Technische Universität Hamburg
Institut für Massivbau
www.tuhh.de/mb

Versuche zur Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetonplatten unter Gleich- und konzentrierten Lasten

- Versuchsbericht -



Experimental investigations on shear failure in RC slabs subjected to distributed and concentrated loads

- Technical Report -

Projektleiter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Günter A. Rombach
Mitarbeiter:	M. Sc. Maike Harter
	Dr.-Ing. Lukas Henze
Versuchsingenieur:	Harald Finger

Hamburg, Oktober 2024

This work is licensed under CC BY-NC-ND 4.0 Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen 4.0 International Lizenz (CC BY-NC-ND 4.0), siehe www.creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen **XI**

1 Einleitung **1**
1.1 Zielsetzung 1
1.2 Danksagung 2

2 Beschreibung der Versuche **3**
2.1 Versuchsprogramm 3
2.2 Baustoffe 7
2.2.1 Beton 7
2.2.2 Bewehrung 12
2.3 Messtechnik 14
2.4 Herstellung 18
2.5 Versuchsdurchführung 20
2.5.1 Versuchsstand 20
2.5.2 Versuchsablauf 23
2.6 Versuchsbeschreibung im Detail 24
2.6.1 Versuch V1/⌀20-80 24
2.6.2 Versuch V2/⌀8-300 25
2.6.3 Versuch V3/4d-FL 26
2.6.4 Versuch V4/5d-FL 27
2.6.5 Versuch V5/5d-FL-2 28
2.6.6 Versuch V6/5d-LL 29
2.6.7 Versuch V7/3d-FL 31
2.6.8 Versuch V8/⌀8-300-2 31
2.7 Dokumentation und Rissbilder 33
2.8 Zusammenfassung der Ergebnisse 36

A Materialprüfungen **A-1**
A.1 Beton A-1
A.1.1 Betonrezeptur V1-V3 . . . . . A-1
A.1.2 Betonrezeptur V4-V8 . . . . . A-2
A.1.3 Betonprüfungen V1-V8 . . . . . A-2

A.1.4 Versuchsergebnisse der Materialprüfungen A-19
A.1.5 Zusammenfassung der Materialwerte für Beton A-21
A.2 Bewehrung A-22
A.2.1 Bewehrungsübersichten - Variation der Bewehrung für die Versuche V1, V2 und V8 . . . . . A-22
A.2.2 Ergebnisse der Zugversuche A-25

B Messelemente und -anordnung **B-1**
B.1 Messtechnik B-1
B.2 Anordnung der Messaufnehmer B-4

C Rissbilder **C-1**

D Versuchsergebnisse **D-1**
D.1 Versuch V1/⌀20-80 . . . . . D-1
D.2 Versuch V2/⌀8-300 . . . . . D-12
D.3 Versuch V3/4d-FL D-23
D.4 Versuch V4/5d-FL D-34
D.5 Versuch V5/5d-FL-2 . . . . . D-44
D.6 Versuch V6/5d-LL D-56
D.7 Versuch V7/3d-FL D-67
D.8 Versuch V8/⌀8-300-2 . . . . . D-78

Abbildungsverzeichnis

2.1 Versuchsaufbau - Laststellung 4d mit Flächenlast 3
2.2 Aufsicht V3 - Anordnung der Pressen für die Flächenlast 6
2.3 Ansicht V6 - Anordnung der Pressen für die Linienlast 6
2.4 Bewehrungsanordnung für die Versuche V3 - V7 in Anlehnung an [12] . . 13
2.5 Spannungs-Dehnungs-Kurve und Spannungs-Zeit-Kurve für Charge 2, Durchmesser ⌀16, 3. Zugprobe 14
2.6 Ausgewählte Messelemente der Versuchsreihe 16
2.7 Einbauteile der Versuchskörper nach [12] 18
2.8 Herstellung der Versuchskörper - links oben: V3 - Bewehrung in der Schalung; rechts oben: V4 - Einbauteil Transport; links unten: V8 nach der Betonage; rechts unten: V8 - Herstellung der Betonzylinder 19
2.9 Versuchsstand - links: V5 - Rückverankerung der Versuchskörper im Spannfeld; Mitte: V5 - Kontrolle der Verdrehungen; rechts oben: V5 - Messaufnehmer vertikal L2; rechts unten: V5 - Messaufnehmer L3 horizontal und L1 vertikal 20
2.10 Anordnung der Verformungsaufnehmer L1 - L8 am Beispiel V5 21
2.11 Anordnung der flächig verteilten Pressen bei Versuch V4 22
2.12 V1 (1 Hz) - Zeit-Verformungs-Kurve (links) und Last-Verformungs-Kurve (rechts) 24
2.13 V2 - Risse an der Stirn- und Unterseite (links) und Riss im Bereich des Steges Ansicht l (rechts) nach Absetzen der Belastung 25
2.14 V2 (1 Hz) - Zeit-Verformungs-Kurve (links) und Last-Verformungs-Kurve (rechts) 26
2.15 V3 (1 Hz) - Zeit-Verformungs-Kurve (links) und Last-Verformungs-Kurve (rechts) 27
2.16 V4 (1 Hz) - Zeit-Verformungs-Kurve (links) und Last-Verformungs-Kurve (rechts) 28
2.17 V5 (1 Hz) - Zeit-Verformungs-Kurve (links) und Last-Verformungs-Kurve (rechts) 29
2.18 V6 - Zeitahänige Verformungen in Lastrichtung während der Vorbelastung 30
2.19 V6 (1 Hz) - Zeit-Verformungs-Kurve (links) und Last-Verformungs-Kurve (rechts) 30

2.20 V7 (1 Hz) - Zeit-Verformungs-Kurve (links) und Last-Verformungs-Kurve (rechts) . . . 31
2.21 V8 (1 Hz) - Zeit-Verformungs-Kurve (links) und Last-Verformungs-Kurve (rechts) . . . 32
2.22 Bezeichnung und Anordnung der vorgenommenen Trennschnitte . . . 33
2.23 Fahrwagen zur Erstellung der Trennschnitte . . . 35

A.1 Betondruckfestigkeit - Zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeit nach EC2-1-1 [6] und Versuchswerte . . . A-19
A.2 Elastizitätsmodul $E_{c,0}$ - Zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeit nach EC2-1-1 [6] und Versuchswerte . . . A-20
A.3 Elastizitätsmodul $E_{c,S}$ - Zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeit nach EC2-1-1 [6] und Versuchswerte . . . A-20
A.4 Bewehrungsanordnung für den Versuch V1 . . . A-22
A.5 Bewehrungsanordnung für den Versuch V2 . . . A-23
A.6 Bewehrungsanordnung für den Versuch V8 . . . A-24

B.1 Messtechnik V1 . . . B-4
B.2 Messtechnik V2 . . . B-5
B.3 Messtechnik V3 . . . B-6
B.4 Messtechnik V4 . . . B-7
B.5 Messtechnik V5 . . . B-8
B.6 Messtechnik V6 . . . B-9
B.7 Messtechnik V7 . . . B-10
B.8 Messtechnik V8 . . . B-11

C.1 V1/⌀20-80 - Rissbilder . . . C-2
C.2 V2/⌀8-300 - Rissbilder . . . C-3
C.3 V3/4d-FL - Rissbilder . . . C-4
C.4 V4/5d-FL - Rissbilder . . . C-5
C.5 V5/5d-FL-2 - Rissbilder . . . C-6
C.6 V6/5d-LL - Rissbilder . . . C-7
C.7 V7/3d-FL - Rissbilder . . . C-8
C.8 V8/⌀8-300-2 - Rissbilder . . . C-9

D.1 V1 - Rissöffnungen R1x - R4x . . . D-1
D.2 V1 - Stahldehnungen DS1 - DS8 . . . D-1
D.3 V1 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Vorbelastung . . . D-2
D.4 V1 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - bis zur Traglast . . . D-2
D.5 V1 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Nachbruchverhalten D-2
D.6 V1 - Zeitabhängige Verformungen in Lastrichtung . . . D-3
D.7 V1 - Zeitabhängige Verformungen in der Lastachse . . . D-3

D.8 V1 - Kräfte in der Rückspannung D-4
D.9 V1 - Verdrehung bei max. Traglast F_u (Werte von L1 - L4) D-4
D.10 V1 - Kraft - Dickenmessungen WP1 - WP11 . . . . . D-5
D.11 V1 - Zeit/Verformung - Dickenmessungen WP1 - WP11 . . . . . D-5
D.12 V1 - Zeitabhängige Dickenmessungen in den ersten Laststufen D-6
D.13 V1 - Zeitabhängige Dickenmessungen bis zur Traglast D-7
D.14 V1 - Zeitabhängige Dickenmessungen nach dem Bruch D-7
D.15 V1 - Dehnung der Glasfaser GF1 während der Vorbelastung D-8
D.16 V1 - Dehnung der Glasfaser GF1 bis zu Traglast D-8
D.17 V1 - Dehnung der Glasfaser GF1 nach dem Bruch D-8
D.18 V1 - Dehnung der Glasfaser GF2 während der Vorbelastung D-9
D.19 V1 - Dehnung der Glasfaser GF2 bis zur Traglast D-9
D.20 V1 - Dehnung der Glasfaser GF2 nach dem Bruch D-9
D.21 V1 - Dehnung der Glasfaser GF3 während der Vorbelastung D-10
D.22 V1 - Dehnung der Glasfaser GF3 bis zur Traglast D-10
D.23 V1 - Dehnung der Glasfaser GF3 nach dem Bruch D-10
D.24 V1 - Dehnung der Glasfaser GF4 während der Vorbelastung D-11
D.25 V1 - Dehnung der Glasfaser GF4 bis zur Traglast D-11
D.26 V1 - Dehnung der Glasfaser GF4 nach dem Bruch D-11
D.27 V2 - Rissöffnungen R1x - R4x D-12
D.28 V2 - Stahldehnungen DS1 - DS8 . . . . . D-12
D.29 V2 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Vorbelastung . . . D-13
D.30 V2 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - bis zur Traglast . . D-13
D.31 V2 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Nachbruchverhalten D-13
D.32 V2 - Zeitabhängige Verformungen in Lastrichtung D-14
D.33 V2 - Zeitabhängige Verformungen in der Lastachse D-14
D.34 V2 - Kräfte in der Rückspannung D-15
D.35 V2 - Verdrehung bei max. Traglast F_u (Werte von L1 - L4) D-15
D.36 V2 - Kraft - Dickenmessungen WP1 - WP11 . . . . . D-16
D.37 V2 - Zeit/Verformung - Dickenmessungen WP1 - WP11 . . . . . D-16
D.38 V2 - Zeitabhängige Dickenmessungen in den ersten Laststufen D-17
D.39 V2 - Zeitabhängige Dickenmessungen bis zur Traglast D-18
D.40 V2 - Zeitabhängige Dickenmessungen nach dem Bruch D-18
D.41 V2 - Zeitabhängige Dickenmessungen nach dem Bruch(2) D-18
D.42 V2 - Dehnung der Glasfaser GF1 während der Vorbelastung D-19
D.43 V2 - Dehnung der Glasfaser GF1 bis zur Traglast D-19
D.44 V2 - Dehnung der Glasfaser GF1 nach dem Bruch D-19
D.45 V2 - Dehnung der Glasfaser GF2 während der Vorbelastung D-20
D.46 V2 - Dehnung der Glasfaser GF2 bis zur Traglast D-20
D.47 V2 - Dehnung der Glasfaser GF2 nach dem Bruch D-20

D.48 V2 - Dehnung der Glasfaser GF3 während der Vorbelastung D-21
D.49 V2 - Dehnung der Glasfaser GF3 bis zur Traglast D-21
D.50 V2 - Dehnung der Glasfaser GF3 nach dem Bruch D-21
D.51 V2 - Dehnung der Glasfaser GF4 während der Vorbelastung D-22
D.52 V2 - Dehnung der Glasfaser GF4 bis zur Traglast D-22
D.53 V2 - Dehnung der Glasfaser GF4 nach dem Bruch D-22
D.54 V3 - Rissöffnungen R1x - R4x D-23
D.55 V3 - Stahldehnungen DS1 - DS8 . . . . . D-23
D.56 V3 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Vorbelastung . . . D-24
D.57 V3 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - bis zur Traglast . . D-24
D.58 V3 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Nachbruchverhalten D-24
D.59 V3 - Zeitabhängige Verformungen in Lastrichtung D-25
D.60 V3 - Zeitabhängige Verformungen in der Lastachse D-25
D.61 V3 - Kräfte in der Rückspannung D-26
D.62 V3 - Verdrehung bei max. Traglast F_u (Werte von L1 - L4) D-26
D.63 V3 - Kraft - Dickenmessungen WP1 - WP11 . . . . . D-27
D.64 V3 - Zeit/Verformung - Dickenmessungen WP1 - WP11 . . . . . D-27
D.65 V3 - Zeitabhängige Dickenmessungen in den ersten Laststufen D-28
D.66 V3 - Zeitabhängige Dickenmessungen bis zur Traglast D-29
D.67 V3 - Zeitabhängige Dickenmessungen nach dem Bruch D-29
D.68 V3 - Dehnung der Glasfaser GF1 während der Vorbelastung D-30
D.69 V3 - Dehnung der Glasfaser GF1 bis zur Traglast D-30
D.70 V3 - Dehnung der Glasfaser GF1 nach dem Bruch D-30
D.71 V3 - Dehnung der Glasfaser GF2 während der Vorbelastung D-31
D.72 V3 - Dehnung der Glasfaser GF2 bis zur Traglast D-31
D.73 V3 - Dehnung der Glasfaser GF2 nach dem Bruch D-31
D.74 V3 - Dehnung der Glasfaser GF3 während der Vorbelastung D-32
D.75 V3 - Dehnung der Glasfaser GF3 bis zur Traglast D-32
D.76 V3 - Dehnung der Glasfaser GF3 nach dem Bruch D-32
D.77 V3 - Dehnung der Glasfaser GF4 während der Vorbelastung D-33
D.78 V3 - Dehnung der Glasfaser GF4 bis zur Traglast D-33
D.79 V3 - Dehnung der Glasfaser GF4 nach dem Bruch D-33
D.80 V4 - Rissöffnungen R1x - R4x D-34
D.81 V4 - Stahldehnungen DS1 - DS8 . . . . . D-34
D.82 V4 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Vorbelastung . . . D-35
D.83 V4 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - bis zur Traglast . . D-35
D.84 V4 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Nachbruchverhalten D-35
D.85 V4 - Zeitabhängige Verformungen in Lastrichtung D-36
D.86 V4 - Zeitabhängige Verformungen in der Lastachse D-36
D.87 V4 - Kräfte in der Rückspannung D-37

D.88 V4 - Verdrehung bei max. Traglast F_u (Werte von L1 - L4) D-37
D.89 V4 - Kraft - Dickenmessungen WP1 - WP11 . . . . . D-38
D.90 V4 - Zeit/Verformung - Dickenmessungen WP1 - WP11 . . . . . D-38
D.91 V4 - Zeitabhängige Dickenmessungen in den ersten Laststufen D-39
D.92 V4 - Zeitabhängige Dickenmessungen bis zur Traglast D-40
D.93 V4 - Zeitabhängige Dickenmessungen nach dem Bruch D-40
D.94 V4 - Dehnung der Glasfaser GF1 während der Vorbelastung D-41
D.95 V4 - Dehnung der Glasfaser GF1 bis zur Traglast D-41
D.96 V4 - Dehnung der Glasfaser GF1 nach dem Bruch D-41
D.97 V4 - Dehnung der Glasfaser GF2 während der Vorbelastung D-42
D.98 V4 - Dehnung der Glasfaser GF2 bis zur Traglast D-42
D.99 V4 - Dehnung der Glasfaser GF2 nach dem Bruch D-42
D.100 V4 - Dehnung der Glasfaser GF3 während der Vorbelastung D-43
D.101 V4 - Dehnung der Glasfaser GF3 bis zur Traglast D-43
D.102 V4 - Dehnung der Glasfaser GF3 nach dem Bruch D-43
D.103 V5 - Rissöffnungen R1x - R4x D-44
D.104 V5 - Stahldehnungen DS1 - DS8 . . . . . D-44
D.105 V5 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Vorbelastung . . . D-45
D.106 V5 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - bis zur Traglast . . D-45
D.107 V5 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Nachbruchverhalten D-45
D.108 V5 - Zeitabhängige Verformungen in Lastrichtung D-46
D.109 V5 - Zeitabhängige Verformungen in der Lastachse D-46
D.110 V5 - Kräfte in der Rückspannung D-47
D.111 V5 - Verdrehung bei max. Traglast F_u (Werte von L1 - L4) D-47
D.112 V5 - Kraft - Dickenmessungen WP1 - WP11 . . . . . D-48
D.113 V5 - Zeit/Verformung - Dickenmessungen WP1 - WP11 . . . . . D-48
D.114 V5 - Zeitabhängige Dickenmessungen in den ersten Laststufen D-49
D.115 V5 - Zeitabhängige Dickenmessungen bis zur Traglast D-50
D.116 V5 - Zeitabhängige Dickenmessungen nach dem Bruch D-51
D.117 V5 - Dehnung der Glasfaser GF1 während der Vorbelastung D-52
D.118 V5 - Dehnung der Glasfaser GF1 bis zur Traglast D-52
D.119 V5 - Dehnung der Glasfaser GF1 nach dem Bruch D-52
D.120 V5 - Dehnung der Glasfaser GF2 während der Vorbelastung D-53
D.121 V5 - Dehnung der Glasfaser GF2 bis zur Traglast D-53
D.122 V5 - Dehnung der Glasfaser GF2 nach dem Bruch D-53
D.123 V5 - Dehnung der Glasfaser GF3 während der Vorbelastung D-54
D.124 V5 - Dehnung der Glasfaser GF3 bis zur Traglast D-54
D.125 V5 - Dehnung der Glasfaser GF3 nach dem Bruch D-54
D.126 V5 - Dehnung der Glasfaser GF4 während der Vorbelastung D-55
D.127 V5 - Dehnung der Glasfaser GF4 bis zur Traglast D-55

D.128 V5 - Dehnung der Glasfaser GF4 nach dem Bruch D-55
D.129 V6 - Rissöffnungen R1x - R4x D-56
D.130 V6 - Stahldehnungen DS1 - DS8 . . . . . D-56
D.131 V6 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Vorbelastung . . . D-57
D.132 V6 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - bis zur Traglast . . D-57
D.133 V6 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Nachbruchverhalten D-57
D.134 V6 - Zeitabhängige Verformungen in Lastrichtung D-58
D.135 V6 - Zeitabhängige Verformungen in der Lastachse D-58
D.136 V6 - Kräfte in der Rückspannung D-59
D.137 V6 - Verdrehung bei max. Traglast F_u (Werte von L1 - L4) D-59
D.138 V6 - Kraft - Dickenmessungen WP1 - WP11 . . . . . D-60
D.139 V6 - Zeit/Verformung - Dickenmessungen WP1 - WP11 . . . . . D-60
D.140 V6 - Zeitabhängige Dickenmessungen in den ersten Laststufen D-61
D.141 V6 - Zeitabhängige Dickenmessungen bis zur Traglast D-62
D.142 V6 - Zeitabhängige Dickenmessungen nach dem Bruch D-62
D.143 V6 - Dehnung der Glasfaser GF1 während der Vorbelastung D-63
D.144 V6 - Dehnung der Glasfaser GF1 bis zur Traglast D-63
D.145 V6 - Dehnung der Glasfaser GF1 nach dem Bruch D-63
D.146 V6 - Dehnung der Glasfaser GF2 während der Vorbelastung D-64
D.147 V6 - Dehnung der Glasfaser GF2 bis zur Traglast D-64
D.148 V6 - Dehnung der Glasfaser GF2 nach dem Bruch D-64
D.149 V6 - Dehnung der Glasfaser GF3 während der Vorbelastung D-65
D.150 V6 - Dehnung der Glasfaser GF3 bis zur Traglast D-65
D.151 V6 - Dehnung der Glasfaser GF3 nach dem Bruch D-65
D.152 V6 - Dehnung der Glasfaser GF4 während der Vorbelastung D-66
D.153 V6 - Dehnung der Glasfaser GF4 bis zur Traglast D-66
D.154 V6 - Dehnung der Glasfaser GF4 nach dem Bruch D-66
D.155 V7 - Rissöffnungen R1x - R4x D-67
D.156 V7 - Stahldehnungen DS1 - DS8 . . . . . D-67
D.157 V7 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Vorbelastung . . . D-68
D.158 V7 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - bis zur Traglast . . D-68
D.159 V7 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Nachbruchverhalten D-68
D.160 V7 - Zeitabhängige Verformungen in Lastrichtung D-69
D.161 V7 - Zeitabhängige Verformungen in der Lastachse D-69
D.162 V7 - Kräfte in der Rückspannung D-70
D.163 V7 - Verdrehung bei max. Traglast F_u (Werte von L1 - L4) D-70
D.164 V7 - Kraft - Dickenmessungen WP1 - WP11 . . . . . D-71
D.165 V7 - Zeit/Verformung - Dickenmessungen WP1 - WP11 . . . . . D-71
D.166 V7 - Zeitabhängige Dickenmessungen in den ersten Laststufen D-72
D.167 V7 - Zeitabhängige Dickenmessungen bis zur Traglast D-73

D.168 V7 - Zeitabhängige Dickenmessungen nach dem Bruch D-73
D.169 V7 - Dehnung der Glasfaser GF1 während der Vorbelastung D-74
D.170 V7 - Dehnung der Glasfaser GF1 bis zur Traglast D-74
D.171 V7 - Dehnung der Glasfaser GF1 nach dem Bruch D-74
D.172 V7 - Dehnung der Glasfaser GF2 während der Vorbelastung D-75
D.173 V7 - Dehnung der Glasfaser GF2 bis zur Traglast D-75
D.174 V7 - Dehnung der Glasfaser GF2 nach dem Bruch D-75
D.175 V7 - Dehnung der Glasfaser GF3 während der Vorbelastung D-76
D.176 V7 - Dehnung der Glasfaser GF3 bis zur Traglast D-76
D.177 V7 - Dehnung der Glasfaser GF3 nach dem Bruch D-76
D.178 V7 - Dehnung der Glasfaser GF4 während der Vorbelastung D-77
D.179 V7 - Dehnung der Glasfaser GF4 bis zur Taglast D-77
D.180 V7 - Dehnung der Glasfaser GF4 nach dem Bruch D-77
D.181 V8 - Rissöffnungen R1x - R4x D-78
D.182 V8 - Stahldehnungen DS1 - DS8 . . . . . D-78
D.183 V8 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Vorbelastung . . . D-79
D.184 V8 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - bis zur Traglast . . D-79
D.185 V8 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Nachbruchverhalten D-79
D.186 V8 - Zeitabhängige Verformungen in Lastrichtung D-80
D.187 V8 - Zeitabhängige Verformungen in der Lastachse D-80
D.188 V8 - Kräfte in der Rückspannung D-81
D.189 V8 - Verdrehung bei max. Traglast F_u (Werte von L1 - L4) D-81
D.190 V8 - Kraft - Dickenmessungen WP1 - WP11 . . . . . D-82
D.191 V8 - Zeit/Verformung - Dickenmessungen WP1 - WP11 . . . . . D-82
D.192 V8 - Zeitabhängige Dickenmessungen in den ersten Laststufen D-83
D.193 V8 - Zeitabhängige Dickenmessungen bis zur Traglast D-84
D.194 V8 - Zeitabhängige Dickenmessungen nach dem Bruch D-84
D.195 V8 - Dehnung der Glasfaser GF1 während der Vorbelastung D-85
D.196 V8 - Dehnung der Glasfaser GF1 bis zur Traglast D-85
D.197 V8 - Dehnung der Glasfaser GF1 nach dem Bruch D-85
D.198 V8 - Dehnung der Glasfaser GF2 während der Vorbelastung D-86
D.199 V8 - Dehnung der Glasfaser GF2 bis zur Traglast D-86
D.200 V8 - Dehnung der Glasfaser GF2 nach dem Bruch D-86
D.201 V8 - Dehnung der Glasfaser GF3 während der Vorbelastung D-87
D.202 V8 - Dehnung der Glasfaser GF3 bis zur Traglast D-87
D.203 V8 - Dehnung der Glasfaser GF3 nach dem Bruch D-87
D.204 V8 - Dehnung der Glasfaser GF4 während der Vorbelastung D-88
D.205 V8 - Dehnung der Glasfaser GF4 bis zur Traglast D-88
D.206 V8 - Dehnung der Glasfaser GF4 nach dem Bruch D-88

Tabellenverzeichnis

2.1 Versuchsprogramm 4
2.2 Betondruckfestigkeiten der Versuche 8
2.3 Spaltzugfestigkeiten der Versuche 10
2.4 Anfänglicher Elastizitätsmodul $E_{c,0}$ der Versuche 11
2.5 Stabiliserter Elastizitätsmodul $E_{c,S}$ der Versuche 12
2.6 Konrolle der stat. Nutzhöhe d 34
2.7 Versuchsergebnisse 36

A.1 Materialwerte für Beton (Mittelwerte) A-21
A.2 Ergebnisse der Zugversuche Charge 1 für V1 und V2 . . . . . A-25
A.3 Ergebnisse der Zugversuche Charge 2 für V3 bis V5 . . . . . A-26
A.4 Ergebnisse der Zugversuche Charge 3 für V6 bis V8 . . . . . A-26

B.1 Bezeichnungen der Messeinrichtung B-1
B.2 Kennwerte der Aufnehmer und Prüfmaschine ([12], erweitert) B-2

Formelzeichen

Abkürzungen

Bez.	Bezeichnung
DS	Dehnungsaufnehmer für Bewehrung
F	Einzellast
FEM	Finite Elemente Methode
FL	Flächenlast
FLh	hintere Kraftdose zur Messung der Pressenkraft (flächige Belastung)
FLm	Kraftdose zur Messung der Pressenkraft (flächige Belastung) - Mittelwert
FLv	vordere Kraftdose zur Messung der Pressenkraft (flächige Belastung))
GF	Glasfaser
K	Druckkraftaufnehmer
L	Wegaufnehmer für Starrkörperverschiebung
l/L	Links
längs	senkrecht zum Steg
LL	Linienlast
M	Mitte
quer	parallel zum Steg
R	Rissaufnehmer
r/R	Rechts
V	Versuch
v	vorne
W	Wegaufnehmer für Verformungsmessung
WP	Wegaufnehmer für Dickenänderung

Lateinische Großbuchstaben

A	Bruchdehnung von Stahl nach [8] und [7]
A_{gt}	gesamte Extensometer-Dehnung bei Höchstkraft nach [8] und [7] (Stahl)
D_{max}	Größtkorndurchmesser
E_c	Elastizitätsmodul von Beton
$E_{c,0}$	anfänglicher Elastizitätsmodul
$E_{c,S}$	stabilisierter Elastizitätsmodul
E_{ci}	Elastizitätsmodul (Tangentenmodul) nach Model Code 2010 [9]

E_{cm}	mittlerer gemessener Elastizitätsmodul/ Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) nach DIN EN 1992-1-1 [6]
F_u	maximale Traglast (Einzellast)
I	Trägheitsmoment
M_{cr}	Rissmoment
R_{eL}	untere Streckgrenze nach [8]
R_{eH}	obere Streckgrenze nach [8]
R_m	Zugfestigkeit von Stahl nach [8] und [7]
$R_{p0,2}$	Spannung bei 0,2 % der plastischen Extensometer Dehnung nach [8]

Lateinische Kleinbuchstaben

a	Abstand zwischen der Schwerachse einer Blocklast und dem Rand des Auflagers
a_v	Abstand zwischen der Kante einer Blocklast und dem Rand des Auflagers
d	statische Nutzhöhe
f_{ck}	charakteristische Zylinderdruckfestigkeit von Beton 28 Tage nach Herstellung
f_{cm}	mittlere Zylinderdruckfestigkeit von Beton
$f_{cm}(t)$	mittlere Zylinderdruckfestigkeit von Beton in Abhängigkeit des Alters t
f_{ct}	einachsiale Betonzugfestigkeit
$f_{ct,calc}$	rechnerische Betonzugfestigkeit (einachsial) DIN EN 1992-1-1 [6]
f_{ctm}	zentrischen Betonzugfestigkeit (Mittelwert)
$f_{ct,sp}$	Spaltzugfestigkeit von Beton
$f_{ct}(t)$	Betonzugfestigkeit in Abhängigkeit des Alters t
m	Mittelwert
s	Beiwert zur Beschreibung des Zementtyps
t	Alter/ Zeitpunkt (in Tagen)
x, y, z	Koordinaten

Griechische Buchstaben

α	Beiwert für die Ermittlung der Betonzugfestigkeit in Abhängigkeit des Alters
α_E	Beiwert für die Ermittlung des Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit der Gesteinskörnung
α_i	Beiwert für die Berücksichtigung anfänglicher plastischer Verformungen
$\beta_{cc}(t)$	Beiwert zur Bestimmung einer Kenngröße abhängig vom Alter t
Δ	Differenz
$\varepsilon_{a,1}$	Dehnung des 1. Belastungszyklus nach DIN EN 12390-13 [2]
$\varepsilon_{a,3}$	Dehnung des 3. Belastungszyklus nach DIN EN 12390-13 [2]

$\varepsilon_{b,0}$	Dehnung zu Beginn des 1. Belastungszyklus nach DIN EN 12390-13 [2]
$\varepsilon_{b,2}$	Dehnung zu Beginn des 3. Belastungszyklus nach DIN EN 12390-13 [2]
ρ_L	Längsbewehrungsgrad
σ_a	obere Prüfspannung nach [2]
σ_a^m	Mittelwert der oberen Prüfspannungen
σ_b	untere Prüfspannung nach [2]
σ_b^m	Mittelwert der unteren Prüfspannung

Indizes

$calc$	rechnerisch ermittelt

Sonderzeichen

$\oslash$	Durchmesser [mm]

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung

Mechanische Zusammenhänge für die Beschreibung des Querkraftversagens sind sehr komplex und bislang nur unzureichend bekannt. Daher enthalten die meisten Bemessungsansätze zur Vereinfachung empirisch ermittelte Faktoren. Die Modelle werden an einer Versuchsdatenbank von Stahlbetonbalken kalibriert. Ein Beispiel hierfür ist der Bemessung für Querkraft nach Eurocode 2 in Deutschland [6].
Das Tragverhalten von Platten unterscheidet sich durch einen zweiachsialen Lastabtrag maßgeblich von Balken. Daher sind die Ergebnisse von Balkenversuchen nicht direkt auf Platten übertragbar. Die Durchführung von Versuchen an Stahlbetonplatten sind im Vergleich zu Stahlbetonbalken ungleich aufwändiger, sodass die derzeitige Datenlage von Stahlbetonplattenversuchen noch immer vergleichsweise gering ist. Im Rahmen eines vorangehenden Forschungsprojektes zu Stahlbetonplatten [12] konnten am Institut für Massivbau der TUHH bereits neue, weitreichende Erkenntnisse erzielt werden. Es bestehen jedoch noch offene Fragen zu den Mechanismen des Lastabtrags in Platten. Daher wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes eine Versuchsreihe an insgesamt 8 Stahlbetonplatten ohne Querkraftbewehrung durchgeführt. Dabei sollen die folgenden zentralen Fragestellungen untersucht werden:

- Welchen Einfluss hat die Variation des Bewehrungsgehalts?
- Welchen Einfluss haben zusätzlich aufgebrachte, verteilte Lasten auf das Tragverhalten einer Stahlbetonplatte unter konzentrierten Lasten?
- Welche Unterschiede bestehen zwischen dem Querkraft- und dem Durchstanzversagen?

Die genannten Themen wurden bisher in keiner der bekannten Versuchsreihen zu Stahlbetonplatten ohne Querkraftbewehrung unter konzentrierten Einzellasten eingehend behandelt. Da bei der Bemessung von Platten meistens verteilte Lasten anzusetzen sind, ist deren Einfluss genauer zu klären. Darüber hinaus lassen sich hierdurch weitere Erkenntnisse zum Tragverhalten einer Platte erzielen.
Bei dem im Folgenden dargestellten Forschungsprojekt handelt es sich im Wesentlichen um eine Fortführung einer früheren Versuchsreihe von Rombach und Henze ([12], [11]).

Abmessungen, Versuchsaufbau und Messprogramm, Versuchsablauf und Dokumentation, Aufbau des Berichtes sowie die Ergebnisse der vorhergehenden Forschungsreihe [12] dienen als Grundlage der im Weiteren beschriebenen Versuche und werden verwendet, angepasst und erweitert. Weitere Informationen zur vorangegangenen Forschungsreihe sind den genannten Originalquellen ([12], [11]) zu entnehmen.

1.2 Danksagung

Das hier dargestellte Forschungsprojekt zum Thema „Tragverhalten von Stahlbetonplatten unter Gleich- und konzentrierten Lasten“ wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (Projektnummer: RO 793/16-1) finanziert. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Förderung.

Des Weiteren bedanken wir uns für die stets engagierte und zuverlässigen Unterstützung durch unsere studentischen Hilfskräfte Jenni Sellung und Daniel Tetla.

2 Beschreibung der Versuche

2.1 Versuchsprogramm

Es wurden insgesamt 8 Stahlbetonplatten ohne Querkraftbewehrung getestet. Der Versuchsaufbau sowie die geometrischen Abmessungen der Stahlbetonplatten sind weitestgehend identisch mit einer vorangehenden Versuchsreihe [12], welche am Institut für Massivbau in 2015 - 2017 durchgeführt wurde. Der schematische Versuchsaufbau inklusive aller wesentlichen Maße ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

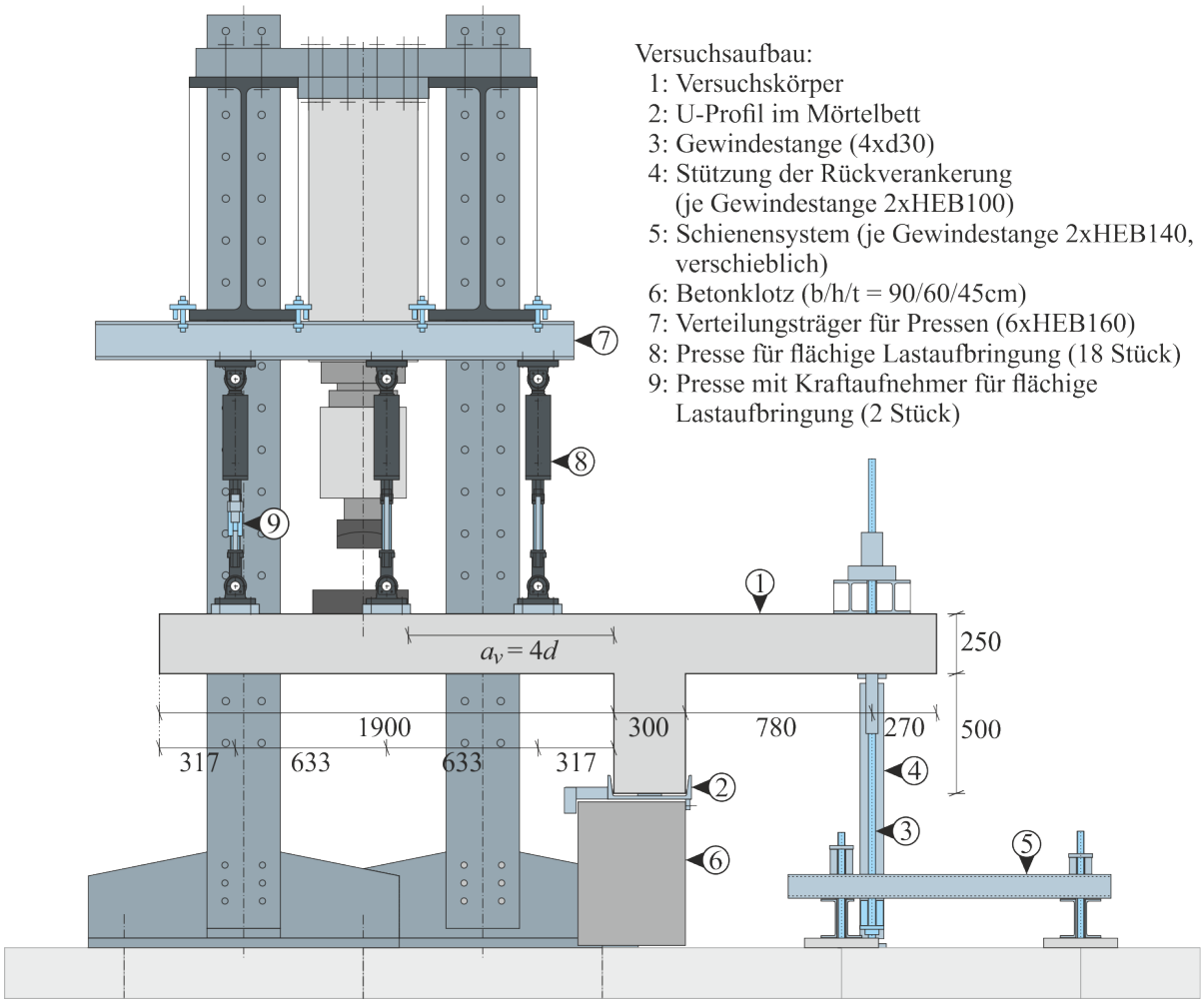

Abbildung 2.1: Versuchsaufbau - Laststellung 4d mit Flächenlast

Alle Versuchsplatten weisen die gleichen Abmessungen auf. Die Stahlbetonplatten haben eine Breite von 4,5 m (quer zur Hauptlastabtragsrichtung/ parallel zum Steg) und eine Länge von 3,25 m (längs des Hauptlastabtrags/ senkrecht zum Steg). Die Plattendicke ist mit 250 mm realitätsnah gewählt. Die Kraglänge beträgt 1,90 m. Der monolithisch angeschlossene Steg soll die Steifigkeit des Auflagers realitätsnah simulieren. Die Versuchskörper wurden unterhalb des monolithisch angeschlossenen Steges starr gelagert. Die Rückspannung auf der lastabgewandten Seite dient als elastische Einspannung. Belastet wurden die Versuchskörper durch eine konzentrierte Einzellast mit einer Aufstandsfläche von 400 mm x 400 mm. Für einige Versuche wurden zusätzliche Pressen angeordnet, um flächige oder linienförmige verteilte Lasten zu generieren. Diese sind ebenfalls in Abbildung 2.1 skizziert.
Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollte der Einfluss der Bewehrung auf das Tragverhalten der Stahlbetonplatten unter konzentrierter Belastung untersucht werden. Außerdem war der Einfluss von zusätzlich vorhandenen verteilten Lasten zu klären. Die Grundbewehrung wurde entsprechend der bereits erwähnten vorherigen Versuchsreihe nach Rombach und Henze [12] festgelegt, um einen direkten Vergleich der beiden Versuchsreihen zu ermöglichen und die Anzahl der Versuchskörper möglichst gering zu halten. Die obere Längsbewehrung (in Lastabtragsrichtung) beträgt im Regelfall $\oslash 16 - 80\,\text{mm}$ ($\rho_l = 1{,}16\,\%$), während die Bewehrung in Querrichtung (quer zur Lastabtragsrichtung) oben und unten sowie in Längsrichtung unten im Regelfall zu $\oslash 12 - 100\,\text{mm}$ gewählt wird. Die folgende Tabelle 2.1 gibt eine Übersicht über die durchgeführten Versuche.

Tabelle 2.1: Versuchsprogramm

Variation der Bewehrung:					
Bezeichnung	a_v/d	längs oben	längs unten	quer oben	quer unten
V1/⊘20-80	4,0	$\oslash 20 - 80\,\text{mm}$	$\oslash 12 - 100\,\text{mm}$	$\oslash 12 - 100\,\text{mm}$	$\oslash 12 - 100\,\text{mm}$
V2/⊘8-300	4,0	$\oslash 16 - 80\,\text{mm}$	$\oslash 12 - 100\,\text{mm}$	$\oslash 12 - 100\,\text{mm}$	$\oslash 8 - 300\,\text{mm}$
V8/⊘8-300-2	4,0	$\oslash 16 - 80\,\text{mm}$	$\oslash 8 - 300\,\text{mm}$	$\oslash 8 - 300\,\text{mm}$	$\oslash 8 - 300\,\text{mm}$
Zusätzliche verteilte Lasten:					
Bezeichnung	a_v/d	Flächenlast (FL)	Höhe der Last	Linienlast (LL)	Höhe der Last
V3/4d-FL	4,0	X	$33{,}70\,\text{kN/m}^2$	–	–
V4/5d-FL	5,0	X	$16{,}85\,\text{kN/m}^2$	–	–
V5/5d-FL-2	5,0	X	$33{,}70\,\text{kN/m}^2$	–	–
V6/5d-LL	5,0	–	–	$a_v/d = 3{,}0$	$81{,}3\,\text{kN/m}$
V7/3d-FL	3,0	X	$33{,}70\,\text{kN/m}^2$	–	–

Zur Variation des Bewehrungsgehaltes wurden insgesamt drei Versuche durchgeführt. Eine Voruntersuchung mit Hilfe der nichtlinearen Finite Elemente Methode (FEM) deutete darauf hin, dass insbesondere die Variation der oberen Längsbewehrung einen Einfluss auf die Tragfähigkeit des Stahlbetonversuchs hat. Daher wurde Versuch V1 mit einem deutlich größeren Längsbewehrungsgrad durchgeführt.
Eine Reduktion der Bewehrung auf der lastabgewandten Seite in der vorhergehenden Versuchsreihe lieferte bei einer Laststellung von $4d$ kaum Unterschiede in der Tragfähigkeit [12]. Daher wurden zusätzlich Versuche mit einer möglichst stark reduzierten Querbewehrung von $\oslash 8 - 300\,\text{mm}$ auf der Plattenunterseite (V2) sowie bei allen Bewehrungslagen abgesehen von der oberen Längsbewehrung (V8) durchgeführt. Die gewählte Bewehrung liegt dabei deutlich unterhalb der Mindestbewehrung und wurde vor allem aus konstruktiven Gründen zur Erstellung des Bewehrungskorbes gewählt.
Zur Untersuchung des Einflusses von zusätzlichen verteilten Lasten wurden weitere 5 Versuche durchgeführt, wobei die Laststellung der konzentrierten Einzellast zwischen $a_v = 3d$ und $a_v = 5d$ variierte. Die verteilten Lasten wurden mit Hilfe von bis zu 18 Pressen über Stahlplatten mit einer Größe von 200 mm x 200 mm aufgebracht, welche in einem regelmäßigen Raster auf der Stahlbetonplatte angeordnet wurden (siehe Abb. 2.2). Die Lastplatten wurden mit einer Kantenlänge von 200 mm möglichst klein gewählt, um einen Einfluss auf die Rissbildung des Stahlbetonkörpers möglichst gering zu halten. Durch die Anordnung von zusätzlichen Pressen konnte eine vergleichsweise hohe Belastung aufgebracht werden, deren Größe zudem direkt angesteuert und während der Versuche dokumentiert werden konnte.
Es sollte eine möglichst große Flächenlast aufgebracht werden, um einen großen Einfluss auf die Schnittgrößen und den Lastabtrag in der Platte zu erreichen. Limitierende Faktoren waren hierbei das Ausschließen von Biegeversagen der Platte, welches sich vor allem bei einem zusätzlich großen Lastabstand der Einzellast zum Steg einstellen könnte, sowie die Beanspruchbarkeit der Rückspannung und der flächig angeordneten Pressen auf Druck. So wurde für drei verschiedene Laststellungen ($3d$, $4d$, $5d$) zusätzlich eine flächige Beanspruchung aufgebracht, die bei einer mittleren Zugfestigkeit von $f_{ct,calc}(28t) \approx 2{,}9\,\text{MPa}$ in etwa dem doppelten Rissmoment am Anschnitt von $M_{cr} = 2 \cdot 2{,}9\,\text{MPa} \cdot I/z \approx 60{,}4\,\text{kNm}$ entspricht. Die zugehörig gewählte Pressenlast betrug 16 kN. Für die Laststellung $5d$ wurde die Flächenlast um 50 % auf 8 kN je Presse reduziert. So konnte zudem der Einfluss der Höhe der verteilten Lasten untersucht werden.
Um den Verlauf der Querkraftschnittgröße in der Platte zusätzlich zu beeinflussen, wurde für einen dritten Versuch mit der Laststellung $5d$ eine Linienlast aus 12 Pressen mit einem Abstand in Querrichtung von 0,375 m untereinander sowie einem Abstand von $a_v = 3d$ zum Auflagerrand des Steges angeordnet (siehe Abb. 2.3). Die Belastung einer Presse betrug hierbei 30,5 kN.

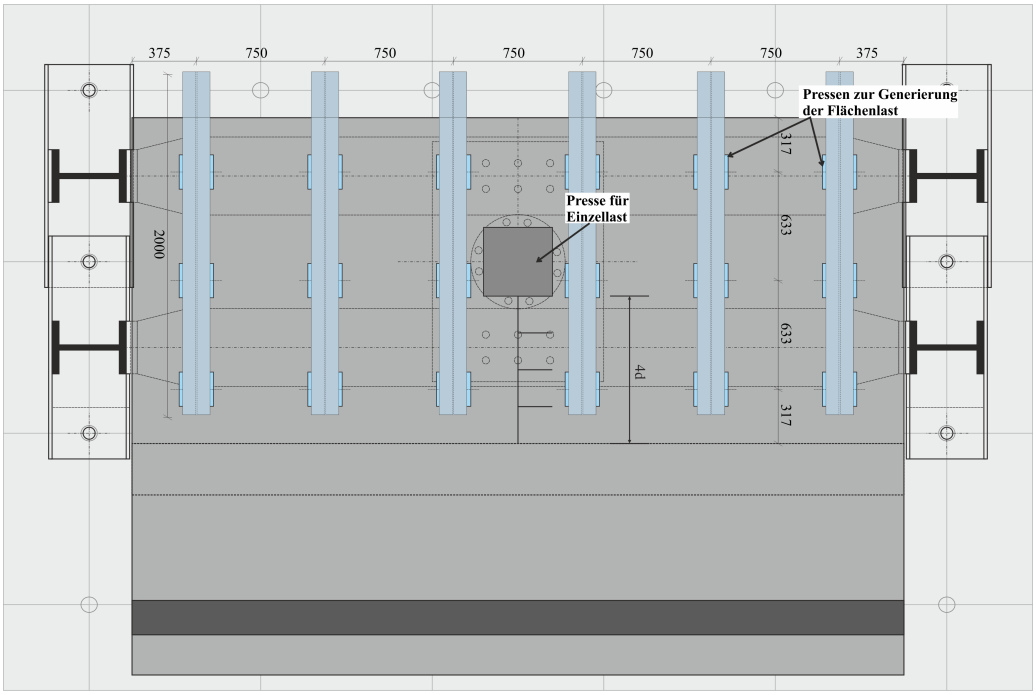

Abbildung 2.2: Aufsicht V3 - Anordnung der Pressen für die Flächenlast

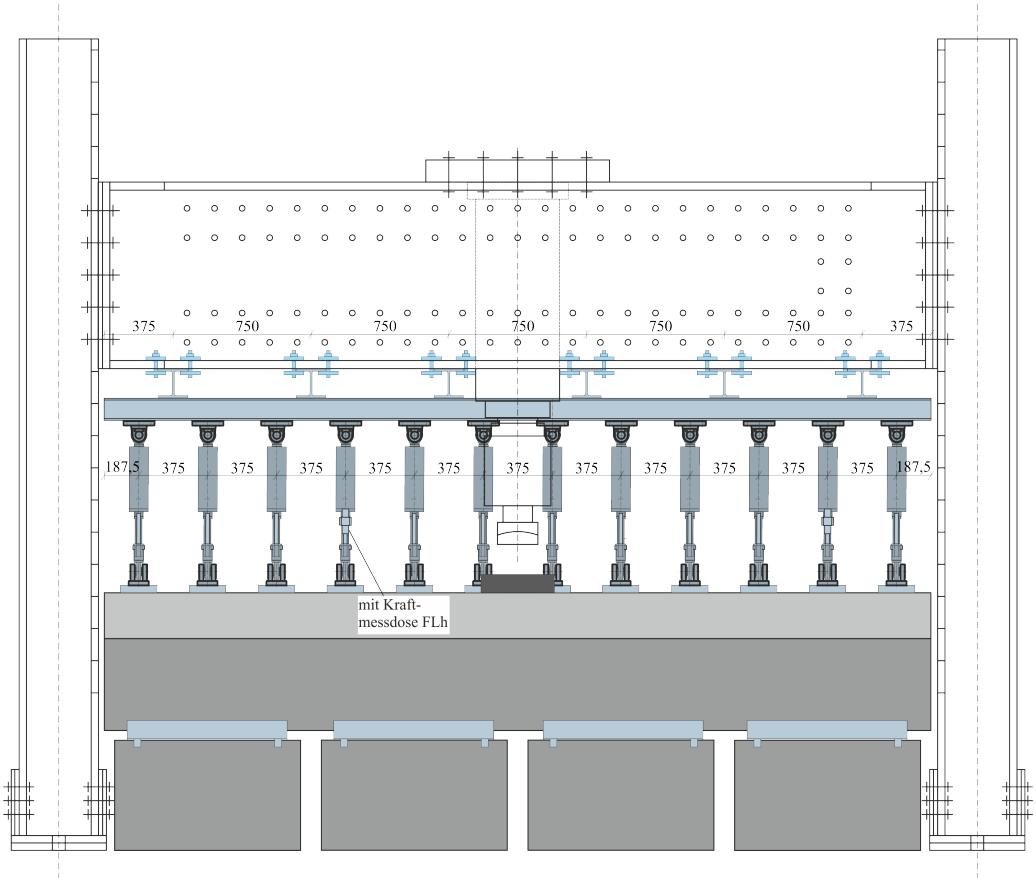

Abbildung 2.3: Ansicht V6 - Anordnung der Pressen für die Linienlast

2.2 Baustoffe

Begleitend zu den Großplattenversuchen wurden die Materialkennwerte des Betons und der Bewehrung experimentell bestimmt. Eine umfangreiche Auflistung der Ergebnisse der Materialproben ist dem Anhang A dieses Berichtes beigefügt.

2.2.1 Beton

Für die Materialprüfungen des Betons wurden geschliffene Betonzylinder mit einem Durchmesser von ⌀150 mm und einer Höhe von 300 mm nach DIN EN 12390-1 [1] und DIN EN 12390-2 [3] zur Ermittlung der Betonkennwerte hergestellt. Die Versuche wurden nach 28 Tagen sowie zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung durchgeführt. Die Betonzylinder, die nach 28 Tagen geprüft wurden, lagerten bis zur Prüfung unter Wasser. Die Betonproben, die zum Zeitpunkt der Großversuche geprüft werden sollten, lagerten unter den gleichen Bedingungen wie die Versuchsplatten. Aufgrund der Komplexität des Versuchsaufbaus wurden die Betonzylinder in der Regel einen Werktag nach der Durchführung der Großplattenversuche geprüft. Im Folgenden wird vereinfacht weiter der Ausdruck „zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung“ verwendet. Ein frühzeitiges Austrocknen der Zylinder wurde durch Abdecken mit Folie in der ersten Zeit nach der Betonage verhindert. Die Folie der Materialproben wurde in der Regel gleichzeitig mit dem Freilegen der Versuchskörper entfernt. Die relevanten Prüfungsdaten sind der Tabelle 2.2 zu entnehmen.
Ermittelt wurden die Druckfestigkeit f_{cm}, die Spaltzugfestigkeit des Betons $f_{ct,sp}$ sowie der Elastizitätsmodul des Betons E_c. Basierend auf Erfahrungswerten des Instituts für Massivbau bei der Betonherstellung unter Laborbedingungen wurde ein Transportbeton nach Eigenschaften mit der Güte C25/30 gewählt, um mittlere Festigkeiten im Bereich von $f_{cm} \approx 40\,\text{MPa}$ zu erzielen. Der Größtkorndurchmesser betrug $D_{max} = 16\,\text{mm}$. Die Rezeptur des Zulieferers wurde nach Herstellung von drei Versuchen (V1 - V3) geändert. Auszüge der wesentlichen Merkmale beider Rezepturen sind im Anhang A.1 angegeben. Außerdem wird die zeitliche Entwicklung der gemessenen Betondruckfestigkeit sowie des E-Moduls den rechnerisch ermittelten Werten nach DIN EN 1992-1-1 [6] im Anhang A.1.4 grafisch gegenübergestellt. Im Anhang A.1.5 werden die Mittelwerte aller gemessen Betonparameter zusätzlich für jeden Versuch übersichtlich tabellarisch zusammengefasst.

Betondruckfestigkeit

Die Betondruckfestigkeitsprüfung wurde für alle Versuche sowohl nach 28 Tagen in Wasserlagerung nach DIN EN 12390-2 [3] als auch zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung bei Lagerung unter Umgebungsbedingungen durchgeführt. Die Prüfung der Betondruckfestigkeit erfolgt nach DIN EN 12390-3 [4]. Es wurden jeweils drei Prüfzylinder getestet, aus denen ein Mittelwert für $f_{cm}(t)$ bestimmt wurde. Bei der Ermittlung der Festigkeiten nach 28 Tagen zeigte sich so, dass die Versuche V1 - V3 mit der ersten Betonrezeptur geringfügig höhere Festigkeiten mit einem Mittelwert von 42,1 MPa aufwiesen, während die

Versuche V4 - V8 mit der neuen Betonrezeptur nach 28 Tagen im Mittel eine Festigkeit von 36,0 MPa ergaben. Für einen Beton der Güte C25/30 wäre nach DIN EN 1992-1-1 [6] eine mittlere Betondruckfestigkeit von $f_{cm} = 33\,\text{MPa}$ zu erwarten. Im Regelfall fand die Durchführung der Versuche (siehe „Versuch“ in Tabelle 2.2) nach wesentlich mehr als 28 Tagen statt, sodass die Betondruckfestigkeiten bei den trocken gelagerten Proben zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung bei einem Wert von $f_{cm} \approx 40\,\text{MPa}$ lagen. In der Tabelle 2.2 sind alle Betondruckfestigkeiten sowie die verschiedenen Prüfdaten zusammengefasst.

