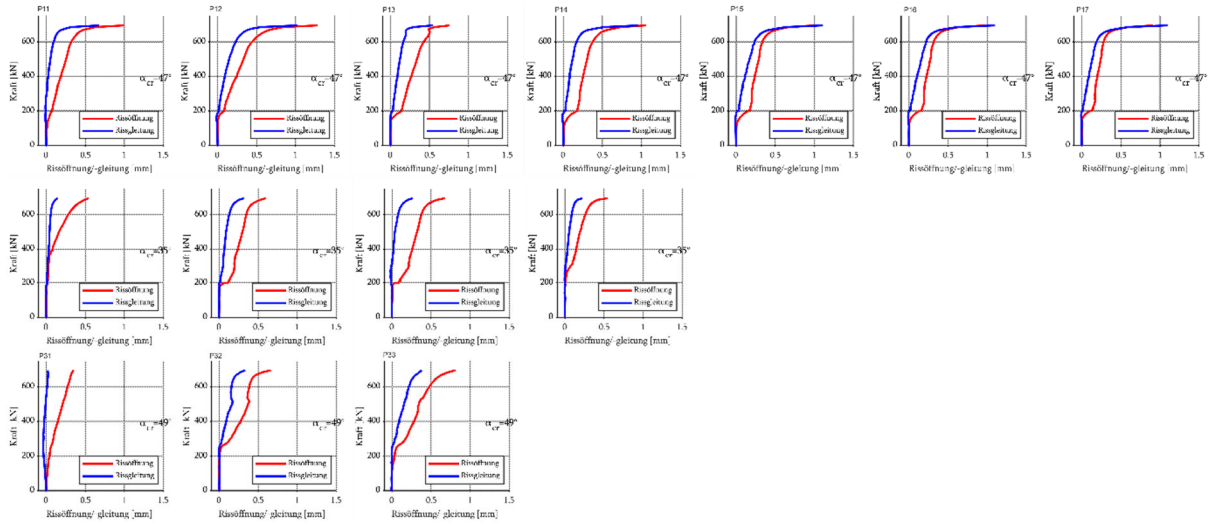
$d = 0,17 \text{ m}$   
 $f_{cm} = 52,0 \text{ MPa}$   
 $f_{ct,sp} = 4,34 \text{ MPa}$   
 $E_{c,0} = 30.060 \text{ MPa}$   
 $a_g = 16 \text{ mm}$   
 $A_{sl} = 15,7 \text{ cm}^2$   
 $\rho_l = 2,05 \%$