Tabelle 2.2: Betondruckfestigkeiten der Versuche

Bez.	Herstellung	Prüfdatum	$f_{cm}(28t)$ [N/mm^2]	Versuch	$\beta_{cc}(t)$	$f_{cm,calc}(t)$ [N/mm^2]	Prüfdatum	$f_{cm}(t)$ [N/mm^2]
V1	17.12.21	14.01.22	42,1	03.03.22	1,103	46,45	04.03.22	46,5
V2	26.01.22	23.02.22	39,7	04.05.22	1,123	44,60	05.05.22	46,6
V3	31.03.22	28.04.22	44,5	13.09.22	1,159	51,56	15.09.22	54,2
V4	16.06.22	14.07.22	35,7	22.09.22	1,123	40,11	23.09.22	44,8
V5	07.07.22	04.08.22	36,2	11.11.22	1,142	41,33	14.11.22	43,5
V6	11.10.22	08.11.22	35,1	20.12.22	1,096	38,48	19.12.22	38,8
V7	02.11.22	30.11.22	37,7	06.12.22	1,023	38,58	07.12.22	37,0
V8	24.11.22	22.12.22	35,5	09.01.23	1,056	37,51	10.01.23	38,5
Mittelwert $m =$:			38,3			42,3		43,7

Für den Entwurf und die Traglastprognose der Versuche wurden vor Versuchsdurchführung nichtlineare Berechnungen mit der kommerziellen Software ATENA Studio (Version 5.6.1) und GiD (Version 14.0.5) durchgeführt, um die Kraft-Verformungskurve sowie die Traglast zu prognostizieren. Hierfür wurden basierend auf den gemessenen Festigkeiten $f_{cm}(28t)$ die Festigkeitswerte $f_{cm,calc}(t)$ nach DIN EN 1992-1-1 [6] zum Zeitpunkt der Versuche rechnerisch ermittelt. Die hierzu verwendeten Formeln (Gl. 2.1 und Gl. 2.2) sind dem Eurocode 2 [6, Abschnitt 3.1.2] entnommen, wobei t die Anzahl der Tage zwischen Betonage und Versuchsdurchführung angibt. Für den verwendeten Zement der Festigkeitsklasse CEM 42,5 N ergibt sich dabei nach [6] ein Beiwert $s = 0{,}25$.

$$\beta_{cc}(t) = e^{s\cdot\left(1-\sqrt{\frac{28}{t}}\right)} \tag{2.1}$$

$$f_{cm,calc}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm}(28t) \tag{2.2}$$

Die ermittelten Werte sind ebenfalls in Tabelle 2.2 angegeben und werden den Werten der Materialprüfungen $f_{cm}(t)$ zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung gegenübergestellt. Hierbei fallen die prognostizierten Werte mit einem Mittelwert von $m_{f_{cm,calc}(t)} = 42{,}3\,\text{MPa}$ im Vergleich zu den Materialproben $m_{f_{cm}(t)} = 43{,}7\,\text{MPa}$ kleiner aus. Im Anhang A.1.4 ist die zeitliche Entwicklung der gemessenen Werte den rechnerisch ermittelten Werten für

die Betondruckfestigkeit ergänzend grafisch gegenübergestellt.

Spaltzugfestigkeit

Die Spaltzugfestigkeit wurde für alle Versuche zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung ermittelt. Außerdem wurde für die Versuchskörper V5 - V8 die Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen in nasser Lagerung geprüft. Für die Bestimmung von $f_{ct,sp}$ wird jeweils der Mittelwert aus drei Betonzylindern ($\oslash$150 mm/300 mm) herangezogen. Die Prüfung erfolgt nach DIN EN 12390-6 [5].
Zusätzliche rechnerisch ermittelte Werte wurden gemäß DIN EN 1992-1-1 [6, Abschnitt 3.1.2] bestimmt. Die einachsiale Zugfestigkeit f_{ct} lässt sich aus der Spaltzugfestigkeit nach Gleichung 2.3 bestimmen [6].

$$f_{ct,calc} = 0{,}9 \cdot f_{ct,sp} \tag{2.3}$$

Für die Versuche V1- V4 wurde die Zugfestigkeit nach 28 Tagen mit Hilfe von Gleichung 2.4 nach [6, Tabelle 3.1] vorab aus der gemessenen Betondruckfestigkeit $f_{cm}(28t)$ ermittelt, da hierfür keine Materialproben hergestellt wurden. Für f_{ck} wird hierbei nach [6] $f_{ck} = f_{cm}(28t) - 8\,\mathrm{N/mm^2}$ angenommen.

$$f_{ctm,calc}(28t) = 0{,}30 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \tag{2.4}$$

Zudem wird die Zugfestigkeit zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung mit Hilfe von Gleichung 2.5 nach [6, Gl. 3.4] vorab ermittelt. Der Beiwert beträgt $\alpha = 2/3$ [6].

$$f_{ctm,calc}(t) = [\beta_{cc}(t)]^{\alpha} \cdot f_{ctm} \tag{2.5}$$

Für die Versuche V1 - V4 wurde hierbei der Rechenwert $f_{ctm,calc}(28t)$ (Gl. 2.4) herangezogen. Für die restlichen Versuche wurde in Gleichung 2.5 der gemessene Wert nach 28 Tagen $f_{ct,calc}(28t)$ verwendet. Die rechnerisch ermittelten Werte für alle Versuche sind in der Tabelle 2.3 den geprüften Werten gegenübergestellt. Die rechnerisch ermittelten Werte $f_{ctm,calc}$ liegen in der Regel betragsmäßig unter den gemessenen Werten $f_{ct,calc}$. Die Mittelwerte m sind ebenfalls in der Tabelle 2.3 angegeben.

Tabelle 2.3: Spaltzugfestigkeiten der Versuche

Bez.	$f_{ctm,calc}(28t)$ [N/mm^2]	$f_{ct,sp}(28t)$ [N/mm^2]	$f_{ct,calc}(28t)$ [N/mm^2]	t	$f_{ctm,calc}(t)$ [N/mm^2]	t	$f_{ct,sp}(t)$ [N/mm^2]	$f_{ct,calc}(t)$ [N/mm^2]
V1	3,15	–	–	76	3,37	77	3,88	3,49
V2	3,00	–	–	98	3,25	99	3,61	3,25
V3	3,30	–	–	166	3,64	168	3,93	3,54
V4	2,75	–	–	98	2,97	99	3,48	3,13
V5	2,78	3,35	3,02	127	3,29	130	3,72	3,35
V6	2,71	3,30	2,97	70	2,92	69	3,36	3,02
V7	2,88	3,27	2,94	34	2,88	35	3,42	3,08
V8	2,73	3,15	2,84	46	2,86	47	3,21	2,89
$m =:$	2,77		2,94		3,15			3,22

Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul wurde für alle Versuche zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung experimentell ermittelt. Außerdem wurde für die Versuchskörper V1 - V4 der E-Modul nach 28 Tagen in nasser Lagerung geprüft. Die Prüfung erfolgte nach dem Verfahren A nach DIN EN 12390-13 [2]. Für die Bestimmung der Spannungshöhe wurden die experimentell am gleichen Tag ermittelten Betondruckfestigkeiten herangezogen. Nach dem Verfahren A werden nach [2] zunächst drei Vorbelastungszyklen auf einem niedrigen Spannungsniveau von bis zu $\sigma_b = 0{,}1 \cdot f_c$ und anschließend drei Belastungszyklen auf höherem Spannungsniveau bis zu $\sigma_a = \frac{f_c}{3}$ durchgeführt. Ein anfänglicher E-Modul $E_{c,0}$ wird dann als Sekantenmodul des ersten (Haupt-)Belastungszyklus nach [2] gemäß Gleichung 2.6 bestimmt.

$$E_{c,0} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_b^m}{\varepsilon_{a,1} - \varepsilon_{b,0}} \tag{2.6}$$

Hierbei steht $\varepsilon_{b,0}$ für die Dehnung zu Beginn des ersten Belastungszyklus und $\varepsilon_{a,1}$ für die Dehnung am Ende des ersten Belastungszyklus. Mit Gleichung 2.7 lässt sich der stabilisierte E-Modul $E_{c,S}$ gemäß [2] als Sekante des letzten Belastungszyklus bestimmen, wobei $\varepsilon_{b,2}$ wieder für den Beginn des letzten Belastungszyklus und $\varepsilon_{a,3}$ für das Ende des letzten Belastungszyklus steht.

$$E_{c,S} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_b^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,2}} \tag{2.7}$$

Es werden jeweils drei Betonzylinder ($\oslash$150 mm/300 mm) für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls geprüft und ein Mittelwert berechnet. Die Tabellen 2.4 und 2.5 geben die gemessenen Werte für $E_{c,0}$ und $E_{c,S}$ wieder.
In einer vorangehenden Analyse [10] wurden Versuchswerte zum E-Modul rechnerischen Nachweismodellen gegenübergestellt. Darauf aufbauend wurden die gemessenen Werte für $E_{c,0,calc}$ den rechnerisch ermittelten Werten nach den Gleichungen des *fib* Model Code 2010

[9] für E_c (Gl. 2.8 und 2.9) ermittelt und ebenfalls in Tabelle 2.4 miteinander verglichen.

$$E_{ci} = 21.500 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{1/3} \tag{2.8}$$

$$E_c = \alpha_i \cdot E_{ci} \tag{2.9}$$

Für den Vergleich der Versuchswerte des stabilisierten E-Moduls $E_{c,S,calc}$ wurde der Sekantenmodul von Beton nach Tabelle 3.1 aus DIN EN 1992-1-1 [6] gemäß Gleichung 2.10 gewählt und ebenfalls in Tabelle 2.5 dargestellt.

$$E_{cm} = 22.000 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} \tag{2.10}$$

Diese rechnerischen Werte wurden beispielsweise für die Prognose mit Hilfe nichtlinearer Berechnungen herangezogen. Dabei fallen die rechnerisch ermittelten Werte jeweils höher aus als die gemessenen Werte. Die Differenz $\Delta E_{c,calc} = E_{c,calc}/E_c$ bzw. $\Delta E_c(t) = E_c(t)/E_c(28t)$ ist ebenfalls den Tabellen 2.4 und 2.5 zu entnehmen.

Tabelle 2.4: Anfänglicher Elastizitätsmodul $E_{c,0}$ der Versuche

Bez.	$E_{c,0,calc}(28t)$ [N/mm²]	$E_{c,0}(28t)$ [N/mm²]	$\Delta E_{c,calc}$	t	$E_{c,0,calc}(t)$ [N/mm²]	t	$E_{c,0}(t)$ [N/mm²]	$\Delta E_c(t)$
V1	31.095	30.420	102,2 %	76	31.330	77	29.167	95,9 %
V2	30.307	29.210	103,8 %	98	30.248	99	27.813	95,2 %
V3	31.868	30.467	104,6 %	166	31.844	168	29.760	97,7 %
V4	28.954	30.400	95,2 %	98	31.480	99	27.170	89,4 %
V5	29.126	–	–	127	30.308	130	28.883	–
V6	28.746	–	–	70	29.549	69	30.287	–
V7	29.637	–	–	34	29.843	35	26.883	–
V8	28.885	–	–	46	29.365	47	26.033	–
$m =:$					30.496		28.250	

Tabelle 2.5: Stabiliserter Elastizitätsmodul $E_{c,S}$ der Versuche

Bez.	$E_{c,S,calc}(28t)$ [N/mm^2]	$E_{c,S}(28t)$ [N/mm^2]	$\Delta E_{c,calc}$	t [N/mm^2]	$E_{c,S,calc}(t)$	t	$E_{c,S}(t)$ [N/mm^2]	$\Delta E_c(t)$
V1	33.862	33.237	101,9 %	76	34.231	77	33.267	100,1 %
V2	33.271	32.450	102,5 %	98	33.603	99	32.597	100,5 %
V3	34.429	33.997	101,3 %	166	35.533	168	34.760	102,2 %
V4	32.227	33.053	97,5 %	98	34.227	99	31.440	95,1 %
V5	32.362	–	–	127	33.675	130	33.153	–
V6	32.064	–	–	70	32.960	69	33.287	–
V7	32.759	–	–	34	32.987	35	30.980	–
V8	32.173	–	–	46	32.708	47	30.257	–
$m =:$					33.741		32.468	

Bei Betrachtung der Werte fällt auf, dass sich die Prüfergebnisse nach 28 Tagen sowie zum „Zeitpunkt der Versuchsdurchführung“ ($> 28t$) nur wenig unterscheiden. Die Werte des experimentell bestimmten stabilisierten E-Moduls $E_{c,S}$ sind für die Versuche V1 - V3 geringfügig höher bei trockener Lagerung und längerer Lagerungsdauer (102,2 % bei V3, 95,1 % bei V4). Im Fall von $E_{c,0}$ sind die Werte bei trockener Lagerung sogar etwas kleiner (97,7 % - 89,4 %) im Vergleich zu den Prüfergebnissen bei nassen Lagerung nach 28 Tagen. Nach dem Nationalen Anhang der DIN EN 12390-13 [2] ist eine Lagerung der Prüfzylinder unter Wasser nur für 6 Tage vorgesehen, während die internationalen Vorschriften die Lagerung unter Wasser bis kurz vor Prüfbeginn definiert. Der Einfluss dieser unterschiedlichen Lagerungsarten wurde nicht weiter untersucht. Im Anhang A.1.4 ist die zeitliche Entwicklung der gemessenen Werte den rechnerisch ermittelten Werten für den Elastizitätsmodul ergänzend grafisch gegenübergestellt.

2.2.2 Bewehrung

Die für die verschiedenen Versuche gewählte Bewehrung wurde in Abschnitt 2.1 bereits kurz erläutert. Die Grundbewehrung, welche in Abbildung 2.4 dargestellt ist, entspricht zu Vergleichszwecken der vorangehenden Versuchsreihe [12]. Die Versuche V3 - V7 zur Untersuchung des Einflusses von zusätzlich vorhandenen verteilten Lasten wiesen entsprechend die gleiche Grundbewehrung mit einer oberen Biegebewehrung von $\oslash 16 - 80\,\text{mm}$ und $\oslash 12 - 100\,\text{mm}$ in den übrigen Lagen auf (siehe Abb. 2.4).

Für die Versuche zur Untersuchung des Einflusses der Bewehrung auf die Traglast V1/$\oslash$20-80, V2/$\oslash$8-300 und V8/$\oslash$8-300-2, wurde die in Abbildung 2.4 dargestellte Bewehrung jeweils abgewandelt. Die Bewehrungsübersichten zu Versuch V1, V2 und V8 sind dem Anhang A.2.1 beigefügt.

Die Bewehrung wurde in drei Chargen bestellt, sodass die Versuchsplatten V1 und V2

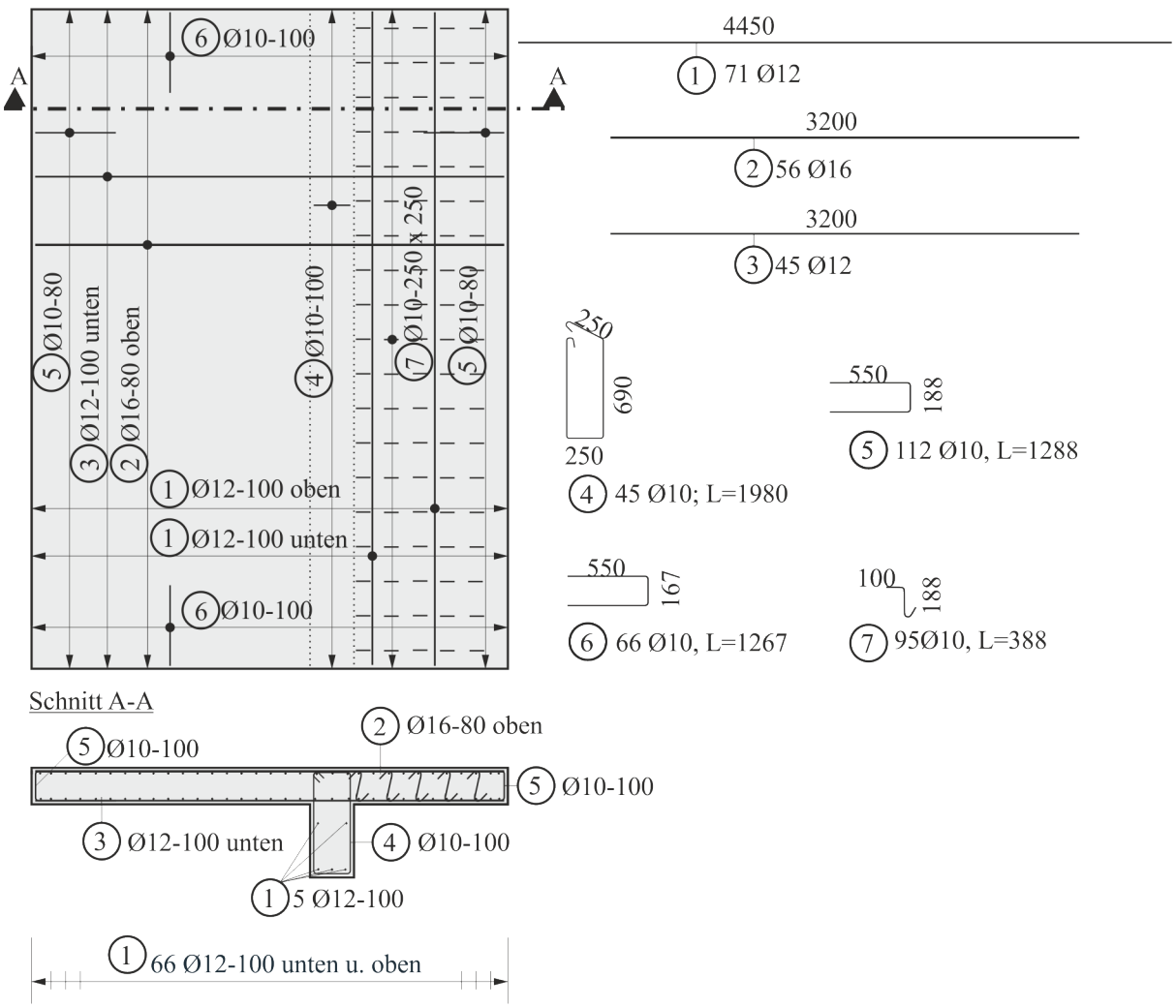

Abbildung 2.4: Bewehrungsanordnung für die Versuche V3 - V7 in Anlehnung an [12]

sowie V3 - V5 und V6 - V8 die gleiche Bewehrung aufwiesen. Für jede Charge wurden Zugversuche nach DIN EN ISO 6892-1 [8] und DIN EN ISO 15630-1 [7] durchgeführt. Für jeden Bewehrungsdurchmesser wurden fünf Proben hergestellt. Die Ergebnisse der einzelnen Versuche sind in Tabellen im Anhang A.2.2 zusammengefasst.
Für fließfähige Stähle wird die obere Streckgrenze R_{eH}, also der maximale Wert bevor sich ein Fließen der Bewehrung einstellt, und die untere Streckgrenze R_{eL} und damit die niedrigste Spannung während des plastischen Fließens des Stahls nach [8] bestimmt. Die Bewehrung entsprach in der Regel der Duktilitätsklasse B und wies eine ausgeprägte Streckgrenze auf. Einzig die Bewehrung mit Durchmesser ⌀8 der 1. Charge war Ringmaterial WR (B500B), welches keine ausgeprägte Streckgrenze aufwies. Bei diesen Proben wurde die Dehngrenze $R_{p0,2}$ bei 0,2 % der plastischen Extensometer-Dehnung nach [8] bestimmt.

Die Dehnungen wurden mit zwei Dehnungsaufnehmern DD1 bis zu deren Messbereichsende von 5 % bzw. 50 mm/m Dehnung gemessen. Anschließend wurden die Versuche ohne Dehnungsmessung bis zum Bruch weitergefahren. Die Zugfestigkeit R_m, die gesamte Extensometer-Dehnung bei Höchstkraft A_{gt} und die Bruchdehnung A wurden mit dem manuellen Verfahren nach [7] nach Abschluss der Versuche ermittelt.
Die Abbildung 2.5 zeigt exemplarisch die Spannungs-Dehnungs-Kurve sowie die Spannungs-Zeit-Kurve einer Zugprobe der 2. Charge mit dem Durchmesser ⌀16.

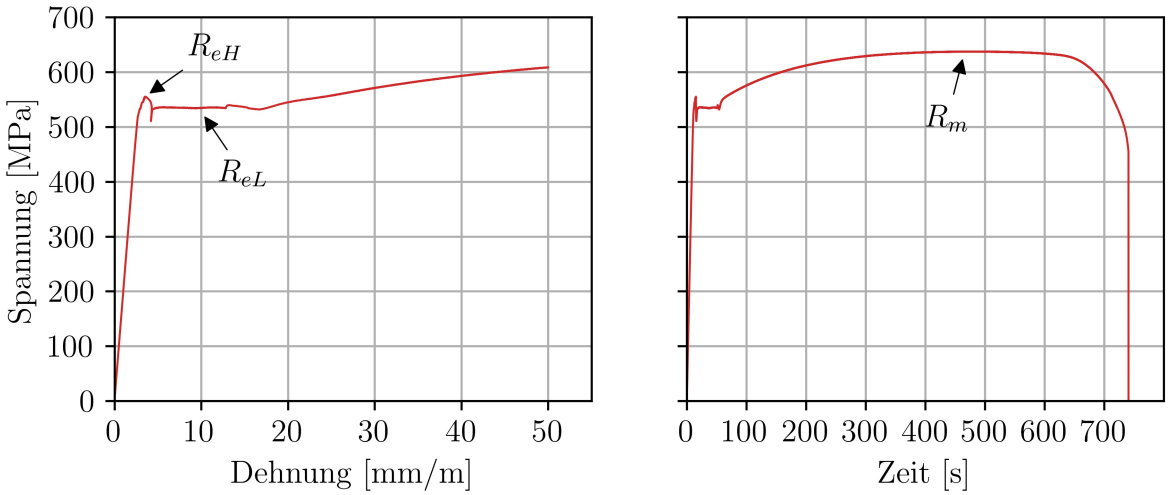

Abbildung 2.5: Spannungs-Dehnungs-Kurve und Spannungs-Zeit-Kurve für Charge 2, Durchmesser ⌀16, 3. Zugprobe

2.3 Messtechnik

Die Versuchsdurchführung wurde mit Hilfe verschiedener Messelemente dokumentiert. Die Anlage B.1 gibt eine Übersicht über die verwendete Messtechnik, die gewählten Bezeichnungen bzw. Abkürzungen sowie die allgemeinen Produktbezeichnungen. Weitere Angaben zu den technischen Eigenschaften der Messelemente können [12] entnommen werden, da die Messtechnik zum Großteil bereits in der vorhergehenden Versuchsreihe zum Einsatz kam.
Die Anordnung der Messelemente variierte für die einzelnen Versuche. Daher wurden dem Anhang B.2 Aufnehmerpläne für jeden Versuch beigefügt. In den Plänen ist die finale Lage der Messelemente dargestellt, welche durch ein Aufmaß nach der Betonage festgestellt wurde.
Für die Kontrolle der Belastungen wurden verschiedene Kraftaufnehmer vorgesehen. Die Messelemente mit der Bezeichnung FLv und FLh wurden in 2 gegenüberliegenden Ecken der Kragplatte positioniert und haben die Druckkraft in den flächig verteilten zusätzlichen Pressen dokumentiert. Für die Auswertung wurde ein Mittelwert FLm aus beiden Werten gebildet. Die Druckkraft in der Rückspannung wurde mit Hilfe der Kraftaufnehmer K1 -

K4 kontrolliert.
Zur Dokumentation des Tragverhaltens der Platte wurde weitere Messtechnik verwendet. Induktive Wegaufnehmer w_i wurden zur Messung der Verformung des Versuchskörpers kreuzförmig um die Einzellast angeordnet. Durch eine Reihe von Messelementen konnte so die Verformung senkrecht zum Steg in Haupttragrichtung aufgenommen werden. Durch die zweite Reihe von Wegaufnehmern wurde die veränderliche Verformung in Querrichtung - parallel zum Steg - auf Höhe der konzentrierten Einzellast dokumentiert.
Zur Aufzeichnung der Rissentwicklung im Platteninneren wurden Wegaufnehmer in die Kragplatte eingefügt. Veränderungen der Plattendicke sollten hierbei eine Aussage über die Rissöffnung geben. Die Messelemente WP waren zwischen der Einzellast und dem Steg der Kragplatte in einer Achse senkrecht zum Steg, auf Linie der Lastausbreitung unter 45° sowie außerhalb von diesem Bereich angeordnet.
Biegerisse im Bereich des Steges wurden mit Hilfe von Rissaufnehmern R1 -R4 aufgezeichnet. Für die Versuche wurde dazu eine Vorlast aufgebracht, um entstehende Risse auf der Plattenoberfläche zu markieren. Die Vorlast wurde in der Regel wieder abgelassen, sodass Rissaufnehmer an den markierten Stellen positioniert und die Rissöffnung ab dem Zustand ohne Belastung dokumentiert werden konnte. In einigen Fällen wurde die Last nicht vollständig abgelassen. Diese Fälle sind in Abschnitt 2.6 beschrieben.
Zur Messung der Beanspruchung der Bewehrung im Stegbereich und unterhalb der Lastplatte in Querrichtung wurden Dehnungsaufnehmer mit DMS-Messystem an den Bewehrungsstäben angebracht. Vor der Betonage wurden dazu Platzhalter aus Styropor an den Bewehrungsstäben befestigt. So konnten die Stäbe nach der Betonage freigelegt werden, um die Messaufnehmer DS zu positionieren.

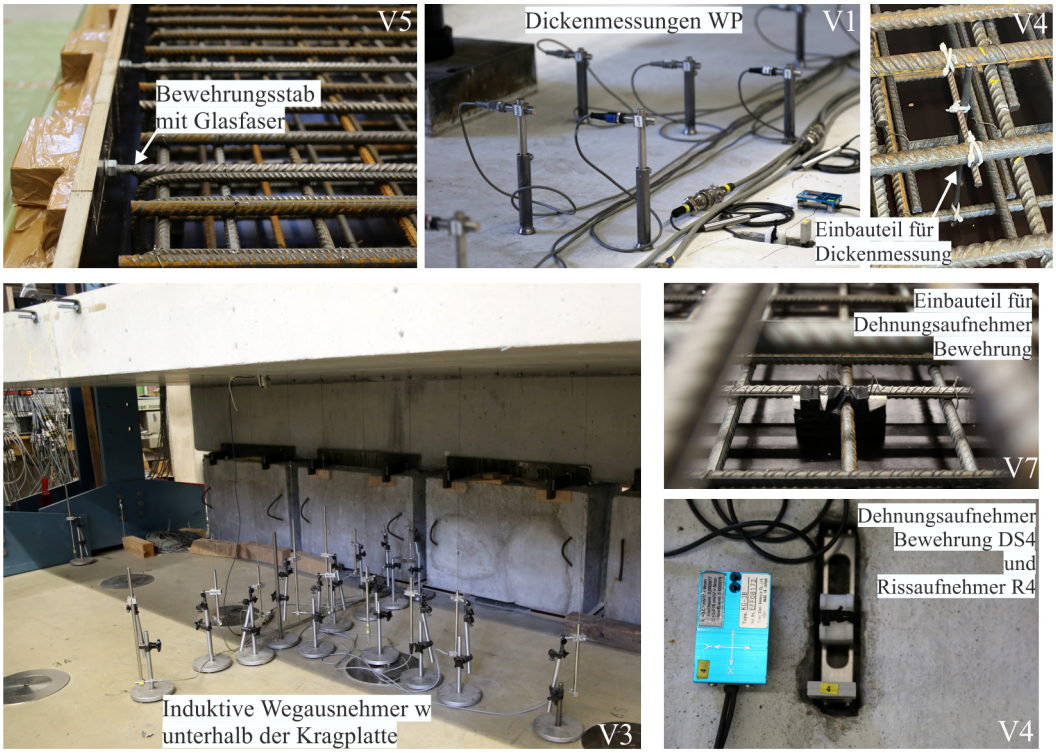

Abbildung 2.6: Ausgewählte Messelemente der Versuchsreihe

Die Abbildung 2.6 zeigt beispielhaft den Einbau verschiedener Messelemente.
Als zusätzliche Messelemente, welche bei der vorangehenden Versuchsreihe [12] noch nicht zur Verfügung standen, wurden einige Bewehrungsstäbe zur Messung der Dehnungen mit faseroptischer Sensorik versehen. Insgesamt konnten vier Stäbe für Messungen ausgewählt werden. Der Vorteil der Dehnungsmessung mit Glasfasern besteht vor allem darin, dass die Dehnungen während der Versuchsdurchführung kontinuierlich und über eine große Länge, in diesem Fall über die gesamte Stablänge, gemessen werden können. Mit den Dehnungsaufnehmern DS der Bewehrung gelingt dies nur punktuell am Ort der voraussichtlich maximalen Beanspruchung (hier im Stegbereich). Gleichzeitig können die Werte der Dehnungsmesser DS mit denen der Glasfasermessungen verglichen und so kontrolliert werden.
Die verwendeten Glasfasern bestanden aus einem Kern mit einem Durchmesser von 9 μm, welcher mit einem Mantel (9 μm) und einer äußeren, schubsteifen Polyimidschicht ummantelt ist. Die Funktionsweise der faseroptischen Messung beruht auf der Auswertung der Rayleight-Streuung, die von der Glasfaser zurückgestrahlt wird [14]. Das Rayleigh-Streulicht ist spezifisch für die Glasfaser und die Frequenz des rückgestreuten Signals ist abhängig vom Ort in der Faser [14]. Eine Dehnungsänderung der Glasfaser sorgt dafür, dass sich das rückgestreute Signal verschiebt [14]. Durch einen Vergleich mit dem ursprünglichen Signal kann so die Dehnung der Glasfaser durch Umrechnung ermittelt werden [13]. Durch eine Segmentierung des Signals, können Messpunkte an verschiedenen Ort auf der Faser ausgewertet werden (siehe hierzu [14], [13]), sodass die Dehnung über

die gesamte Länge der Bewehrung nahezu kontinuierlich erfasst werden kann. Es wurden Messabstände von 0,65 mm gewählt, welche in Vorversuchen innerhalb des Institus die besten Ergebnisse erzielt haben. Einflüsse auf die Dehnung infolge von Temperaturänderung konnten ausgeschlossen werden, da die Versuche unter Laborbedingungen mit einer konstanten Temperatur stattfanden.
Es wurden Bewehrungsstäbe der oberen Längsbewehrung gewählt, um die Beanspruchung der Biegebewehrung und gegebenenfalls Lastumlagerungseffekte über eine Breite der Platte darzustellen. Außerdem wurde mindestens ein Bewehrungsstab der unteren Querbewehrung gewählt, um Dehnungen in der Bewehrung auf der lastabgewandten Seite parallel zum Steg aufzuzeichnen. Die Bewehrungsstäbe wurden vor Einbau geschlitzt (ca. 3 mm tief), um die Glasfasern zu schützen. Eine geeignete Herstellung eines Verbundes mit dem Bewehrungsstab ist für Dehnungsmessungen essentiell. Es wurde ein Kleber aus Cyanacrylat verwendet. Anschließend wurde der Schlitz mit 2-Komponenten Epoxidharzklebstoff versiegelt. Anschließend waren die empfindlichen Glasfasern im Stabinneren vor äußeren Einflüssen, die insbesondere durch den direkten Kontakt zum Beton unter Belastung entstehen, geschützt. Eine Gefährdung der Messtechnik bestand außerdem am Anfang/Ende der Bewehrungsstäbe, wo Verschiebungen des Bewehrungskorbes oder des Betonkörpers im Übergang zur Schalung die Glasfasern beschädigen können. Hier wurden die Glasfasern in einem Schutzschlauch aus den Betonkörper herausgeführt. Die Glasfasern wurden mit Hilfe von ebenfalls geschlitzten M12 Gewindestangen, welche bei den Bewehrungsstäben der oberen Bewehrungslage direkt an den Stab angeschweißt wurden, aus der Schalung geführt (siehe Abbildung 2.6). Der unten liegende Querstab wurde zusätzlich über einen Schutzschlauch zur Vorderkante der Kragplatte geführt und in einem am Korb befestigten Stück M12 Gewindestange aus der Schalung geführt.
Die Messungen mit faseroptischer Sensorik unterliegen einem gewissen Rauschen. Um die Werte zu glätten wurde das Signal in Anaconda/Python mit dem Savitzky-Golay-Filter (Fensterlänge: 31, Polynomordnung 3, Modus „nearest“) geglättet (siehe auch [15]). In der Versuchsauswertung im Anhang D wurden sowohl die Original-Messergebnisse (in Blautönen) als auch die geglättete Kurve (in schwarz) dargestellt.
Zusätzlich wurden Verformungen der Auflager kontrolliert. Hierzu dienten Wegaufnehmer, die entkoppelt von dem Versuchskörper am Versuchsrahmen befestigt wurden. Weitere Erläuterungen hierzu werden im Abschnitt 2.5.1 gemacht.
Die Messergebnisse wurden mit Frequenzen von 1 Hz, 10 Hz und 200 Hz aufgenommen. Durch die unterschiedliche Dokumentationsfrequenz können sich die ausgelesenen Werte um bis zu ca. 1 kN unterscheiden, was in der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt wird. Messdaten der Glasfasern wurden mit Frequenzen von ca. 0,78 Hz - 1,66 Hz erfasst, welche vom Messsystem festgelegt wurden.

2.4 Herstellung

Für die Herstellung der Versuchskörper wurde eine ortsfeste Schalung in der Versuchshalle des Instituts für Massivbau an der TUHH errichtet. Die Halle war stets beheizt, sodass ein Arbeiten zu jeder Jahreszeit unter ähnlichen Umgebungsbedingungen möglich war. Durch eine sorgfältige Behandlung der Schalung konnte diese für die Herstellung aller 8 Versuchskörper verwendet werden. In der Schalung wurden außerdem Einbauteile - vornehmlich Rohre - für die spätere Rückverankerung sowie zum Transport des Versuchskörpers innerhalb der Halle - vor und nach Erstellung von Sägeschnitten - vorgesehen. Die Einbauteile sind in der folgenden Abbildung 2.7 dargestellt.

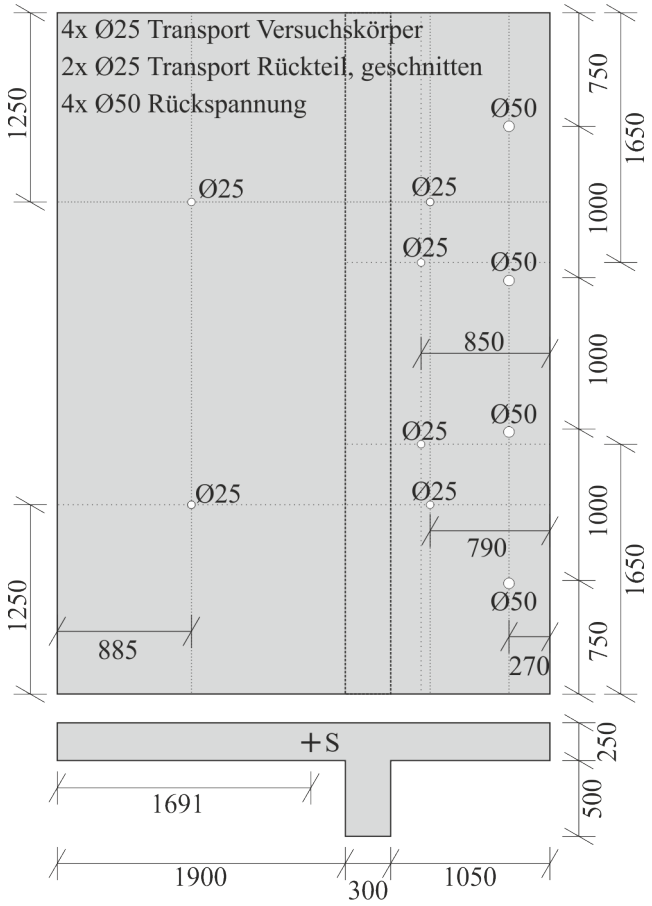

Abbildung 2.7: Einbauteile der Versuchskörper nach [12]

Nachdem die Bewehrung in der Schalung verlegt war, wurden Vorrichtungen für die Messeinrichtungen, welche ebenfalls in den Betonkröper einzubetonieren waren, ergänzt. Die Glasfasern, die in Bewehrungsstäben eingelassen wurden, mussten ohne starke Krümmungen oder Knicke aus der Platte herausgeführt werden. Für die Dickenmessungen wurden vertikale Röhrchen durch Stahlstäbe mit einem Gummimantel vorgesehen, die nach Betonage wieder entfernt werden konnten. Außerdem wurden für Dehnungsmessungen an den Bewehrungsstäben Styroporstücke eingebaut, damit später die Dehnungsmesser an-

geordnet werden konnten (siehe auch Abb. 2.6). Die Lage der Messeinrichtungen sind für alle Versuchskörper im Anhang B.2 dargestellt.
Wie bereits in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, wurde ein Transportbeton der Güte C25/30 verbaut. Für die Betonage konnte die Schalung direkt aus dem Betonmischer heraus befüllt werden. Nach Verdichten des Versuchskörpers wurde die Oberfläche glatt abgezogen und anschließend mit Folie abgedeckt. Die genaue Lage der Messeinrichtungen wurde durch ein Aufmaß kontrolliert, sodass in den Aufnehmerplänen des Anhang B.2 entsprechend die finale Lage der Messgeräte dargestellt ist.
Die Betonzylinder wurden im Nebenraum hergestellt, sodass vor Betonage der Versuchskörper jeweils eine Teilmenge des Betons aus dem Mischer abgenommen wurde. Die Verdichtung der Zylinder erfolgte über einen Rütteltisch. Die Zylinder wurden nach Herstellung anschließend nass (unter Wasser) oder trocken im Nebenraum gelagert, wobei die trocken gelagerten Prüfzylinder entsprechend der Großversuche durch Folie vor dem Austrocknen geschützt wurden. Die folgende Abbildung 2.8 zeigt einige Bilder des Herstellungsprozesses der Versuchskörper.

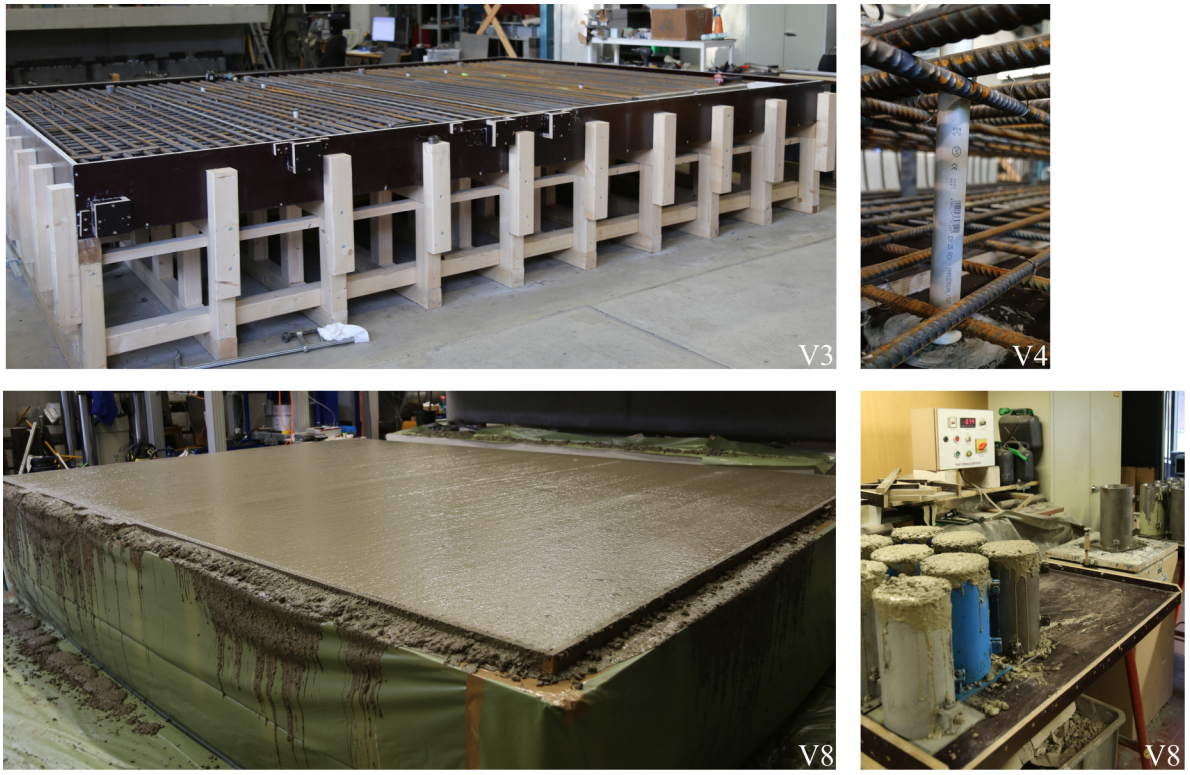

Abbildung 2.8: Herstellung der Versuchskörper - links oben: V3 - Bewehrung in der Schalung; rechts oben: V4 - Einbauteil Transport; links unten: V8 nach der Betonage; rechts unten: V8 - Herstellung der Betonzylinder

2.5 Versuchsdurchführung

2.5.1 Versuchsstand

Der Aufbau des Versuchsstandes inklusive Lagerungs- und Rückspannsystem wurde aus der vorhergehenden Versuchsreihe [12] übernommen. Der schematische Versuchsaufbau wurde bereits in Abbildung 2.1 dargestellt. Die Stahlbetonversuchskörper waren im Versuchsstand auf Betonklötzen gelagert, um ein Arbeiten unterhalb der Platte zu ermöglichen. Dabei wurde der Steg in ein U-Profil mit Mörtelbett eingelassen. Die Lage der Kragplatten wurde durch eine vertikale Rückverankerung auf der Rückseite der Platte sichergestellt. Für die Verankerung der Platten auf dem Spannfeld wurden vier vertikale Gewindestangen durch die vorbereiteten Aussparungen im Versuchskörper gesteckt. Die Gewindestangen wurden auf der Unterseite über ein Schienensystems am Spannfeld befestigt. Das Schienensystem ermöglichte eine veränderliche Lage der Versuchskörper für unterschiedliche Laststellungen. Zu jeder Gewindestange wurden zwei Stahlstützen HEB 100 zur Lagersicherung der Stahlbetonplatten von unten angeordnet, gegen die die Gewindestangen anschließend über Spannzylinder von der Plattenoberseite vorgespannt wurden. Die aufgebrachten Kräfte wurden dabei über Kraftmessdosen (K1 - K4) kontrolliert. Die Abbildung 2.9 (Bild links) zeigt beispielhaft die Ausführung der Rückspannsystems für den Versuch V5.

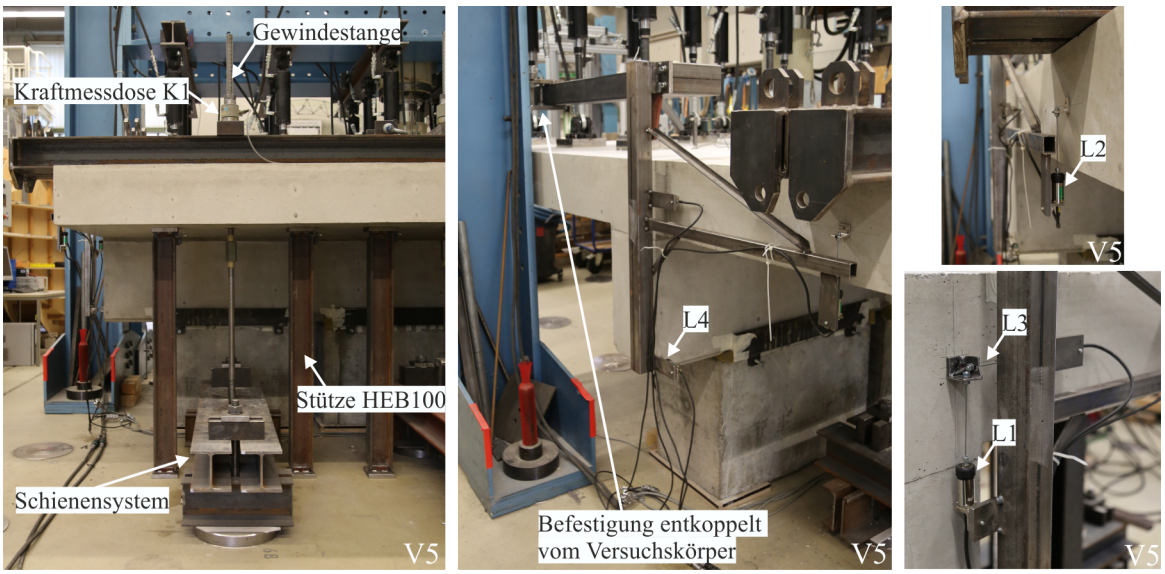

Abbildung 2.9: Versuchsstand - links: V5 - Rückverankerung der Versuchskörper im Spannfeld; Mitte: V5 - Kontrolle der Verdrehungen; rechts oben: V5 - Messaufnehmer vertikal L2; rechts unten: V5 - Messaufnehmer L3 horizontal und L1 vertikal

Bei denn Versuchen V1 und V2 war der Schwerpunkt der Rückverankerung 72 cm von der Hinterkante des Stegs entfernt, bei der Versuchsreihe 2015 - 2017 [12] waren es noch

78 cm. Der Einfluss dieser Abweichung auf den Tragwiderstand und das Tragverhalten ist gering. Für die Versuche V3 - V8 wurde wieder die ursprüngliche Lage (Abstand der Gewindestange vom Stegrand: 78 cm) verwendet.
Die Verformungen der Auflager können einen Einfluss auf die Verformung des Gesamtsystems und damit auf die Versuchsergebnisse haben. Daher wurden die Verschiebungen der Versuchskörper durch zusätzliche Wegaufnehmer L1 - L4 bzw. L5 - L8 auf beiden Seiten des Versuchskörpers kontrolliert. Die Messaufnehmer wurden dabei entkoppelt vom Versuchskörper an einem L-förmigen Rahmen, welcher am Versuchsstand befestigt war, positioniert (siehe Abb. 2.9 (Bild Mitte und Bilder rechts oben und unten)). Durch eine Verformungsmessung auf beiden Seiten des Versuchskörpers konnte zudem das Auftreten einer ungleichförmigen Verdrehung an beiden Plattenrändern dokumentiert werden. Nur bei dem Versuch V6 mit einer zusätzlichen Lininelast ergaben sich Verformungen mit unterschiedlichem Vorzeichen an beiden Plattenrändern (siehe D.137).
Die Ergebnisse der gemessenen Verformungen jedes einzelnen Versuches sind im Anhang D jeweils für die erreichte Traglast dokumentiert. Ein Einfluss auf die gemessenen Verformungen unterhalb des Kragarms ergibt sich dabei vorwiegend aus den vertikalen Verschiebungen L1 und L2 (bzw. L5 und L6). Abbildung 2.10 zeigt die Lage der Aufnehmer L1 bis L8. Zusätzlich werden in dieser Abbildung die Verformungen L1 und L2 während der maximalen Belastung (Traglast F_u) für den Versuch V5 angegeben (rote/ blaue Werte, siehe auch D.111, Darstellung in Abb. 2.10 in 100-facher Vergrößerung). Durch eine einfache Extrapolation der Werte für L1 und L2 bzw. L5 und L6 wurde für V5 der Einfluss der Lagerverformung auf die Verformungsmessung unterhalb der Lastplatte im Mittel zu ca. $\Delta w_1 \approxeq 2{,}1$ mm abgeschätzt. Bei dem Versuch V5 wurde eine der größten Lagerverformungen dokumentiert, sodass davon auszugehen ist, dass der Einfluss bei den übrigen Versuchen darunter liegt.

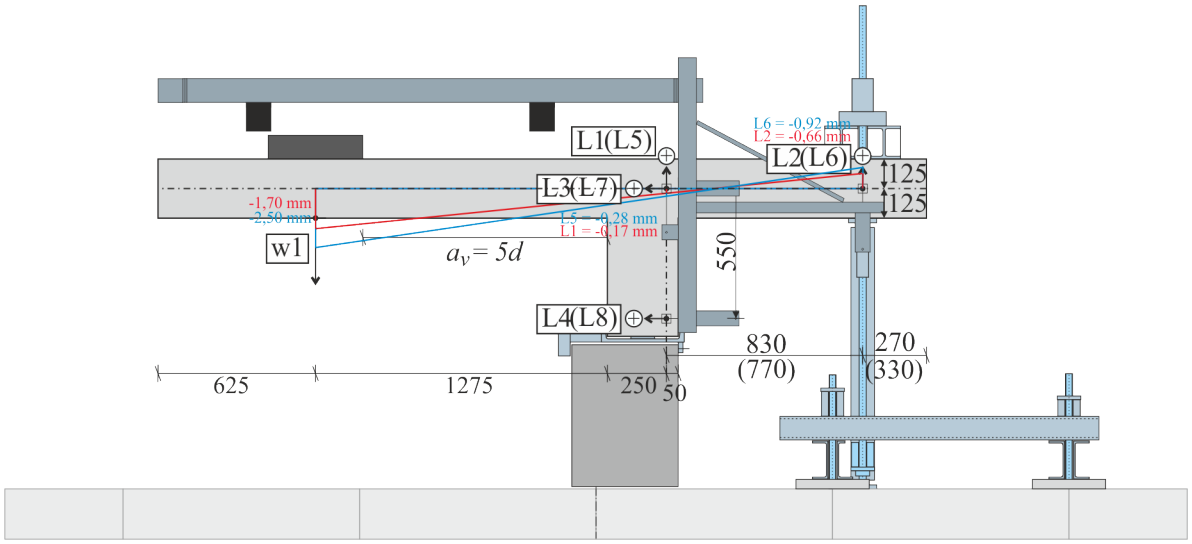

Abbildung 2.10: Anordnung der Verformungsaufnehmer L1 - L8 am Beispiel V5

Die konzentrierte Einzellast wird durch eine hydraulische Presse über eine Lastverteilungsplatte aus Stahl mit einer Kantenlänge von 400 mm aufgebracht. Die Lastplatte wurde zur Reduktion von Spannungsspitzen an den Plattenkanten in einem Mörtelbett auf den Versuchskörper gelegt [12]. Außerdem war der Stempel der Presse senkrecht zum Steg gelenkig gelagert, sodass sich die Platte zwängungsfrei verdrehen konnte [12]. Zur Aufbringung von verteilten Lasten, wurden zusätzlich bis zu 18 Pressen und Stahlplatten in einem regelmäßigen Raster auf den Versuchskörpern angeordnet. Die Stahlplatten mit einer Kantenlänge von 200 mm wurden ebenfalls in ein Mörtelbett gelegt. Für die Anordnung der Pressen wurden 6 Verteilungsträger HEB 160 am Versuchsrahmen befestigt, welche eine veränderliche Lage relativ zum Versuchskörper bei verschiedenen Einzellaststellungen ermöglichten (siehe auch Abb. 2.1 - 2.3 und Abb. 2.11). Die Pressen wurden über einen separaten Regelungskreis angesteuert, wobei die Pressenkraft über ein rechnergesteuertes Hydraulikaggregat geregelt wurde. Dabei wurde der Mittelwert der beiden Kraftaufnehmer FLm vorgegeben. Die Kontrolle der Pressenkraft erfolgte über zwei Kraftaufnehmer, FLv und FLh, welche jeweils in zwei gegenüberliegenden Ecken der Kragplatte angeordnet waren. Die Lagerung der Pressen war gelenkig in die Haupttragrichtung (längs/ senkrecht zum Steg), um Zwängungen zu vermeiden. Die Stahlplatten wurden möglichst klein gewählt, um einen Einfluss durch Reibung gering zu halten. Außerdem wurde durch eine linear elastische Vergleichsrechnung mit der Software SOFiSTiK SSD Version 2022 geprüft, ob die Biegemomenten- und Querkraftverläufe durch die Mitte der Einzellast bei einer Beanspruchung durch 18 einzelne Pressen denen einer flächigen Belastung entsprechen.

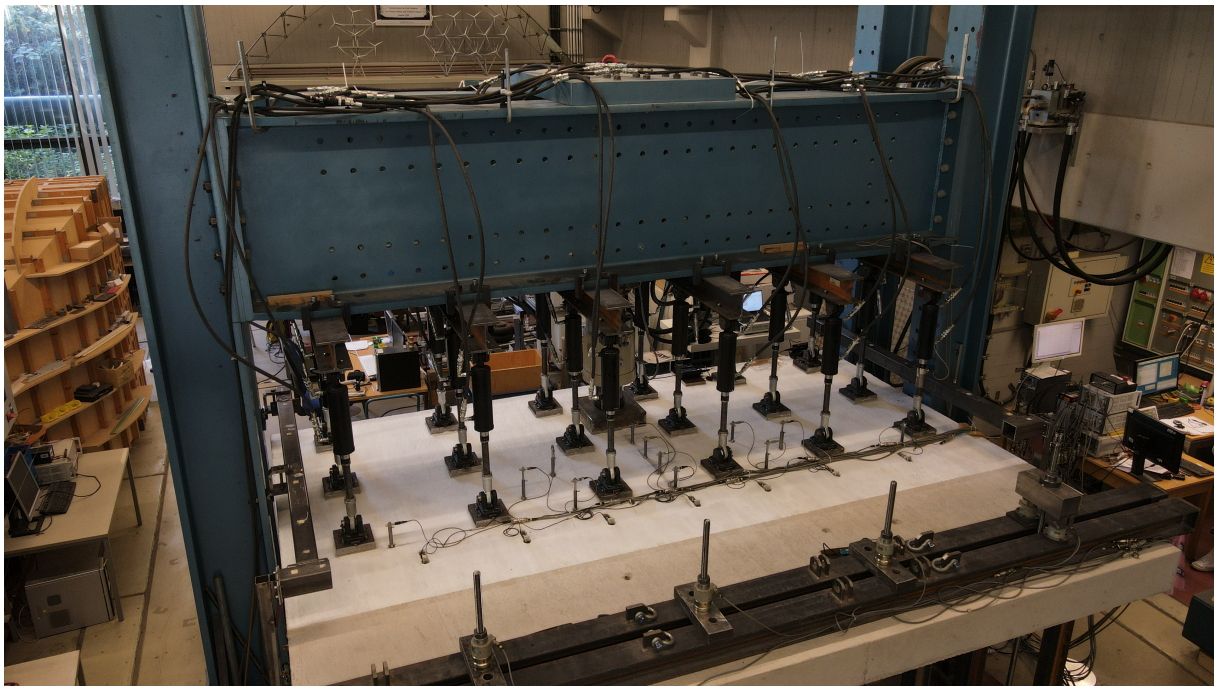

Abbildung 2.11: Anordnung der flächig verteilten Pressen bei Versuch V4

2.5.2 Versuchsablauf

Zunächst wurden die Stahlbetonplatten entsprechend ihrer Laststellung in den Versuchsstand eingebaut und durch die in Abschnitt 2.5.1 beschriebene vertikale Verankerung so auf das Spannfeld gespannt, dass ein Abheben nicht möglich war. Die Rückverankerung wurde für die Versuche V1 - V3 mit 360 kN vorgespannt, wobei nach dem Vorspannen von den Kraftmessdosen im Bereich der Rückspannung aufgrund der Nachgiebigkeit des Systems im Mittel noch 320 kN gemessen wurden. Im Laufe der Versuchsdurchführung stieg diese Vorspannkraft wieder an. Um die Beanspruchung der Rückspannung weniger stark auszuschöpfen und weiterhin die gemessenen Verformungen des Messrahmens (L1 - L4) klein zu halten, wurden die anschließenden Versuche V4 - V8 mit 330 kN vorgespannt. In diesen Fällen wurden im Mittel ca. 300 kN durch die Kraftmessdosen gemessen.
Bei den Versuchen zur Untersuchung der Bewehrungsvariation (V1, V2, V8) wurde die konzentrierte Last (400 mm x 400 mm) über eine hydraulische Presse zunächst kraftgesteuert mit einer Geschwindigkeit von 1,67 kN/s in Schrittweiten von 100 kN abschnittsweise gesteigert und anschließend für ca. 5 min auf diesem Lastniveau gehalten. Ab einem Belastungsniveau von ca. 200 kN wurde die Belastung weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 0,03 m/s weiter erhöht.
Bei Versuchen, bei denen der Einfluss zusätzlich vorhandener Flächen- und Linienlasten untersucht wurde (V3 - V7), wurden zunächst die verteilten Lasten mittels hydraulischer Pressen kraftgesteuert auf das angestrebte Lastniveau aufgebracht. Die Erhöhung der Belastung erfolgte manuell und hing somit vorwiegend von der Trägheit der Pressen ab. Nach Aufbringen der verteilten Lasten wurde die konzentrierte Last über eine hydraulische Presse in Schrittweiten von 100 kN angehoben, wobei in der Regel eine Wegsteuerung gewählt wurde. Auch hier wurde jede Laststufe für ca. 5 min gehalten.
Die Rissaufnehmer wurden im Stegbereich positioniert, nachdem erste Biegerisse auftraten. Hierzu sind zunächst wahlweise die konzentrierte Einzellast, die verteilten Lasten oder eine Kombination aus beiden auf den Versuchskörper aufgebracht worden, um entstandene Risse im Bereich des Steges zu markieren. Die Belastung wurde in der Regel anschließend ganz oder teilweise wieder abgelassen, um die Rissöffnung wieder zu minimieren und bei Wiederbelastung dokumentieren zu können. Das Verfahren für diese Wiederbelastung variierte abhängig von der Art des Versuches und ist im folgenden Abschnitt unter anderem durch die Darstellung der Kraft-Zeit-Kurven genauer beschrieben. Nach Erreichen der Traglast wurden die Versuche jeweils noch einige Zeit weiter gefahren, um zusätzliche einen Eindruck von dem Nachbruchverhalten der Platten gewinnen zu können.
Im Zuge der Entlastung wurden in der Regel zunächst die verteilten, kraftgesteuerten Lasten abgelassen, wodurch ein Sprung in der Last-Verformungs-Kurve resultiert. Anschließend erfolgte das Ablassen der konzentrierten Last. Für die Versuchsauswertung wurde die Dokumentation der Versuchsergebnisse mit einer Frequenz von 1 Hz herangezogen. Die Datenerfassung der Glasfasermessung wurde mit einer Frequenz von 0,78 Hz - 1,66 Hz dokumentiert.

2.6 Versuchsbeschreibung im Detail

In diesem Abschnitt werden alle Versuche im Einzelnen beschrieben. Gegenstand der Beschreibung sind Besonderheiten und Beobachtungen, die während der Versuchsdurchführung aufkamen, sowie eine Beschreibung des Tragverhaltens.

2.6.1 Versuch V1/⌀20-80

Der Versuch V1 wurde am 03.03.22 durchgeführt. Zwischen 100 kN und 200 kN traten erste Biegerisse im Bereich des Steges auf, sodass die Entlastung und Positionierung der Rissaufnehmer nach einer Last von 200 kN erfolgte. Bei Wiederbelastung wurde die hydraulische Presse bis 300 kN kraftgesteuert gefahren, bevor auf eine weggesteuerte Belastungserhöhung gewechselt wurde. Bei ca. 600 kN war die Rissbildung durch ein Rauschen hörbar. Das Versagen trat bei 700,4 kN auf.
Die Belastung wurde bei ca. 700 kN, also direkt bei Eintritt des Versagens, automatisch gehalten. Im Zuge der nächsten Belastungsstufe stellte sich dann eine erneute Laststeigerung bis auf 690,8 kN ein, welche in der Auswertung auch als „Fu(2)“ bezeichnet wird. Anschließend fiel die Last endgültig ab. Bei weiterer Belastung war das Fortschreiten der Risse in Querrichtung akustisch hörbar.
Durch die Anordnung von Bewehrungsstäben mit Glasfasern in der oberen Längsbewehrung konnte ein Fortschreiten des Schrägrisses in Querrichtung aufgezeichnet werden. Für die nachfolgend hergestellten Versuche (V3-V8) wurden daher 3 Glasfasern an der oberen Längsbewehrung positioniert und nur eine Glasfaser an der unteren Querbewehrung eingebaut. Nach dem Bruch bildete sich ein Last-Plateau bei ca. 300 kN. Dieses trat bereits in der vorangehenden Versuchsreihe von Rombach und Henze [12] auf.

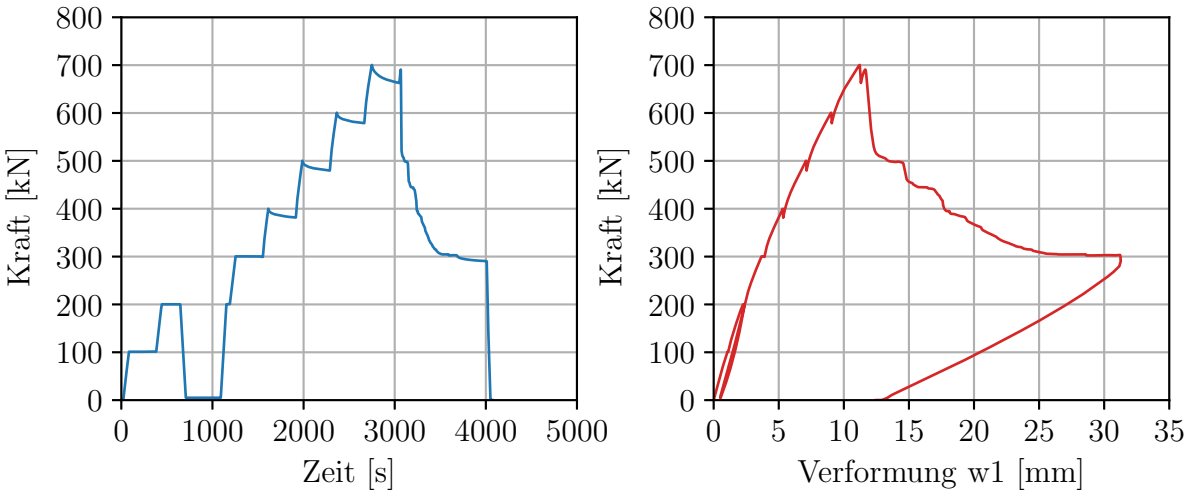

Abbildung 2.12: V1 (1 Hz) - Zeit-Verformungs-Kurve (links) und Last-Verformungs-Kurve (rechts)

Die Abbildung 2.12 zeigt die Kraft-Zeit-Kurve sowie der Last-Verformungs-Kurve, wobei die Verformung der Platte unterhalb der konzentrierten Last w_1 betrachtet wird.

2.6.2 Versuch V2/⌀8-300

Der Versuch V2 wurde am 04.05.22 durchgeführt. Die Last wurde stufenweise um 100 kN - 50 kN - 50 kN - 31 kN kraftgesteuert gesteigert und auf jeder Laststufe für ca. 5 min gehalten. Bei ca. 231 kN wurden die Lage der Rissaufnehmer im Bereich des Steges festgelegt, wobei nur sehr kleine Biegerisse zu finden waren. Die Risse auf der Plattenunterseite waren zu diesem Zeitpunkt bereits größer. Anschließend wurde der Versuchkörper entlastet, Rissaufnehmer wurden positioniert, der Versuhskörper wurde wieder belastet und ab 200 kN weggesteuert weitergefahren. Auf der Plattenunterseite bildeten sich drei große Risse senkrecht zum Steg, welche auch auf der Stirnseite des Kragendes deutlich sichtbar wurden. Nach Erreichen der Traglast von 684,4 kN verformte sich die Platte in Querrichtung (parallel zum Steg) deutlich „knickartiger“ im Vergleich zu V1 mit höherer Querbewehrung. Der Versuch V2 weist im Vergleich zu V1 dabei nur eine geringfügig kleinere Traglast auf ($\Delta = -2\,\%$). Die drei Risse auf der Unterseite öffneten sich deutlich. Diese Risse sind in Abbildung 2.13 (links) nach Absetzen der Belastung dargestellt. Der Versuch wurde so weit gefahren, dass sich in der Last-Verformungs-Kurve noch ein Plateau bei ca. 300 kN Nachbruchlast andeuten konnte, welches im Vergleich zu der vorherigen Versuchsreihe [12] aber weniger stark ausgebildet war. Am linken Plattenrand war im Steg, unterhalb der Plattenebene, ein großer Riss zu erkennen, welcher aus einem Abheben der Platte im Randbereich hindeutete (siehe Abb. 2.13, rechts).



Abbildung 2.13: V2 - Risse an der Stirn- und Unterseite (links) und Riss im Bereich des Steges Ansicht l (rechts) nach Absetzen der Belastung

Die Abbildung 2.14 zeigt die Kraft-Zeit-Kurve sowie der Last-Verformungs-Kurve, wobei die Verformung der Platte unterhalb der konzentrierten Last w_1 betrachtet wird.

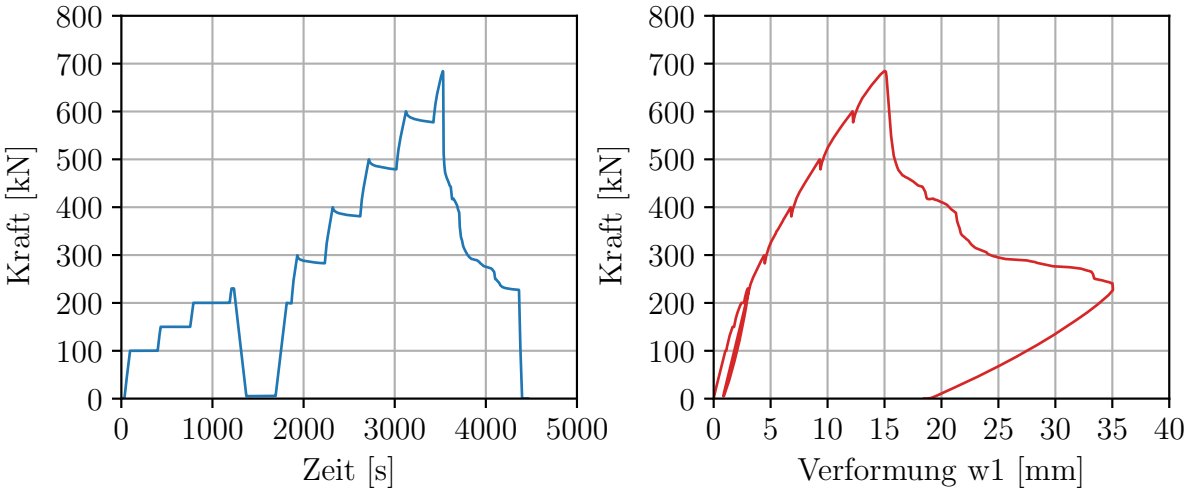

Abbildung 2.14: V2 (1 Hz) - Zeit-Verformungs-Kurve (links) und Last-Verformungs-Kurve (rechts)

2.6.3 Versuch V3/4d-FL

Der Versuch V3 wurde am 13.09.22 durchgeführt. Zunächst wurde die Kraft in den Pressen zur Abbildung der Flächenlast händisch auf 16 kN erhöht. Im Bereich des Steges waren anschließend bereits eindeutige Biegerisse zu sehen. Nach Aufbringen der Flächenlast wurden die Rissaufnehmer positioniert. Bei diesem Versuch wurden keine Ent- und Wiederbelastung vorgenommen. Daher sind anfängliche Rissöffnungen durch die flächige Vorbelastung nicht über die aufgezeichneten Messergebnisse dokumentiert. Dies ist bei der weiteren Auswertung der Rissmessung zu berücksichtigen.
Anschließend wurde die konzentrierte Last wie üblich in 100 kN Schritten weggesteuert aufgebracht. In den Pausen der verschiedenen Laststufen fiel die aufgebrachte Last bei gleichbleibender Verformung schon auf einem niedrigen Lastniveau von 100 kN um ca. 20 kN ab, was darauf hindeutet, dass der Versuchskörper hier durch Flächen- und Einzellast bereits deutlich beansprucht wurde. Die Glasfasern auf der Oberseite der Platte stiegen, wie erwartet, entsprechend des Momentenverlaufs an. Auf der Unterseite konnte die Rissentwicklung in der Glasfasermessung bereits ab ca. 100 kN visuell gut beobachtet werden.
Die Traglast des Versuches betrug 694,0 kN. Nach Erreichen der Traglast, blieb die aufgebrachte Last noch eine Zeit lang auf diesem Niveau, bevor sich ein Teil der Platte um die Einzellast herum deutlich absenkte. Das Versagen schien dabei eher großflächig um die Einzellast aufzutreten. Die Einzellast stanzte sich vergleichsweise wenig in die Druckzone ein. Anschließend fiel die Traglast rasch ab und konnte sich kaum auf einem Lastniveau von ca. 300 kN halten. Da die Pressen für die Abbildung der Flächenlast kraftgesteuert gefahren wurden, wurde der Versuch vor Erreichen einer Verformung von $w_1 = 30$ mm beendet. Zunächst wurden dabei die Pressen der Flächenlast heruntergefahren, wodurch

sie die gemessene Kraft der Einzellast noch einmal erhöhte. Anschließend wurde auch die Einzellast abgesenkt.
Die folgende Abbildung 2.15 zeigt die Kraft-Zeit-Kurve sowie der Last-Verformungs-Kurve, wobei die Verformung der Platte unterhalb der konzentrierten Last w_1 betrachtet wird.

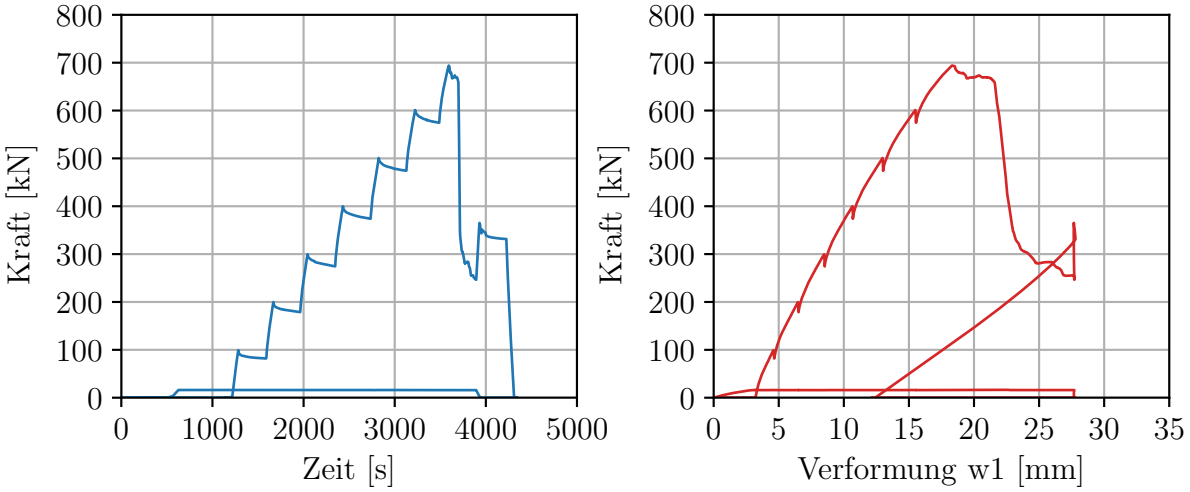

Abbildung 2.15: V3 (1 Hz) - Zeit-Verformungs-Kurve (links) und Last-Verformungs-Kurve (rechts)

2.6.4 Versuch V4/5d-FL

Der Versuch V4 wurde am 22.09.22 durchgeführt. Zunächst wurde die Kraft in den flächig verteilten Pressen bis auf 8 kN je Presse erhöht. Es zeigten sich keine eindeutigen Biegerisse. Anschließend wurde die Einzellast kraftgesteuert bis auf 100 kN erhöht und wieder abgelassen, um die Rissaufnehmer zu positionieren. In diesem Versuch sind daher anfängliche Rissöffnungen, welche sich durch die flächige Beanspruchung ergeben haben, nicht über die aufgezeichneten Messergebnisse dokumentiert. Dies ist bei der weiteren Auswertung der Rissmessung zu berücksichtigen. Bei ca. 400 kN waren bereits deutliche Risse an der Stirnseite im Bereich unter der Einzellast sowie Biegerisse im Bereich des Steges zu erkennen. Bei ca. 500 kN war dann ein deutlicheres Eindrücken der Stahlplatte der Einzellast in den Versuchskörper sichtbar. Die Traglast des Versuches lag bei 626,4 kN Einzellast, wobei ein eindeutiger rund um die Einzellast verlaufender Riss auf der Plattenoberseite erkennbar war.
Die folgende Abbildung 2.16 zeigt die Kraft-Zeit-Kurve sowie der Last-Verformungs-Kurve, wobei die Verformung der Platte unterhalb der konzentrierten Last w_1 betrachtet wird.

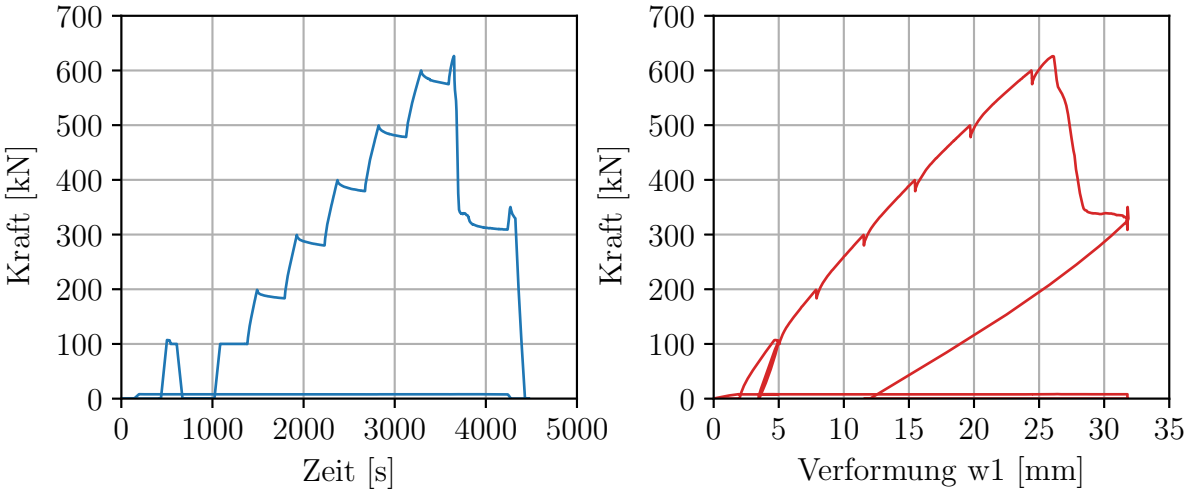

Abbildung 2.16: V4 (1 Hz) - Zeit-Verformungs-Kurve (links) und Last-Verformungs-Kurve (rechts)

2.6.5 Versuch V5/5d-FL-2

Der Versuch V5 wurde am 11.11.22 durchgeführt. Die Pressen zur Erzeugung der flächig verteilten Last wurden zunächst auf je 16 kN händisch erhöht. Im Bereich des Steges waren daraufhin bereits deutliche Biegerisse zu sehen, sodass Positionen zur Befestigung der Rissaufnehmer gewählt werden konnten. Anschließend wurde die Last der Pressen runter gefahren, die Rissaufnehmer befestigt und die flächige Last wieder auf 16 kN je Presse erhöht. Die Einzellast wurde nun weggesteuert aufgebracht. Ab ca. 600 kN stieg die Last langsamer als zuvor weiter an und die Verformungen vergrößerten sich. Ab hier erreichten auch die äußeren Dehnungsmessgeräte für die Bewehrung DS6 und DS7 auf der Plattenoberseite die Fließgrenze des Stahls. Bei dem Versuch konnte eine maximale Traglast von 646,2 kN erreicht werden. Bei Maximallast war das Aufgehen spröder Risse hörbar. Um die Einzellast herum verliefen die Biegerisse auf der Plattenoberseite gekrümmt. Auf der rechten Hälfte (von der Stirnseite des Kragarmes aus geblickt), traten die Biegerisse an der Stirnseite heraus. Hier bildete sich bei Entlastung des Versuches ein horizontaler Riss entlang der oberen Bewehrungslage. Auf der linken Seite war der Krümmungsradius größer. Die Biegerisse trafen eher in Richtung des linken Randes auf das Ende der Platte. Die folgende Abbildung 2.17 zeigt die Kraft-Zeit-Kurve sowie der Last-Verformungs-Kurve, wobei die Verformung der Platte unterhalb der konzentrierten Last w_1 betrachtet wird.

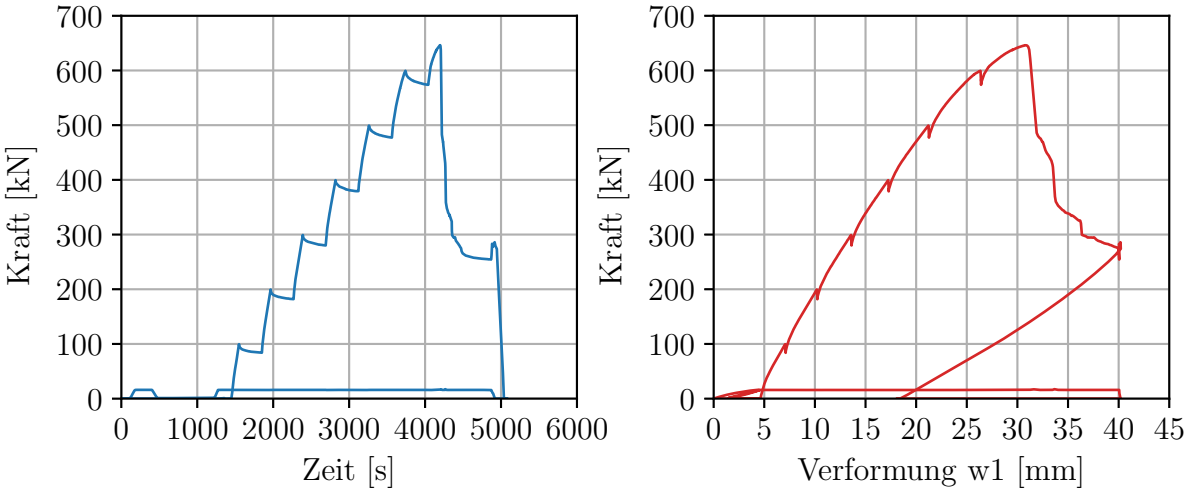

Abbildung 2.17: V5 (1 Hz) - Zeit-Verformungs-Kurve (links) und Last-Verformungs-Kurve (rechts)

2.6.6 Versuch V6/5d-LL

Der Versuch V6 wurde am 20.12.22 durchgeführt. Zunächst wurden die linienförmig angeordneten Pressen auf 30,5 kN händisch erhöht. Anders als erwartet traten trotz der vergleichsweise hohen Beanspruchung des Steges keine Biegerisse auf. Es befand sich zu diesem Zeitpunkt noch eine Stahlstütze mittig unter der Kragplatte, die den Versuchskörper während der Lagerung sicherte. Daher wurde die Pressen der Linienlast wieder heruntergefahren, die Stahlstütze entfernt und der Versuch durch Aufbringen der linienförmigen Belastung neu gestartet. Dieses Mal traten eindeutige Risse im Bereich des Steges auf, sodass die Last ein zweites Mal abgelassen wurde, um Rissaufnehmer anzubringen. Anschließend erfolgte die Steigerung der verteilten Last sowie der Einzellast (weggesteuert). Im Anhang D.6 wird z.B. bei Betrachtung der zeitabhängigen Stahldehnungen am Anschnitt während der Vorbelastung (Abb. D.131) ersichtlich, dass der Einfluss der ungeplanten ersten Belastung vernachlässigbar ist. Die Stahldehnungen lagen bei der ersten Erhöhung der flächig angeordneten Pressen auf FLm = 30 kN(1) im niedrigen Beanspruchungsbereich der zweiten Entlastung auf eine mittlere Pressenkraft von FLm = 1,0 kN(2). Hierbei stellt FLm den Mittelwert aus den zwei Kraftaufnehmern FLv und FLh dar, deren Anordnung in den Versuchsplänen in Anhang B.2 dargestellt ist. Die Verformungen in Lastrichtung (senkrecht zum Steg) sind in der folgenden Abbildung 2.18 für alle Vorbelastungsschritte dargestellt. Auch hier waren die Werte sehr klein. Die Verformung unter der Einzellast lag nach Ablasssen der ersten Linienlast bei $w_1 = 0{,}7$ mm . Es kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss auf den weiteren Versuchsablauf vernachlässigbar gering war. Die Biegerisse im Stegbereich waren bei diesem Versuch über die gesamte Plattenbreite schon bei ca. 200 kN Einzellast deutlich ausgeprägt.

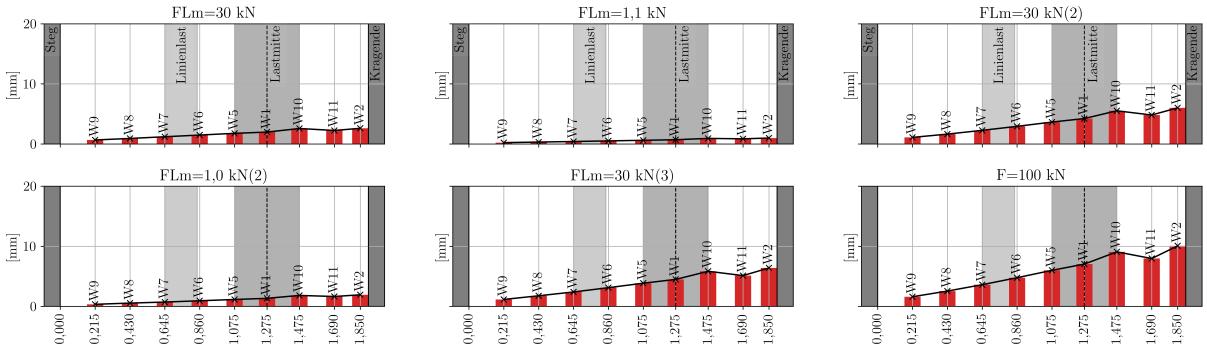

Abbildung 2.18: V6 - Zeitahänige Verformungen in Lastrichtung während der Vorbelastung

Ab ca. 300 KN bildeten sich auch Risse von der Unterkante der Stirnseite im Bereich der Plattenmitte. Die Last wurde ab 500 kN ohne eine zusätzliche vorgesehene automatische Stufe bei 600 kN kontinuierlich weiter erhöht, da davon ausgegangen wurde, dass die Traglast nicht deutlich über 600 kN liegen würde. Letztlich wurde eine maximale Einzellast von 599,1 kN aufgezeichnet. Nach Erreichen der Traglast fiel die Last sehr schnell ab. Auf der Plattenoberseite bildeten sich zwar leicht gekrümmte Biegerisse, diese gingen jedoch über die gesamte Plattenbreite kaum über die Lage der linienförmig aufgebrachten Pressen hinaus. Auf der rechten Seite trat ein Schrägriss in Stegnähe auch von außen sichtbar am Plattenrand auf. Anschließend wurde die Platte zunächst durch die Linienlast entlastet und abschließend von der konzentrierten Einzellast, wobei wiederholt ein „Knacken“ innerhalb der Platte hörbar wurde. Die Abbildung 2.19 zeigt die Kraft-Zeit-Kurve sowie der Last-Verformungs-Kurve, wobei die Verformung der Platte unterhalb der konzentrierten Last w_1 betrachtet wird.

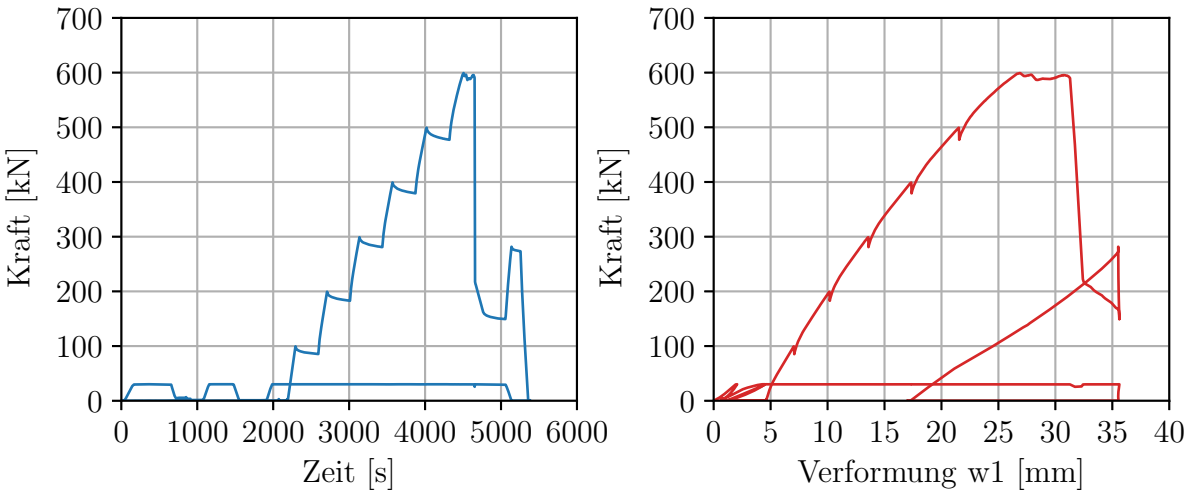

Abbildung 2.19: V6 (1 Hz) - Zeit-Verformungs-Kurve (links) und Last-Verformungs-Kurve (rechts)

2.6.7 Versuch V7/3d-FL

Der Versuch V7 wurde am 06.12.22 durchgeführt. Die Kraft in den flächig verteilten Pressen wurde zunächst auf 16 kN erhöht. Anschließend wurde die Last wieder abgelassen und Rissaufnehmer im Bereich des Steges befestigt, bevor die flächig verteilten Pressen wieder belastet und anschließend die konzentrierte Einzellast weggesteuert aufgebracht wurde. Bei ca. 100 kN ist eventuell die Presse der Einzellast in ihre genaue Position auf der Lastplatte gerutscht, denn hier wurde eine Bewegung kurz und laut hörbar und die Einzellast war kurzzeitig weg (siehe Abb. 2.20 (rechts)). Anschließend verlief der Versuch normal weiter. Es bildeten sich deutliche Biegerisse zwischen Steg und Einzellast aus, welche in Richtung der Seitenränder gekrümmt um die Last herum verliefen. Die Traglast betrug 509,3 kN. Im Bereich der Traglast war in den Glasfasermessungen auf der Oberseite der Platte zu sehen, dass die Dehnungen im Bereich direkt vor der Einzelllast zunahmen (siehe Abb. D.170,D.173, D.176). Die Last-Verformungs-Kurve wies bei diesem Versuch kein ausgeprägtes Plateau bei ca. 300 kN Nachbruchlast auf.
Die folgende Abbildung 2.20 zeigt die Kraft-Zeit-Kurve sowie der Last-Verformungs-Kurve, wobei die Verformung der Platte unterhalb der konzentrierten Last w_1 betrachtet wird.

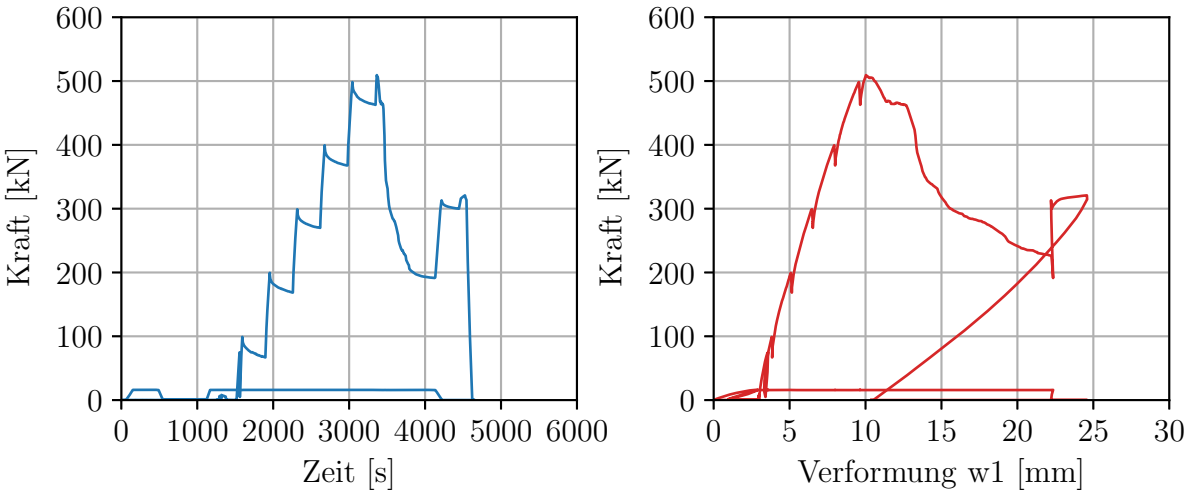

Abbildung 2.20: V7 (1 Hz) - Zeit-Verformungs-Kurve (links) und Last-Verformungs-Kurve (rechts)

2.6.8 Versuch V8/⌀8-300-2

Der Versuch V8 wurde am 09.01.23 durchgeführt. Die Last wurde stufenweise um 100 kN - 50 kN - 50 kN kraftgesteuert gesteigert. Anschließend wurde die konzentrierte Last wieder abgelassen, sodass die Rissaufnehmer im Bereich des Stegs positioniert werden konnten. Nach der Wiederbelastung bis auf 200 kN wurde die Last weggesteuert weiter erhöht. Bei 300 kN trat sowohl an der Stirnseite des Kragarms als auch im Bereich des Stegs bereits

ein deutlicher Biegeriss auf. Der Riss an der Stirnseite des Kragarms war bei ca. 400 kN sehr deutlich erkennbar. Die Biegerisse im Bereich des Steges formten auf diesem Lastniveau eine leichte Kurve um die Einzellast herum. Bei 500 kN durchtrennte der Riss von der Unterseite aus die Stirnseite.
Die Traglast des Versuches betrug 592,3 kN. Nach Erreichen der Traglast war mehrfach ein „Knacken“ im Inneren der Platte zu hören, das auf ein Fortschreiten der Schrägrisse hinwies. Insgesamt bildeten sich zwei große Risse senkrecht zum Steg auf der Plattenunterseite. Auf der Oberseite verliefen die Biegerisse um die Lasteinleistungsstelle herum und kurz vor Plattenende bereits nahezu senkrecht auf die Stirnseite zu, wo sie die Platte ebenfalls durchtrennten. Ein Lastplateau nach dem Bruch war kaum erkennbar. Nach Erreichen der Traglast ist in Abbildung D.186 ein Versatz in den Verformungen der Wegaufnehmer W8 im Abstand von $1d$ zum Steg und W7 im Abstand $2d$ vom Steg zu sehen. Die Verformungen von W7 nähern sich anschließend wieder dem Wert von W8 an, da die Messergebnisse von W8 langsamer ansteigen. Die Ursache für den Versatz könnte darin liegen, dass sich die Stahlbetonplatte bis zu einem Abstand $2d$ vom Auflager einheitlich unter der Einzellast verformt. Der Einfluss der Lastverteilung durch die geringe Bewehrungsmenge auf der Plattenunterseite ist nahe des Steges nicht mehr vorhanden. Der Ausfall des Aufnehmers W8 wäre eine andere mögliche Ursache. Dies wurde jedoch nicht dokumentiert.
Die folgende Abbildung 2.21 zeigt die Kraft-Zeit-Kurve sowie der Last-Verformungs-Kurve, wobei die Verformung der Platte unterhalb der konzentrierten Last w_1 betrachtet wird.

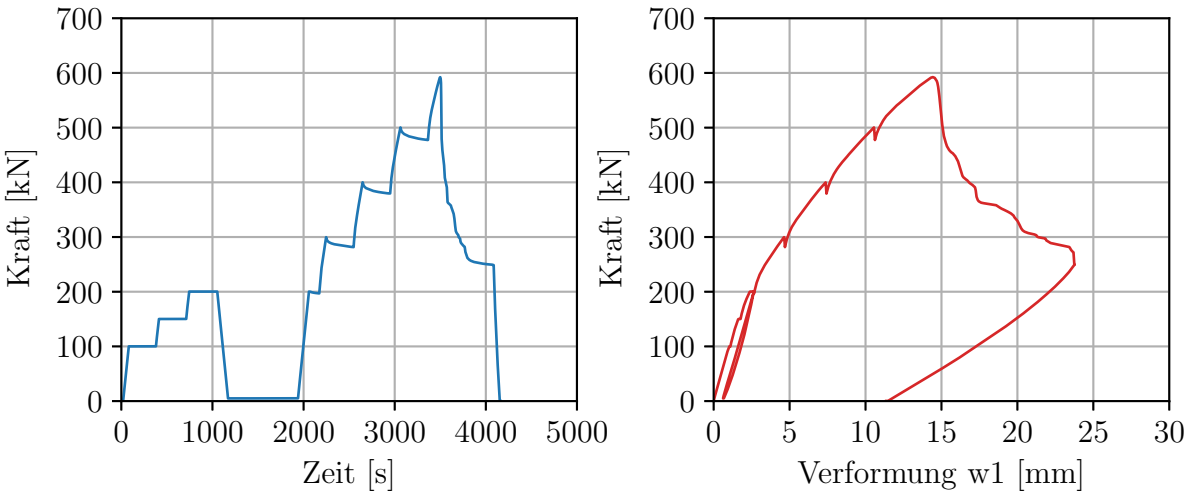

Abbildung 2.21: V8 (1 Hz) - Zeit-Verformungs-Kurve (links) und Last-Verformungs-Kurve (rechts)

2.7 Dokumentation und Rissbilder

Die Dokumentation der Versuchsreihe wurde durch verschiedene Maßnahmen sichergestellt. Für alle Versuchskörper wurden Fotos von der Bewehrung vor der Betonage, von der Versuchsdurchführung sowie vom Rissbild nach der Versuchsdurchführung erstellt. Die Versuchsreihe wurde durch Bewehrungs- und Aufnehmerpläne, welche diesem Bericht beigefügt sind, begleitet. Der Fortschritt der Versuchsreihe wurde in einem Laborbuch festgehalten.
Während des Versuchsablaufs wurden die angebrachten Messaufnehmer z.B. zur Einhaltung der zulässigen Kraft in der Rückspannung oder zur Kontrolle der flächig verteilten Pressenkräfte beobachtet. Außerdem wurden die Versuche per Video aufgenommen. Direkt nach der Durchführung eines Versuches wurden die Lastaufbringung als auch die Versuchsdaten gesichert.
Nach der Versuchsdurchführung wurde die Lage der Messaufnehmer kontrolliert und in den Aufnehmerplänen in Anhang B.2 festgehalten.
Außerdem wurden die Risse auf der Plattenober- und unterseite, sowie an den Rändern nachgezeichnet, damit diese auf Fotos gut sichtbar waren. Dabei konnte die Größe der Risse nicht im Detail nachgebildet werden, sodass die Bilder vor allem einer Auswertung der Rissrichtung und des Versagensbildes dienen. Bei dem Versuch V3 traten auf der Plattenoberseite sehr viele Risse auf. Es wurde vermutet, dass diese Risse teilweise durch die Oberflächenbeschaffenheit des Betonkörpers entstanden und nicht zwangsläufig aus dem strukturellen Tragverhalten. Daher wurden die Oberseiten der Versuchskörper V4 - V8 vor der Versuchsdurchführung mit einem Gemisch aus Wasser und weißer Wandfarbe bemalt, sodass strukturelle Risse, die nach der Belastung auftraten, hier besser zu erkennen waren.

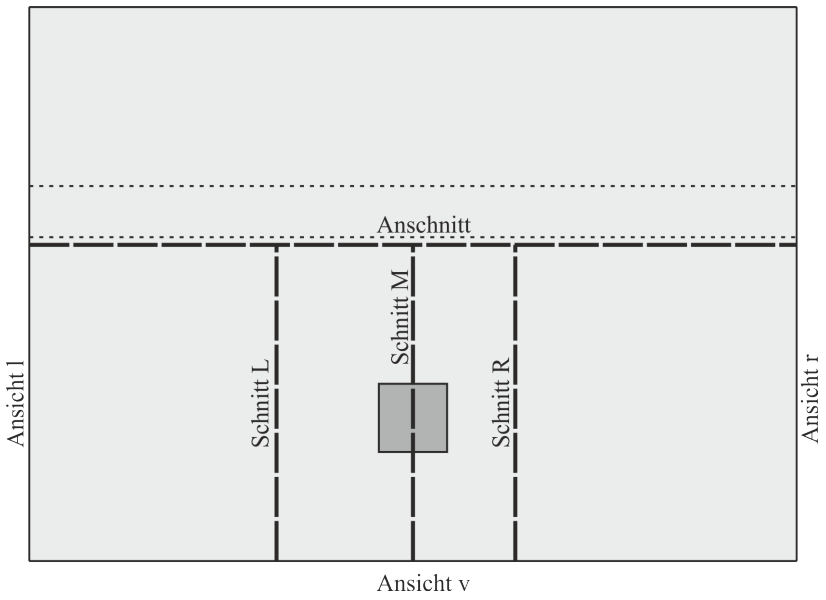

Abbildung 2.22: Bezeichnung und Anordnung der vorgenommenen Trennschnitte

Zur Darstellung des Rissverlaufs innerhalb der Stahlbetonplatte wurden 4 Trennschnitte angefertigt. Dabei wurden für die Kragplatte drei Schnitte in Lastabtragsrichtung/ senkrecht zum Steg sowie ein Längsschnitt entlang der Kante zum Steg erstellt. Die folgende Abbildung 2.22 zeigt die Lage der vorgenommen Schnitte sowie deren Bezeichnung. Die Rissbilder aller Versuche sind im Anhang C dargestellt.
Die Erstellung der Sägeschnitte musste aufgrund der Lärm- und Staubemissionen außerhalb der Versuchshalle stattfinden. Dazu wurde, wie bereits bei der vorhergehenden Versuchsreihe [12], ein Fahrwagen gebaut, mit welchem die Versuchskörper über ein Schienensystem vor die Halle transportiert und dort zersägt werden konnte. Die Abbildung 2.23 zeigt den leeren Fahrwagen (Bild oben), die Fahrschienen zum Transport aus der Halle (Bild Mitte) sowie den zertrennten Versuchskörper V2 von oben (Bild unten). Nach Anfertigung der Sägeschnitte wurde die planmäßige Lage der Bewehrungsstäbe bzw. die statische Nutzhöhe am Anschnitt an mehreren Stellen kontrolliert. Tabelle 2.6 zeigt die Ergebnisse. Die Indizes der gemessenen Nutzhöhen weisen auf die Lage der Kontrollmessung hin. So wurde z.B. d_L im Bereich des Schnittes L vorgenommen. Kursiv gedruckte Werte kennzeichnen eine sehr ungenaue Messung, da hier z.B. der Steg mit angeschnitten wurde und die Unterkante der Platte nicht gut zu erkennen war.
Durch die Betonage waren geringfügige Abweichungen der Bewehrungslage vom Soll-Wert kaum zu vermeiden. Mit d_{ist} wird die statische Nutzhöhe bezeichnet, die sich vor allem aus den Messergebnissen aus der Plattenmitte d_L - d_R ergeben haben. d_{ist} sollte für weitere statische Berechnungen und Versuchsauswertungen verwendet werden.

Tabelle 2.6: Konrolle der stat. Nutzhöhe d

Bezeichnung	d_{soll} [mm]	d_l [mm]	d_L [mm]	d_M [mm]	d_R [mm]	d_r [mm]	d_{ist} [mm]
V1/⌀20-80	215	213	215	*207*	215	215	215
V2/⌀8-300	215	–	214	215	214	209	214
V3/4d-FL	215	212	206	205	208	207	206
V4/5d-FL	215	212	205	204	209	213	206
V5/5d-FL-2	215	214	211	212	212	214	212
V6/5d-LL	215	212	212	212	213	212	212
V7/3d-FL	215	215	216	213	213	214	214
V8/⌀8-300-2	215	202	208	210	210	209	209

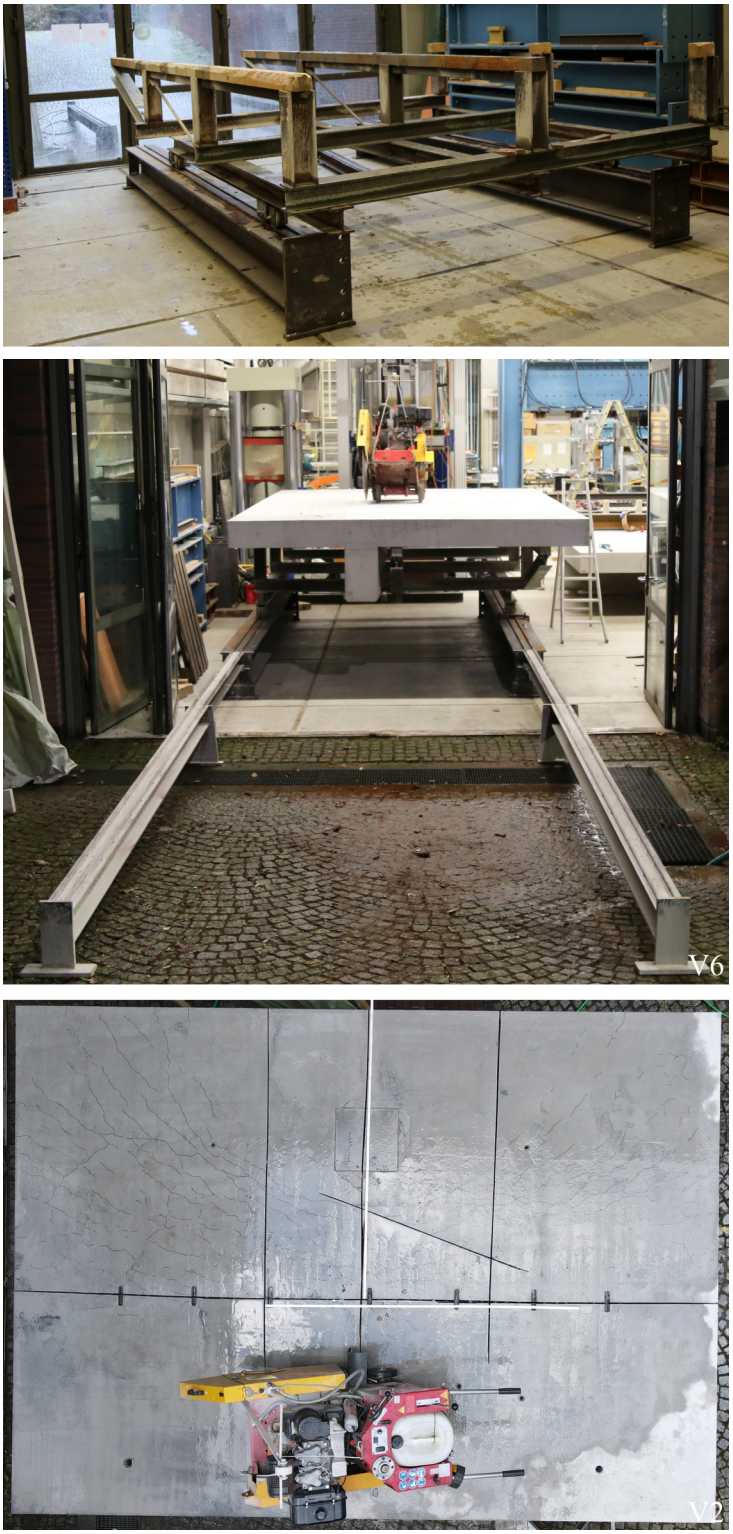

Abbildung 2.23: Fahrwagen zur Erstellung der Trennschnitte

2.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Versuchsreihe verlief wie geplant. Bei keinem der Versuche kam es zu einem Ausfall der Messanlage. Die folgende Tabelle 2.7 gibt eine Übersicht über die durchgeführten Versuche. Die Spalte FLm gibt hierbei die angestrebte Pressenkraft der flächig verteilten Pressen an und FL entspricht der Umrechnung in eine äquivalente Flächenlast.

Tabelle 2.7: Versuchsergebnisse

Variation der Bewehrung:						
Bezeichnung	Versuchsdatum	a_v/d	$f_{cm}(t)$ [N/mm^2]	F_u [kN]	Höhe der Zusatzlast	
V1/⌀20-80	03.03.22	4,0	46,5	700,4	–	
V2/⌀8-300	04.05.22	4,0	46,6	684,4	–	
V8/⌀8-300-2	09.01.23	4,0	38,5	592,3	–	
Zusätzliche verteilte Lasten:						
Bezeichnung	Versuchsdatum	a_v/d	$f_{cm}(t)$ [N/mm^2]	F_{Test} [kN]	Höhe der Zusatzlast	
					FLm [kN]	FL[kN/m^2]
V3/4d-FL	13.09.22	4,0	54,2	694,0	16	33,70
V4/5d-FL	22.09.22	5,0	44,8	626,4	8	16,85
V5/5d-FL-2	11.11.22	5,0	43,5	646,2	16	33,70
V6/5d-LL	20.12.22	5,0	38,8	599,1	30,5	81,30 kN/m
V7/3d-FL	06.12.22	3,0	37,0	509,3	16	33,70

Literatur

[1] DIN EN 12390-1: 2021. *Prüfung von Festbeton - Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen*. DIN EN 12390-1: 2021. Beuth-Verlag, Berlin, Sep. 2021.

[2] DIN EN 12390-13: 2021. *Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul)*. DIN EN 12390-13: 2021. Beuth-Verlag, Berlin, Sep. 2021.

[3] DIN EN 12390-2: 2019. *Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen*. DIN EN 12390-2: 2019. Beuth-Verlag, Berlin, Okt. 2019.

[4] DIN EN 12390-3: 2019. *Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*. DIN EN 12390-3: 2019. Beuth-Verlag, Berlin, Okt. 2019.

[5] DIN EN 12390-6: 2009. *Prüfung von Festbeton - Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern*. DIN EN 12390-6: 2009. Beuth-Verlag, Berlin, Sep. 2010.

[6] DIN EN 1992-1-1: 2004 + AC:2010. *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. DIN EN 1992-1-1: 2004 + AC: 2010. Beuth-Verlag, Berlin, Jan. 2011.

[7] DIN EN ISO 15630-1: 2019. *Stähle für die Bewehrung und das Vorspannen von Beton - Prüfverfahren - Teil 1: Bewehrungsstäbe, Walzdraht und Draht*. DIN EN ISO 15630-1: 2019. Beuth-Verlag, Berlin, Mai 2019.