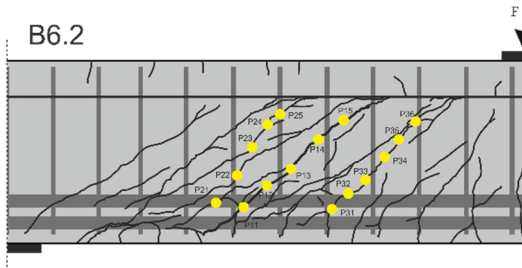
### B6.1



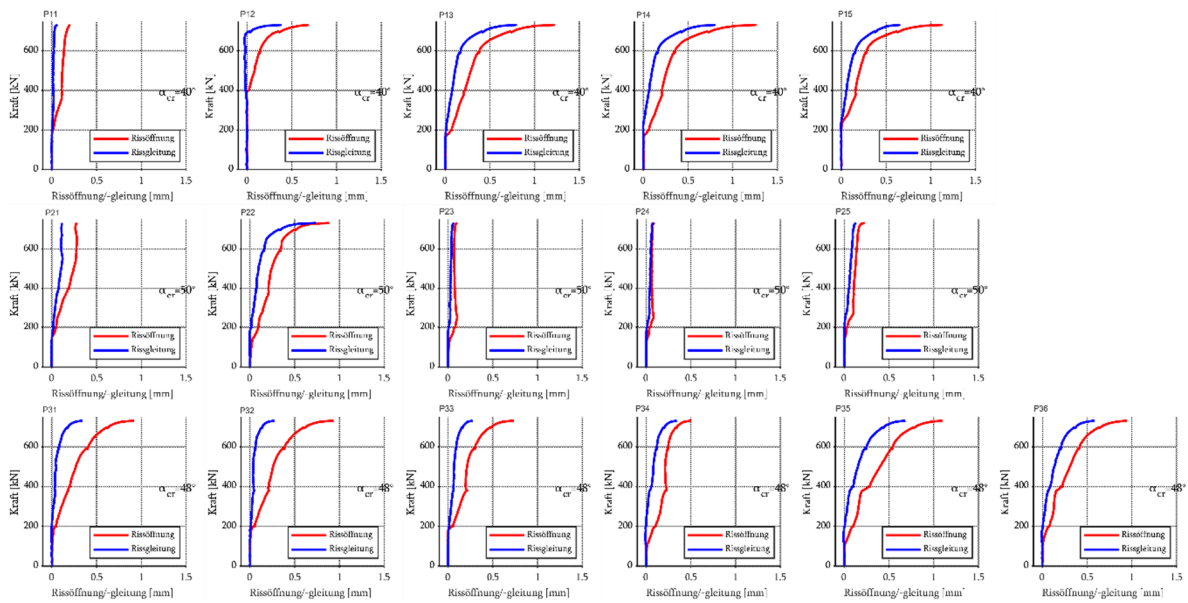
- $d = 0,332 \text{ m}$
- $f_{cm} = 43,1 \text{ MPa}$
- $f_{ct,sp} = 3,35 \text{ MPa}$
- $E_{c,0} = 27.670 \text{ MPa}$
- $g = 16 \text{ mm}$
- $A_{sl} = 36,9 \text{ cm}^2$
- $\rho_l = 1,11 \text{ \%}$
- $a_{sw} = 15,7 \text{ cm}^2/\text{m}$
- $\rho_w = 0,79 \text{ \%}$



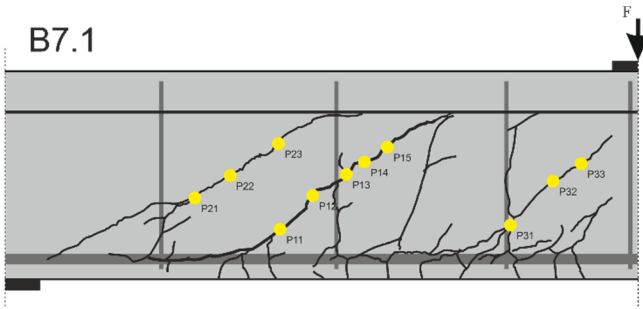
### B6.2



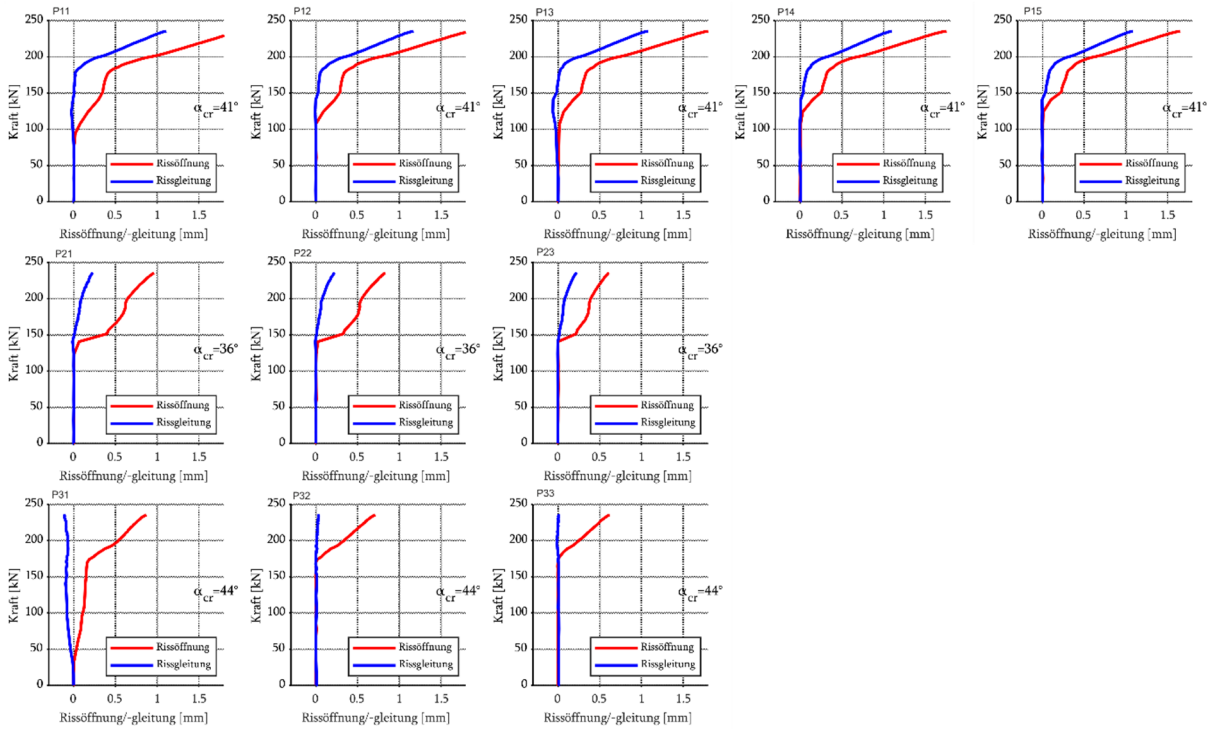
- $d = 0,332 \text{ m}$
- $f_{cm} = 43,1 \text{ MPa}$
- $f_{ct,sp} = 3,35 \text{ MPa}$
- $E_{c,0} = 27.670 \text{ MPa}$
- $g = 16 \text{ mm}$
- $A_{sl} = 36,9 \text{ cm}^2$
- $\rho_l = 1,11 \text{ \%}$
- $a_{sw} = 15,7 \text{ cm}^2/\text{m}$
- $\rho_w = 0,79 \text{ \%}$