[8] DIN EN ISO 6892-1: 2020. *Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur*. DIN EN ISO 6892-1: 2019. Beuth-Verlag, Berlin, Juni 2020.

[9] fib. *Model Code for Concrete Structures 2010*. 2013. DOI: 10.1002/9783433604090.

[10] Harter, M., Jauk, V. und Rombach, G. "Modelling aspects of non-linear FE analyses of RC beams and slabs failing in shear". In: *Computational Modelling of concrete and Concrete Structures*. Euro-C 2022. Hrsg. von Meschke, Pichler und Rots. CRC Press, Mai 2022, S. 669–678. DOI: 10.1201/9781003316404.

[11] Henze, L. "Querkrafttragverhalten von Stahlbeton-Fahrbahnplatten". Doktorarbeit. Technische Universität Hamburg, 2019. DOI: 10.15480/882.2270.

[12] Henze, L. und Rombach, G. A. *Versuche zur Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetonplatten unter auflagernahen Einzellasten*. Versuchsbericht. Technische Universität Hamburg, 2017. DOI: 10.15480/882.1443.

[13] Konertz, D. u. a. "Faseroptische Messung von Dehnungs- und Temperaturfeldern". In: *Bauingenieur* 94.7. (2019), S. 292–300.

[14] Samiec, D. "Verteilte faseroptische Temperatur- und Dehnungsmessung mit sehr hoher Ortsauflösung". In: *Photonik* 6.2011 (2011), S. 34–37.

[15] Schafer, R. W. "What is a Savitzky-Golay Filter? [lecture notes]". In: *IEEE Signal Processing Magazine* 28.4 (2011), S. 111–117.

Verwendete Software

ATENA Studio (Version 5.6.1) [Computer Software]. Na Hrebenkach 55, 150 00 Prague, Czech Republic: Cervenka Consulting s.r.o.

GiD (Version 14.0.5) [Computer Software]. Edificio Cl, Campus Norte UPC, Gran Capitàn s/n, 08034 Barcelona, Spain: CIMNE.

SOFiSTiK FEA 2022 und SOFiPLUS-X 2022 (Version 2022) [Computer Software]. Flataustraße 14, 90411 Nürnberg, Deutschland: SOFiSTiK AG.

Anaconda Software Distribution (Version 2.0.3.) [Computer Software]. Anaconda, 2016. Web. https://anaconda.com

DIAdem Software (Version 2019) [Computer Software]. National Instruments Corp. Web. https://ni.com

A Materialprüfungen

A.1 Beton

Die Prüfmethoden und Prüfergebnisse dieses Anhangs wurden in Abschnitt 2.2.1 erläutert.

A.1.1 Betonrezeptur V1-V3

Betonzusammensetzung

C25/30 F3 D_{max} 16 Stahlbeton(Cl 0,4) Beton nach Eigenschaften

Expositionsklasse(n): X0 Kein Angriffsrisiko: Beton ohne Bewehrung XC4 Bewehrungskorrosion/Karbonatisierung: wechselnd naß und trocken XF1 Betonkorrosion/Frostangriff: mäßige Wassersättigung, ohne Taumittel XA1 Betonkorrosion/Chemischer Angriff: chemisch schwacher Angriff	Festigkeitsentwicklung: mittel Feuchtigkeitsklasse: WA Überwachungsklasse: 2 Festigkeitsnachweis nach 28 Tagen
Ausbreit-/Verdichtungsmaß: 420-480 Mindestzementgehalt: 280 kg/m³ max (w/z)eq: 0,55 **Art der Verwendung gegebenfalls zusätzliche Anforderungen** Stahlbeton WU-Beton gemäß DAStb-Richtlinie	Zieldruckfestigkeit fcta: 34 N/mm² Porengehalt : 1,5 Vol. %
CEM III/A 42,5N(na) 280 kg/m³ Dichte: 3,00 g/cm³ FA-M Flugasche k=0,40 Dichte: 2,27 g/cm³ BV N9 BV MC N9 0,30% v.Z. Dichte: 1,15 g/cm³ Perma2 PCE Perma2 0,25% v.Z. Dichte: 1,04 g/cm³	**Sieblinie** Nummer: 68-451540 Körnungsziffer: 1,72 <0,125mm: % <2mm: 85,3%

(w/z)eq= **0,55** Gesamtwassergehalt **166** kg Zusatzstoffgehalt **60** kg Zementgehalt **280** kg

Stoffraum	dm³/m³	Mehlkorngehalt	kg/m³	Mehlkorn+Feinstsand	kg/m³	Mörtelgehalt	dm³/m³
Zement	93	Zement	280	Zement	280	Zement	93
Wasser	166	Gestein < 0,125mm		Gestein<0,25mm	760	Wasser	166
Porengehalt	15					Porengehalt	15
Zusatzmittel	1					Zusatzmittel	1
Zusatzstoff	26	Zusatzstoff	60	Zusatzstoff	60	Zusatzstoff	26
Gestein	699					Gestein < 2mm	596
Summe:	1000	Summe:	340	Summe:	1100	Summe:	896

	Art der Gesteinskörnung	Rohdichte kg/dm³	Anteil %	Stoffraum dm³/m³	trocken kg/m³	Feuchte %	Feuchte kg/m³	feucht kg/m³
0/2	FGK Zweedorf E I-O EI-OF	2,61	45	315	821	4,0	33	854
2/8	GGK 2/8 Zeithain	2,63	15	105	276	2,0	6	282
8/16	GGK 8/16 Glensanda	2,65	40	280	741	2,0	15	756
	Summe				1838		54	1892
	Zugabewasser							112
	Wassergehalt				166			
	Zementgehalt				280			280
	Zusatzstoff				60			60
	Saugwasser				10			10
	Frischbetongewicht				**2354**			**2354**

Frischwasserdosierung 112l (100%)

Zusatzstoff: FA-M 60 kg

Zusatzmittel: BV N9 0,840 kg 0,730 dm³
Perma2 0,700 kg 0,673 dm³

A.1.2 Betonrezeptur V4-V8

Betonzusammensetzung

C25/30 F3 D_{max} 16 Stahlbeton(Cl 0,4) Beton nach Eigenschaften

Expositionsklasse(n): X0 Kein Angriffsrisiko: Beton ohne Bewehrung XC4 Bewehrungskorrosion/Karbonatisierung: wechselnd naß und trocken XF1 Betonkorrosion/Frostangriff: mäßige Wassersättigung, ohne Taumittel XA1 Betonkorrosion/Chemischer Angriff: chemisch schwacher Angriff	Festigkeitsentwicklung: mittel Feuchtigkeitsklasse: WA Überwachungsklasse: 2 Festigkeitsnachweis nach 28 Tagen
Ausbreit-/Verdichtungsmaß: 420-480 Mindestzementgehalt: 270 kg/m³ max (w/z)eq: 0,55 **Art der Verwendung gegebenfalls zusätzliche Anforderungen** Stahlbeton WU-Beton gemäß DAStb-Richtlinie bewehrt, pumpfähig	Zieldruckfestigkeit fcta: 34 N/mm² Porengehalt : 1,5 Vol. % Chloridgehalt: 0,04 %
CEM III/A 42,5N(na) 270 kg/m³ Dichte: 3,00 g/cm³ FA-M Flugasche k=0,40 Dichte: 2,27 g/cm³ BV N9 BV MC N9 0,30% v.Z. Dichte: 1,15 g/cm³ Perma2 PCE Perma2 0,30% v.Z. Dichte: 1,04 g/cm³	Leimvolumen: 259 dm³ **Sieblinie** Nummer: 69-451540K Körnungsziffer: 3,89 <0,125mm: 0,4% <2mm: 45,2%

(w/z)eq= **0,54** Gesamtwassergehalt **158** kg Zusatzstoffgehalt **60** kg Zementgehalt **270** kg

Stoffraum	dm³/m³	Mehlkorngehalt	kg/m³	Mehlkorn+Feinstsand	kg/m³	Mörtelgehalt	dm³/m³
Zement	90	Zement	270	Zement	270	Zement	90
Wasser	158	Gestein < 0,125mm	7	Gestein<0,25mm	68	Wasser	158
Porengehalt	15					Porengehalt	15
Zusatzmittel	2					Zusatzmittel	2
Zusatzstoff	26	Zusatzstoff	60	Zusatzstoff	60	Zusatzstoff	26
Gestein	709					Gestein < 2mm	321
Summe:	1000	Summe:	337	Summe:	398	Summe:	610

	Art der Gesteinskörnung	Rohdichte kg/dm³	Anteil %	Stoffraum dm³/m³	trocken kg/m³	Feuchte %	Feuchte kg/m³	feucht kg/m³
0/2	FGK Zweedorf E I-O EI-OF	2,61	45	319	833	4,0	33	866
2/8	GGK Zeithain E I-O E I-OF	2,63	15	106	280	2,0	6	286
8/16	GGK Zeithain E I-O E I-OF	2,63	40	284	746	2,0	15	761
				Summe	1859		54	1913
Frischwasserdosierung 104l (100%)				Zugabewasser				104
Zusatzstoff:	FA-M 60 kg							
				Wassergehalt	158			
				Zementgehalt	270			270
Zusatzmittel:	BV N9 0,810 kg 0,704 dm³			Zusatzstoff	60			60
	Perma2 0,810 kg 0,779 dm³			Saugwasser	10			10
				Frischbetongewicht	**2357**			**2357**

A.1.3 Betonprüfungen V1-V8

Betonprüfungen
Plattenversuche 2022, V1/d20-80 (Herstellung am 17.12.2021):

Prüfung am 14.01.2022, Alter 28 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben nach DIN, 28 Tage unter Wasser

Tabelle A.1.1: V1/d20-80; Masse, Dichte und Druckfestigkeit (nass)

Probe Nr.	Maße [mm] ø	h	m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_c [MPa]
1	150,0	298,9	12,484	2363	761	43,1
2	150,0	297,0	12,315	2346	743	42,0
3	150,0	298,9	12,460	2359	728	41,2
Mittelwert:				2356		42,1

Tabelle A.1.2: V1/d20-80 Dichte (nass), E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 14.01.2022

Probe Nr.	Maße [mm] ø	h	m [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [MPa]	σ_b [MPa]	$\varepsilon_{a,1}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [MPa]	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,2}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [MPa]
1	150,0	298,3	12,433	2359	14,0	4,2	0,449	0,123	30.130	0,458	0,160	32.970
2	150,0	299,7	12,536	2367	14,0	4,2	0,435	0,119	31.090	0,443	0,154	33.990
3	150,0	297,8	12,369	2350	14,0	4,2	0,450	0,123	30.040	0,460	0,160	32.750
Mittelwert:				2359					30.420			33.237

Probe Nr.	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [MPa]
1	248,0	74,4	745,7	42,2
2	248,0	74,4	752,7	42,6
3	248,0	74,4	756,5	42,8
Mittelwert:				42,5

Betonprüfungen
Plattenversuche 2022, V1/d20-80 (Herstellung am 17.12.2021):

Prüfung am 04.03.2022, Alter 77 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper V1

Tabelle A.1.3: V1/d20-80; Masse, Dichte und Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_c [MPa]
1	150,0	297,7	12,212	2321	827,3	46,8
2	150,0	298,2	12,197	2315	841,2	47,6
3	150,0	297,7	12,256	2330	797,7	45,1
Mittelwert:				2322		46,5

Tabelle A.1.4: V1/d20-80; Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 04.03.2022

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [MPa]	σ_b [MPa]	$\varepsilon_{a,1}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [MPa]	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,2}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [MPa]
1	150,0	298,7	12,253	2321	15,5	4,6	0,500	0,136	29.720	0,506	0,188	34.020
2	150,0	297,3	12,192	2321	15,5	4,6	0,523	0,148	28.850	0,531	0,201	32.790
3	150,0	297,4	12,179	2317	15,5	4,6	0,526	0,152	28.930	0,534	0,206	32.990
Mittelwert:				2320					29.167			33.267

Probe Nr.	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [MPa]
1	273,3	82,1	803,4	45,5
2	273,3	82,1	822,7	46,6
3	273,3	82,1	840	47,5
Mittelwert:				46,5

Tabelle A.1.5: V1/d20-80; Masse, Dichte und Spaltzugfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_{ct} [MPa]
1	150,0	298,1	12,188	2314	290,6	4,14
2	150,0	298,5	12,211	2315	261,5	3,72
3	150,0	297,8	12,210	2320	265,6	3,79
Mittelwert:				2320	272,6	3,88

Betonprüfungen
Plattenversuche 2022, V2/d8-300 (Herstellung am 26.01.2022):

Prüfung am 23.02.2022, Alter 28 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben nach DIN, 28 Tage unter Wasser

Tabelle A.2.1: V2/d8-300; Masse, Dichte und Druckfestigkeit (nass)

Probe Nr.	Maße [mm] ø	h	m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_c [MPa]
1	150,0	299,5	12,508	2363	705	39,9
2	150,0	299,6	12,506	2362	696	39,4
3	150,0	299,0	12,540	2373	703	39,8
Mittelwert:				2366		39,7

Tabelle A.2.2: V2/d8-300; Dichte (nass), E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 23.02.2022

Probe Nr.	Maße [mm] ø	h	m [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [MPa]	σ_b [MPa]	$\varepsilon_{a,1}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [MPa]	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,2}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [MPa]
1	150,0	298,3	12,437	2359	13,2	4,0	0,433	0,115	29.150	0,442	0,156	32.410
2	150,0	299,8	12,520	2363	13,2	4,0	0,433	0,117	29.330	0,443	0,159	32.640
3	150,0	299,1	12,490	2363	13,2	4,0	0,434	0,116	29.150	0,442	0,155	32.300
Mittelwert:				2362					29.210			32.450

Probe Nr.	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [MPa]
1	234,0	70,2	678	38,4
2	234,0	70,2	690,3	39,1
3	234,0	70,2	689,8	39,0
Mittelwert:				38,8

Betonprüfungen
Plattenversuche 2022, V2/d8-300 (Herstellung am 26.01.2022):

Prüfung am 05.05.2022, Alter 99 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper V2

Tabelle A.2.3: V2/d8-300; Masse, Dichte und Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_c [MPa]
1	150,0	299,3	12,335	2332	832	47,1
2	150,0	299,0	12,219	2313	825	46,7
3	150,0	297,2	12,138	2311	811	45,9
Mittelwert:				2319		46,6

Tabelle A.2.4: V2/d8-300; Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 05.05.2022

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [MPa]	σ_b [MPa]	$\varepsilon_{a,1}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [MPa]	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,2}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [MPa]
1	150,0	297,0	12,183	2321	15,5	4,7	0,547	0,152	27.480	0,555	0,217	32.110
2	150,0	298,8	12,344	2338	15,5	4,7	0,539	0,145	27.550	0,547	0,214	32.590
3	150,0	298,5	12,329	2337	15,5	4,7	0,524	0,142	28.410	0,532	0,204	33.090
Mittelwert:				2332					27.813			32.597

Probe Nr.	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [MPa]
1	274,0	82,2	797,4	45,1
2	274,0	82,2	833,2	47,1
3	274,0	82,2	842	47,6
Mittelwert:				46,6

Tabelle A.2.5: V2/d8-300; Masse, Dichte und Spaltzugfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_{ct} [MPa]
1	150,0	298,8	12,266	2323	269,3	3,83
2	150,0	298,6	12,203	2313	256,6	3,65
3	150,0	298,5	12,256	2323	235,2	3,34
Mittelwert:				2320	253,7	3,61

Betonprüfungen
Plattenversuche 2022, V3/4d-FL (Herstellung am 31.03.2022):

Prüfung am 28.04.2022, Alter 28 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben nach DIN, 28 Tage unter Wasser

Tabelle A.3.1: V3/4d-FL; Masse, Dichte und Druckfestigkeit (nass)

Probe Nr.	Maße [mm] ø	h	m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_c [MPa]
1	150,0	298,3	12,573	2385	774	43,8
2	150,0	298,3	12,532	2377	791	44,8
3	150,0	297,5	12,529	2383	792	44,8
Mittelwert:				2382		44,5

Tabelle A.3.2: V3/4d-FL; Dichte (nass), E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 28.04.2022

Probe Nr.	Maße [mm] ø	h	m [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [MPa]	σ_b [MPa]	$\varepsilon_{a,1}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [MPa]	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,2}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [MPa]
1	150,0	298,2	12,593	2390	14,8	4,4	0,462	0,125	30.800	0,470	0,168	34.370
2	150,0	298,3	12,609	2392	14,8	4,4	0,467	0,126	30.430	0,476	0,171	34.030
3	150,0	297,9	12,532	2381	14,8	4,4	0,471	0,127	30.170	0,481	0,172	33.590
Mittelwert:				2387					30.467			33.997

Probe Nr.	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [MPa]
1	262,0	78,6	814,3	46,1
2	262,0	78,6	791,4	44,8
3	262,0	78,6	755,8	42,8
Mittelwert:				44,5

Betonprüfungen
Plattenversuche 2022, V3/4d-FL (Herstellung am 31.03.2022):

Prüfung am 15.09.2022, Alter 168 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper V3

Tabelle A.3.3: V3/4d-FL; Masse, Dichte und Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_c [MPa]
1	150,0	298,8	12,419	2352	969	54,8
2	150,0	298,5	12,395	2350	946	53,5
3	150,0	298,5	12,319	2335	959	54,3
Mittelwert:				2346		54,2

Tabelle A.3.4: V3/4d-FL; Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 15.09.2022

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [MPa]	σ_b [MPa]	$\varepsilon_{a,1}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [MPa]	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,2}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [MPa]
1	150,0	298,0	12,382	2351	18,1	5,4	0,585	0,163	30.040	0,594	0,231	34.920
2	150,0	298,6	12,348	2340	18,1	5,4	0,590	0,162	29.620	0,598	0,234	34.820
3	150,0	297,3	12,252	2332	18,1	5,4	0,593	0,165	29.620	0,600	0,233	34.540
Mittelwert:				2341					29.760			34.760

Probe Nr.	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [MPa]
1	320,0	96,0	976,1	55,2
2	320,0	96,0	948,6	53,7
3	320,0	96,0	959,5	54,3
Mittelwert:				54,4

Tabelle A.3.5: V3/4d-FL; Masse, Dichte und Spaltzugfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_{ct} [MPa]
1	150,0	298,3	12,376	2348	265,2	3,77
2	150,0	297,8	12,385	2353	283,4	4,04
3	150,0	297,5	12,406	2360	279,6	3,99
Mittelwert:				2350	276,1	3,93

Betonprüfungen
Plattenversuche 2022, V4/5d-FL (Herstellung am 16.06.2022):

Prüfung am 14.07.2022, Alter 28 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben nach DIN, 28 Tage unter Wasser

Tabelle A.4.1: V4/5d-FL; Masse, Dichte und Druckfestigkeit (nass)

Probe Nr.	Maße [mm] ø	h	m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_c [MPa]
1	150,0	299,3	12,521	2367	643	36,4
2	150,0	298,9	12,485	2364	611	34,6
3	150,0	299,0	12,466	2359	641	36,3
Mittelwert:				2363		35,7

Tabelle A.4.2: V4/5d-FL; Dichte (nass), E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 14.07.2022

Probe Nr.	Maße [mm] ø	h	m [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [MPa]	σ_b [MPa]	$\varepsilon_{a,1}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [MPa]	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,2}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [MPa]
1	150,0	299,8	12,506	2361	11,9	3,6	0,379	0,103	30.140	0,385	0,131	32.750
2	150,0	298,8	12,494	2366	11,9	3,6	0,371	0,101	30.810	0,378	0,127	33.140
3	150,0	299,4	12,486	2360	11,9	3,6	0,377	0,102	30.250	0,380	0,130	33.270
Mittelwert:				2362					30.400			33.053

Probe Nr.	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [MPa]
1	210,0	63,0	642,2	36,3
2	210,0	63,0	651,8	36,9
3	210,0	63,0	636	36,0
Mittelwert:				36,4

Betonprüfungen
Plattenversuche 2022, V4/5d-FL (Herstellung am 16.06.2022):

Prüfung am 23.09.2022, Alter 99 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper V4

Tabelle A.4.3: V4/5d-FL; Masse, Dichte und Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_c [MPa]
1	150,0	298,3	12,270	2328	799	45,2
2	150,0	298,0	12,242	2325	768	43,5
3	150,0	298,9	12,292	2327	807	45,7
Mittelwert:				2326		44,8

Tabelle A.4.4: V4/5d-FL; Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 23.09.2022

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [MPa]	σ_b [MPa]	$\varepsilon_{a,1}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [MPa]	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,2}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [MPa]
1	150,0	297,8	12,139	2307	14,9	4,5	0,517	0,141	27.810	0,524	0,195	31.790
2	150,0	297,8	12,128	2305	14,9	4,5	0,545	0,154	26.750	0,557	0,222	31.220
3	150,0	298,2	12,119	2300	14,9	4,5	0,539	0,151	26.950	0,546	0,212	31.310
Mittelwert:				2304					27.170			31.440

Probe Nr.	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [MPa]
1	264,0	79,2	731,1	41,4
2	264,0	79,2	729,9	41,3
3	264,0	79,2	750,7	42,5
Mittelwert:				41,7

Tabelle A.4.5: V4/5d-FL; Masse, Dichte und Spaltzugfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_{ct} [MPa]
1	150,0	298,1	12,260	2327	237,0	3,37
2	150,0	298,3	12,226	2319	248,9	3,54
3	150,0	297,9	12,249	2327	247,4	3,52
Mittelwert:				2320	244,4	3,48

Betonprüfungen
Plattenversuche 2022, V5/5d-FL-2 (Herstellung am 07.07.2022):

Prüfung am 04.08.2022, Alter 28 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben nach DIN, 28 Tage unter Wasser

Tabelle A.5.1: V5/5d-FL-2; Masse, Dichte und Druckfestigkeit (nass)

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_c [MPa]
	ø	h				
1	150,0	299,4	12,511	2365	630	35,7
2	150,0	299,2	12,421	2349	636	36,0
3	150,0	298,9	12,544	2375	652	36,9
Mittelwert:				2363		36,2

Tabelle A.5.2: V5/5d-FL-2; Masse, Dichte und Spaltzugfestigkeit (nass)

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_{ct} [MPa]
	ø	h				
1	150,0	300,2	12,527	2361	228,0	3,22
2	150,0	298,4	12,525	2375	250,8	3,57
3	150,0	300,0	12,120	2286	229,5	3,25
Mittelwert:				2340	236,1	3,35

Betonprüfungen
Plattenversuche 2022, V5/5d-FL-2 (Herstellung am 07.07.2022):

Prüfung am 14.11.2022, Alter 130 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper V5

Tabelle A.5.3: V5/5d-FL-2; Masse, Dichte und Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_c [MPa]
1	150,0	299,1	12,287	2325	747,6	42,3
2	150,0	298,2	12,169	2309	805,9	45,6
3	150,0	298,8	12,302	2330	751,3	42,5
Mittelwert:				2321		43,5

Tabelle A.5.4: V5/5d-FL-2; Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 14.11.2022

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [MPa]	σ_b [MPa]	$\varepsilon_{a,1}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [MPa]	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,2}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [MPa]
1	150,0	298,6	12,306	2332	14,5	4,3	0,493	0,137	28.480	0,499	0,189	32.710
2	150,0	297,7	12,239	2326	14,5	4,3	0,499	0,139	28.170	0,506	0,195	32.610
3	150,0	300,0	12,350	2330	14,5	4,3	0,466	0,128	30.000	0,472	0,175	34.140
Mittelwert:				2329					28.883			33.153

Probe Nr.	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [MPa]
1	256,0	76,8	806,4	45,6
2	256,0	76,8	767,2	43,4
3	256,0	76,8	797,8	45,1
Mittelwert:				44,7

Tabelle A.5.5: V5/5d-FL-2; Masse, Dichte und Spaltzugfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_{ct} [MPa]
1	150,0	299,2	12,240	2315	240,2	3,41
2	150,0	298,9	12,220	2314	285,2	4,05
3	150,0	299,3	12,307	2327	261,5	3,71
Mittelwert:				2320	262,3	3,72

Betonprüfungen
Plattenversuche 2022, V6/5d-LL (Herstellung am 11.10.2022):

Prüfung am 08.11.2022, Alter 28 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben nach DIN, 28 Tage unter Wasser

Tabelle A.6.1: V6/5d-LL; Masse, Dichte und Druckfestigkeit (nass)

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_c [MPa]
	ø	h				
1	150,0	298,0	12,240	2324	616	34,9
2	150,0	297,6	12,261	2331	602	34,1
3	150,0	297,6	12,161	2312	645	36,5
Mittelwert:				2323		35,1

Tabelle A.6.2: V6/5d-LL; Masse, Dichte und Spaltzugfestigkeit (nass)

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_{ct} [MPa]
	ø	h				
1	150,0	298,6	12,287	2329	245,5	3,49
2	150,0	298,2	12,308	2336	235,2	3,35
3	150,0	297,7	12,232	2325	214,7	3,06
Mittelwert:				2330	231,8	3,30

Betonprüfungen
Plattenversuche 2022, V6/5d-LL (Herstellung am 11.10.2022):

Prüfung am 19.12.2022, Alter 69 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper V6

Tabelle A.6.3: V6/5d-LL; Masse, Dichte und Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_c [MPa]
1	150,0	297,5	12,076	2297	671	38,0
2	150,0	298,0	12,124	2302	687	38,9
3	150,0	296,9	12,095	2305	701	39,7
Mittelwert:				2302		38,8

Tabelle A.6.4: V6/5d-LL; Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 19.12.2022

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [MPa]	σ_b [MPa]	$\varepsilon_{a,1}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [MPa]	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,2}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [MPa]
1	150,0	297,4	12,036	2290	12,9	3,9	0,410	0,111	30.210	0,413	0,143	33.450
2	150,0	298,4	12,090	2293	12,9	3,9	0,403	0,113	31.140	0,404	0,133	33.330
3	150,0	298,5	12,154	2304	12,9	3,9	0,419	0,113	29.510	0,412	0,139	33.080
Mittelwert:				2296					30.287			33.287

Probe Nr.	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [MPa]
1	228,0	68,4	707,8	40,1
2	228,0	68,4	685,1	38,8
3	228,0	68,4	708,7	40,1
Mittelwert:				39,6

Tabelle A.6.5: V6/5d-LL; Masse, Dichte und Spaltzugfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_{ct} [MPa]
1	150,0	298,4	12,079	2291	237,0	3,37
2	150,0	297,9	12,111	2301	239,7	3,41
3	150,0	297,8	12,080	2295	231	3,29
Mittelwert:				2300	235,9	3,36

Betonprüfungen
Plattenversuche 2022, V7/3d-FL (Herstellung am 02.11.2022):

Prüfung am 30.11.2022, Alter 28 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben nach DIN, 28 Tage unter Wasser

Tabelle A.7.1: V7/3d-FL; Masse, Dichte und Druckfestigkeit (nass)

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_c [MPa]
	ø	h				
1	150,0	299,3	12,626	2387	675	38,2
2	150,0	299,2	12,645	2392	662	37,5
3	150,0	299,0	12,588	2382	662	37,5
Mittelwert:				2387		37,7

Tabelle A.7.2: V7/3d-FL; Masse, Dichte und Spaltzugfestigkeit (nass)

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_{ct} [MPa]
	ø	h				
1	150,0	299,3	12,625	2387	227,5	3,23
2	150,0	299,5	12,621	2385	248,5	3,52
3	150,0	299,3	12,588	2380	216,7	3,07
Mittelwert:				2380	230,9	3,27

Betonprüfungen
Plattenversuche 2022, V7/3d-FL (Herstellung am 02.11.2022):

Prüfung am 07.12.2022, Alter 35 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper V7

Tabelle A.7.3: V7/3d-FL; Masse, Dichte und Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_c [MPa]
1	150,0	299,3	12,389	2342	641,2	36,3
2	150,0	299,4	12,349	2334	639,5	36,2
3	150,0	299,4	12,441	2351	681,4	38,6
Mittelwert:				2343		37,0

Tabelle A.7.4: V7/3d-FL; Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 07.12.2022

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [MPa]	σ_b [MPa]	$\varepsilon_{a,1}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [MPa]	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,2}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [MPa]
1	150,0	299,6	12,317	2326	12,3	3,7	0,483	0,135	24.700	0,489	0,192	28.940
2	150,0	299,3	12,451	2354	12,3	3,7	0,395	0,109	30.060	0,400	0,146	33.840
3	150,0	298,7	12,336	2337	12,3	3,7	0,458	0,126	25.890	0,463	0,178	30.160
Mittelwert:				2339					26.883			30.980

Probe Nr.	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [MPa]
1	217,0	65,1	646,7	36,6
2	217,0	65,1	664,8	37,6
3	217,0	65,1	665,4	37,7
Mittelwert:				37,3

Tabelle A.7.5: V7/3d-FL; Masse, Dichte und Spaltzugfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_{ct} [MPa]
1	150,0	298,3	12,370	2347	250,1	3,56
2	150,0	298,8	12,432	2354	248,4	3,53
3	150,0	299,3	12,453	2354	224,5	3,18
Mittelwert:				2350	241,0	3,42

Betonprüfungen
Plattenversuche 2022, V8/d8-300-2 (Herstellung am 24.11.2022):

Prüfung am 22.12.2022, Alter 28 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben nach DIN, 28 Tage unter Wasser

Tabelle A.8.1: V8/d8-300-2; Masse, Dichte und Druckfestigkeit (nass)

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_c [MPa]
	ø	h				
1	150,0	229,4	12,493	3082	623	35,3
2	150,0	298,8	12,536	2374	647	36,6
3	150,0	299,4	12,509	2364	614	34,7
Mittelwert:				2607		35,5

Tabelle A.8.2: V8/d8-300; Masse, Dichte und Spaltzugfestigkeit (nass)

Probe Nr.	Maße [mm]		m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_{ct} [MPa]
	ø	h				
1	150,0	299,4	12,556	2373	234,7	3,33
2	150,0	299,3	12,466	2357	225,4	3,20
3	150,0	299,1	12,388	2344	207,3	2,94
Mittelwert:				2360	222,5	3,15

Betonprüfungen
Plattenversuche 2022, V8/d8-300-2 (Herstellung am 24.11.2022):

Prüfung am 10.01.2023, Alter 47 Tage
Zylinder ø 150/300 mm, Lagerung der Proben wie Versuchskörper V8

Tabelle A.8.3: V8/d8-300-2; Masse, Dichte und Druckfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_c [MPa]
1	150,0	298,8	12,275	2325	688	38,9
2	150,0	298,2	12,277	2330	684	38,7
3	150,0	298,6	12,217	2315	668	37,8
Mittelwert:				2323		38,5

Tabelle A.8.4: V8/d8-300-2; Dichte, E-Modul in Anlehnung an DIN EN 12390-13 Verfahren A, Druckfestigkeit

Festlegung der Prüfspannung anhand der Druckfestigkeitsprüfung vom 10.01.2023

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	σ_a [MPa]	σ_b [MPa]	$\varepsilon_{a,1}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,0}$ [mm/m]	$E_{c,0}$ [MPa]	$\varepsilon_{a,3}$ [mm/m]	$\varepsilon_{b,2}$ [mm/m]	$E_{c,S}$ [MPa]
1	150,0	299,2	12,282	2323	12,8	3,8	0,487	0,135	25.430	0,494	0,191	29.550
2	150,0	299,0	12,292	2326	12,8	3,8	0,472	0,130	26.180	0,480	0,185	30.350
3	150,0	298,3	12,237	2321	12,8	3,8	0,472	0,134	26.490	0,481	0,191	30.870
Mittelwert:				2324					26.033			30.257

Probe Nr.	F_a [kN]	F_b [kN]	F [kN]	f_c [MPa]
1	226,0	67,8	668,4	37,8
2	226,0	67,8	661,5	37,4
3	226,0	67,8	645,5	36,5
Mittelwert:				37,3

Tabelle A.8.5: V8/d8-300-2; Masse, Dichte und Spaltzugfestigkeit

Probe Nr.	Maße [mm] ø	Maße [mm] h	m [kg]	ρ [kg/m³]	F [kN]	f_{ct} [MPa]
1	150,0	299,7	12,371	2336	218,5	3,09
2	150,0	298,8	12,360	2341	239	3,39
3	150,0	298,0	12,281	2332	220,6	3,14
Mittelwert:				2340	226,0	3,21

A.1.4 Versuchsergebnisse der Materialprüfungen

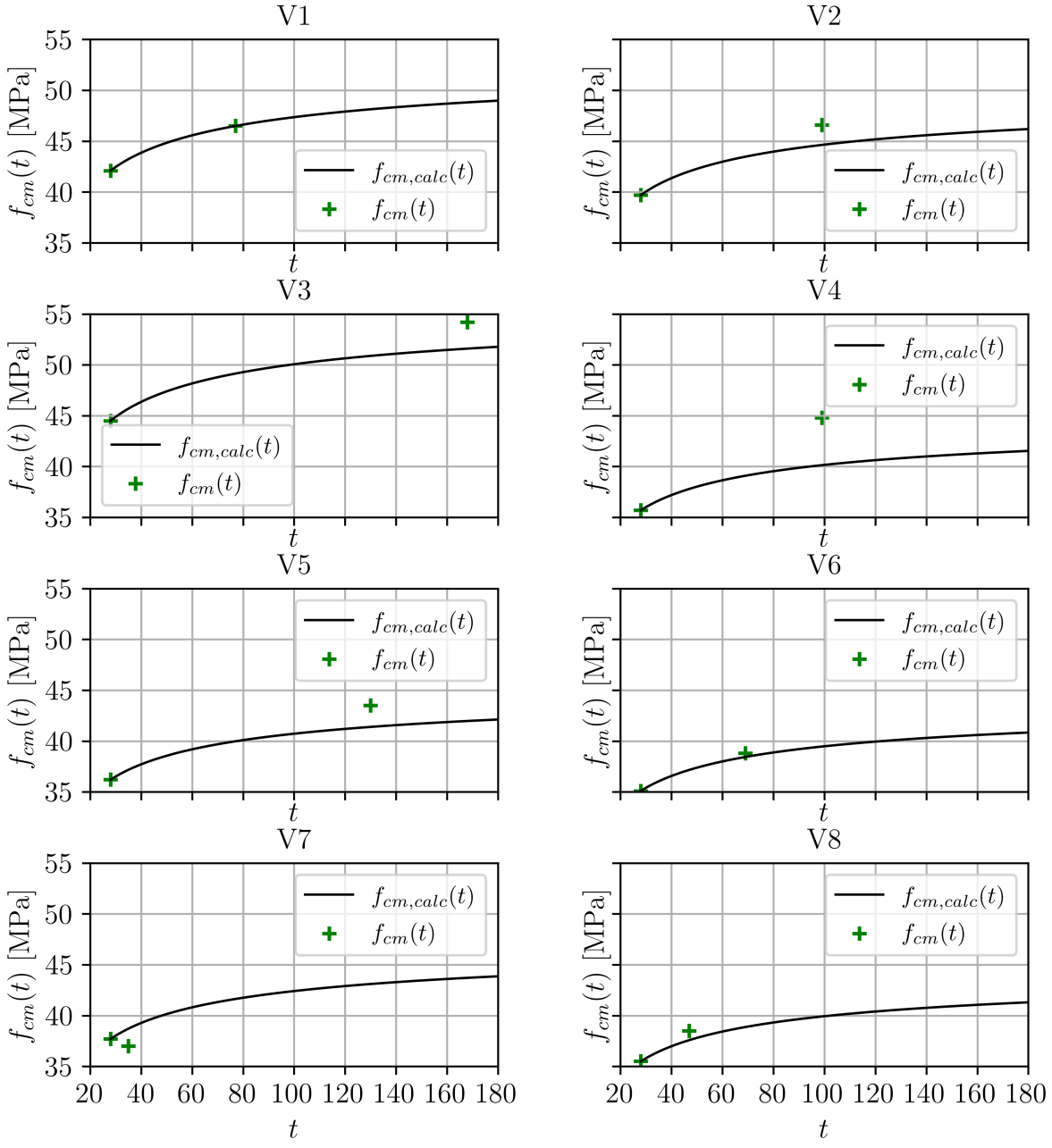

Abbildung A.1: Betondruckfestigkeit - Zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeit nach EC2-1-1 [6] und Versuchswerte

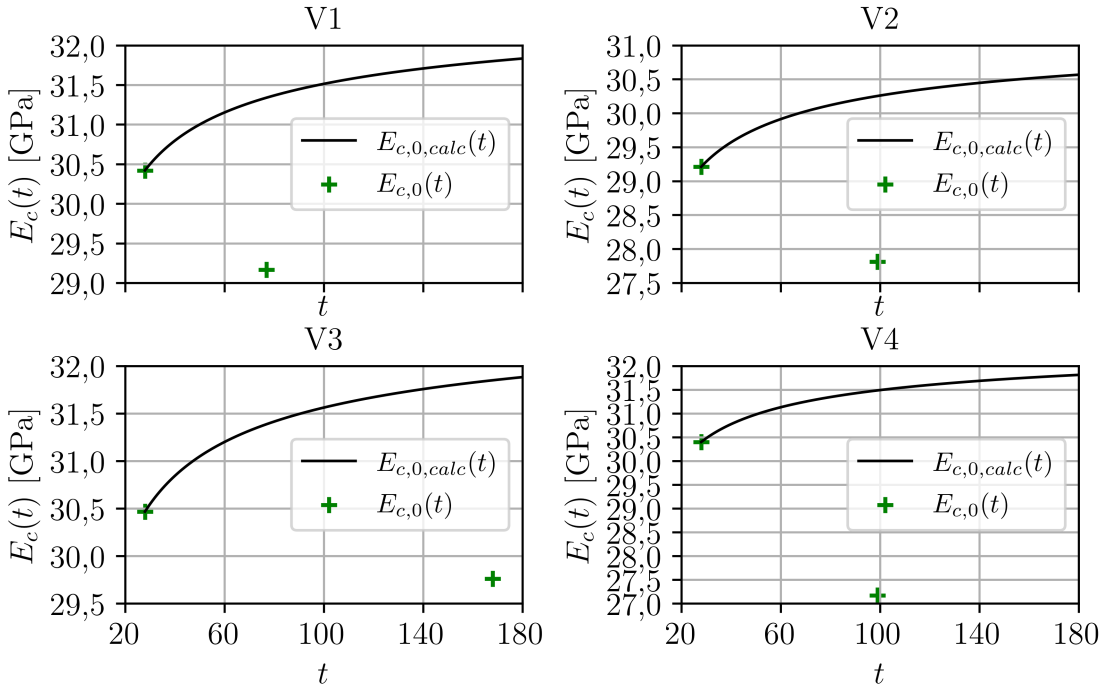

Abbildung A.2: Elastizitätsmodul $E_{c,0}$ - Zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeit nach EC2-1-1 [6] und Versuchswerte

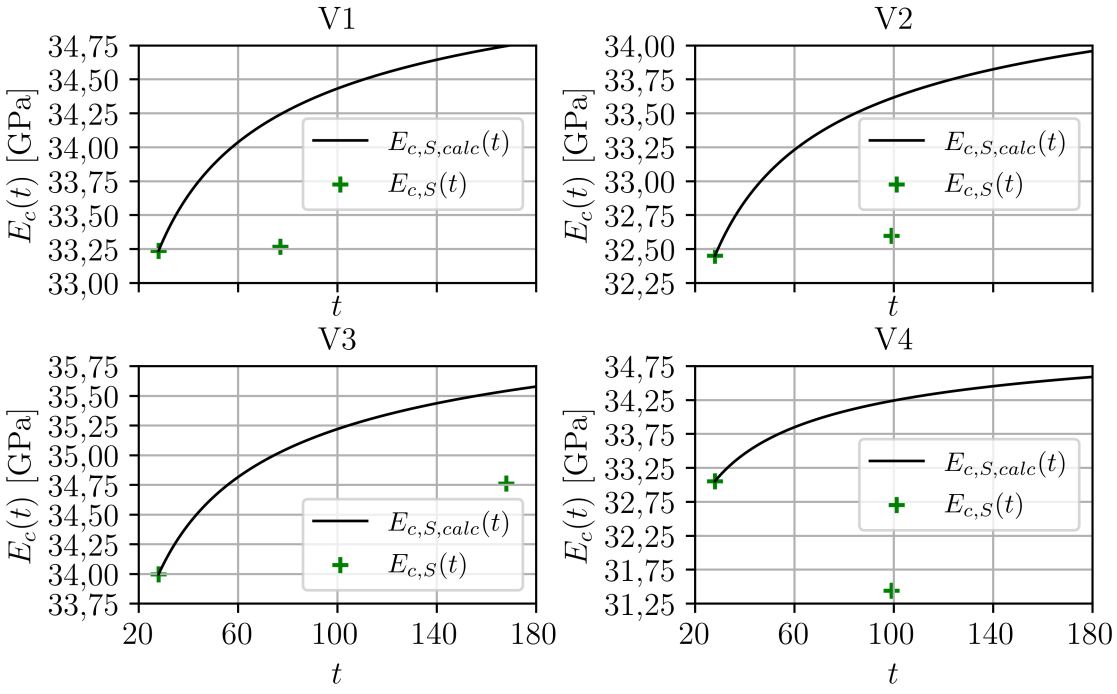

Abbildung A.3: Elastizitätsmodul $E_{c,S}$ - Zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeit nach EC2-1-1 [6] und Versuchswerte

A.1.5 Zusammenfassung der Materialwerte für Beton

Tabelle A.1: Materialwerte für Beton (Mittelwerte)

	Alter: 28 Tage					Alter: zum Versuchszeitpunkt				
Versuch	t	f_{cm} [MPa]	$E_{c,0}$ [MPa]	$E_{c,S}$ [MPa]	f_{ct} [MPa]	t	f_{cm} [MPa]	$E_{c,0}$ [MPa]	$E_{c,S}$ [MPa]	f_{ct} [MPa]
V1	28	42,1	30.420	33.237	–	77	46,5	29.167	33.267	3,88
V2	28	39,7	29.210	32.450	–	99	46,6	27.813	32.597	3,61
V3	28	44,5	30.467	33.997	–	168	54,2	29.760	34.760	3,93
V4	28	35,7	30.400	33.053	–	99	44,8	27.170	31.440	3,48
V5	28	36,2	–	–	3,35	130	43,5	28.883	33.153	3,72
V6	28	35,1	–	–	3,30	69	38,8	30.287	33.287	3,36
V7	28	37,7	–	–	3,27	35	37,0	26.883	30.980	3,42
V8	28	35,5	–	–	3,15	47	38,5	26.033	30.257	3,21

A.2 Bewehrung

Die Bewehrungsanordnung für die Versuche V3 - V7 ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

A.2.1 Bewehrungsübersichten - Variation der Bewehrung für die Versuche V1, V2 und V8

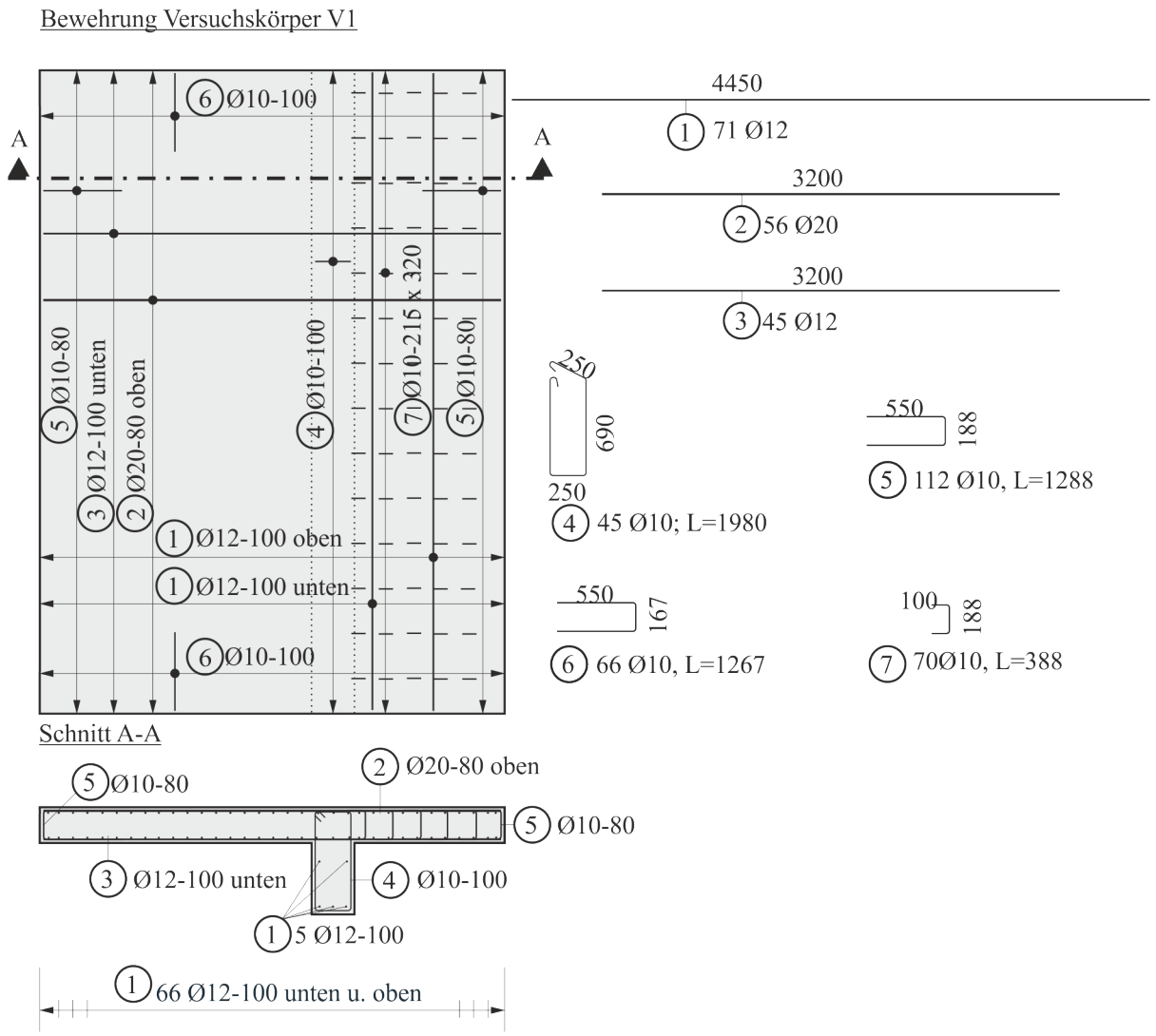

Abbildung A.4: Bewehrungsanordnung für den Versuch V1

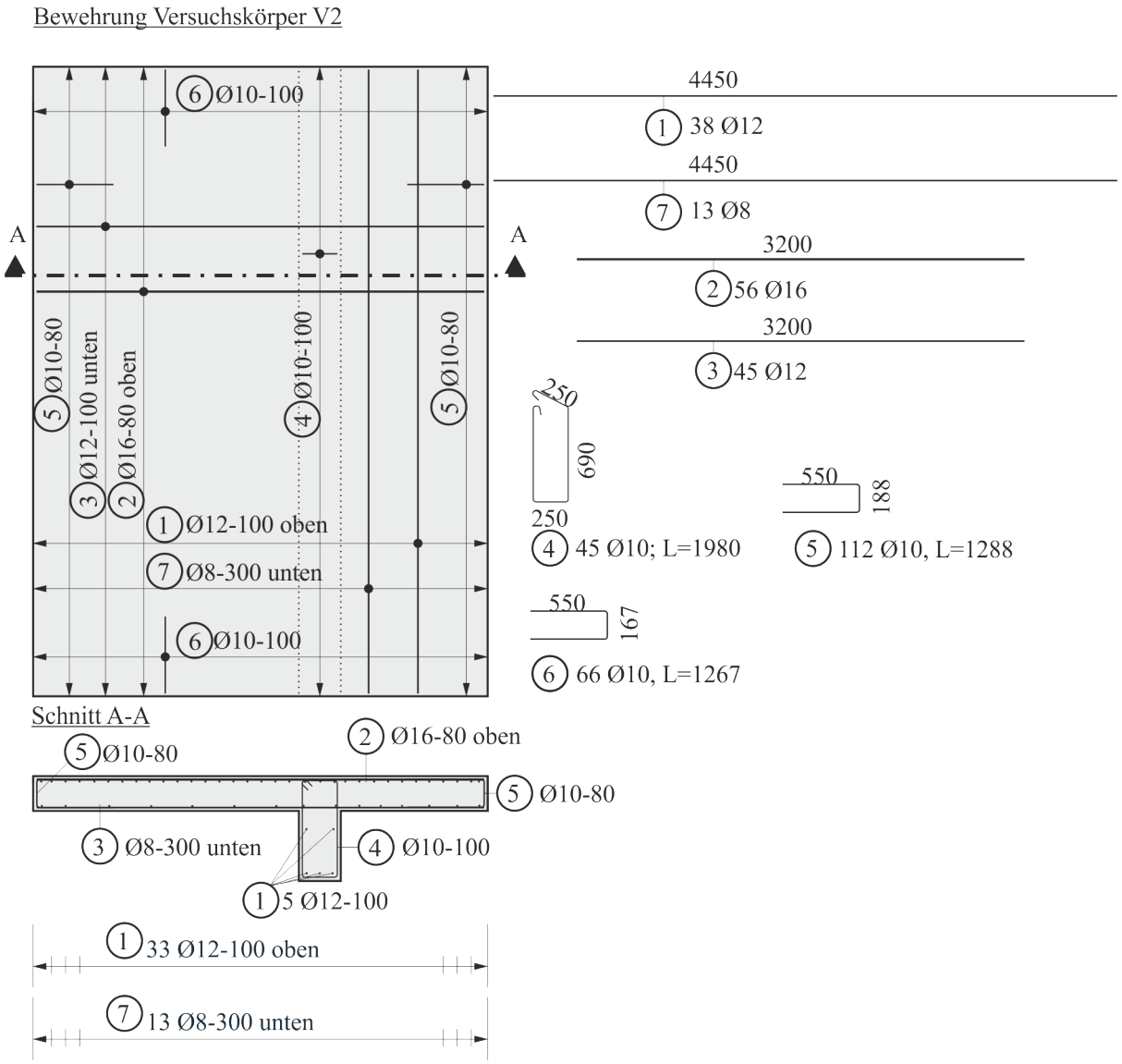

Abbildung A.5: Bewehrungsanordnung für den Versuch V2

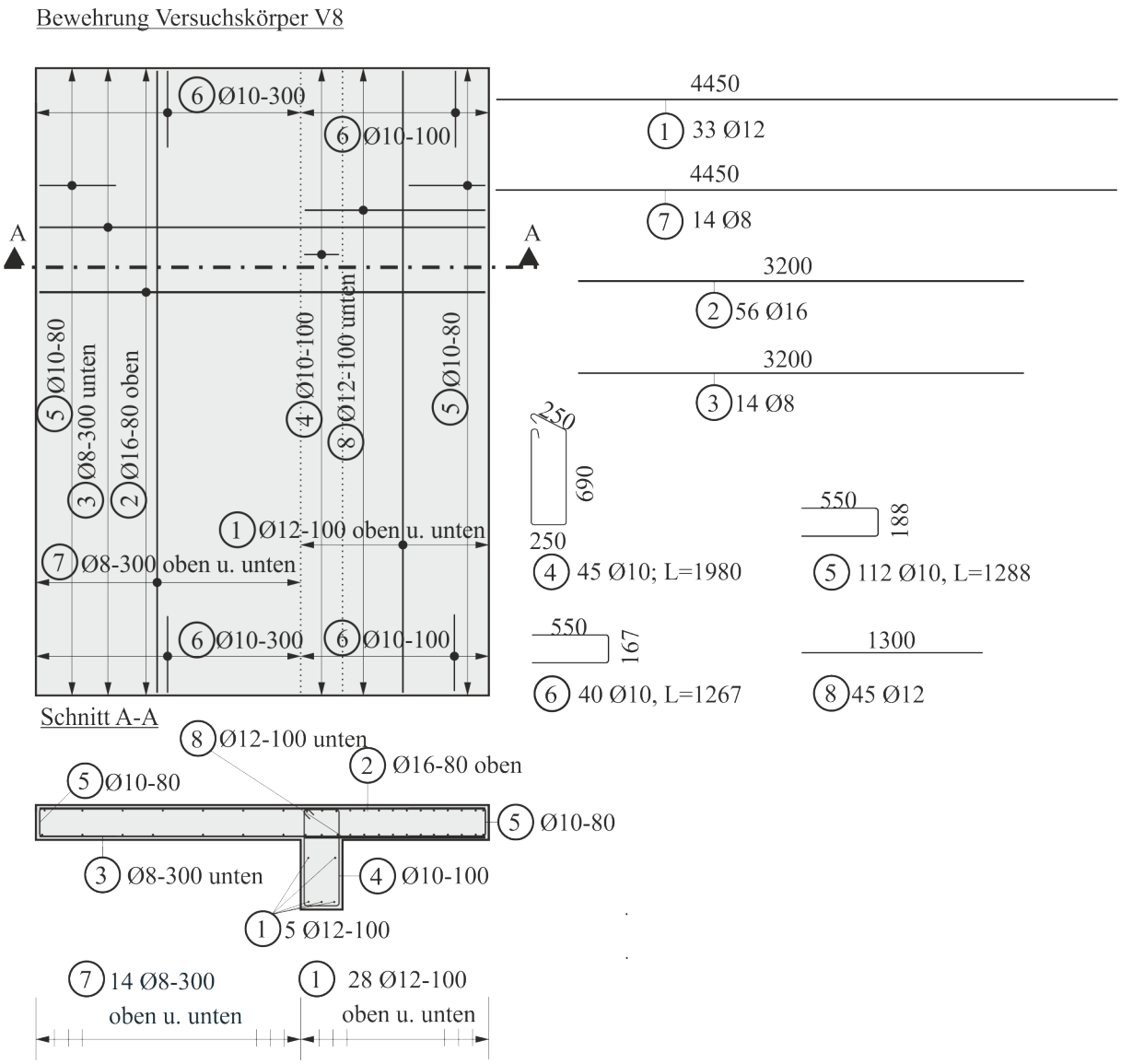

Abbildung A.6: Bewehrungsanordnung für den Versuch V8

A.2.2 Ergebnisse der Zugversuche

Die folgenden Tabellen A.2 bis A.4 geben die Ergebnisse der Zugversuche der Bewehrung wieder. Die Zugversuche wurden am 07. - 09.01.2023 an einer 500 kN-Zug-Prüfmaschine in Anlehnung an DIN EN ISO 6892-1 [8] und DIN EN ISO 15630-1 [7] durchgeführt. Bei den Bewehrungsproben der Charge 1 mit einem Durchmesser von ⌀8 handelte es sich um Ringmaterial WR (B500B), während alle übrigen Proben Stäbe waren. Proben mit *kursiv gedruckten Zahlen* sind nach DIN nicht gültig, da der Bruch der Zugprobe im Bereich der Einspannung des Stabes in die Prüfmaschine lag. Außerdem waren Werte mit der Kennzeichnung „x“ nicht ermittelbar, da der Bruch zu nahe an der Einspannung (für die Ermittlung der Bruchdehnung A) oder innerhalb der Messstrecke (für die Ermittlung von A_{gt}) lag.

Tabelle A.2: Ergebnisse der Zugversuche Charge 1 für V1 und V2

⌀	Nr.	Versuchs-länge [mm]	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m/R_e [–]	A_{gt} [%]	A [%]
⌀8	1	289,4	*634,2*	*582,5*	–	–	*1,089*	x	x
WZ 1/9	2	289,0	*634,2*	*576,5*	–	–	*1,100*	x	x
	3	289,1	*632,2*	*576,5*	–	–	*1,097*	x	x
	4	289,8	*634,2*	*580,5*	–	–	*1,092*	x	x
	5	289,9	636,2	578,5	–	–	1,100	6,32	22,5
m=			–	–			–		
⌀12	1	289,3	650,4	–	573,5	547,8	1,134	x	23,3
WZ 1/26	2	289,0	646,9	–	569,0	546,9	1,137	10,32	23,3
	3	289,3	646,0	–	569,0	543,4	1,135	x	24,2
	4	289,4	646,9	–	569,9	544,2	1,135	12,32	25,0
	5	289,7	645,1	–	569,0	543,4	1,134	x	22,5
m=			**647,1**		**570,1**	**545,1**	**1,135**		
⌀16	1	289,6	660,7	–	586,1	564,7	1,127	x	22,5
WZ 1/9	2	289,2	663,7	–	588,1	568,2	1,129	9,83	x
	3	289,1	661,2	–	584,6	565,2	1,131	9,83	20,0
	4	289,4	656,7	–	581,1	564,7	1,130	9,33	21,3
	5	289,3	659,7	–	584,1	565,2	1,129	10,33	x
m=			**660,4**		**584,8**	**565,6**	**1,129**		
⌀20	1	289,1	652,9	–	561,8	552,2	1,162	x	22,0
WZ 1/9	2	289,1	658,9	–	576,1	561,5	1,144	9,83	22,0
	3	289,4	655,1	–	572,9	553,2	1,143	9,83	20,5
	4	289,8	651,0	–	571,0	551,6	1,140	10,33	20,5
	5	289,0	653,2	–	572,0	551,6	1,142	9,33	21,0
m=			**654,2**		**570,8**	**554,0**	**1,146**		

Tabelle A.3: Ergebnisse der Zugversuche Charge 2 für V3 bis V5

⌀	Nr.	Versuchs -länge [mm]	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m/R_e [–]	A_{gt} [%]	A [%]
⌀12	1	289,0	646,0	–	582,3	552,2	1,109	12,82	25,8
WZ 1/9	2	289,3	649,6	–	581,4	555,8	1,117	13,32	23,3
	3	289,3	647,8	–	584,1	554,9	1,109	11,32	25,0
	4	289,2	648,7	–	585,0	557,5	1,109	12,32	26,7
	5	290,0	649,6	–	585,8	556,6	1,109	10,32	23,3
m=			**648,3**		**583,7**	**555,4**	**1,111**		
⌀16	1	290,0	636,8	–	553,7	530,3	1,150	13,32	22,5
WZ 1/26	2	290,0	634,8	–	551,2	528,9	1,152	11,32	24,4
	3	290,4	637,3	–	554,7	531,3	1,149	x	25,6
	4	290,1	640,3	–	556,7	533,8	1,150	12,82	26,3
	5	289,3	636,3	–	554,2	534,8	1,148	9,32	23,1
m=			**637,1**		**554,1**	**531,8**	**1,150**		

Tabelle A.4: Ergebnisse der Zugversuche Charge 3 für V6 bis V8

⌀	Nr.	Versuchs -länge [mm]	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m/R_e [–]	A_{gt} [%]	A [%]
⌀8	1	289,4	632,2	–	554,7	524,9	1,140	12,32	28,8
WZ 4/25	2	289,3	636,2	–	558,6	526,8	1,139	12,32	25,0
	3	289,6	634,2	–	550,7	518,9	1,152	13,32	28,8
	4	289,7	624,3	–	540,8	503,0	1,154	14,31	27,5
	5	289,0	636,2	–	556,7	522,9	1,143	15,32	25,0
m=			**632,6**		**552,3**	**519,3**	**1,145**		
⌀12	1	288,9	688,5	–	623,9	597,3	1,104	x	23,3
WZ 9/72	2	289,5	686,7	–	623,9	600,9	1,101	6,34	22,5
	3	289,4	688,5	–	624,8	598,2	1,102	7,34	23,3
	4	289,0	685,8	–	623,0	597,3	1,101	7,84	21,7
	5	289,7	688,5	–	616,8	595,6	1,116	x	22,5
m=			**687,6**		**622,5**	**597,9**	**1,105**		
⌀16	1	289,5	630,8	–	546,8	523,4	1,154	9,82	x
WZ 9/87	2	289,2	632,3	–	545,3	525,4	1,160	8,82	24,4
	3	289,5	629,4	–	543,3	518,4	1,158	x	22,5
	4	289,6	632,3	–	545,8	525,4	1,159	12,82	24,0
	5	289,3	628,9	–	540,8	518,9	1,163	x	24,4
m=			**630,7**		**544,4**	**522,3**	**1,159**		

B Messelemente und -anordnung

B.1 Messtechnik

In der Tabelle B.1 sind die Abkürzungen für die verwendeten Messgeräte aufgelistet. Die Tabelle B.2 gibt die Messbereiche der einzelnen verwendeten Geräte sowie deren Produktbezeichnung an. Weitere Angaben zu den Spezifikationen der Messgeräte sind [12, Anhang C] zu entnehmen. Bei der dort beschriebenen Versuchsreihe wurden abgesehen von den Glasfasern und den Kraftmessdosen der Flächenlast die selben Geräte verwendet. Bei weiteren Auswertungen der Versuche wird in der Regel der Mittelwert FLm der beiden Kraftaufnehmer FLv und FLh herangezogen. Die Lage der Messgeräte ist für jeden einzelnen Versuch im Abschnitt B.2 dargestellt.

Tabelle B.1: Bezeichnungen der Messeinrichtung

Bezeichnung	Erläuterung - Anwendung	Anzahl
DS	Dehnungsaufnehmer - Messung der Dehnungen ausgewählter Bewehrungsstäbe	DS1 - DS8
F	Kraftaufnehmer Kontrolle der Kraft in der Prüfmaschine (Einzellast)	F
FL	Kraftaufnehmer - Kontrolle der Kraft in den Pressen (flächige Lastaufbringung)	FLv, FLh
GF	Faseroptische Sensorik - Messung der Dehnungen ausgewählter Bewehrungsstäbe	GF1 - GF4
K	Kraftaufnehmer - Kontrolle der Kraft in der Rückspannung	K1 - K4
L	Wegaufnehmer - Kontrolle der Starrkörperverschiebung des Versuchskörpers	L1 - L8
R	Rissaufnehmer - Aufnahme der Rissbreite von Biegerissen im Bereich des Steges	R1 - R4
W	Wegaufnehmer - Messung der Verformung des Versuchskörpers	W1 - 16
WP	Wegaufnehmer - Messung der Dickenänderung des Versuchskörpers	WP0 - WP11

Tabelle B.2: Kennwerte der Aufnehmer und Prüfmaschine ([12], erweitert)

Messung	Aufnehmer	Messbereich
Prüfmaschine		
F	Instron	1000 kN
Weg	Instron	±200 mm
Zusätzliche Pressen (verteilte Lasten)		
FLh, FLv	Hydraulikzylinder ewo Fluid Power GmbH & Mobile Servohydraulik Rander	–
Verformungen (Wegaufnehmer), Messkette linearisiert < 0,2%		
W1	HBM W100	±100 mm
W2	HBM W50	±50 mm
W3	HBM W50	±50 mm
W4	HBM W100	±100 mm
W5	HBM W50	±50 mm
W6	HBM W50	±50 mm
W7	HBM W100	±100 mm
W8	HBM W50	±50 mm
W9	HBM W50	±50 mm
W10	HBM W100	±100 mm
W11	HBM W50	±50 mm
W12	HBM W50	±50 mm
W13	Pekel WLG100	±100 mm
W14	Pekel WLG50	±50 mm
W15	Pekel WLG50	±50 mm
W16	HBM W20	±20 mm
Plattendicke, Messkette linearisiert < 0,2%		
WP0 - WP11	HBM W10/W20	±10 mm, bzw. ±20 mm
Stahldehnungen		
DS1 - DS7	HBM DD1/100 mm	±2,5 mm
DS8	HBM DD1/50 mm	±2,5 mm
Rissaufnehmer		
R1 - R4	TML KG-B, Rissöffnung:	±3,0 mm
	Rissverschiebung:	±2,0 mm

Kraft (Rückspannung)		
K1 - K3	HBM C6/500	500 kN
K4, K5	HBM C6/200 (Verwendung in Reihe für K4)	200 kN