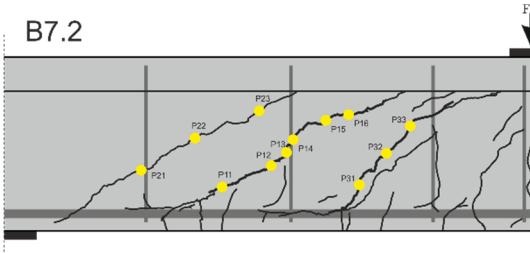
# B7.1



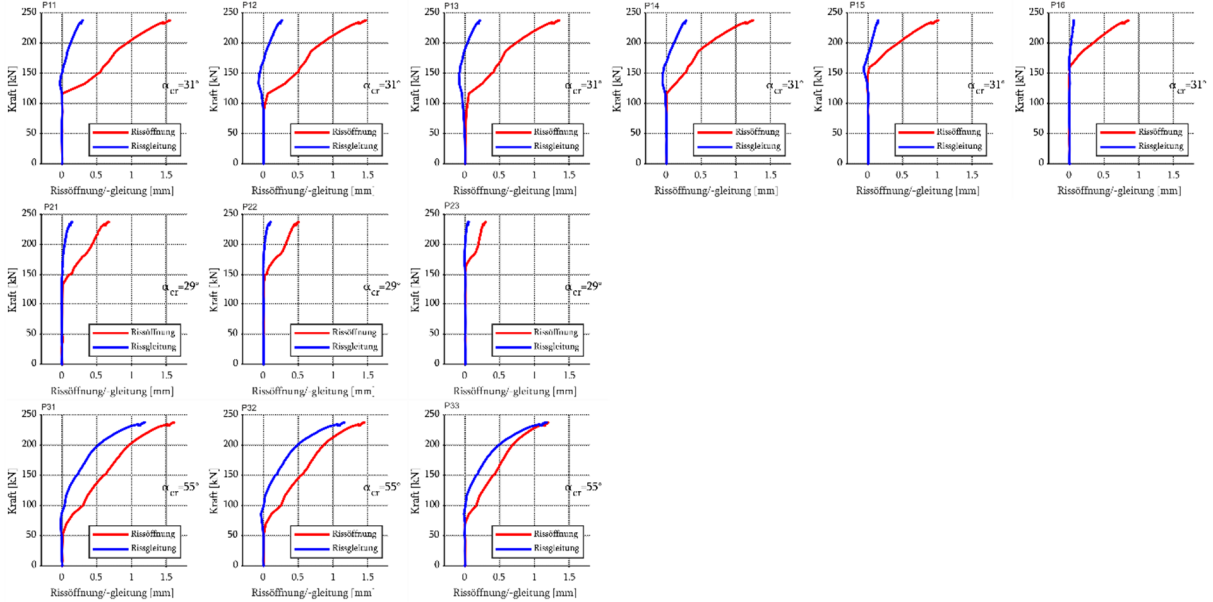
|             |   |        |                    |
|-------------|---|--------|--------------------|
| $d$         | = | 0,362  | m                  |
| $f_{cm}$    | = | 43,1   | MPa                |
| $f_{ct,sp}$ | = | 3,35   | MPa                |
| $E_{c,0}$   | = | 27.670 | MPa                |
| $a_g$       | = | 16     | mm                 |
| $A_{sl}$    | = | 9,4    | cm <sup>2</sup>    |
| $\rho_l$    | = | 0,26   | %                  |
| $a_{sw}$    | = | 3,33   | cm <sup>2</sup> /m |
| $\rho_w$    | = | 0,17   | %                  |