Auflagerverformungen		
L1 - L8	TML KG-A2	±2,0 mm

Kraft (Flächenlast)		
FLv - FLh	Lorenz K12	±100 kN

Faseroptische Messungen		
GF1 - GF4	LUNA ODiSI	–

B.2 Anordnung der Messaufnehmer

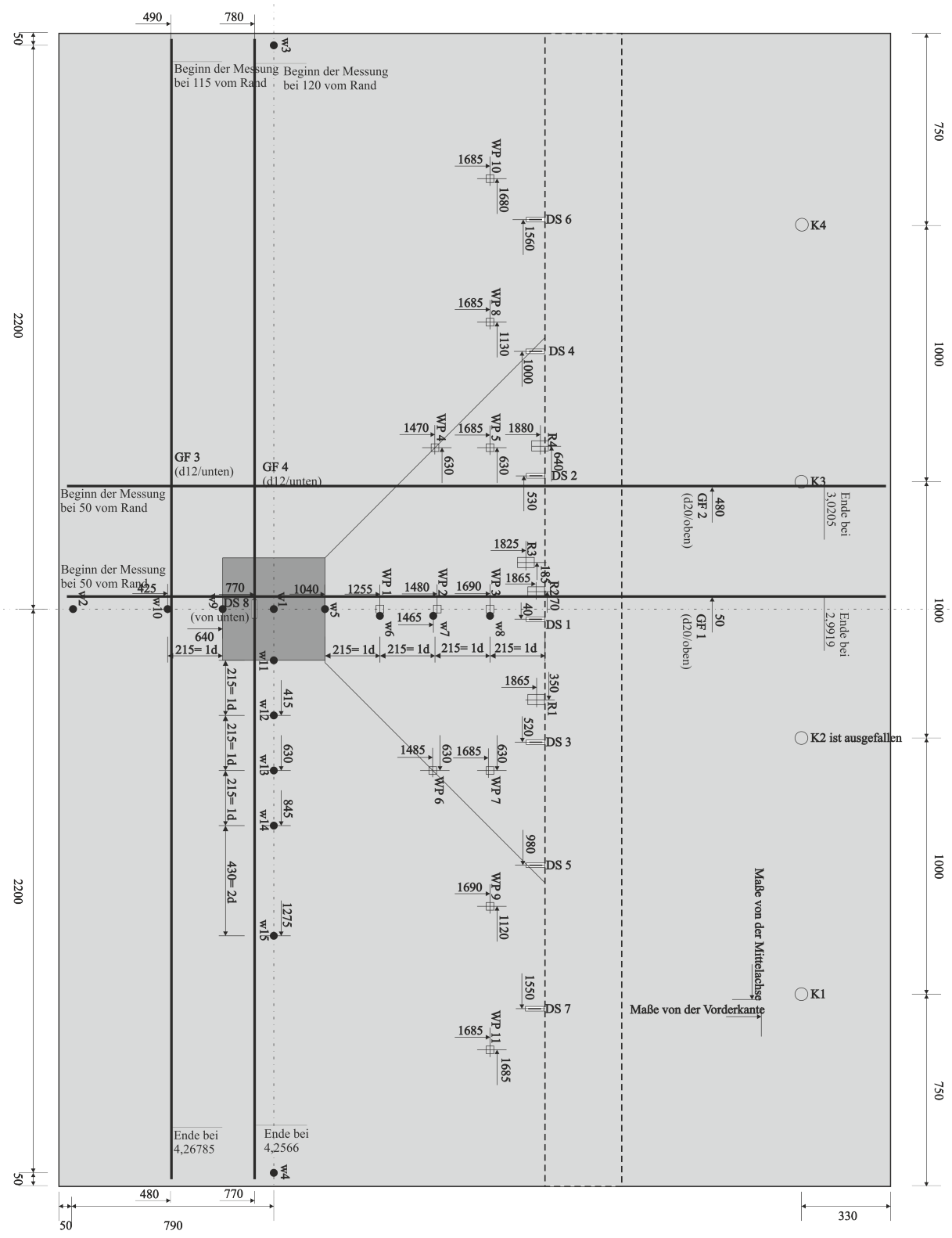

Abbildung B.1: Messtechnik V1

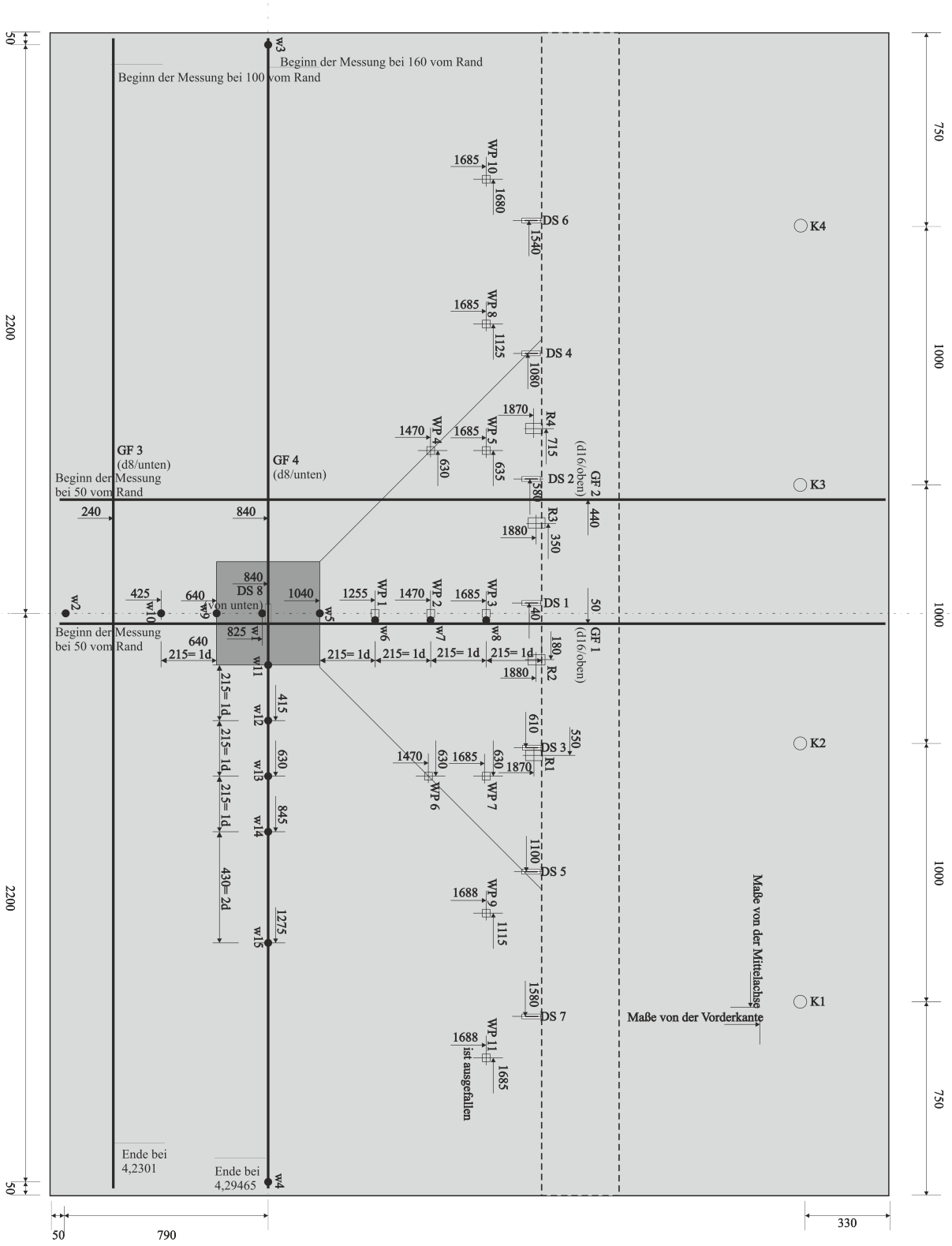

Abbildung B.2: Messtechnik V2

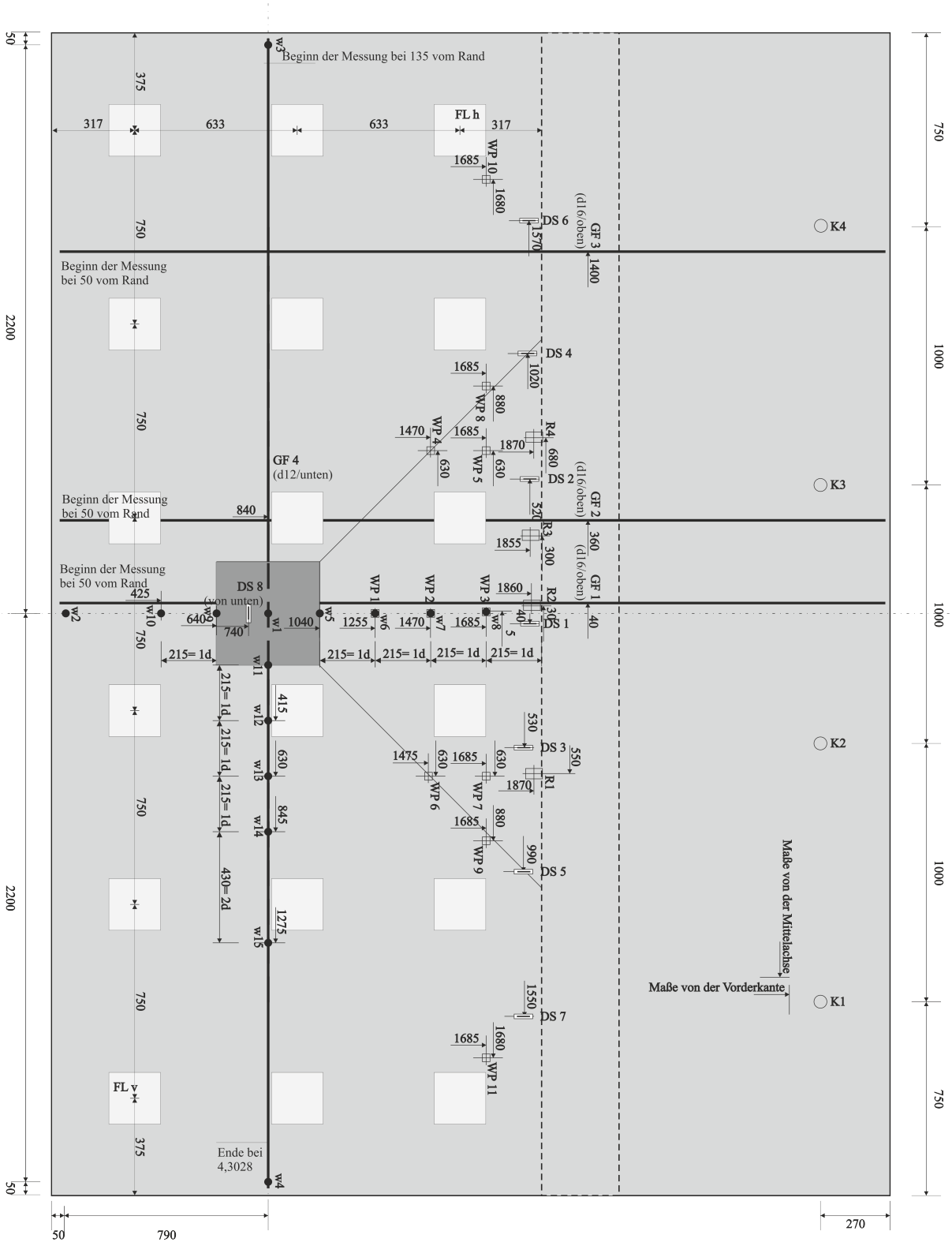

Abbildung B.3: Messtechnik V3

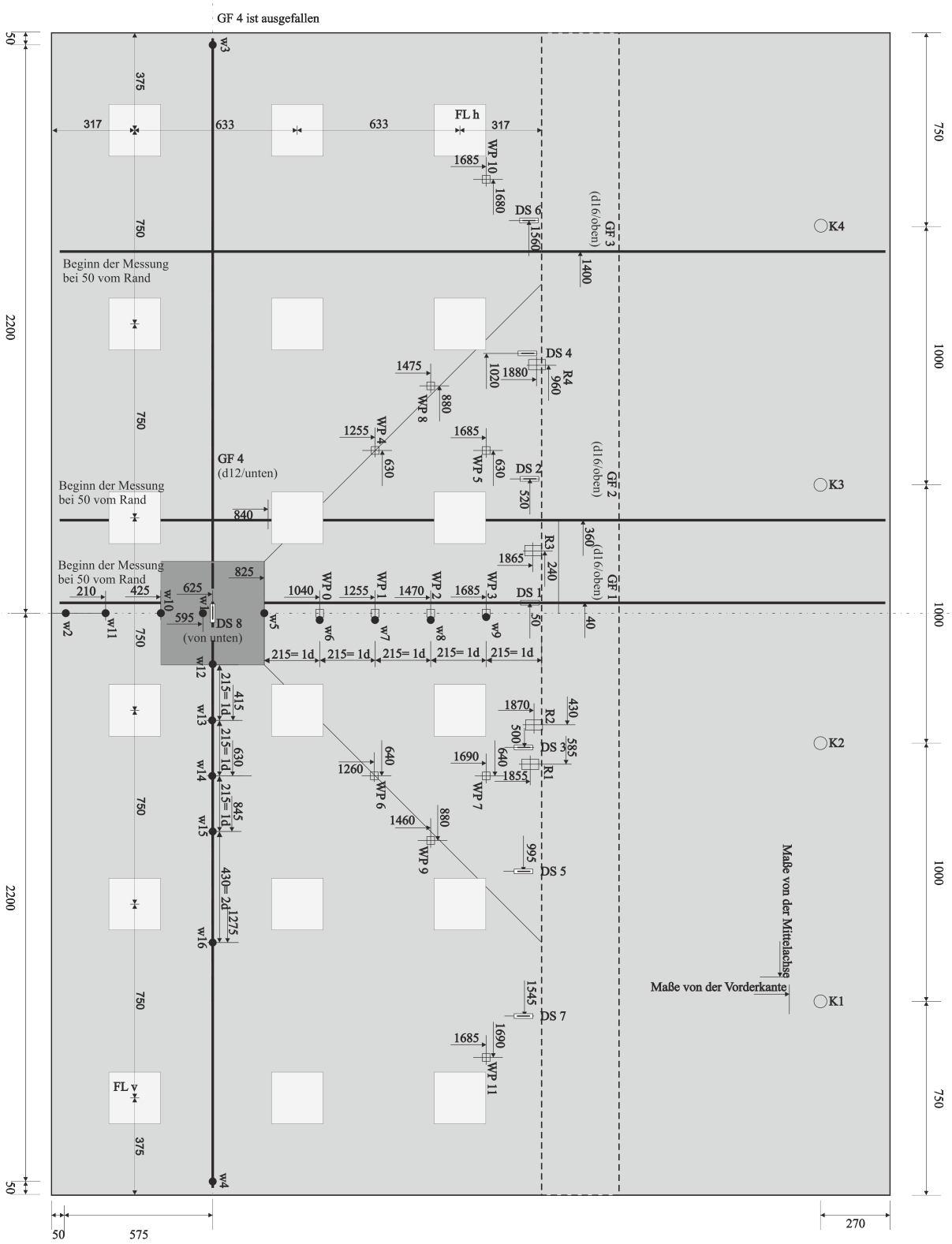

Abbildung B.4: Messtechnik V4

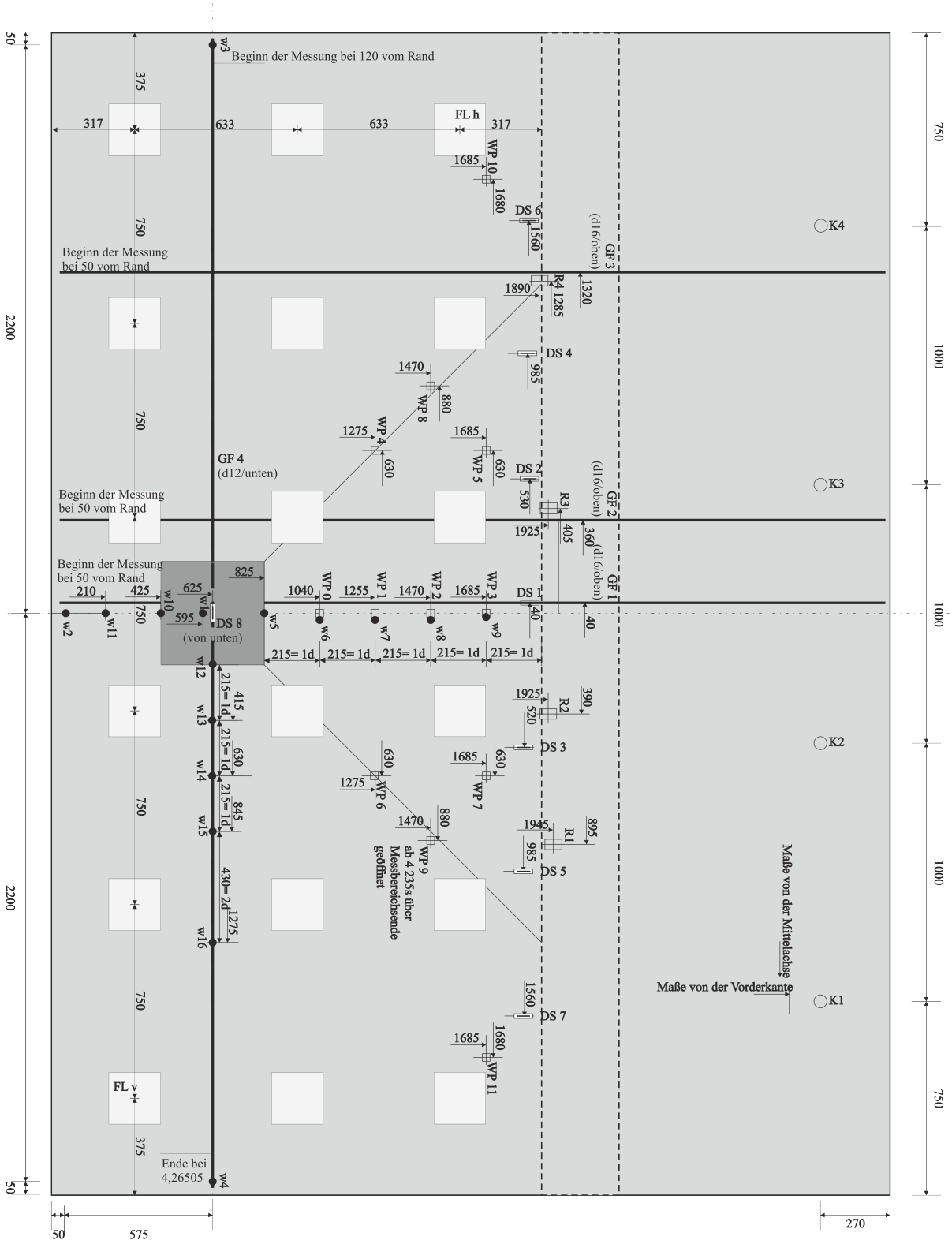

Abbildung B.5: Messtechnik V5

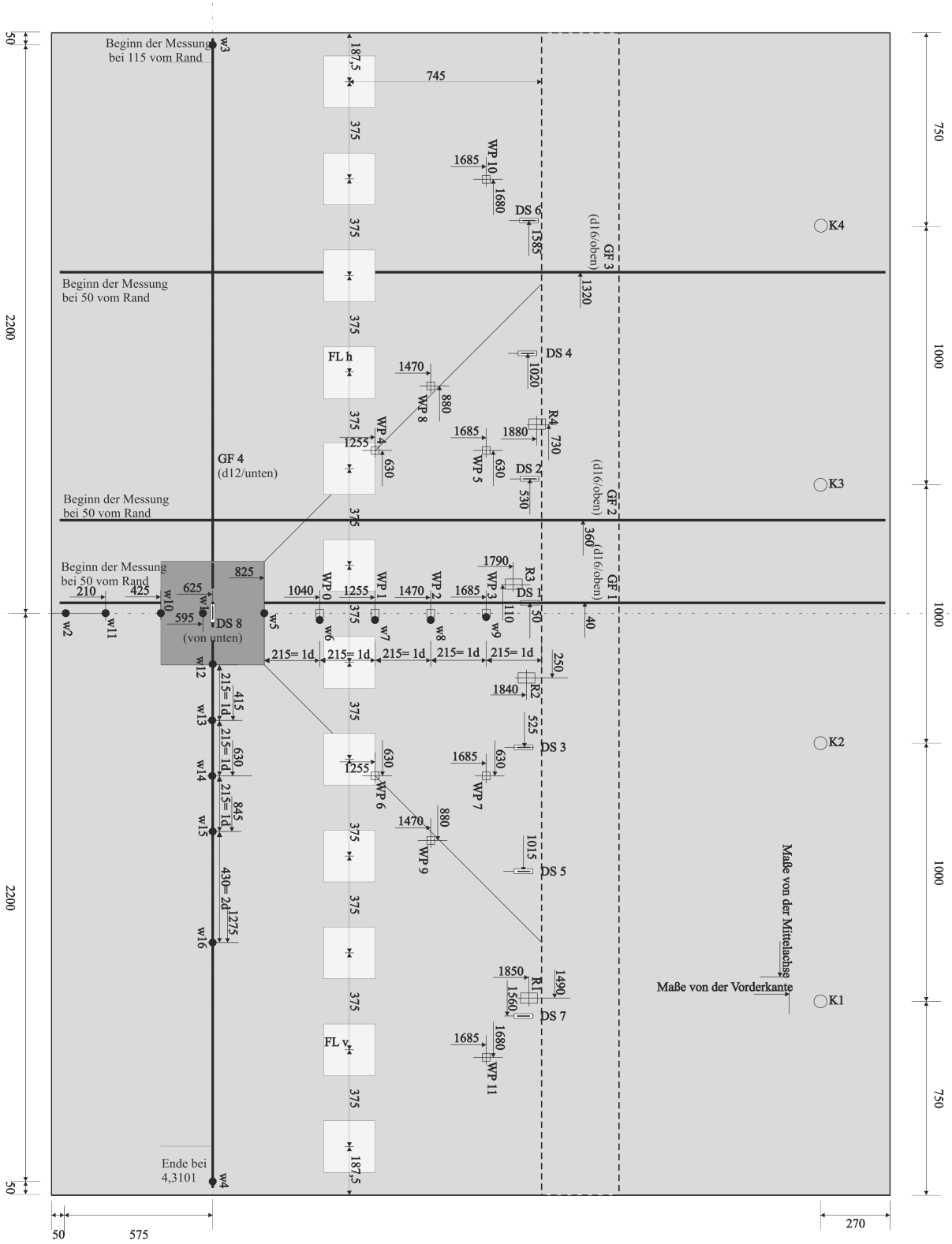

Abbildung B.6: Messtechnik V6

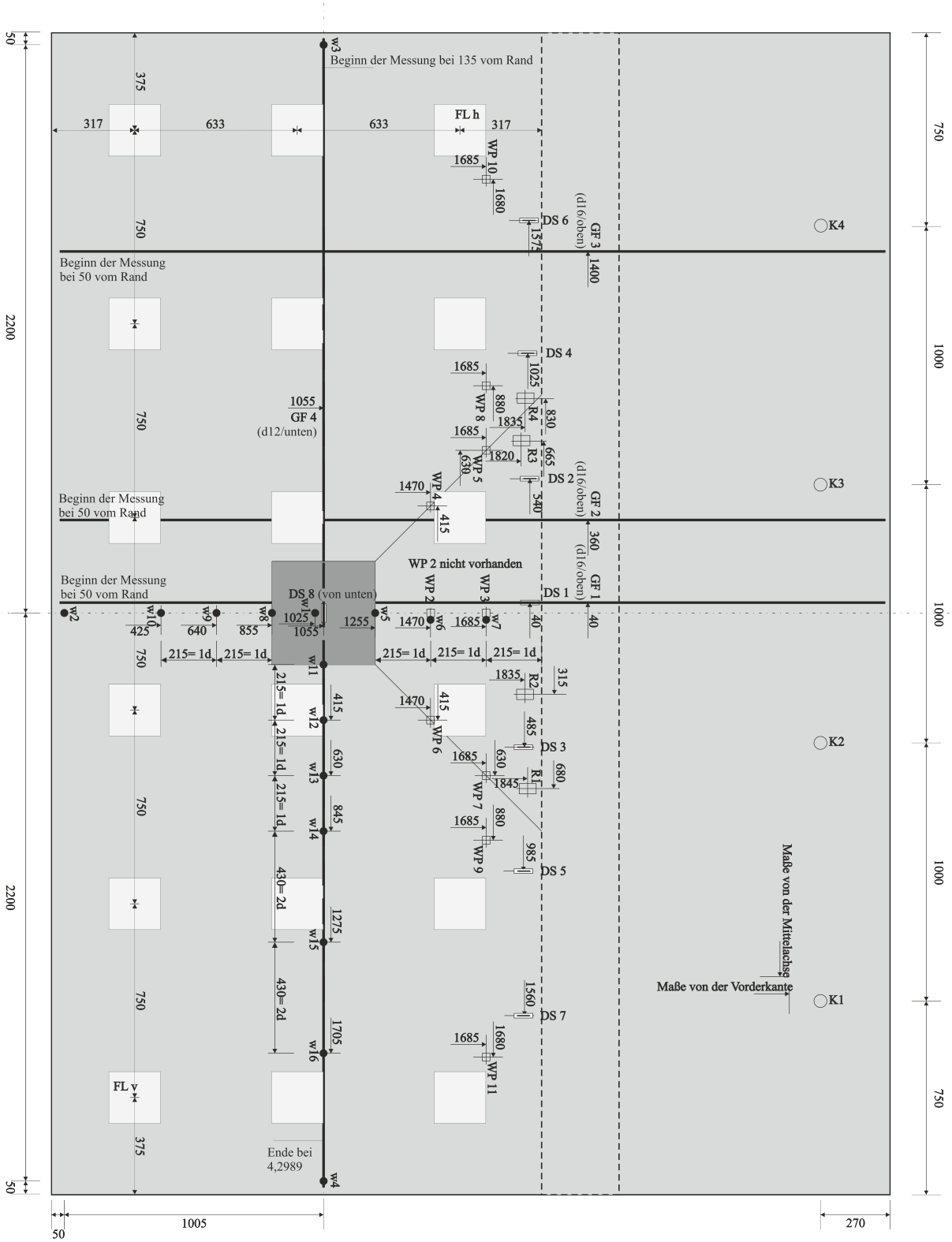

Abbildung B.7: Messtechnik V7

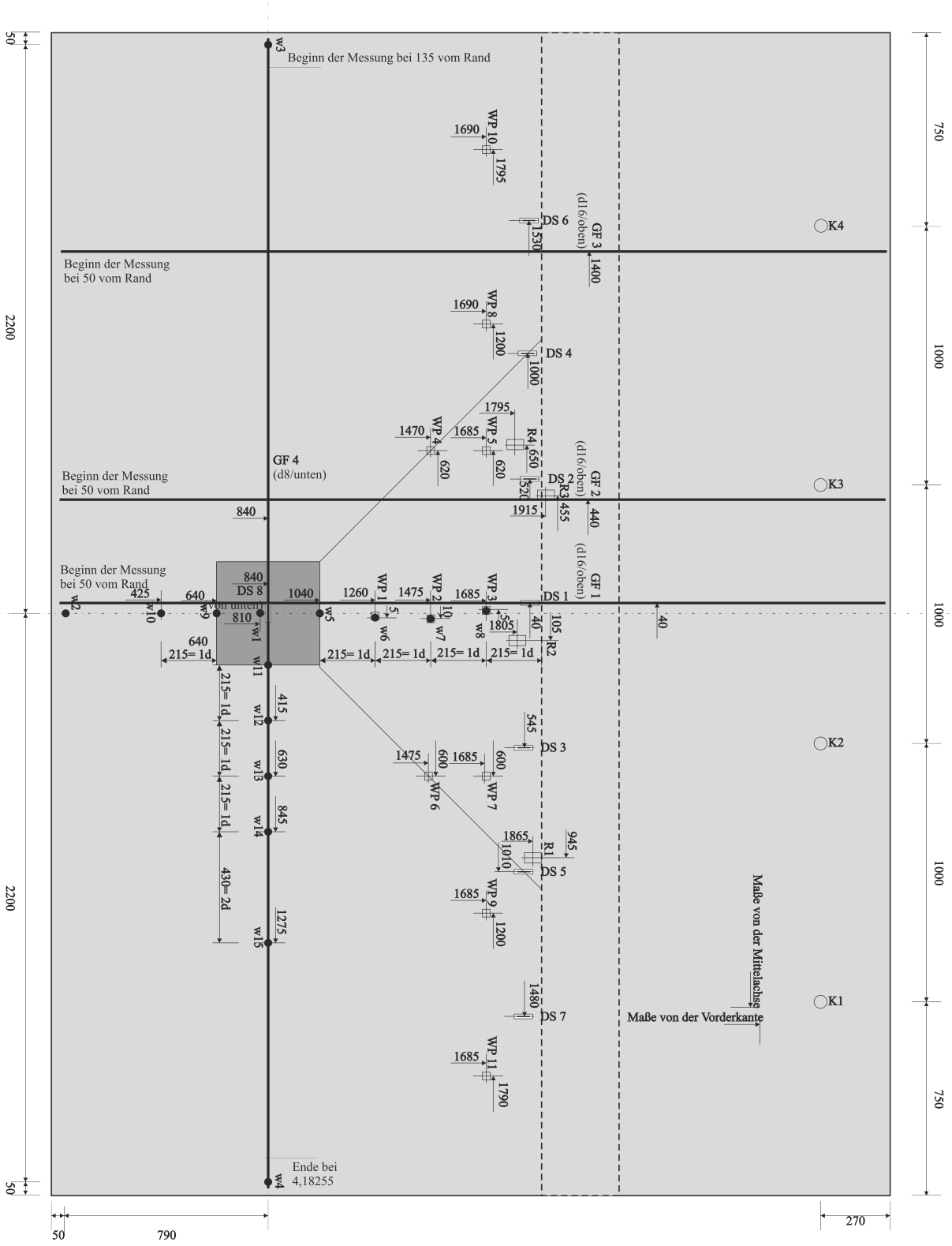

Abbildung B.8: Messtechnik V8

C Rissbilder

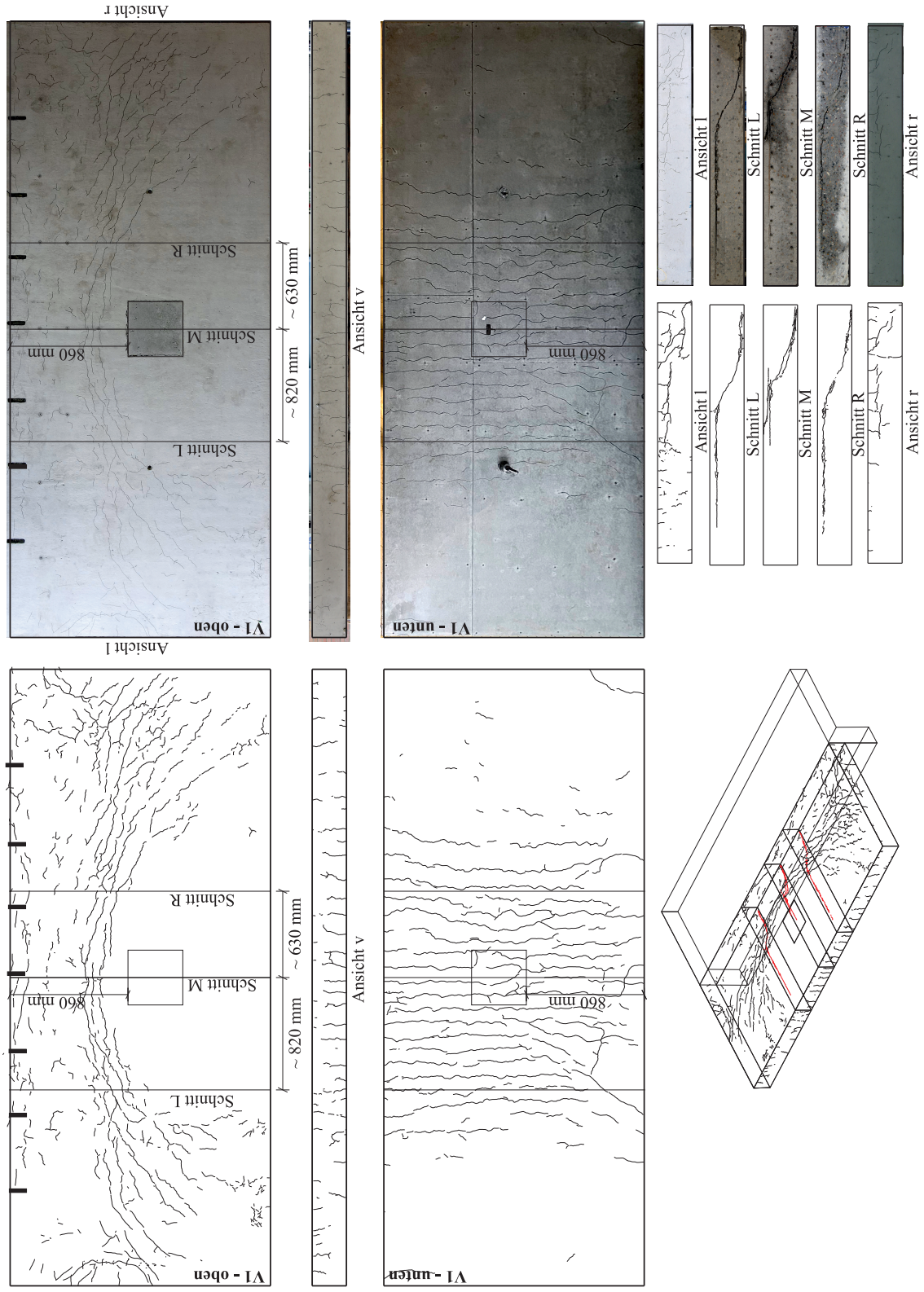

Abbildung C.1: V1/⌀20-80 - Rissbilder

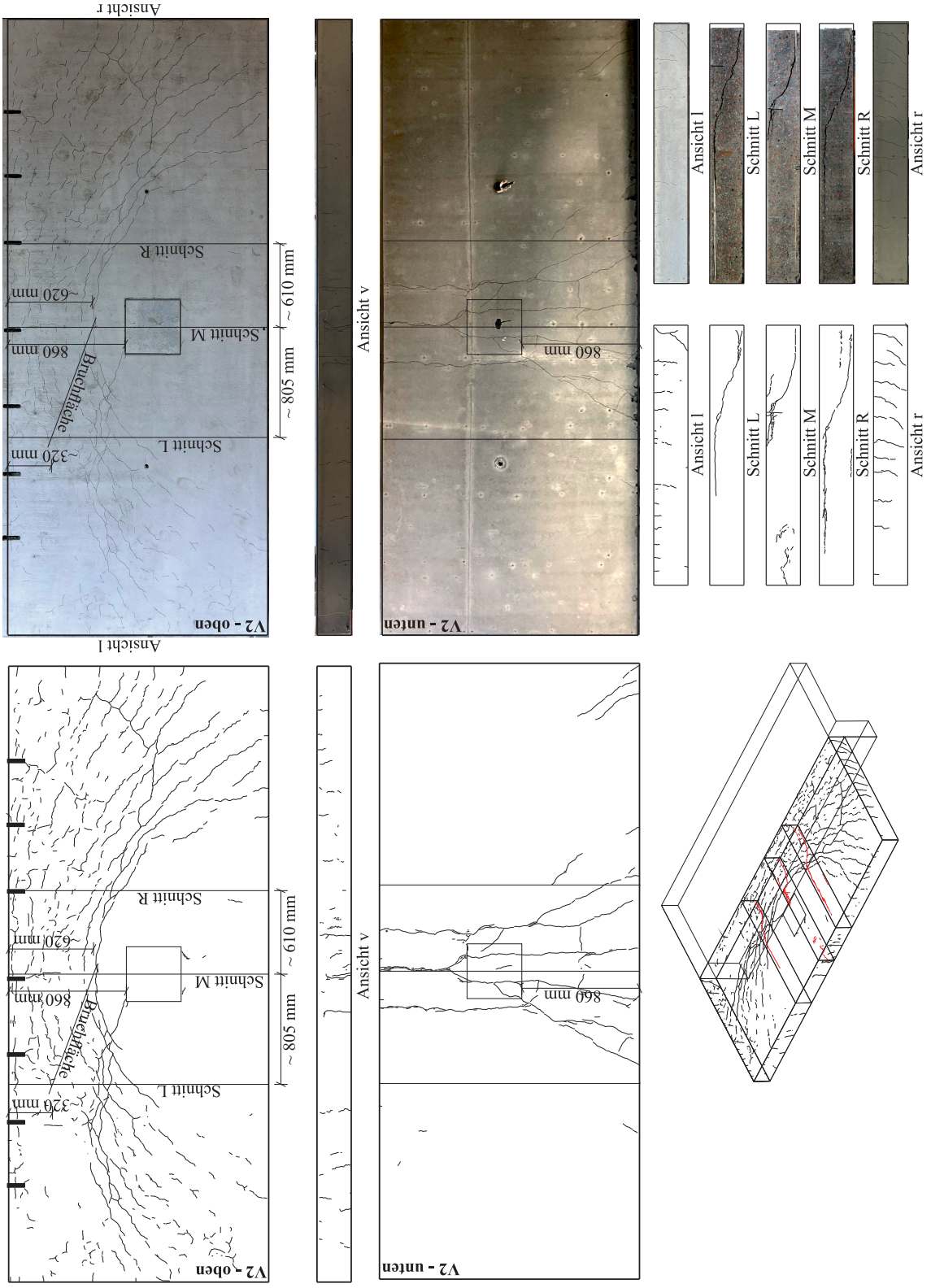

Abbildung C.2: V2/⌀8-300 - Rissbilder

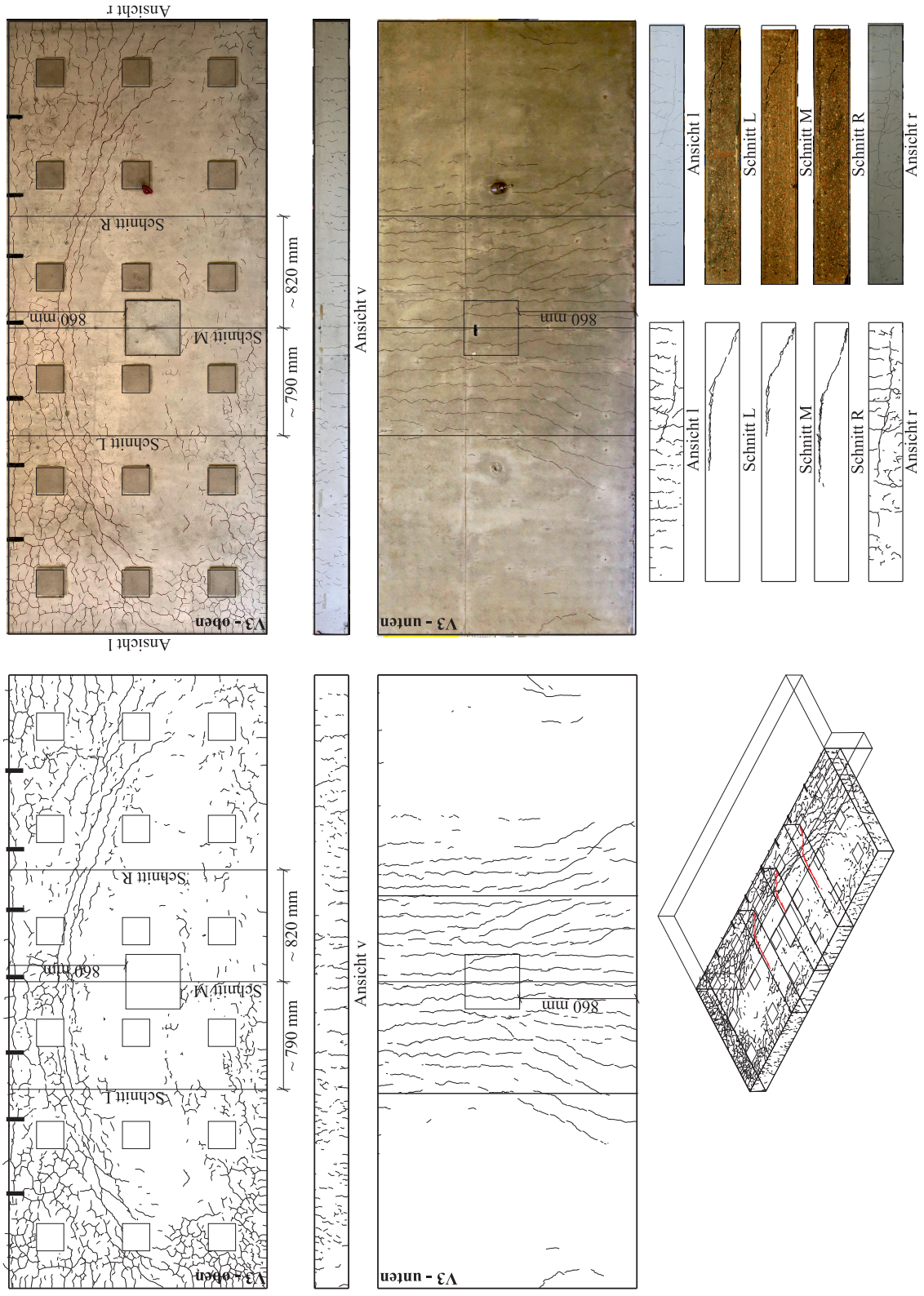

Abbildung C.3: V3/4d-FL - Rissbilder

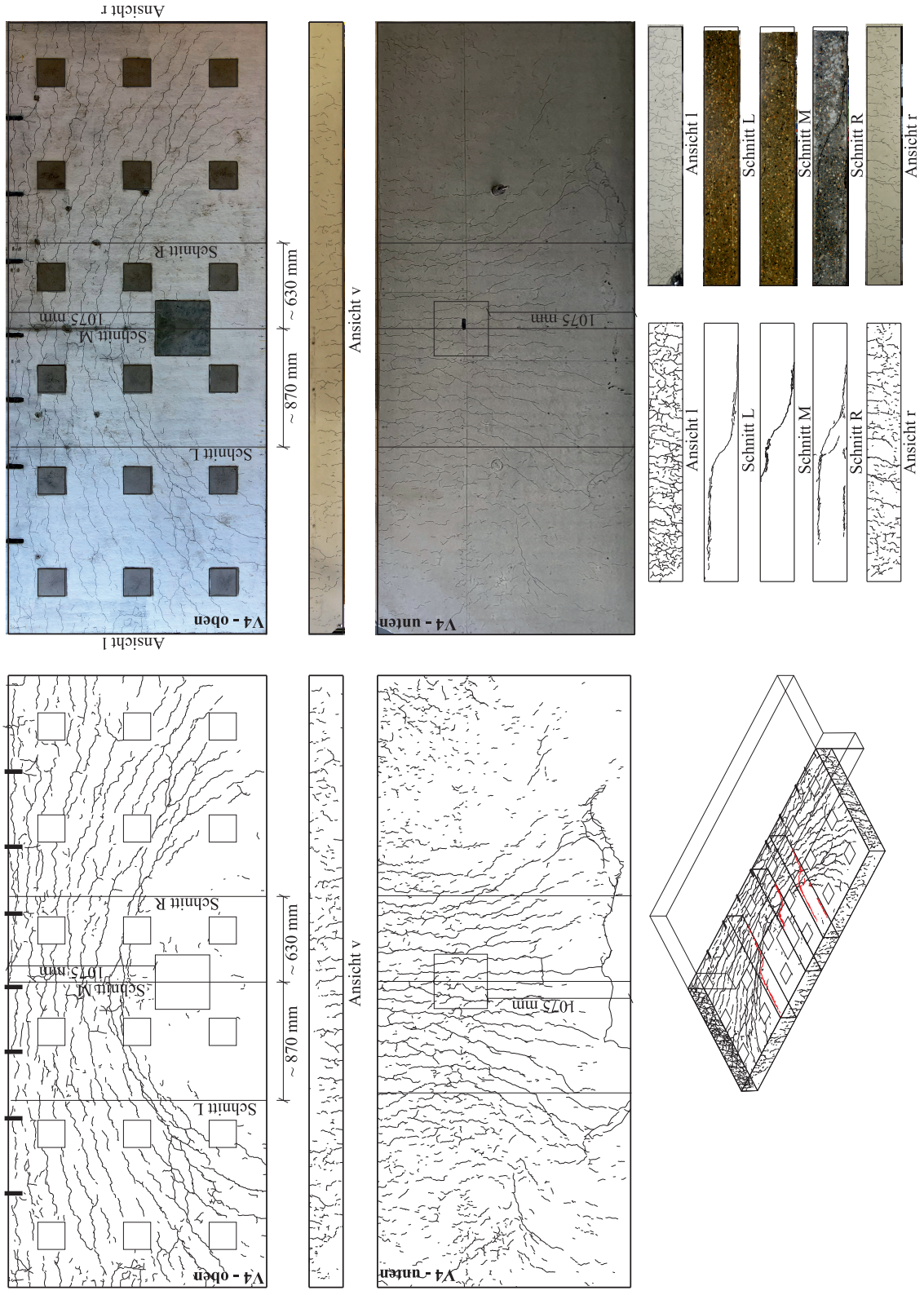

Abbildung C.4: V4/5d-FL - Rissbilder

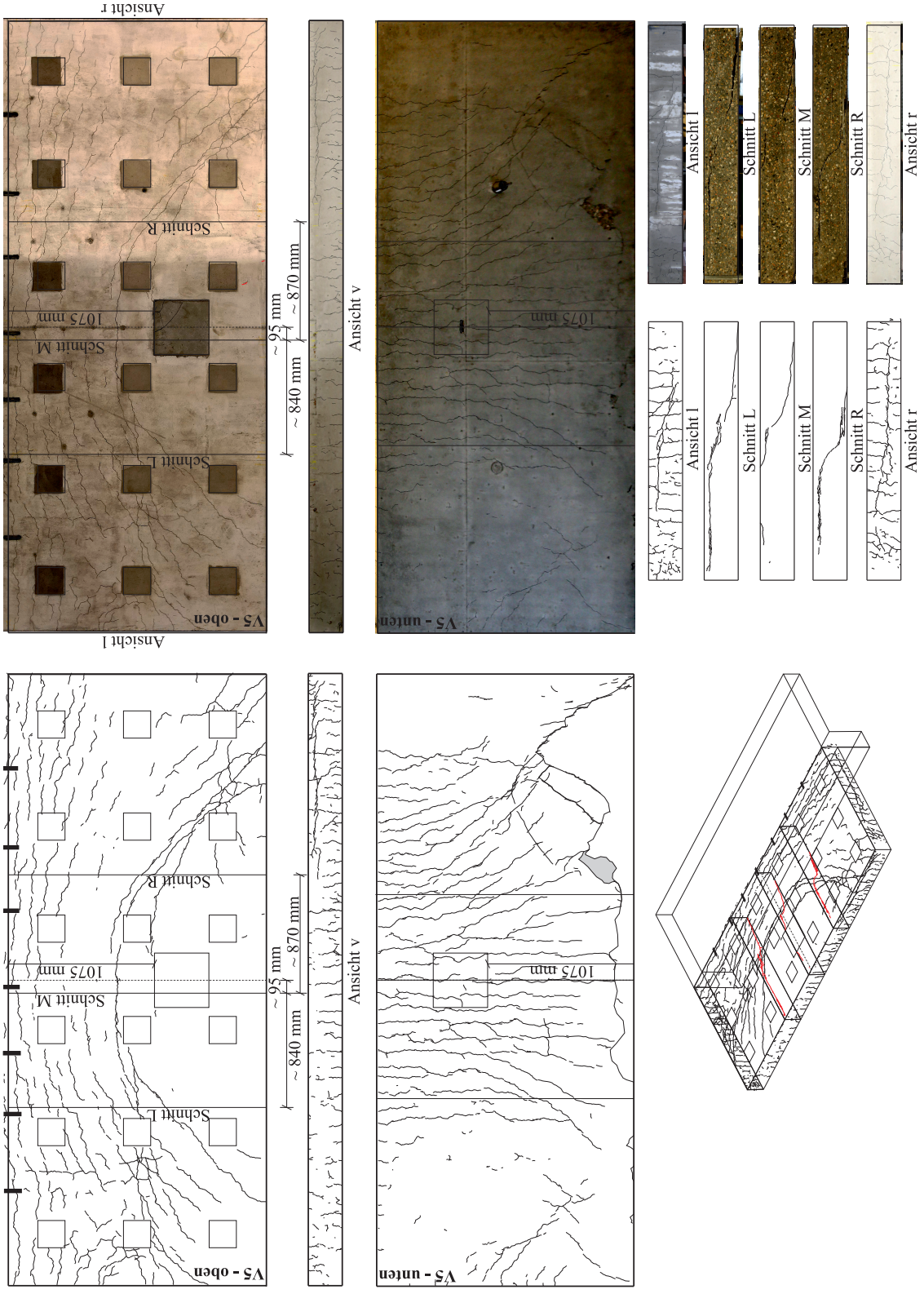

Abbildung C.5: V5/5d-FL-2 - Rissbilder

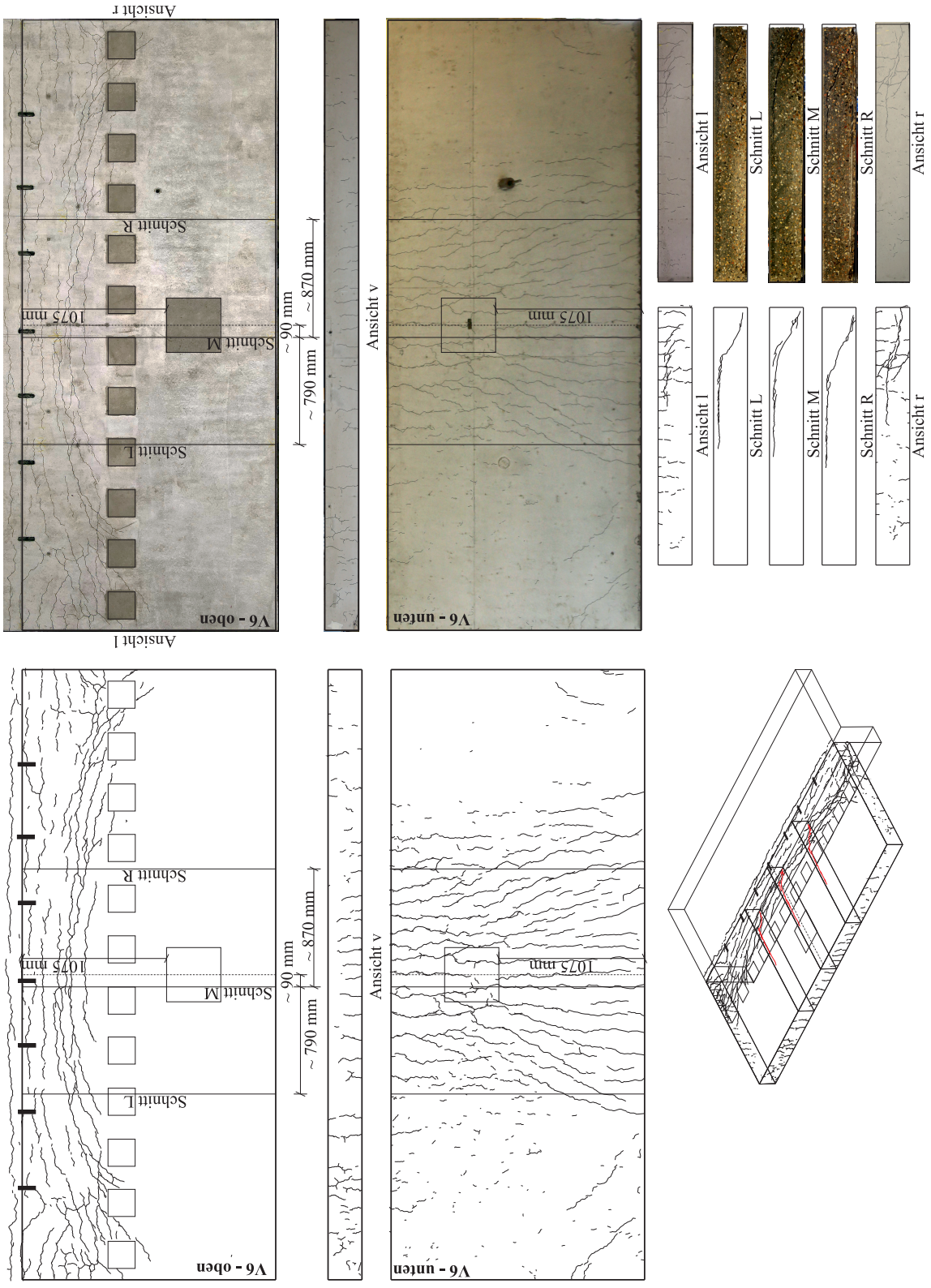

Abbildung C.6: V6/5d-LL - Rissbilder

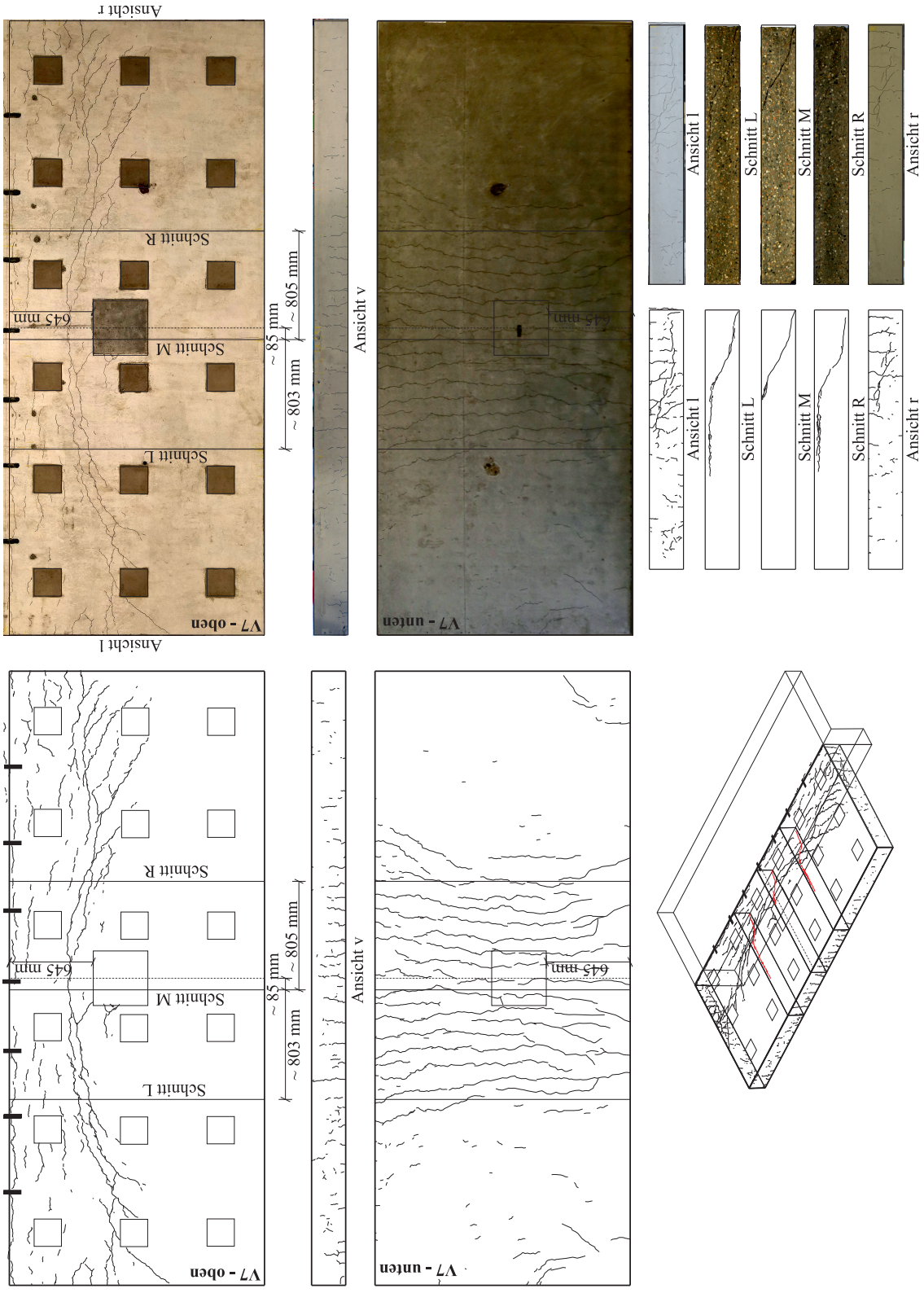

Abbildung C.7: V7/3d-FL - Rissbilder

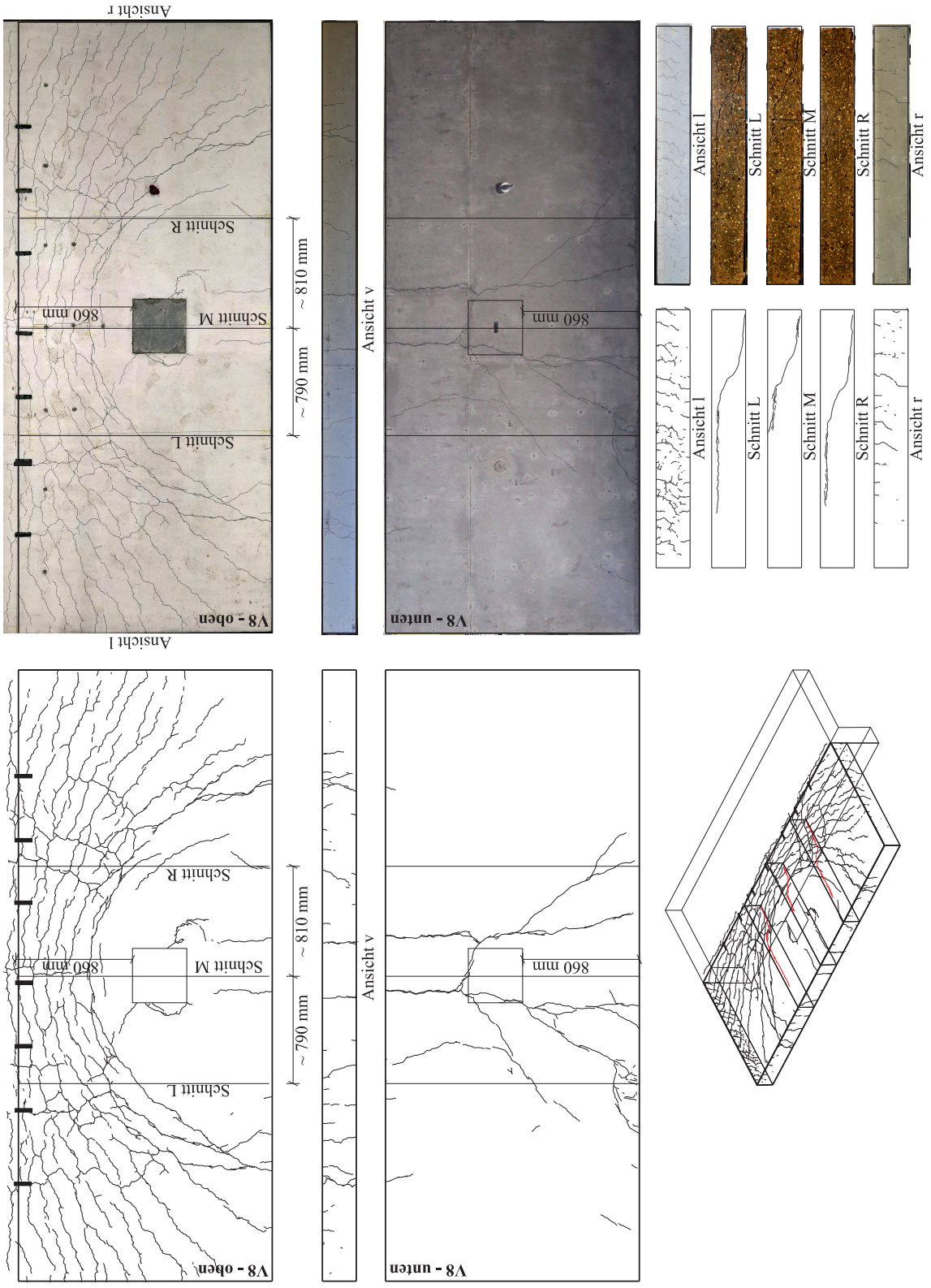

Abbildung C.8: V8/⌀8-300-2 - Rissbilder

D Versuchsergebnisse

Anordnung der Messtechnik siehe Anhang B.

D.1 Versuch V1/⌀20-80

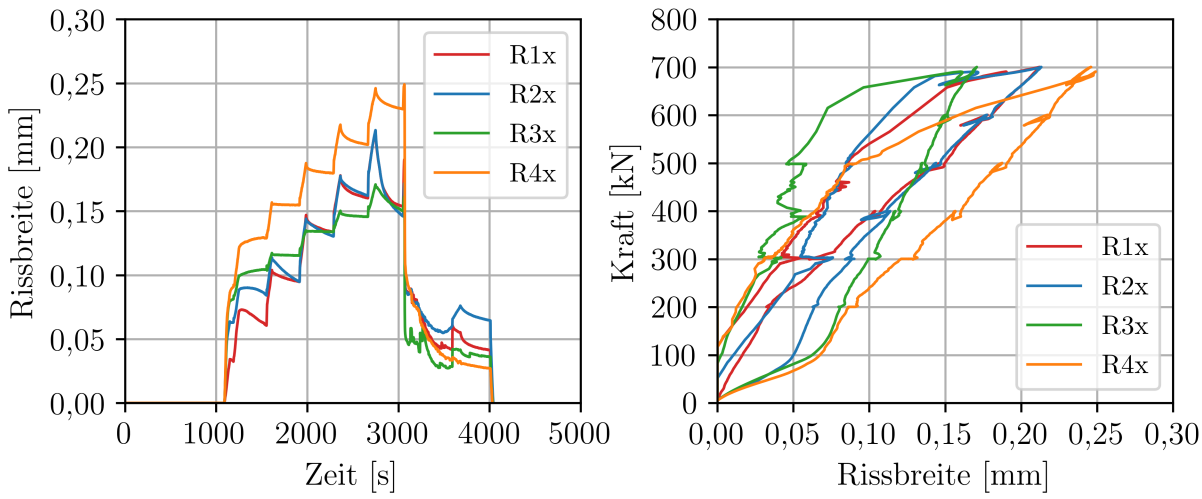

Abbildung D.1: V1 - Rissöffnungen R1x - R4x

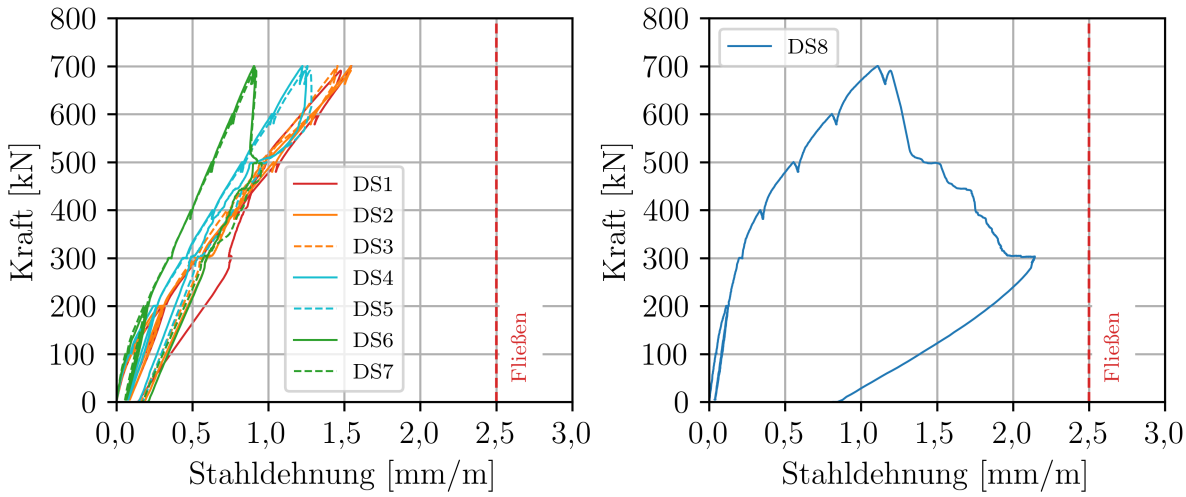

Abbildung D.2: V1 - Stahldehnungen DS1 - DS8

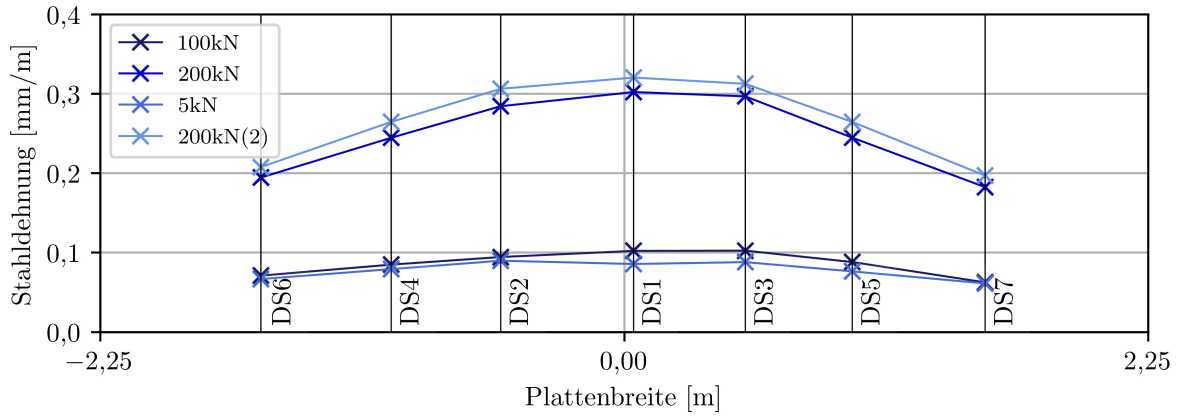

Abbildung D.3: V1 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Vorbelastung

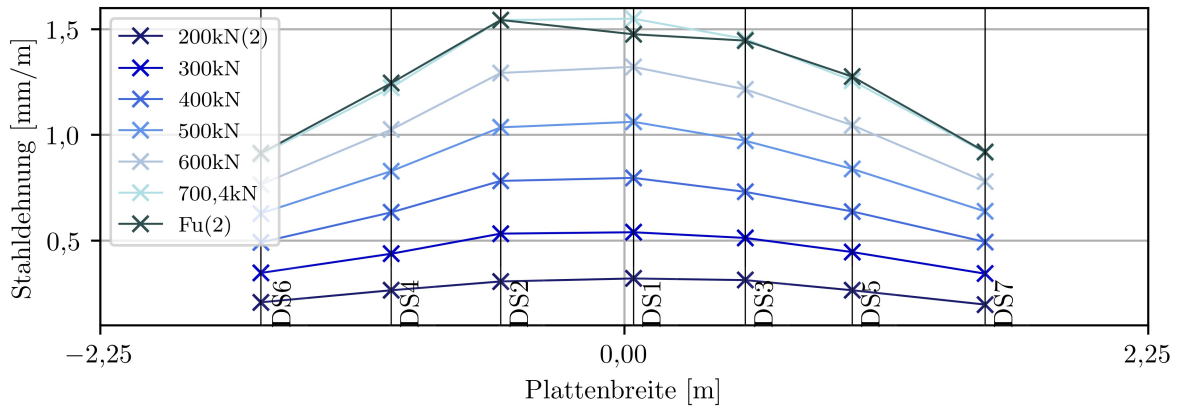

Abbildung D.4: V1 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - bis zur Traglast

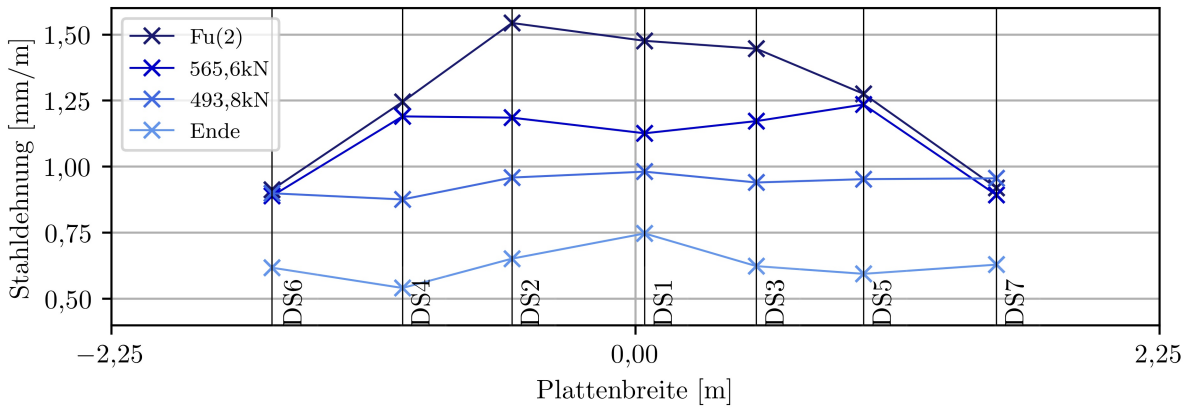

Abbildung D.5: V1 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Nachbruchverhalten

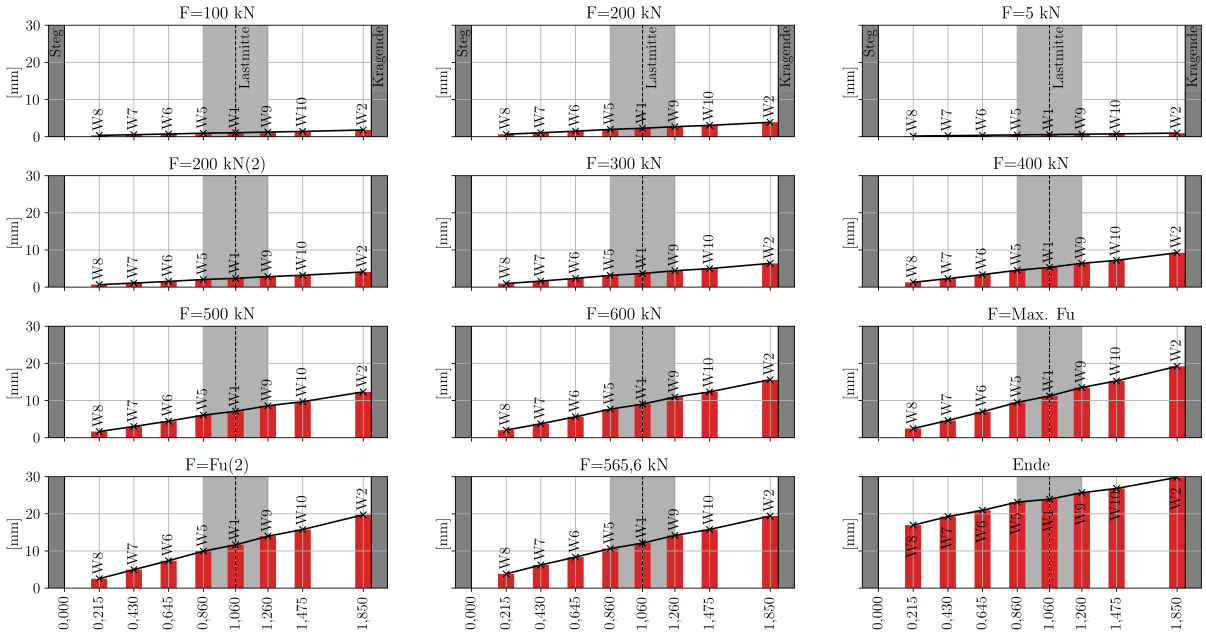

Abbildung D.6: V1 - Zeitabhängige Verformungen in Lastrichtung

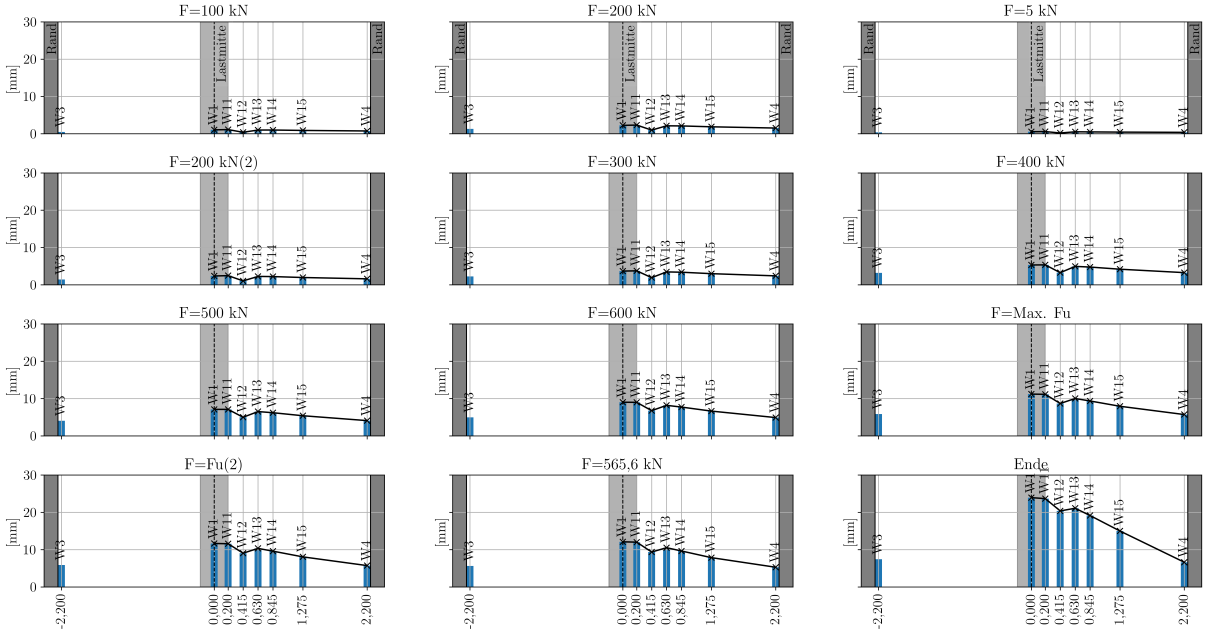

Abbildung D.7: V1 - Zeitabhängige Verformungen in der Lastachse

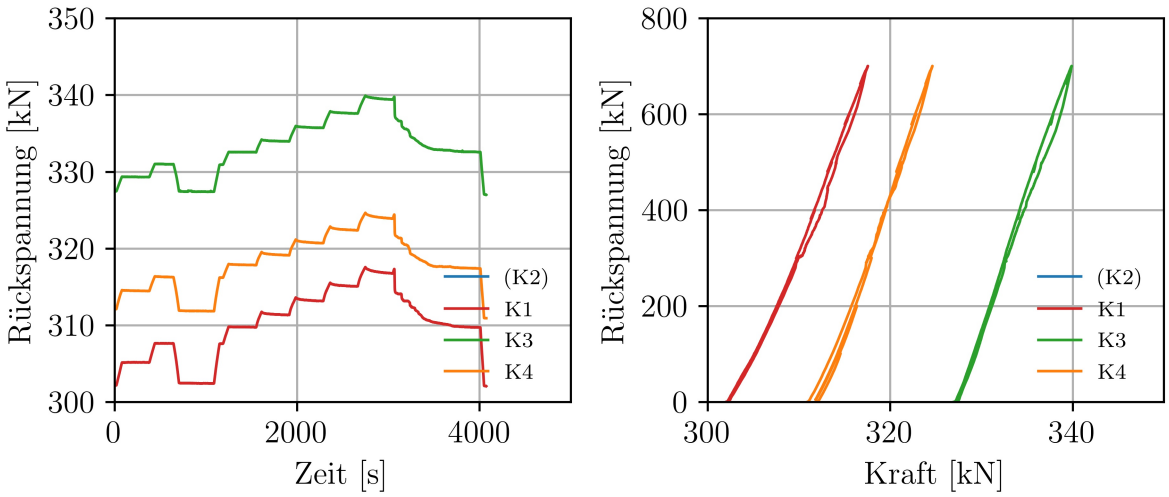

Abbildung D.8: V1 - Kräfte in der Rückspannung

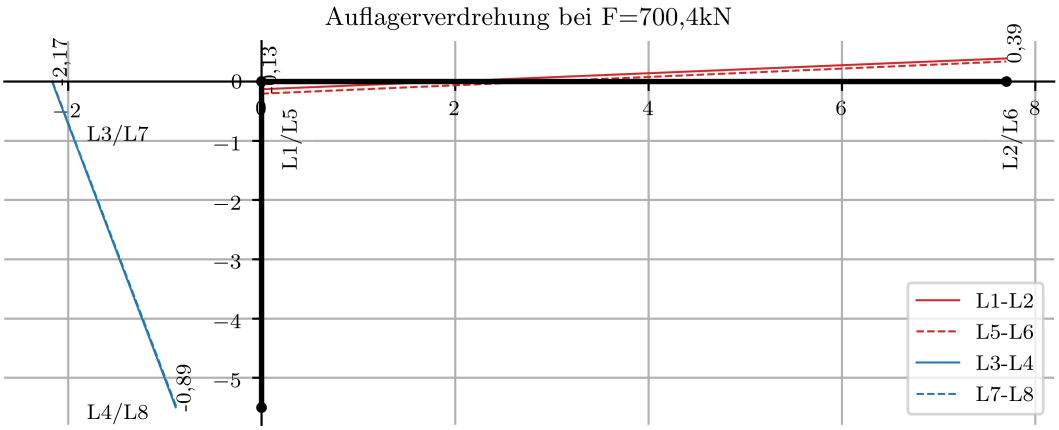

Abbildung D.9: V1 - Verdrehung bei max. Traglast F_u (Werte von L1 - L4)

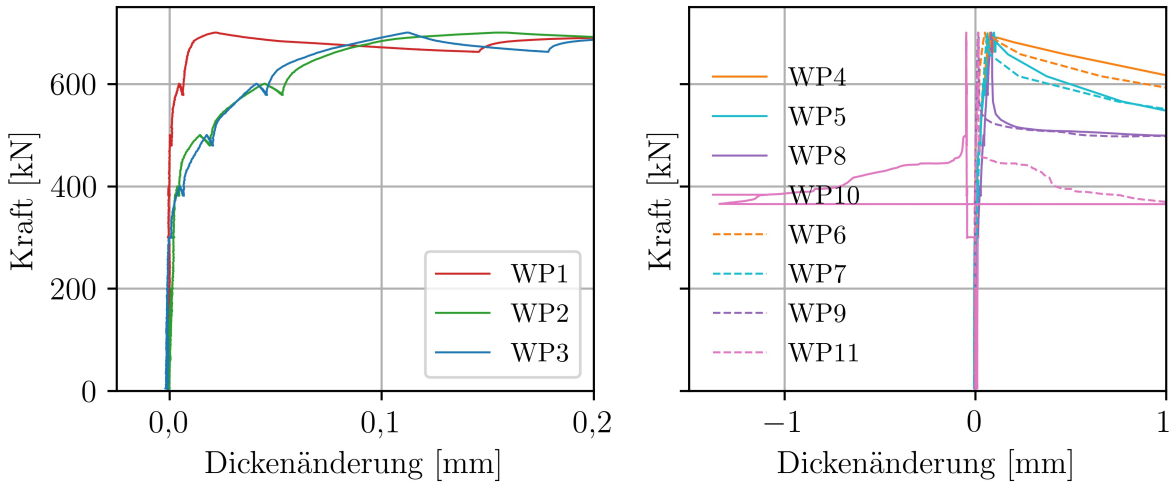

Abbildung D.10: V1 - Kraft - Dickenmessungen WP1 - WP11

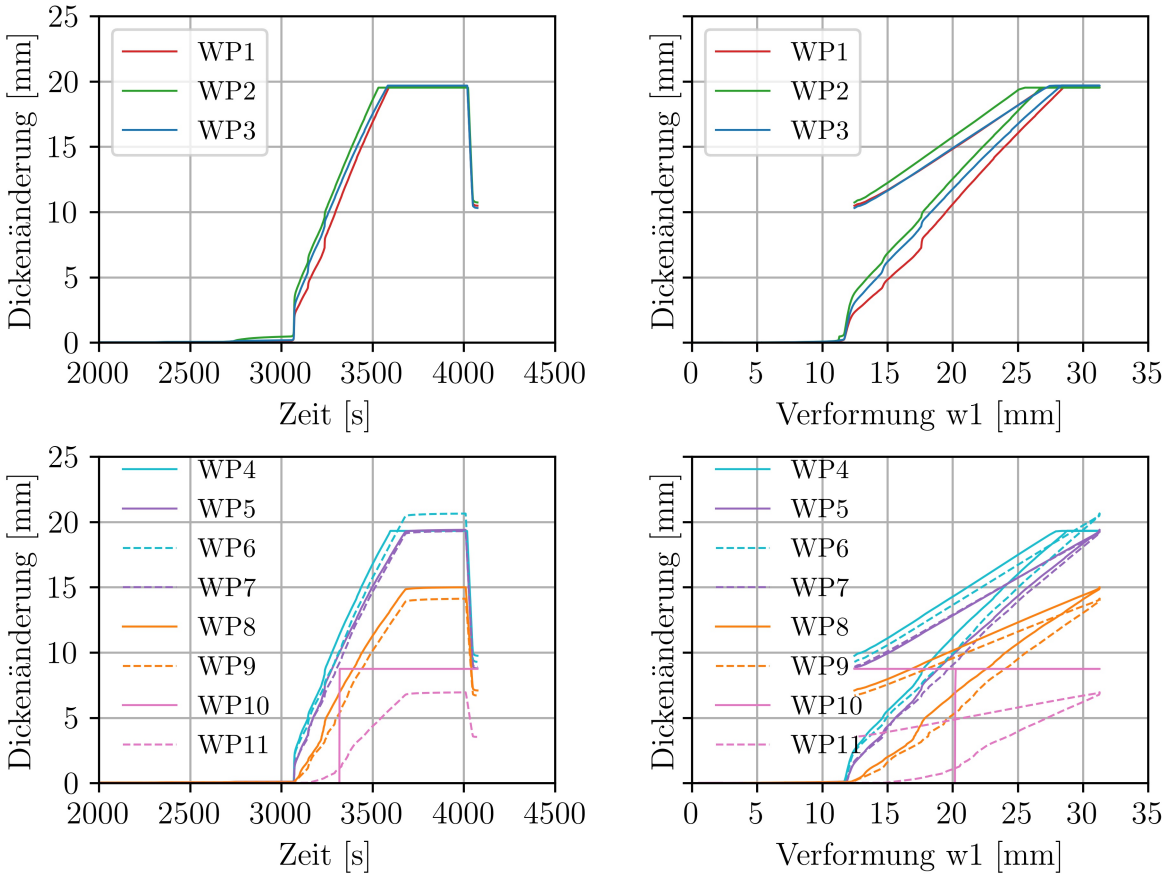

Abbildung D.11: V1 - Zeit/Verformung - Dickenmessungen WP1 - WP11

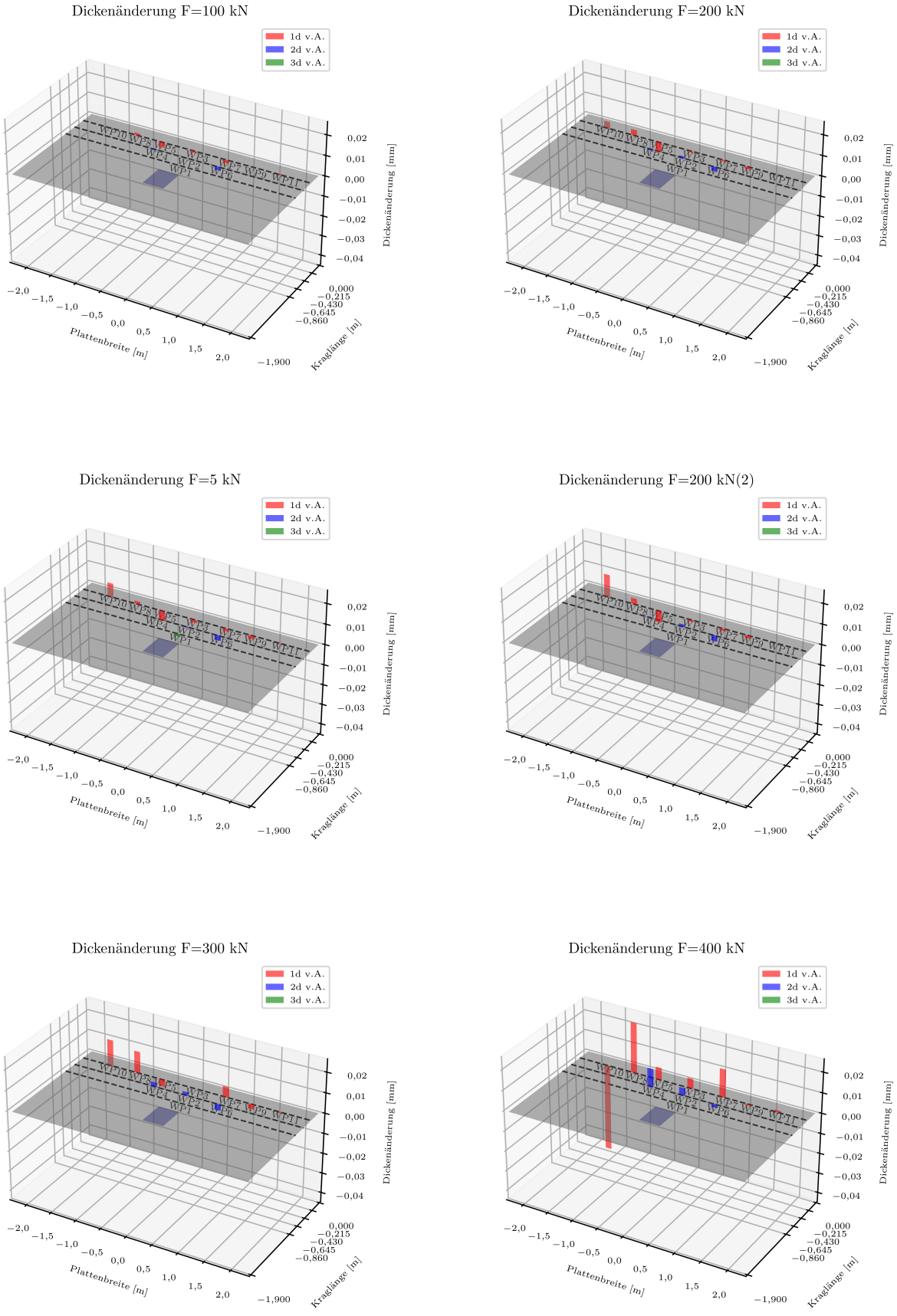

Abbildung D.12: V1 - Zeitabhängige Dickenmessungen in den ersten Laststufen

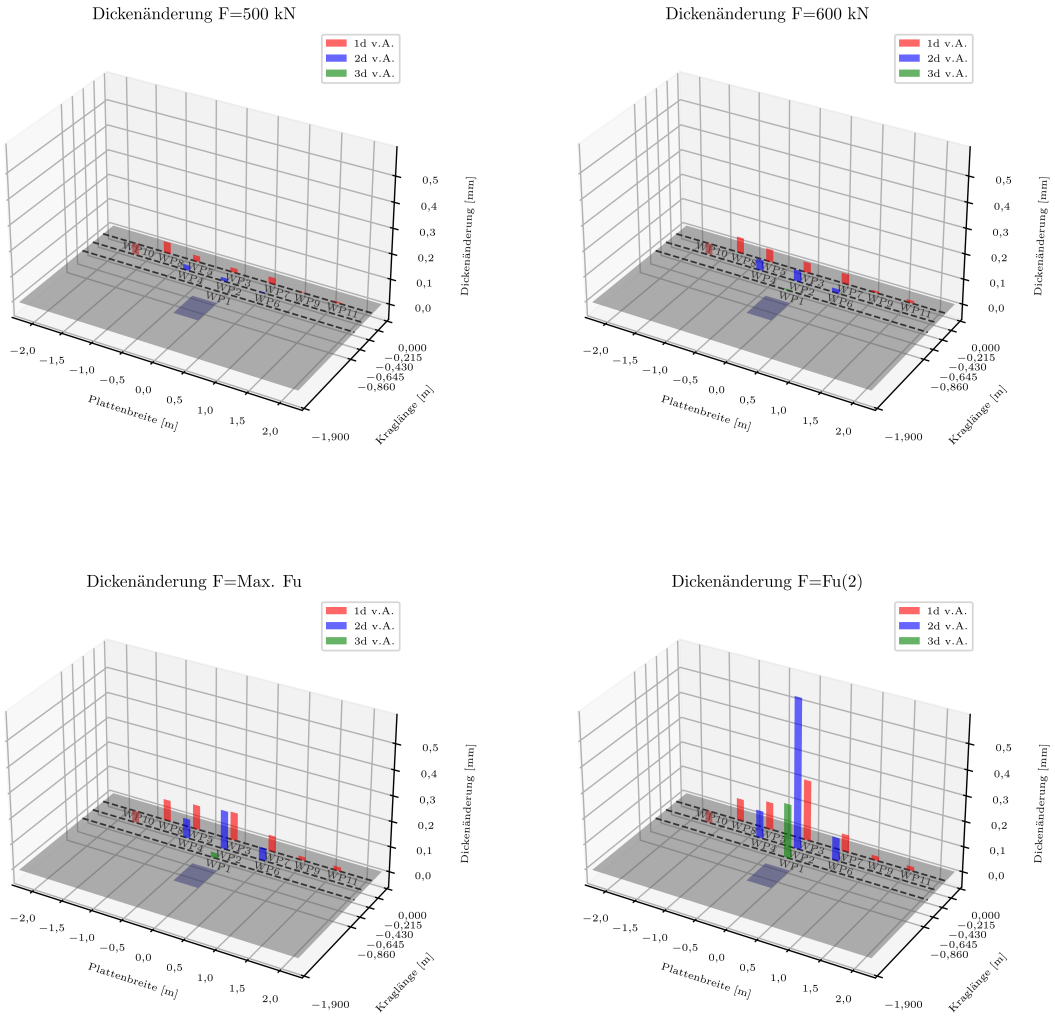

Abbildung D.13: V1 - Zeitabhängige Dickenmessungen bis zur Traglast

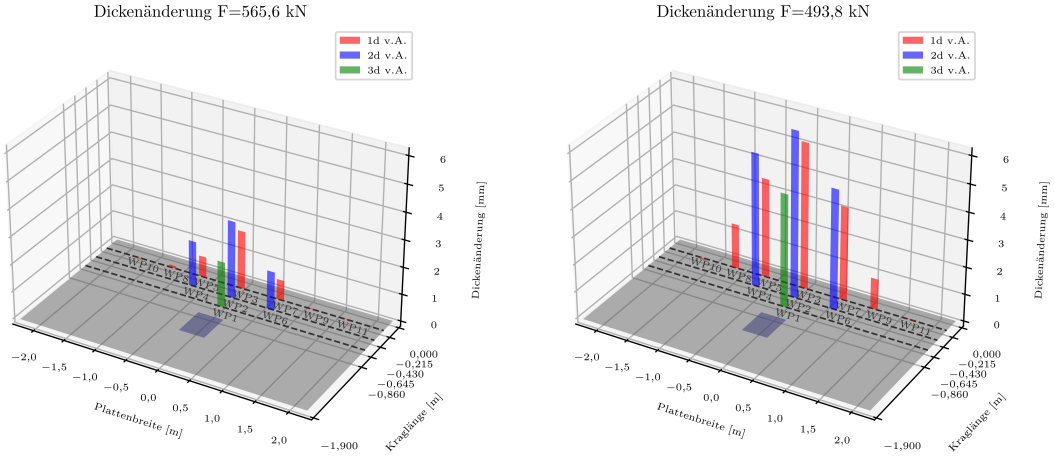

Abbildung D.14: V1 - Zeitabhängige Dickenmessungen nach dem Bruch

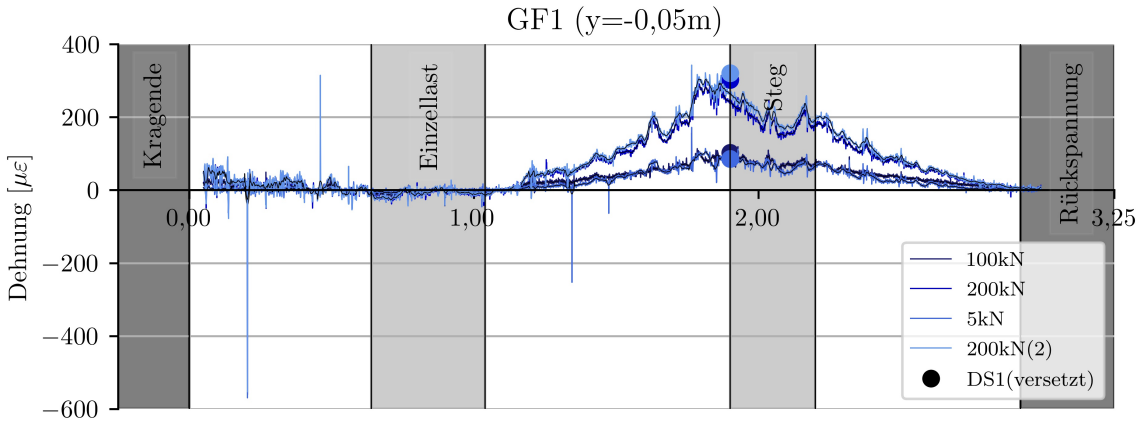

Abbildung D.15: V1 - Dehnung der Glasfaser GF1 während der Vorbelastung

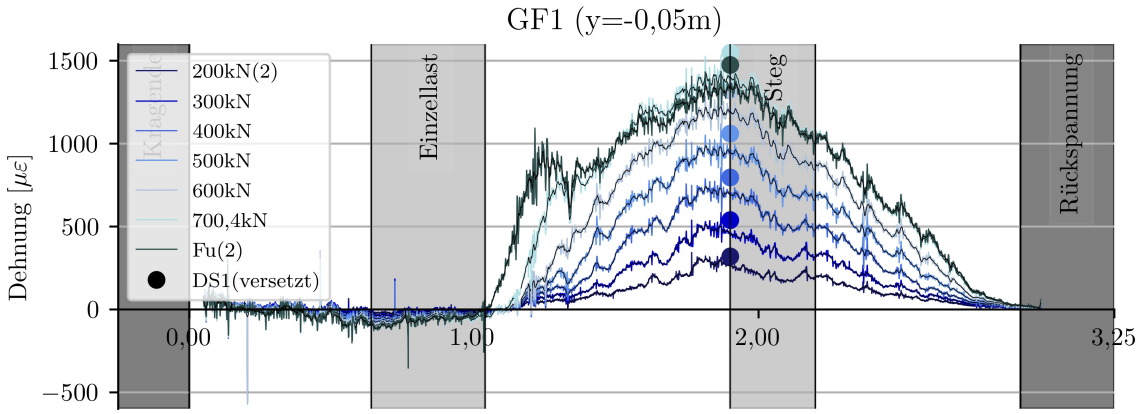

Abbildung D.16: V1 - Dehnung der Glasfaser GF1 bis zu Traglast

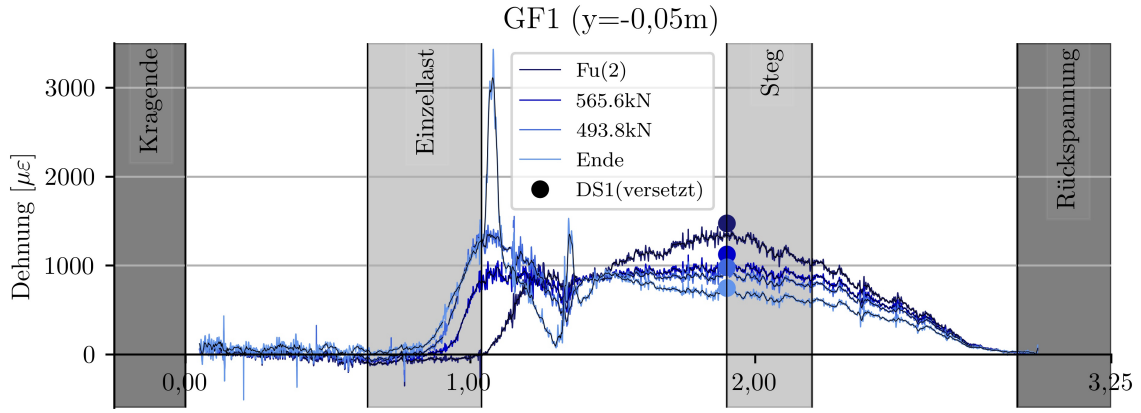

Abbildung D.17: V1 - Dehnung der Glasfaser GF1 nach dem Bruch

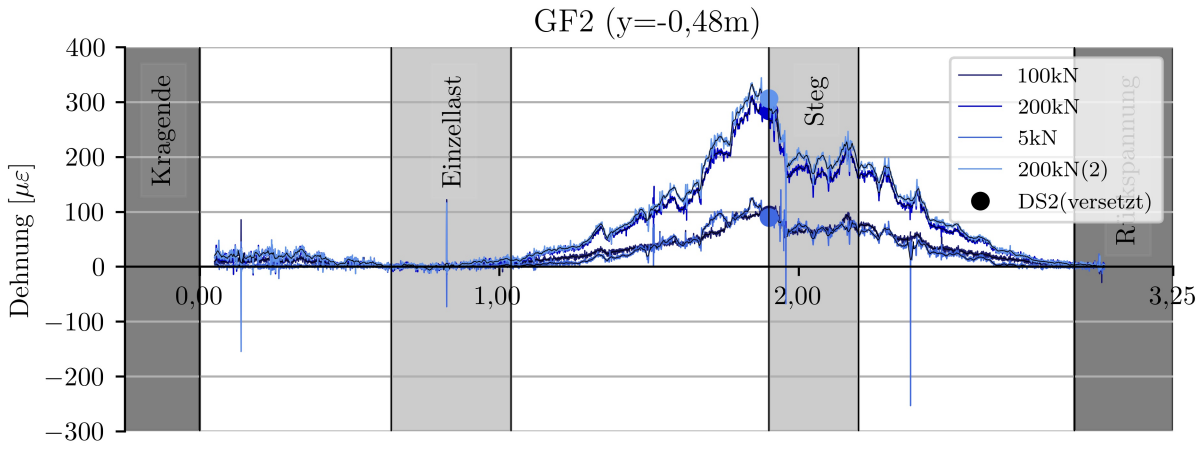

Abbildung D.18: V1 - Dehnung der Glasfaser GF2 während der Vorbelastung

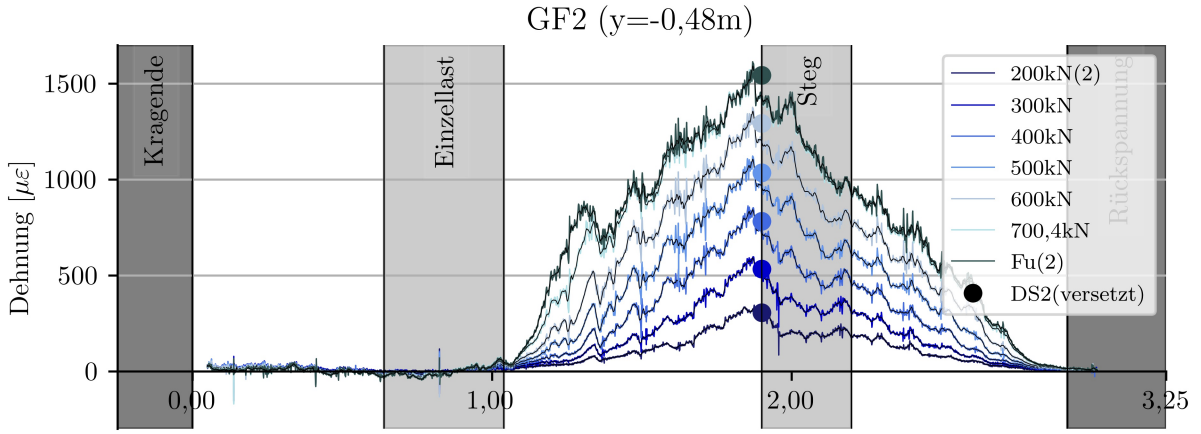

Abbildung D.19: V1 - Dehnung der Glasfaser GF2 bis zur Traglast

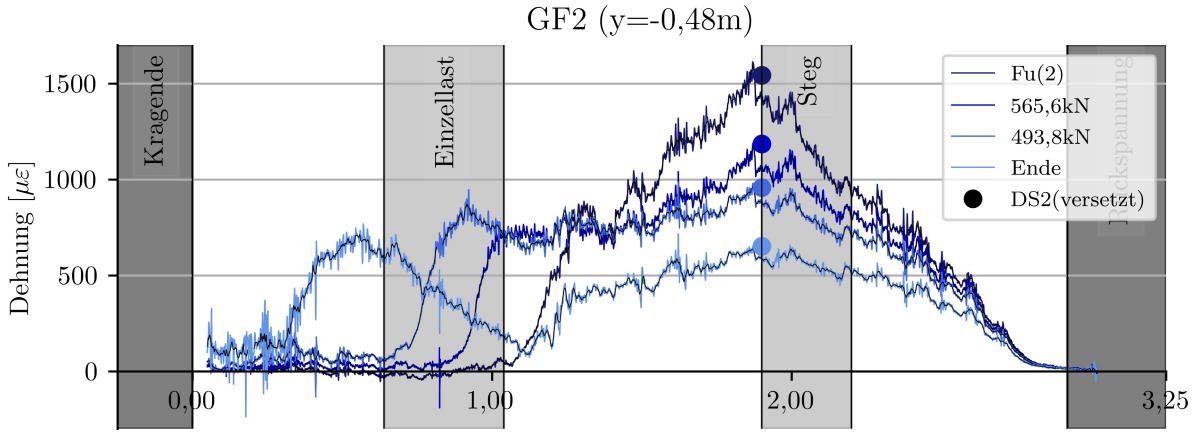

Abbildung D.20: V1 - Dehnung der Glasfaser GF2 nach dem Bruch

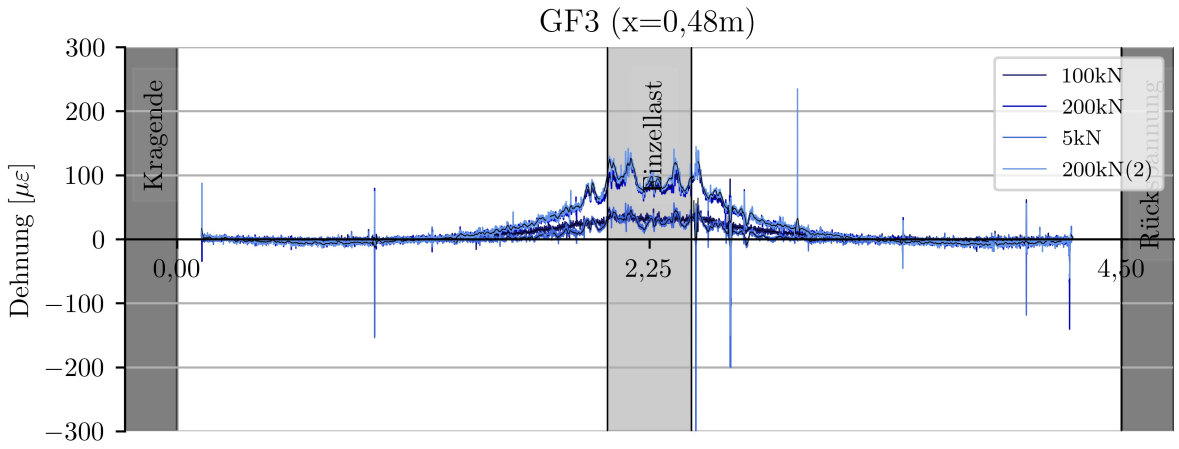

Abbildung D.21: V1 - Dehnung der Glasfaser GF3 während der Vorbelastung

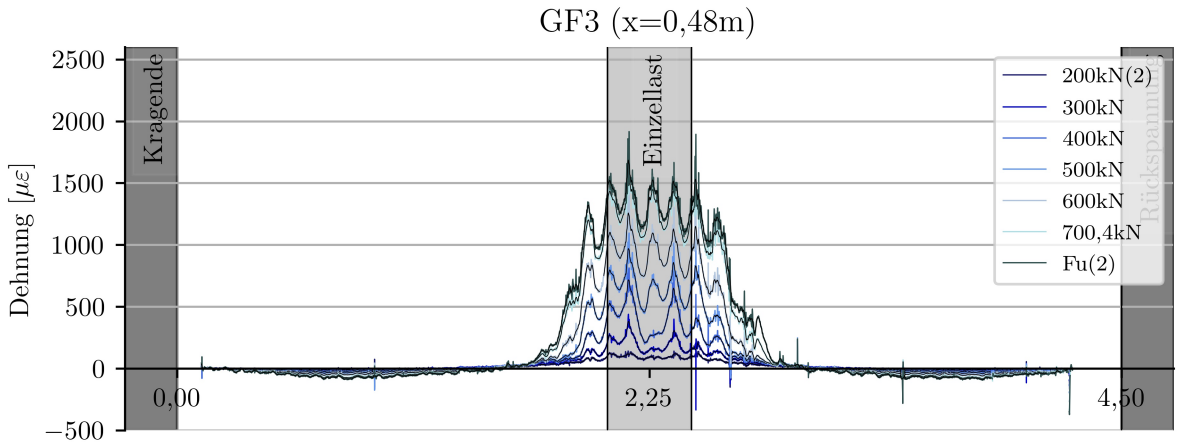

Abbildung D.22: V1 - Dehnung der Glasfaser GF3 bis zur Traglast

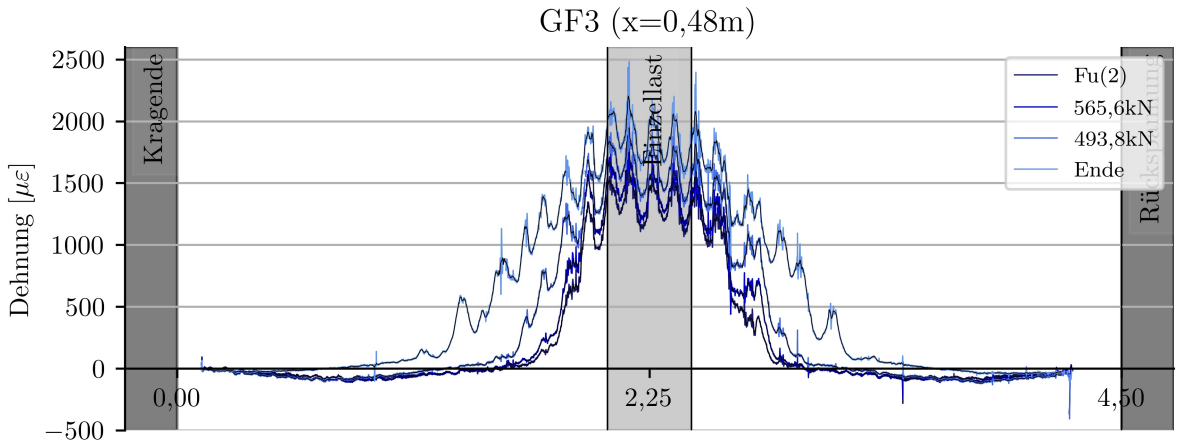

Abbildung D.23: V1 - Dehnung der Glasfaser GF3 nach dem Bruch

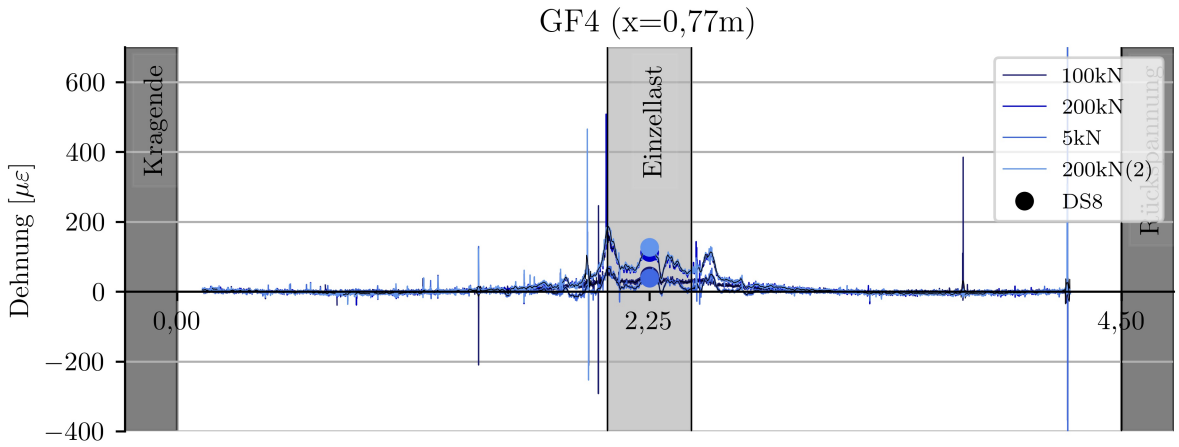

Abbildung D.24: V1 - Dehnung der Glasfaser GF4 während der Vorbelastung

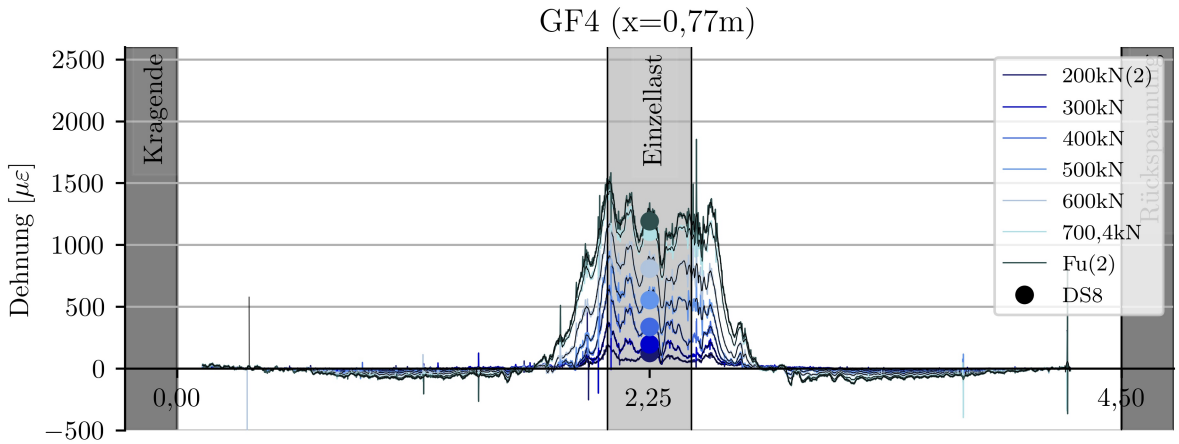

Abbildung D.25: V1 - Dehnung der Glasfaser GF4 bis zur Traglast

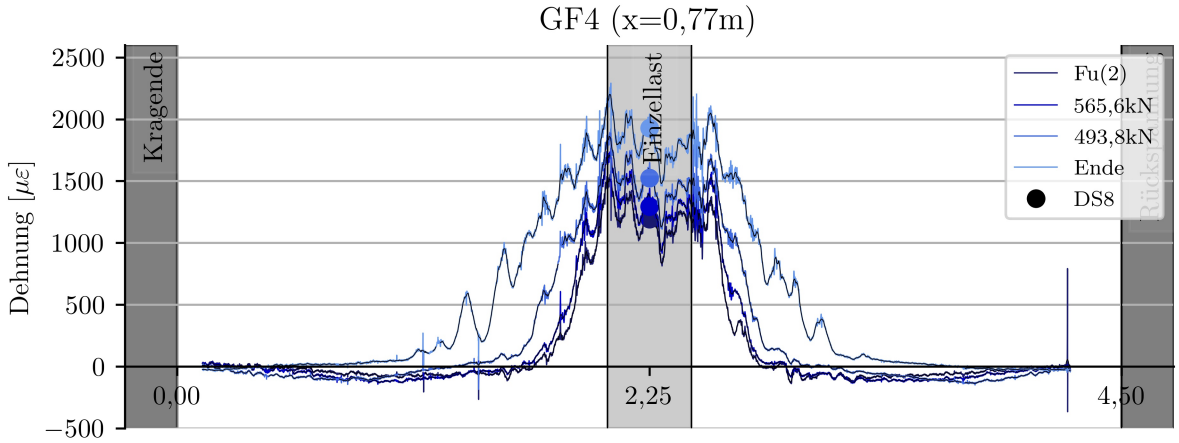

Abbildung D.26: V1 - Dehnung der Glasfaser GF4 nach dem Bruch

D.2 Versuch V2/⌀8-300

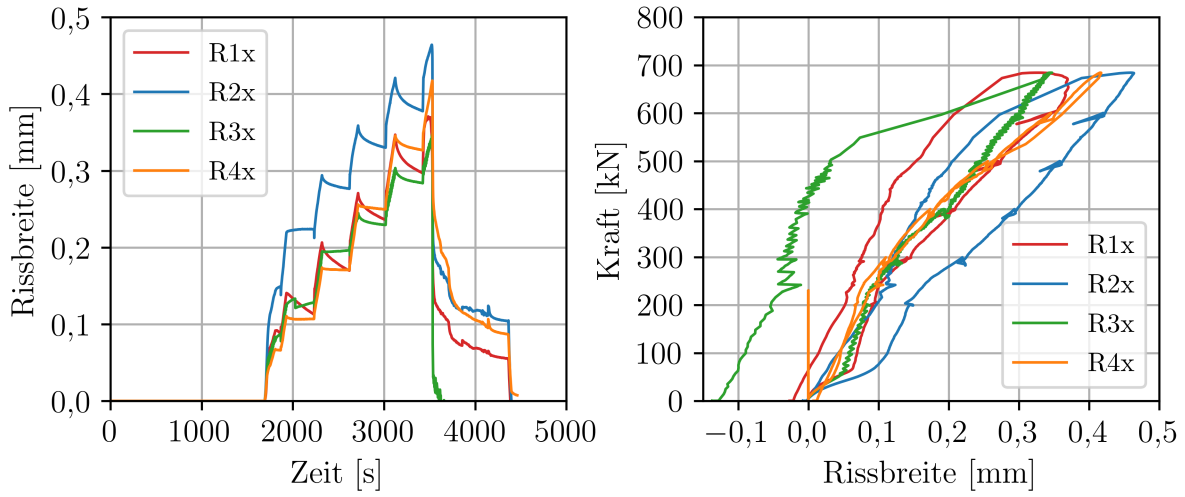

Abbildung D.27: V2 - Rissöffnungen R1x - R4x

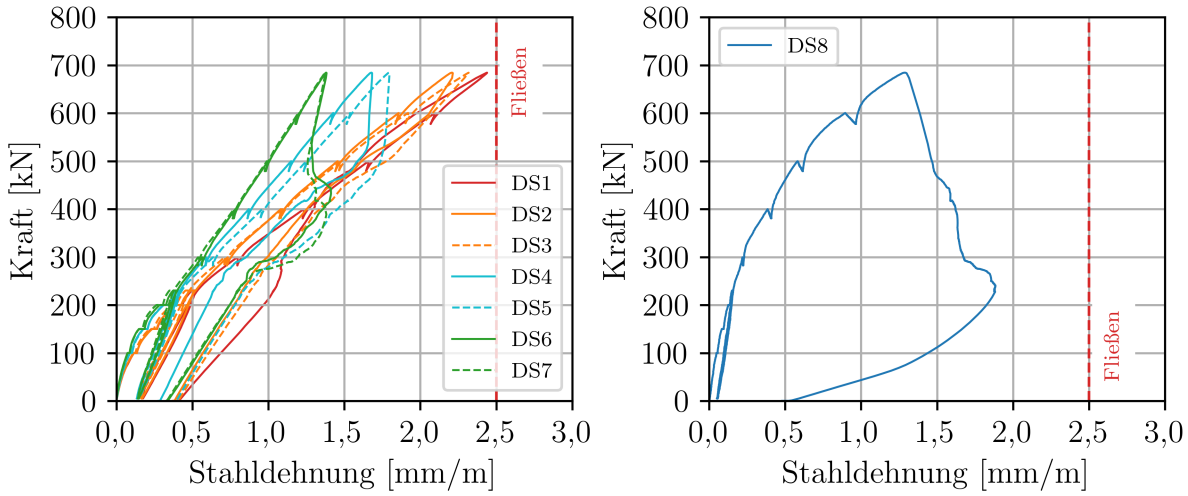

Abbildung D.28: V2 - Stahldehnungen DS1 - DS8

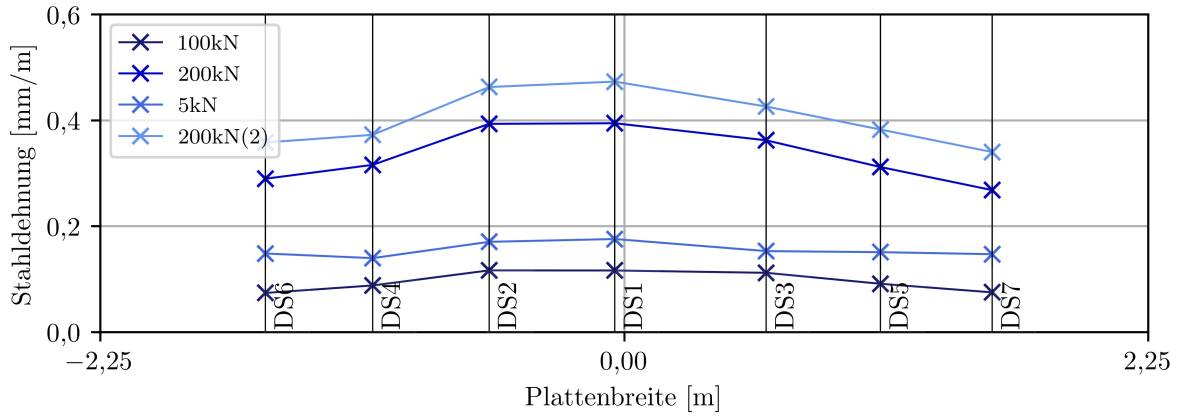

Abbildung D.29: V2 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Vorbelastung

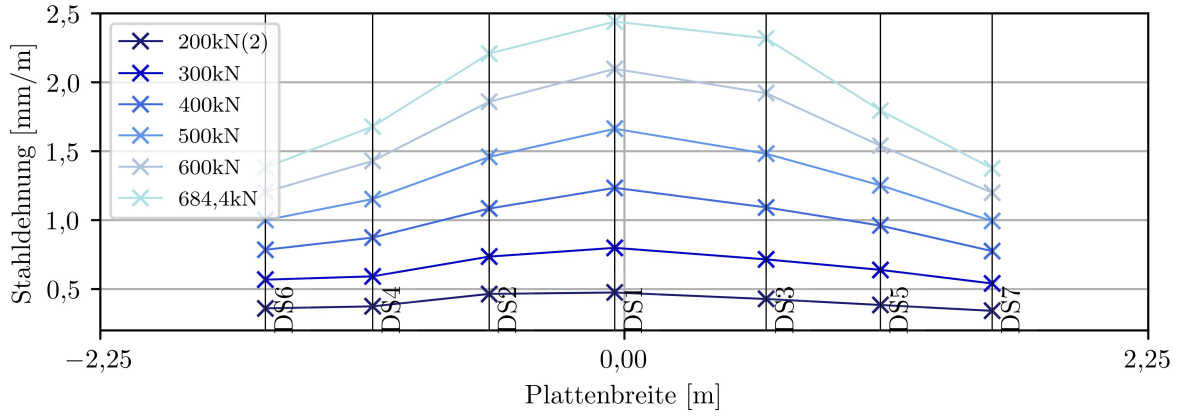

Abbildung D.30: V2 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - bis zur Traglast

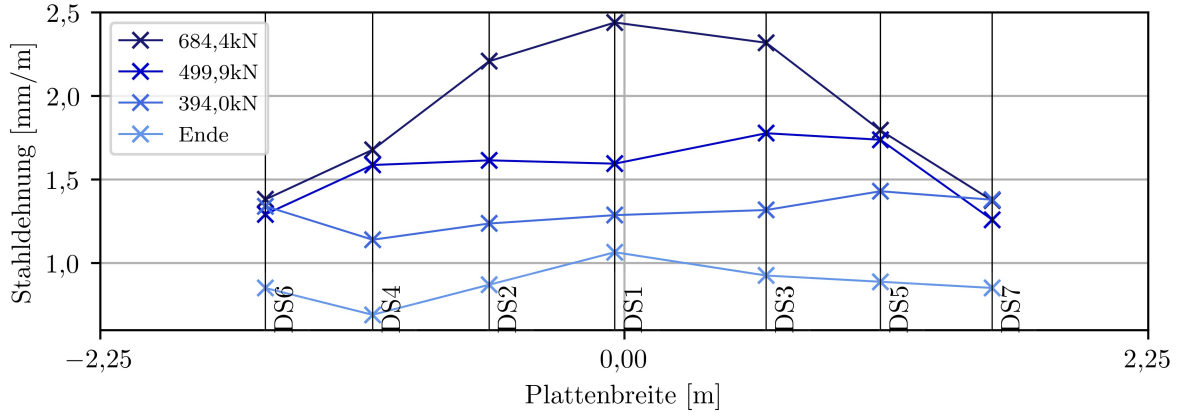

Abbildung D.31: V2 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Nachbruchverhalten

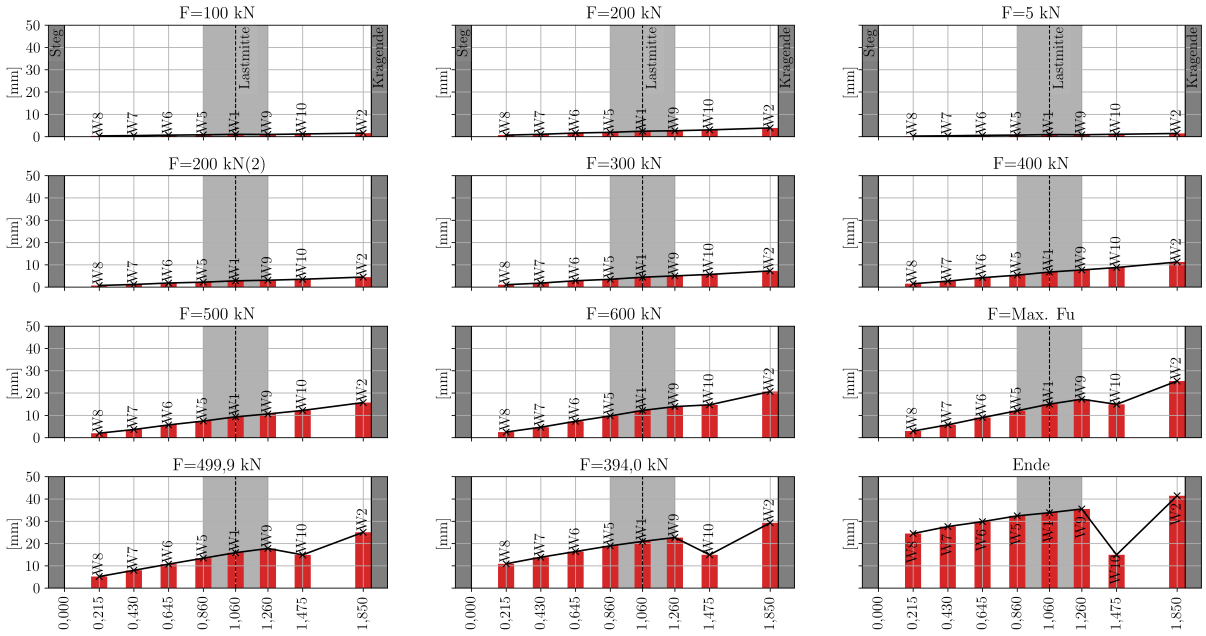

Abbildung D.32: V2 - Zeitabhängige Verformungen in Lastrichtung

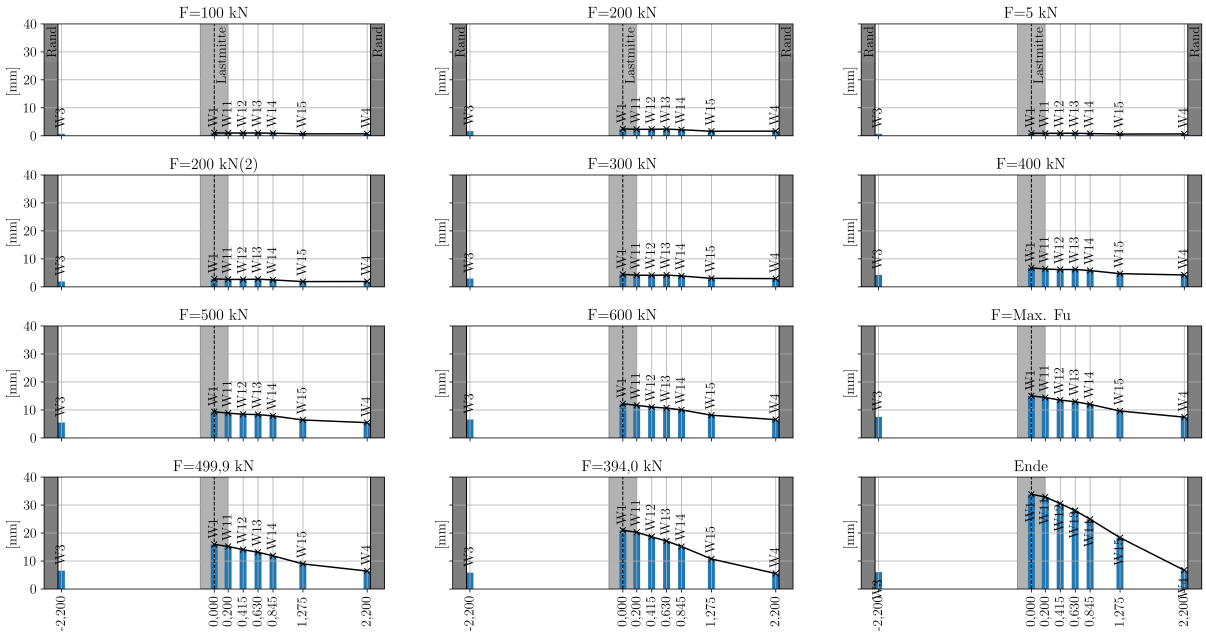

Abbildung D.33: V2 - Zeitabhängige Verformungen in der Lastachse

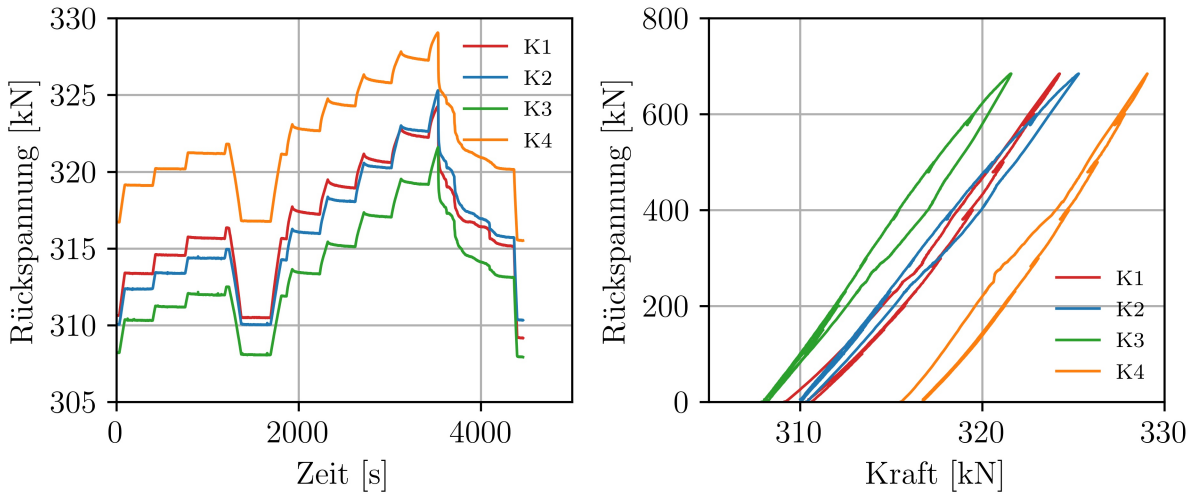

Abbildung D.34: V2 - Kräfte in der Rückspannung

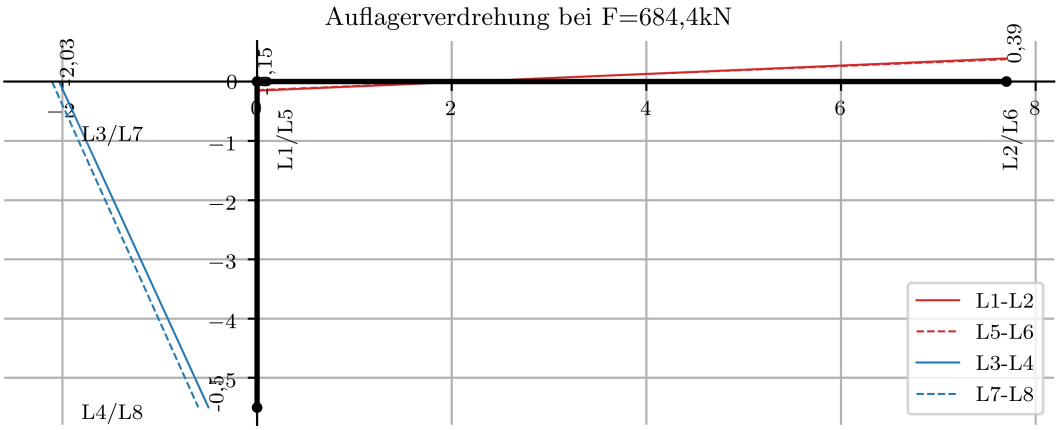

Abbildung D.35: V2 - Verdrehung bei max. Traglast F_u (Werte von L1 - L4)

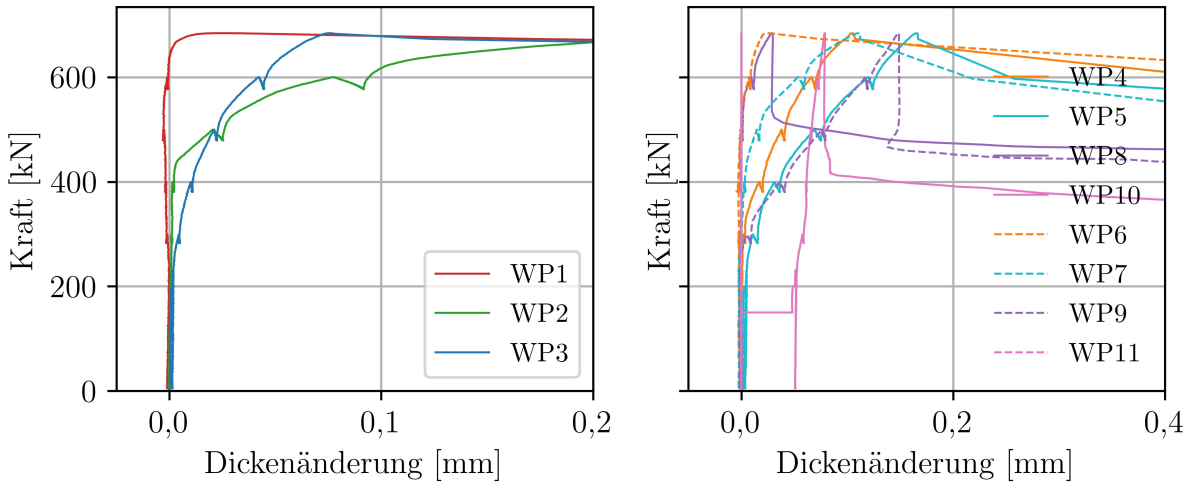

Abbildung D.36: V2 - Kraft - Dickenmessungen WP1 - WP11

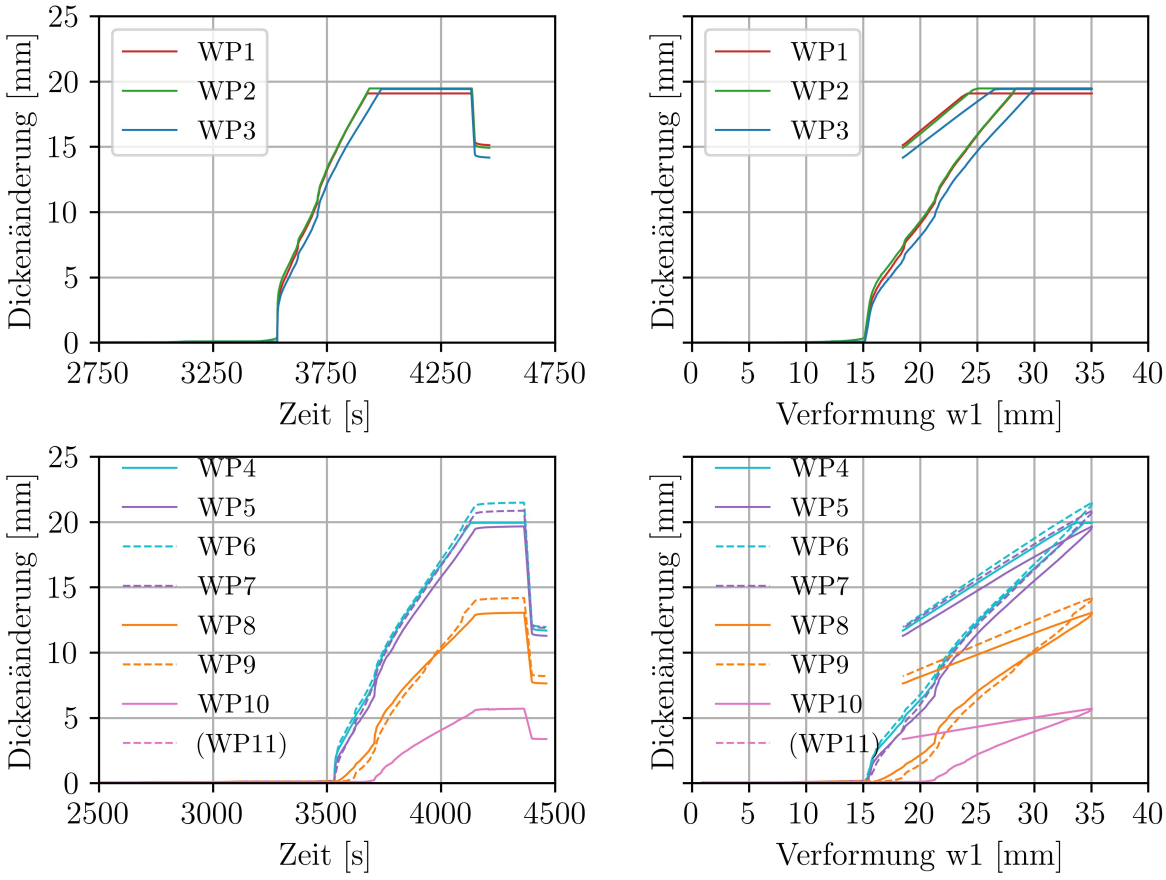

Abbildung D.37: V2 - Zeit/Verformung - Dickenmessungen WP1 - WP11

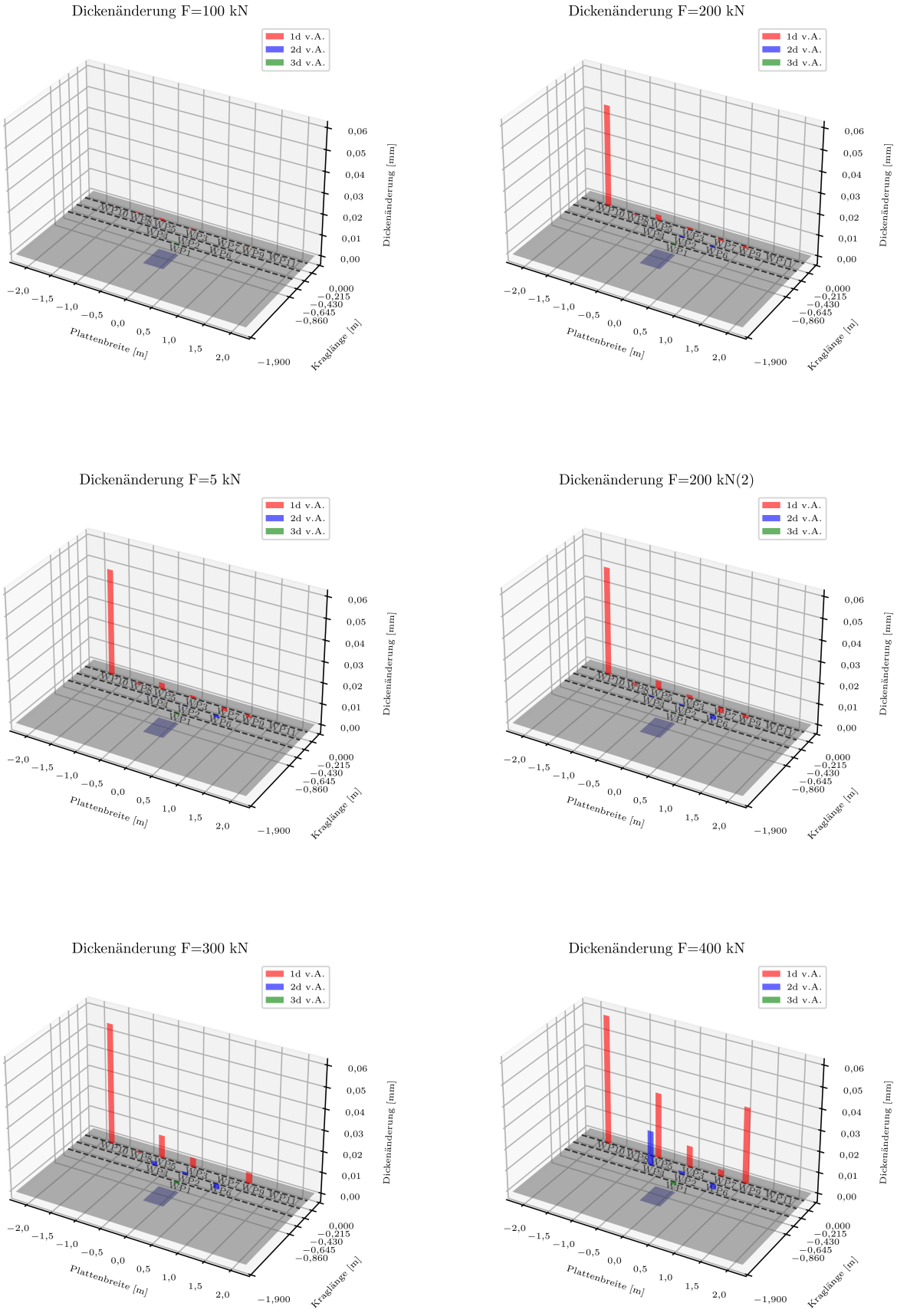

Abbildung D.38: V2 - Zeitabhängige Dickenmessungen in den ersten Laststufen

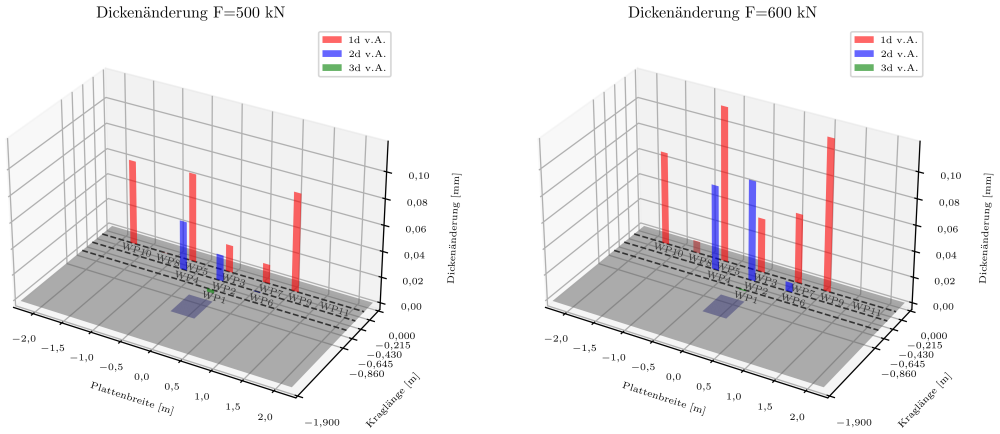

Abbildung D.39: V2 - Zeitabhängige Dickenmessungen bis zur Traglast

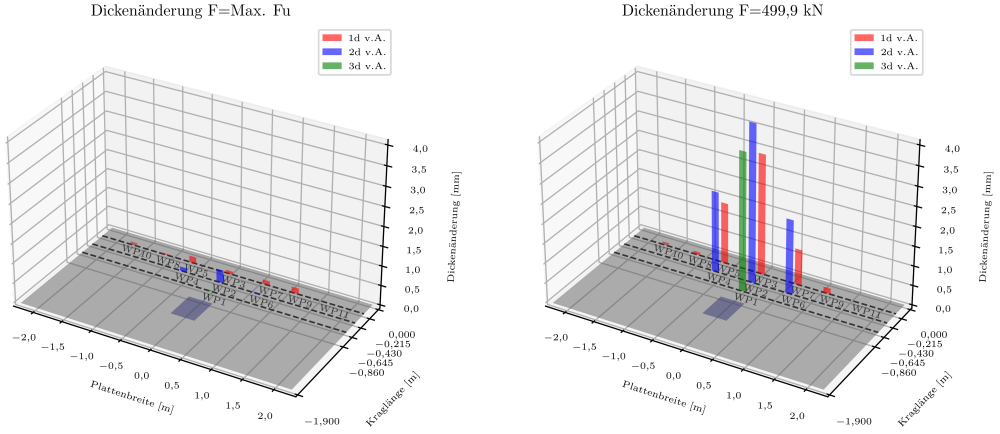

Abbildung D.40: V2 - Zeitabhängige Dickenmessungen nach dem Bruch

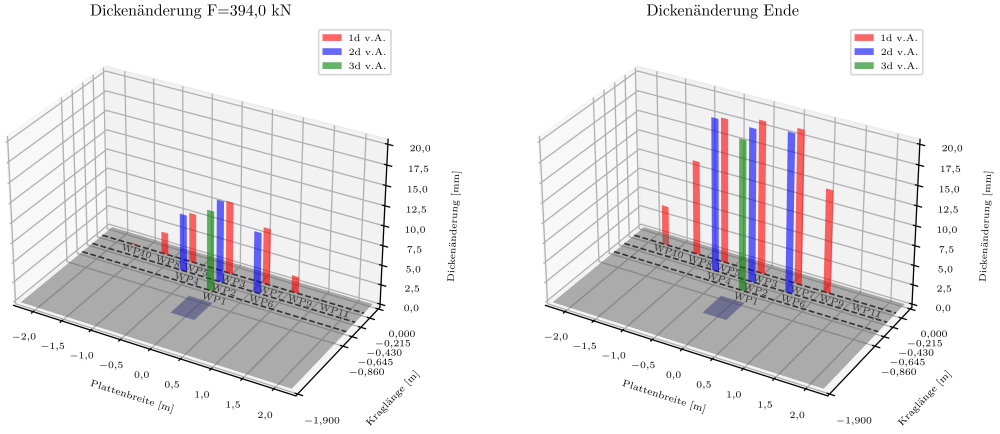

Abbildung D.41: V2 - Zeitabhängige Dickenmessungen nach dem Bruch(2)