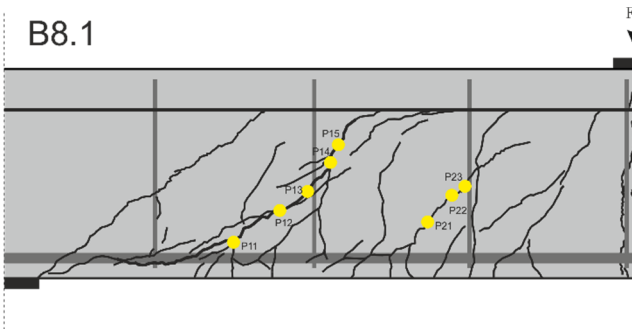
## B7.2



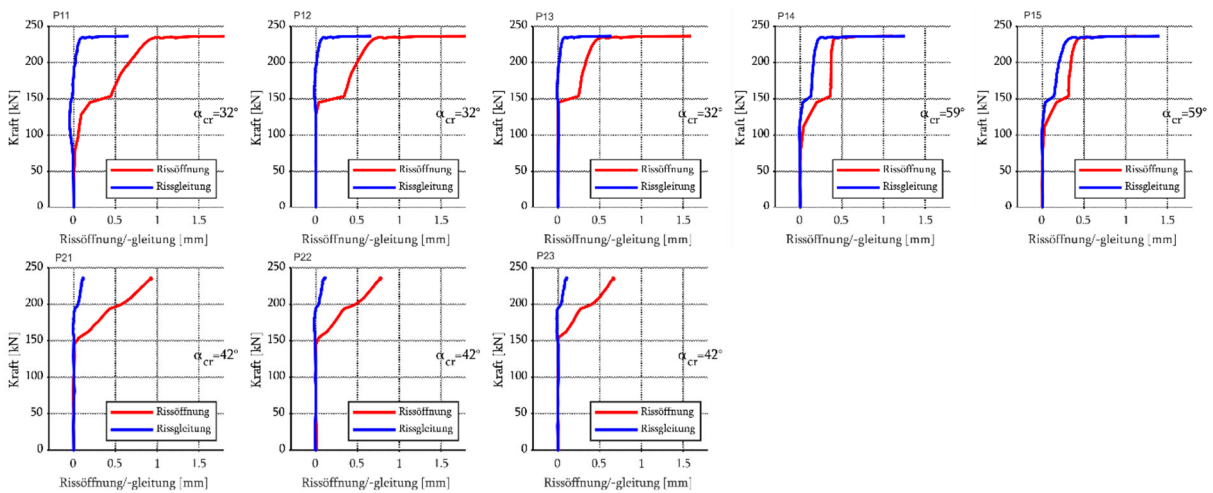
|             |   |        |                    |
|-------------|---|--------|--------------------|
| $d$         | = | 0,362  | m                  |
| $f_{cm}$    | = | 43,1   | MPa                |
| $f_{ct,sp}$ | = | 3,35   | MPa                |
| $E_{c,0}$   | = | 27.670 | MPa                |
| $a_g$       | = | 16     | mm                 |
| $A_{sl}$    | = | 9,4    | cm <sup>2</sup>    |
| $\rho_l$    | = | 0,26   | %                  |
| $a_{sw}$    | = | 3,33   | cm <sup>2</sup> /m |
| $\rho_w$    | = | 0,17   | %                  |



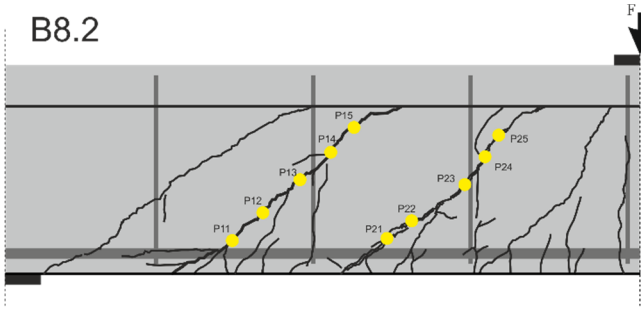
## B8.1



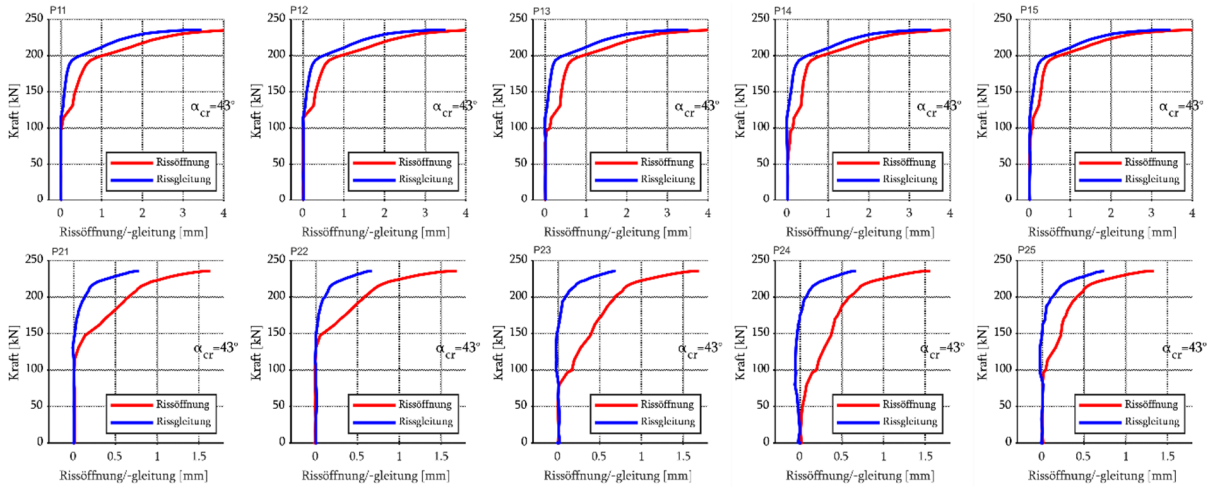
|             |   |        |                    |
|-------------|---|--------|--------------------|
| $d$         | = | 0,362  | m                  |
| $f_{cm}$    | = | 38,0   | MPa                |
| $f_{ct,sp}$ | = | 3,17   | MPa                |
| $E_{c,0}$   | = | 25.217 | MPa                |
| $a_g$       | = | 8      | mm                 |
| $A_{sl}$    | = | 9,4    | cm <sup>2</sup>    |
| $\rho_l$    | = | 0,26   | %                  |
| $a_{sw}$    | = | 3,33   | cm <sup>2</sup> /m |
| $\rho_w$    | = | 0,17   | %                  |



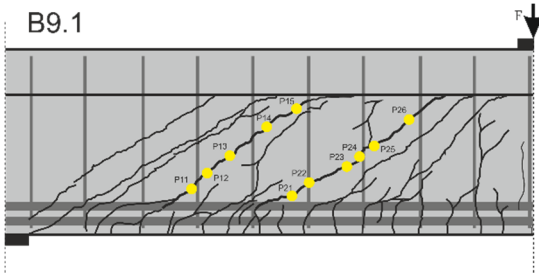
## B8.2



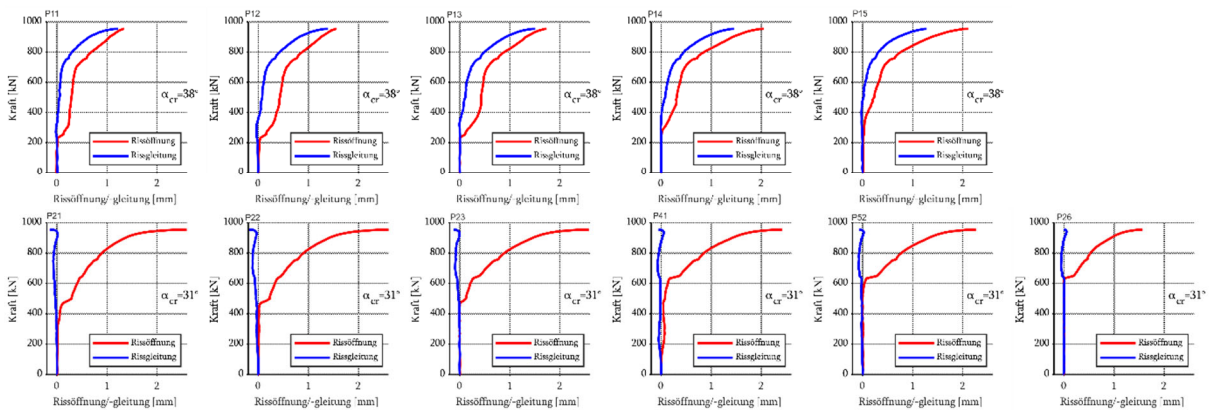
|             |   |        |                    |
|-------------|---|--------|--------------------|
| $d$         | = | 0,362  | m                  |
| $f_{cm}$    | = | 38,0   | MPa                |
| $f_{ct,sp}$ | = | 3,17   | MPa                |
| $E_{c,0}$   | = | 25.217 | MPa                |
| $a_g$       | = | 8      | mm                 |
| $A_{sl}$    | = | 9,4    | cm <sup>2</sup>    |
| $\rho_l$    | = | 0,26   | %                  |
| $a_{sw}$    | = | 3,33   | cm <sup>2</sup> /m |
| $\rho_w$    | = | 0,17   | %                  |



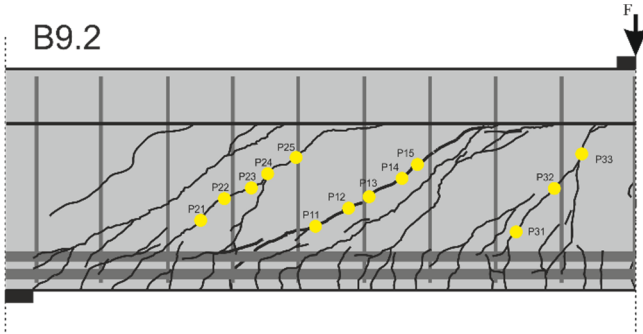
## B9.1



|             |   |        |                    |
|-------------|---|--------|--------------------|
| $d$         | = | 0,532  | m                  |
| $f_{cm}$    | = | 45,6   | MPa                |
| $f_{ct,sp}$ | = | 3,55   | MPa                |
| $E_{c,0}$   | = | 28.290 | MPa                |
| $a_g$       | = | 16     | mm                 |
| $A_{sl}$    | = | 36,9   | cm <sup>2</sup>    |
| $\rho_l$    | = | 0,69   | %                  |
| $a_{sw}$    | = | 8,78   | cm <sup>2</sup> /m |
| $\rho_w$    | = | 0,44   | %                  |



# B9.2



- $d = 0,532 \text{ m}$
- $f_{cm} = 45,6 \text{ MPa}$
- $f_{ct,sp} = 3,55 \text{ MPa}$
- $E_{c,0} = 28.290 \text{ MPa}$
- $a_g = 16 \text{ mm}$
- $A_{sl} = 36,9 \text{ cm}^2$
- $\rho_l = 0,69 \text{ \%}$
- $a_{sw} = 8,78 \text{ cm}^2/\text{m}$
- $\rho_w = 0,44 \text{ \%}$