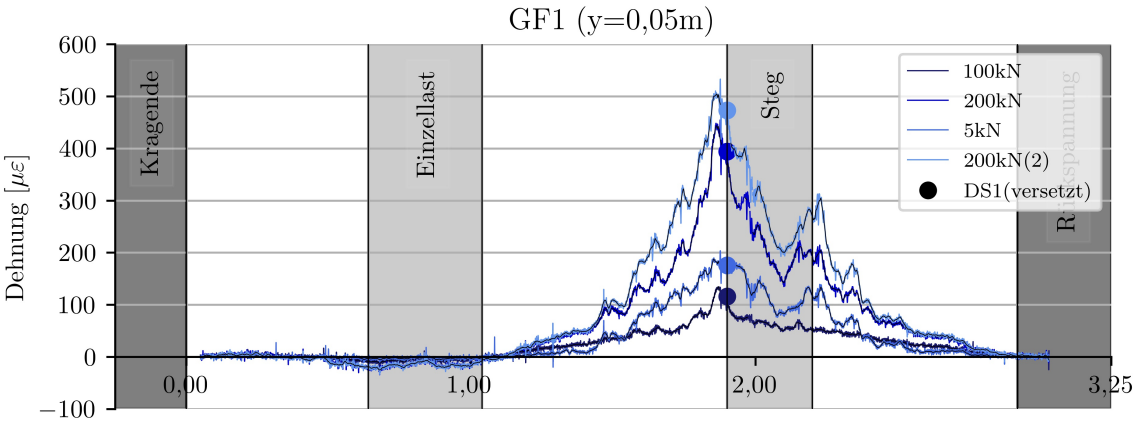

Abbildung D.42: V2 - Dehnung der Glasfaser GF1 während der Vorbelastung

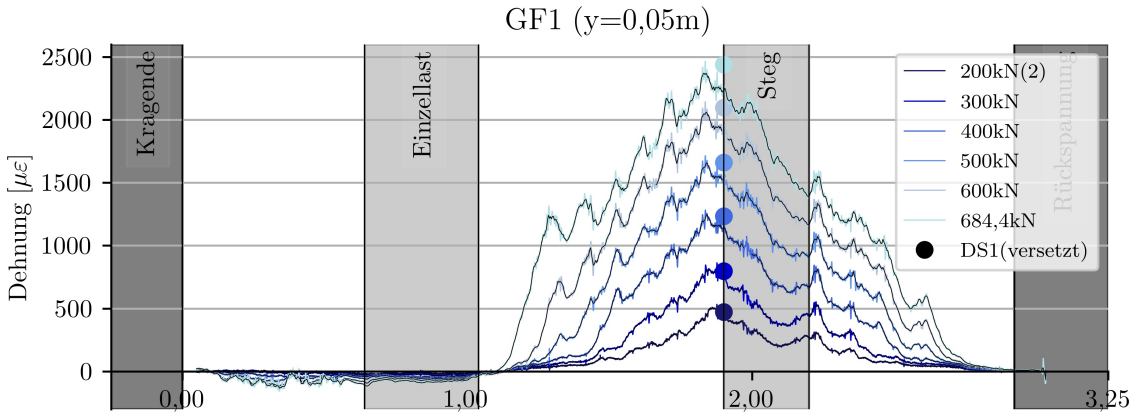

Abbildung D.43: V2 - Dehnung der Glasfaser GF1 bis zur Traglast

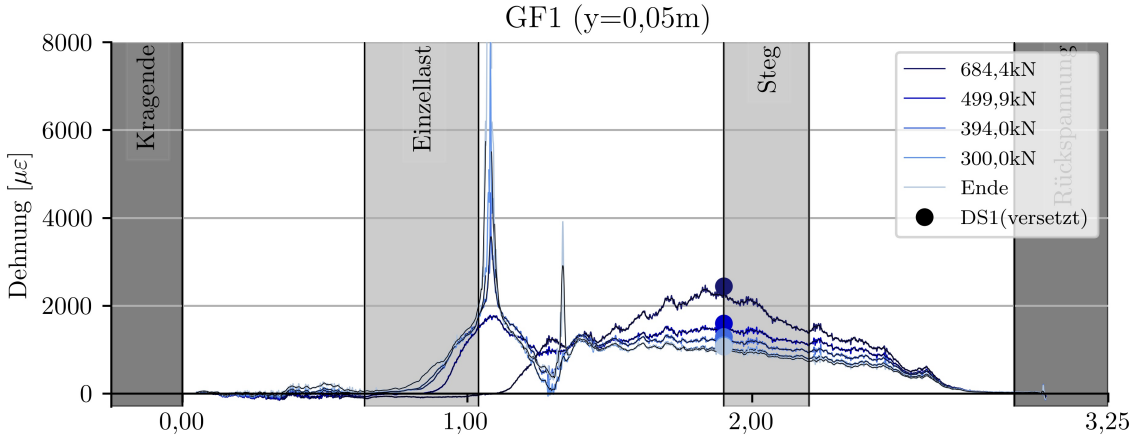

Abbildung D.44: V2 - Dehnung der Glasfaser GF1 nach dem Bruch

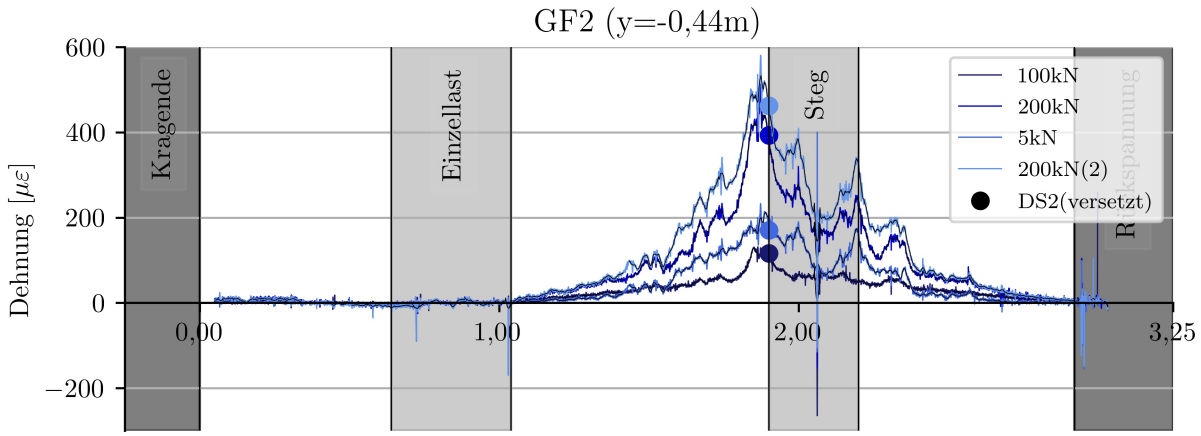

Abbildung D.45: V2 - Dehnung der Glasfaser GF2 während der Vorbelastung

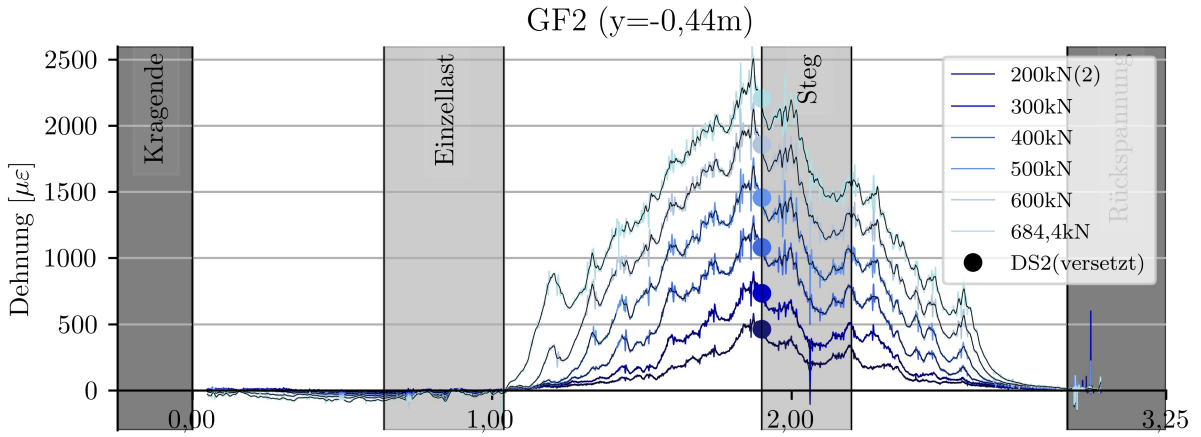

Abbildung D.46: V2 - Dehnung der Glasfaser GF2 bis zur Traglast

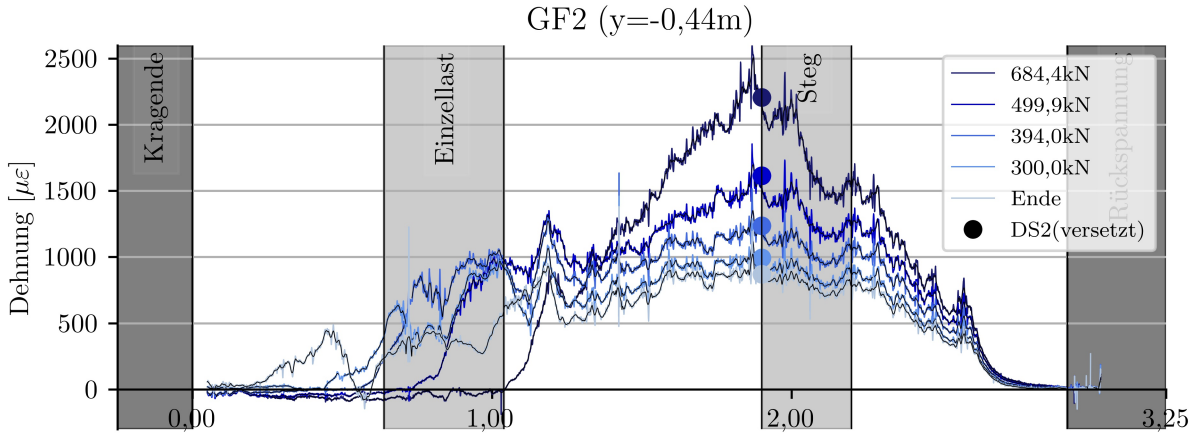

Abbildung D.47: V2 - Dehnung der Glasfaser GF2 nach dem Bruch

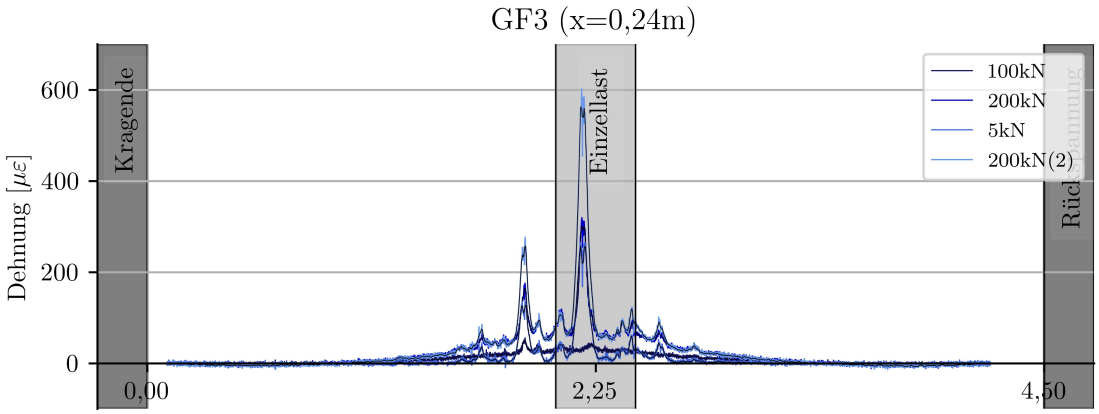

Abbildung D.48: V2 - Dehnung der Glasfaser GF3 während der Vorbelastung

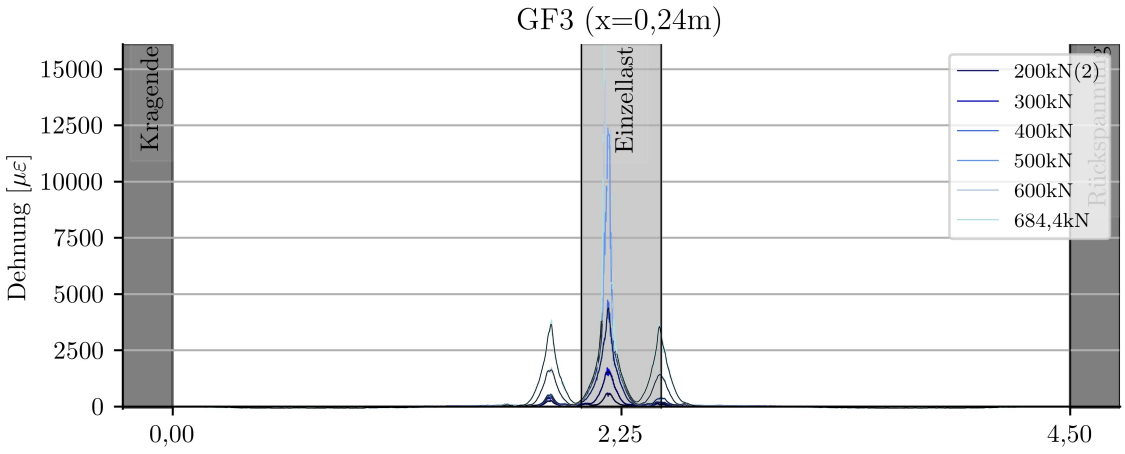

Abbildung D.49: V2 - Dehnung der Glasfaser GF3 bis zur Traglast

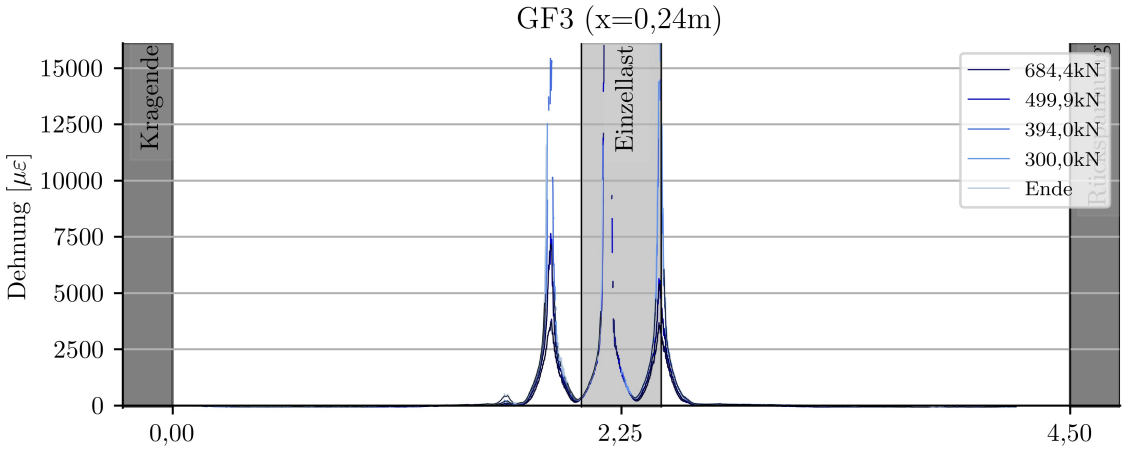

Abbildung D.50: V2 - Dehnung der Glasfaser GF3 nach dem Bruch

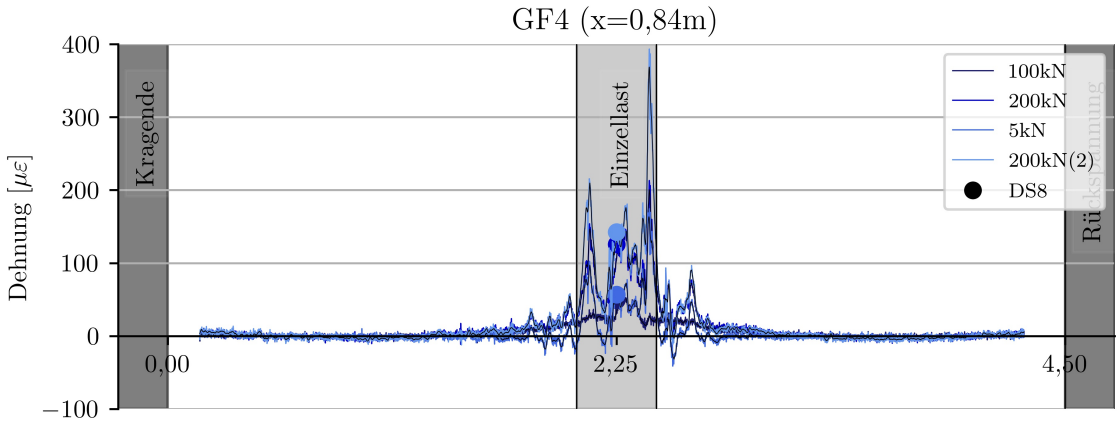

Abbildung D.51: V2 - Dehnung der Glasfaser GF4 während der Vorbelastung

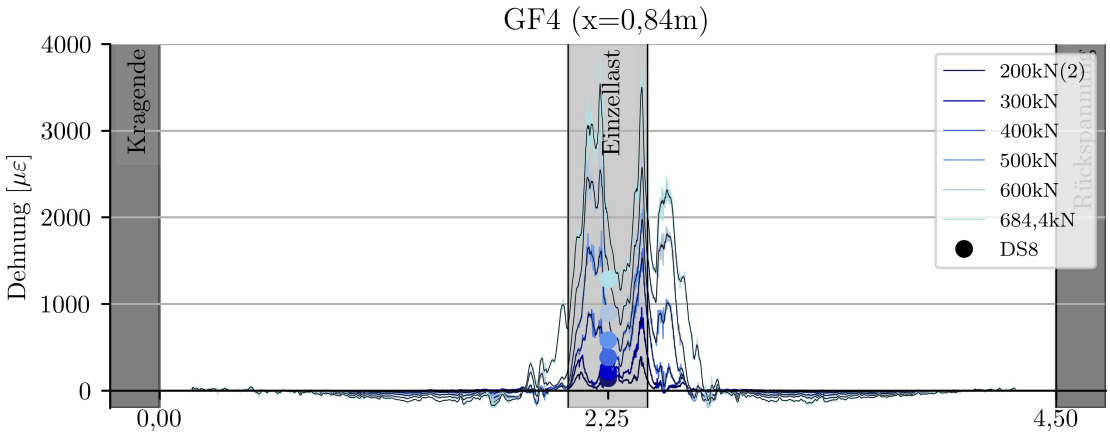

Abbildung D.52: V2 - Dehnung der Glasfaser GF4 bis zur Traglast

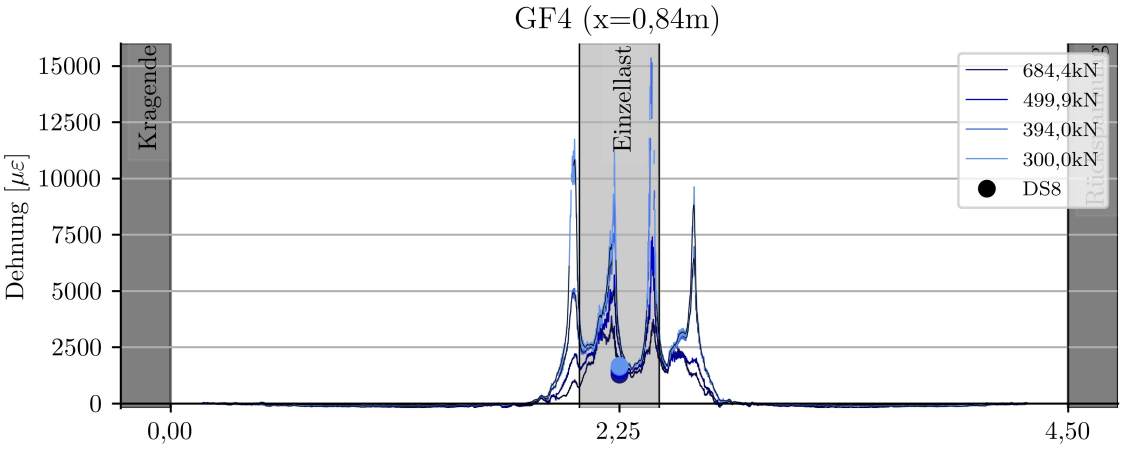

Abbildung D.53: V2 - Dehnung der Glasfaser GF4 nach dem Bruch

D.3 Versuch V3/4d-FL

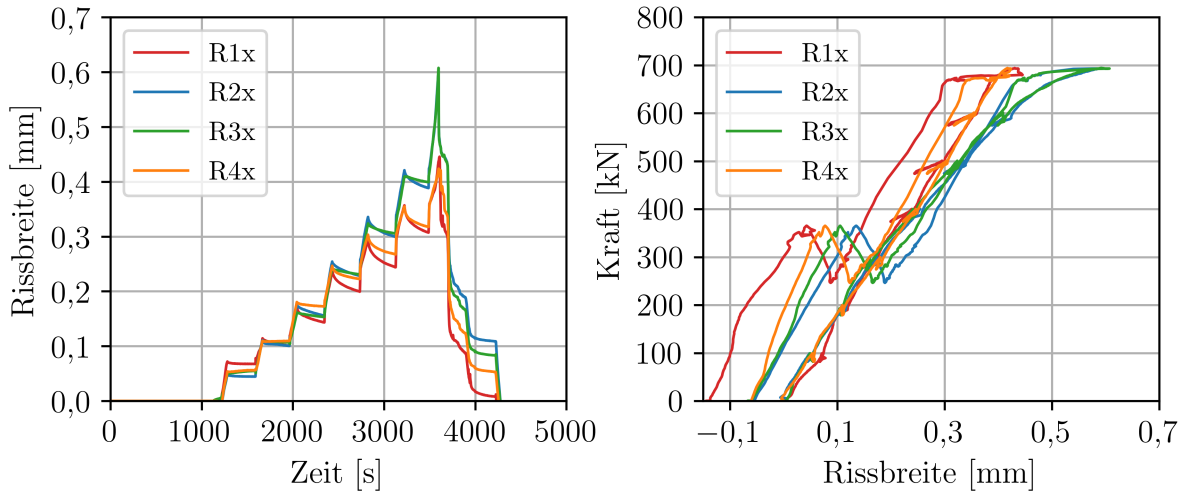

Abbildung D.54: V3 - Rissöffnungen R1x - R4x

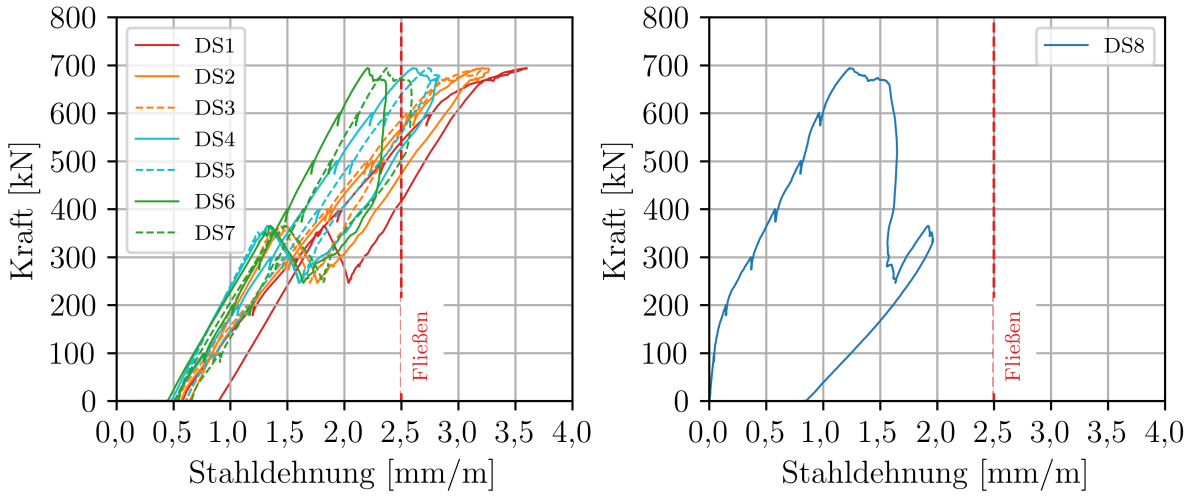

Abbildung D.55: V3 - Stahldehnungen DS1 - DS8

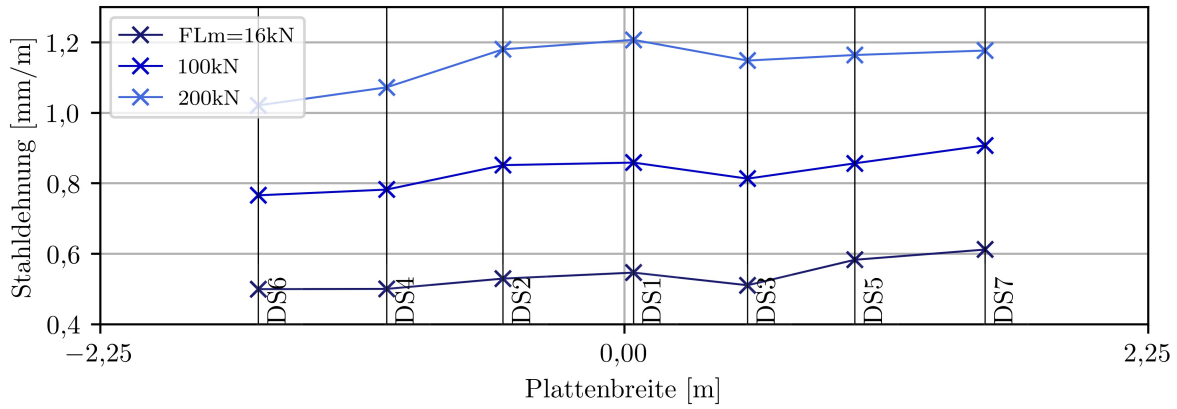

Abbildung D.56: V3 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Vorbelastung

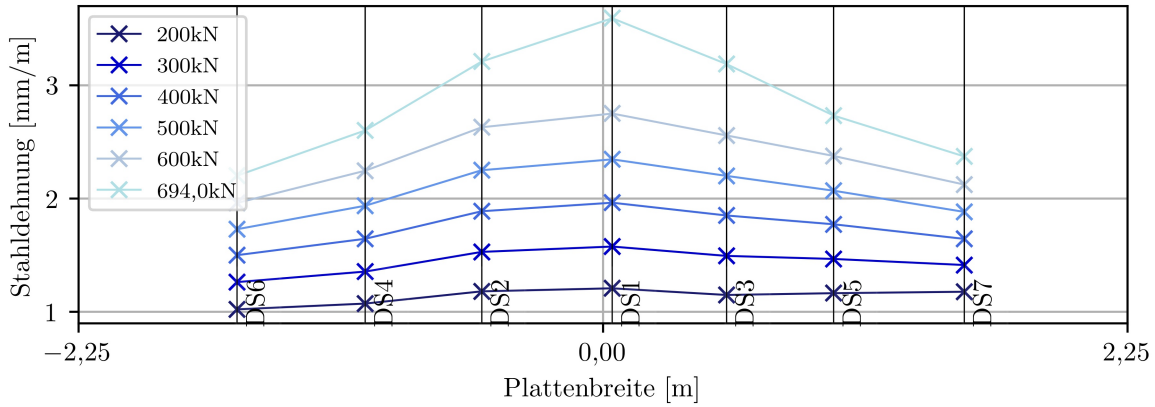

Abbildung D.57: V3 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - bis zur Traglast

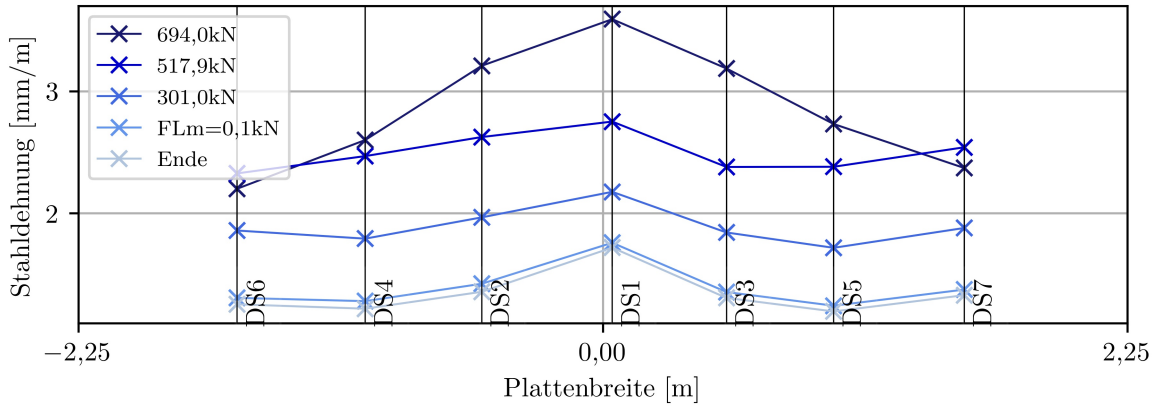

Abbildung D.58: V3 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Nachbruchverhalten

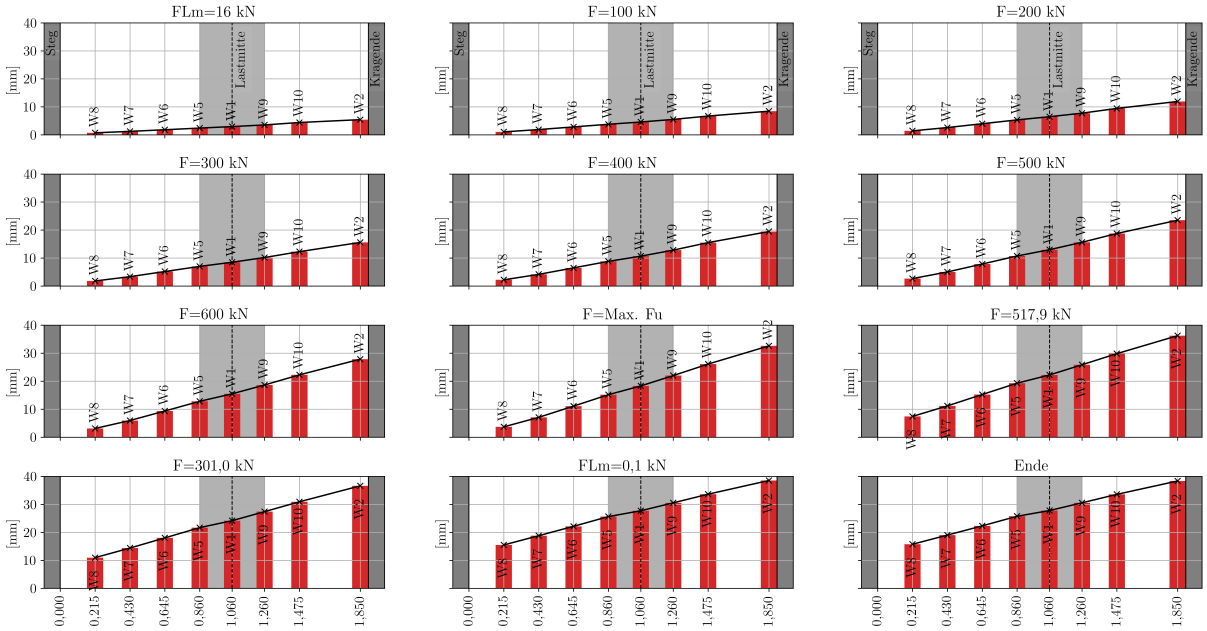

Abbildung D.59: V3 - Zeitabhängige Verformungen in Lastrichtung

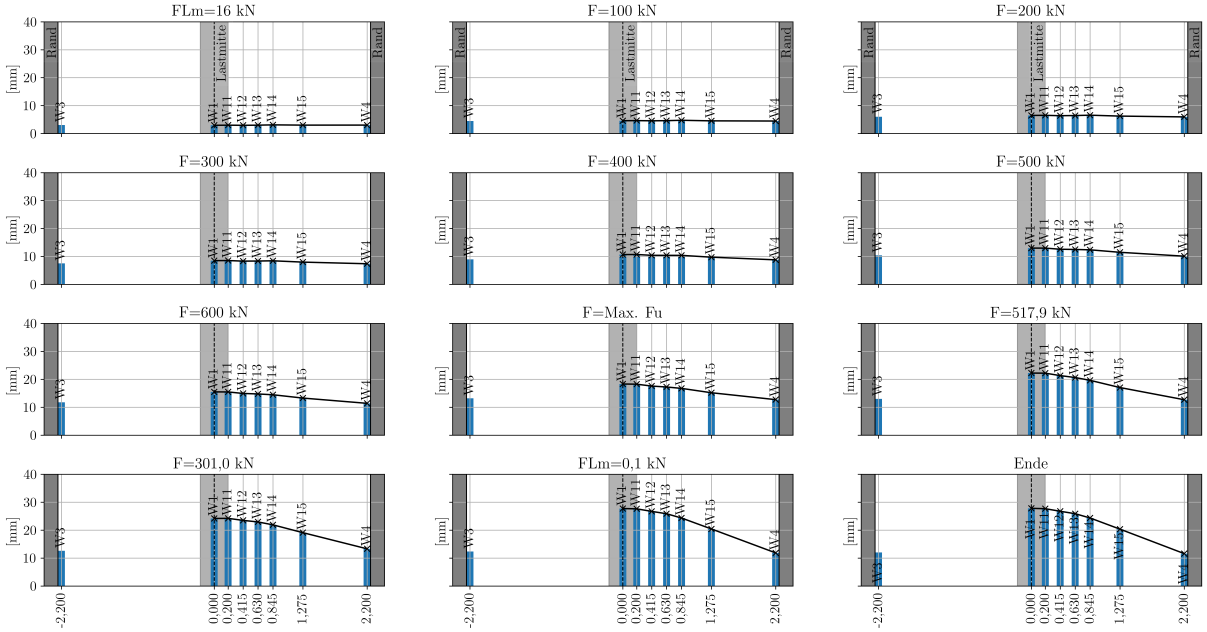

Abbildung D.60: V3 - Zeitabhängige Verformungen in der Lastachse

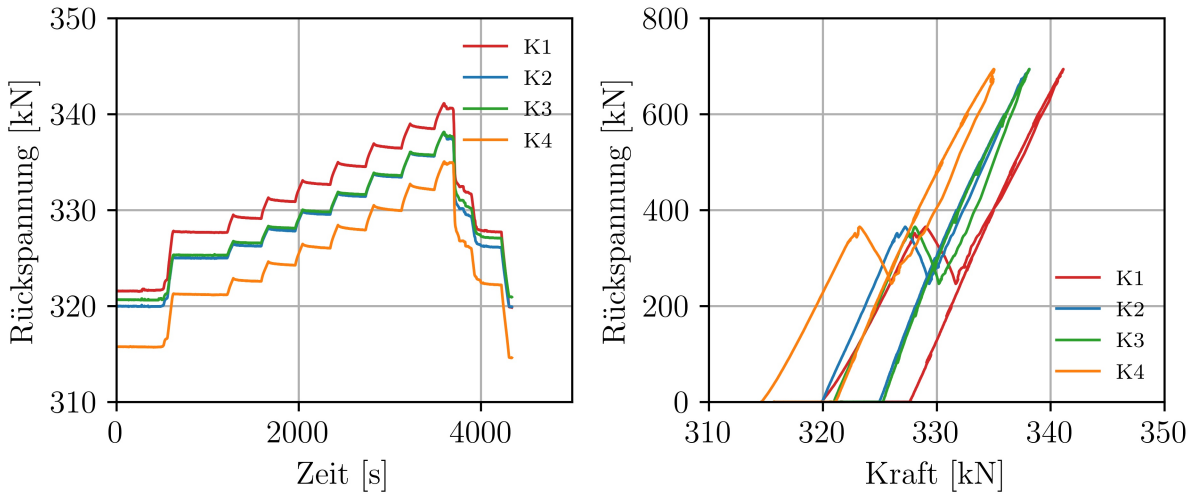

Abbildung D.61: V3 - Kräfte in der Rückspannung

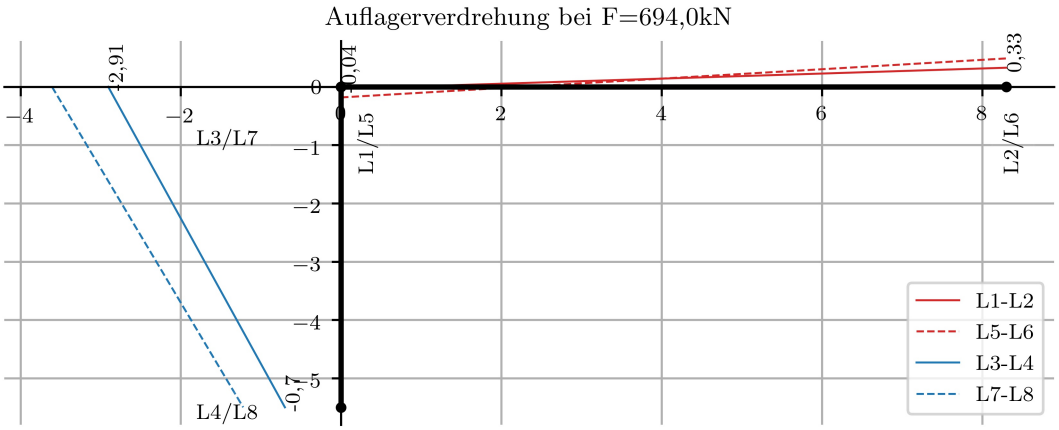

Abbildung D.62: V3 - Verdrehung bei max. Traglast F_u (Werte von L1 - L4)

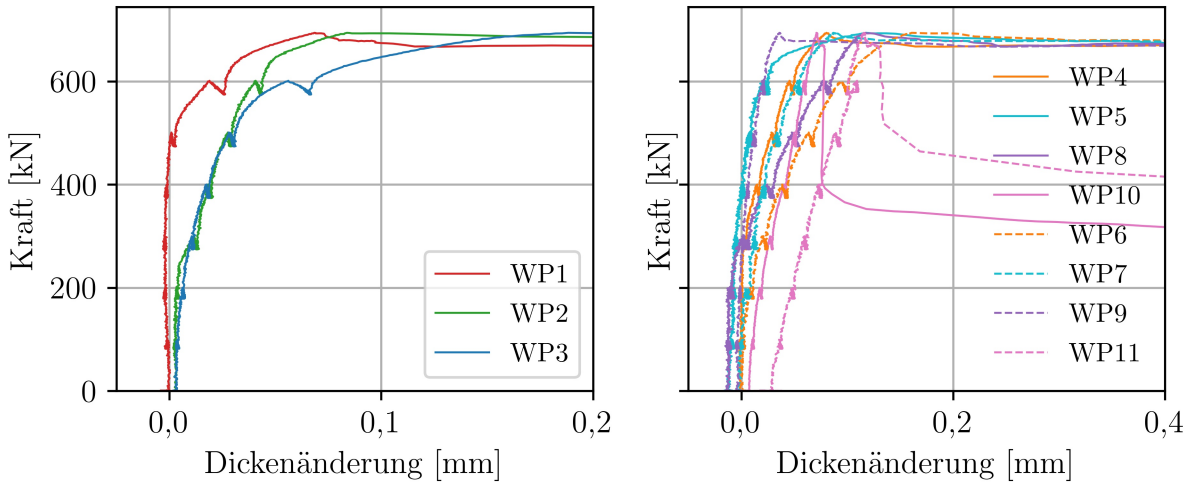

Abbildung D.63: V3 - Kraft - Dickenmessungen WP1 - WP11

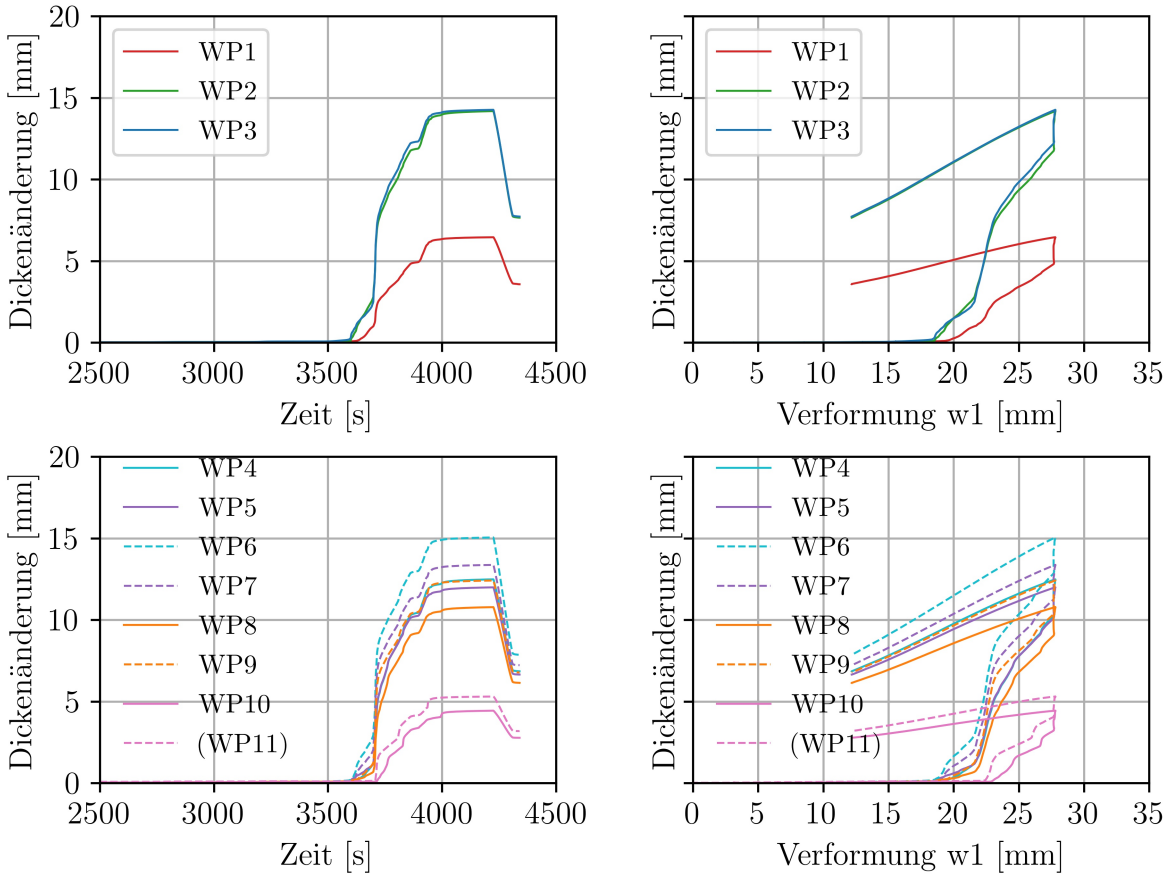

Abbildung D.64: V3 - Zeit/Verformung - Dickenmessungen WP1 - WP11

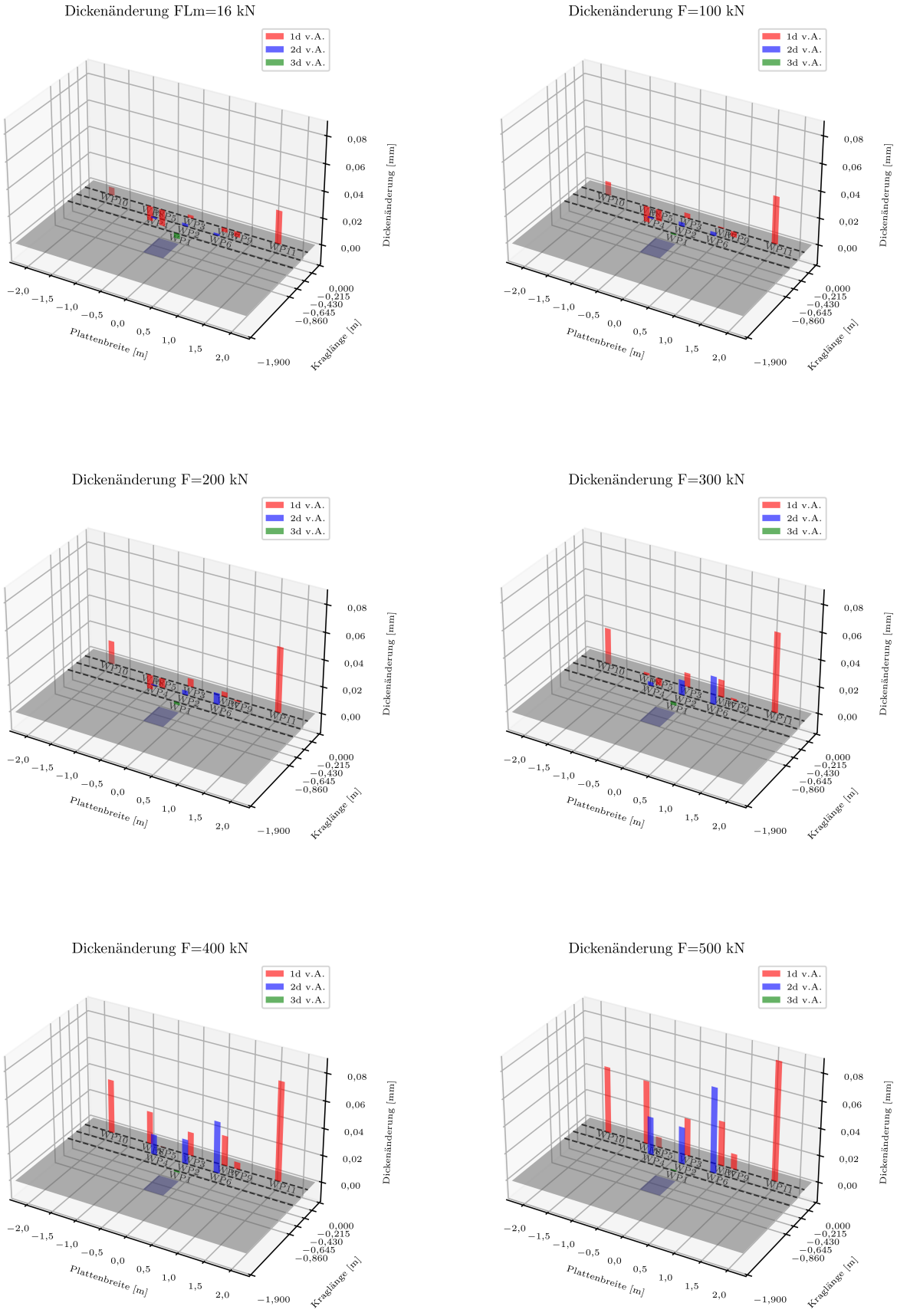

Abbildung D.65: V3 - Zeitabhängige Dickenmessungen in den ersten Laststufen

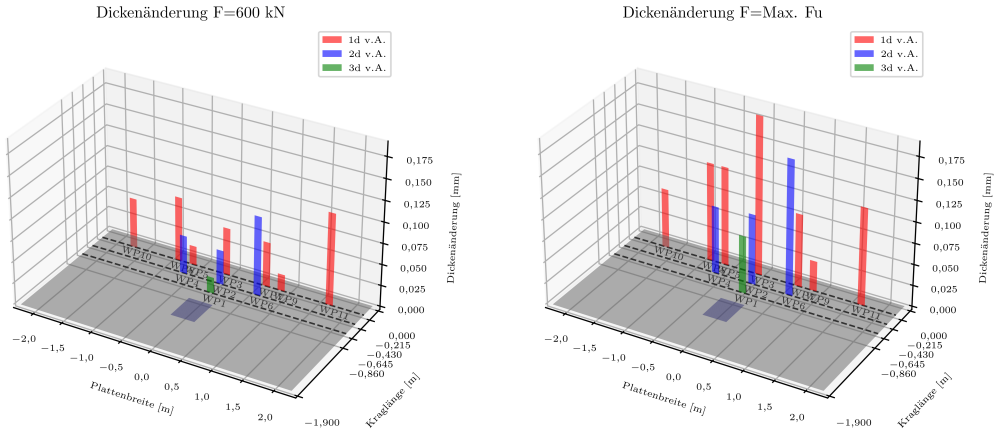

Abbildung D.66: V3 - Zeitabhängige Dickenmessungen bis zur Traglast

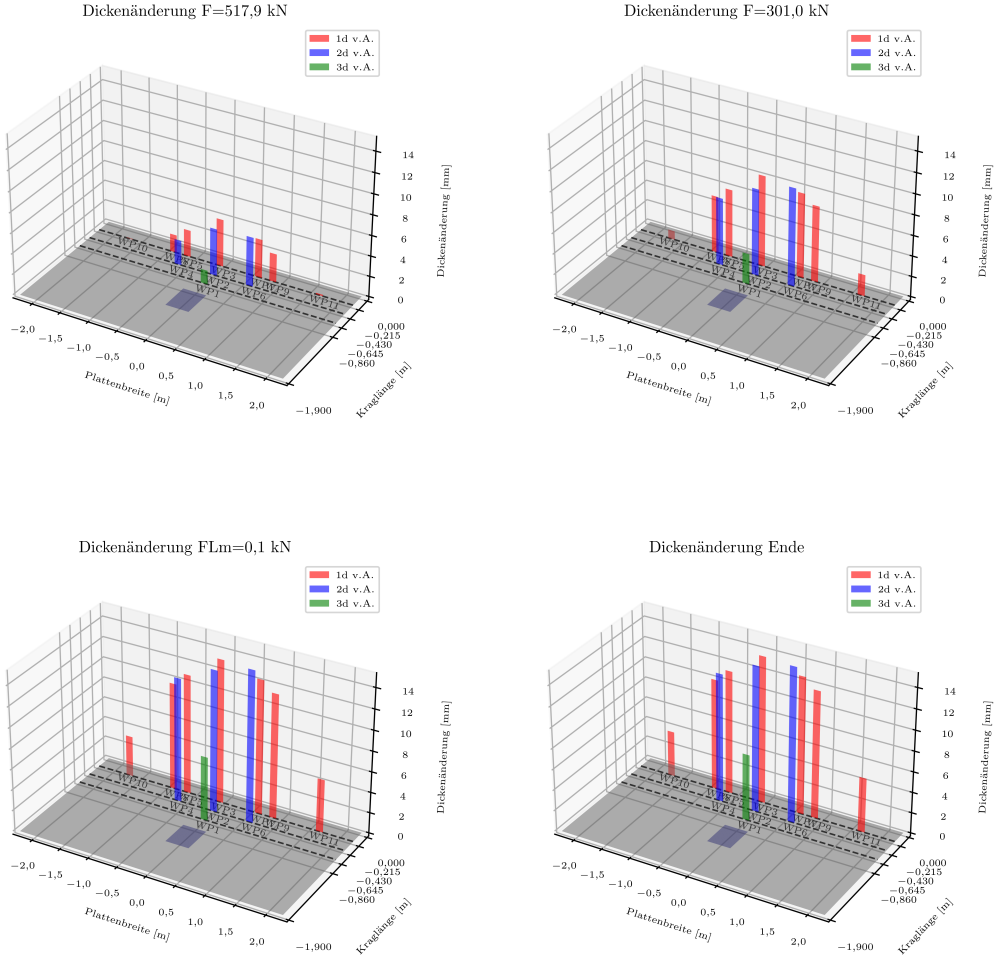

Abbildung D.67: V3 - Zeitabhängige Dickenmessungen nach dem Bruch

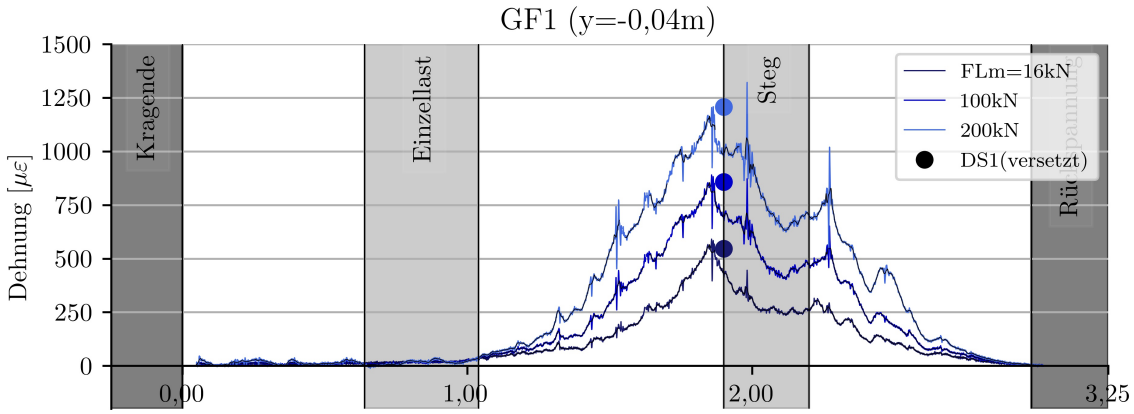

Abbildung D.68: V3 - Dehnung der Glasfaser GF1 während der Vorbelastung

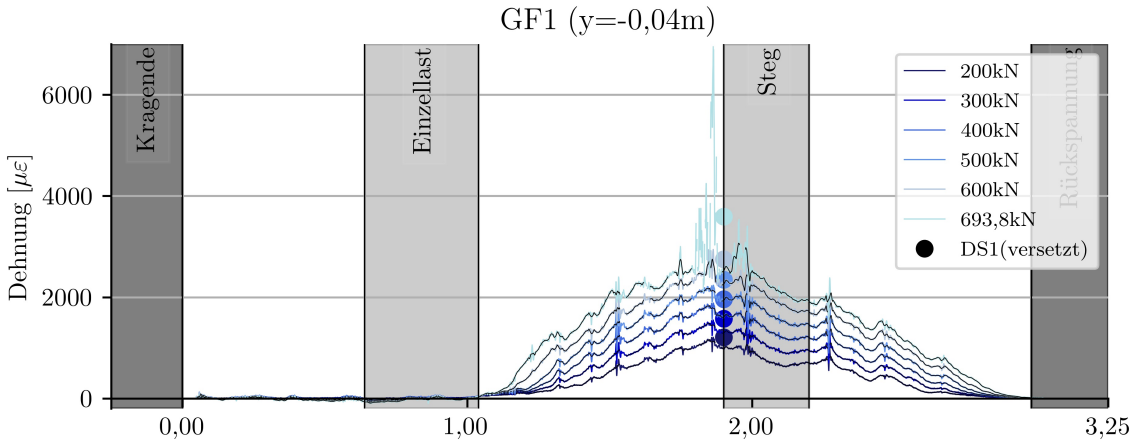

Abbildung D.69: V3 - Dehnung der Glasfaser GF1 bis zur Traglast

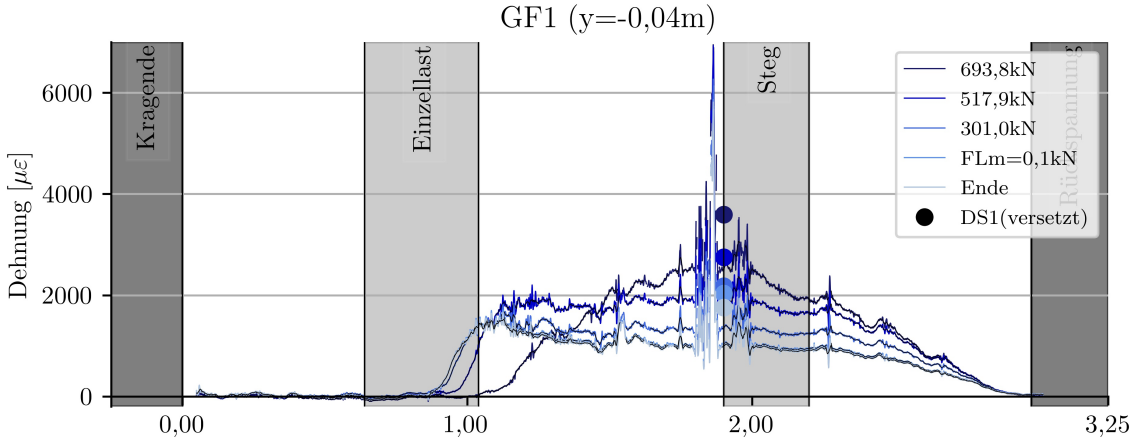

Abbildung D.70: V3 - Dehnung der Glasfaser GF1 nach dem Bruch

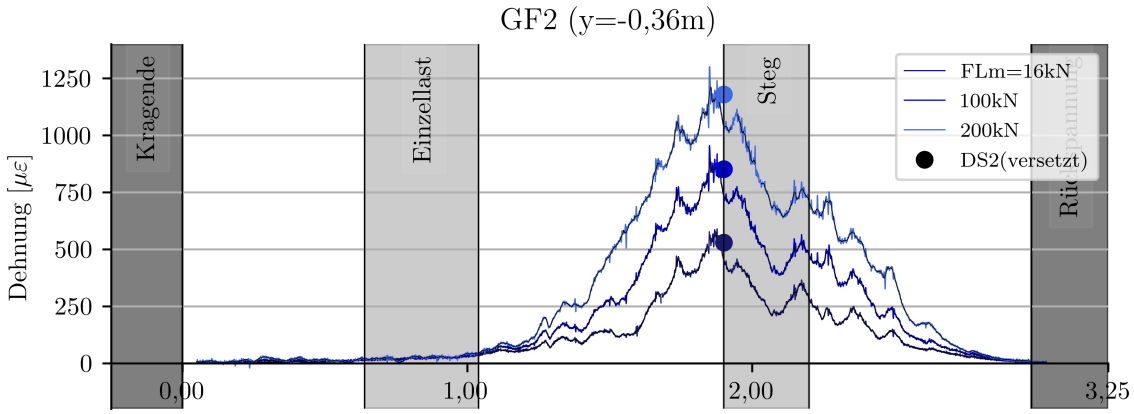

Abbildung D.71: V3 - Dehnung der Glasfaser GF2 während der Vorbelastung

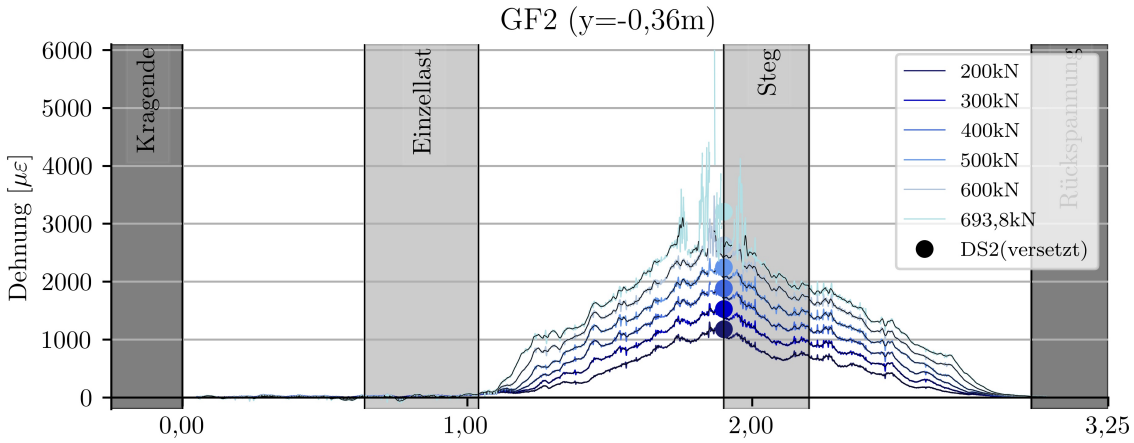

Abbildung D.72: V3 - Dehnung der Glasfaser GF2 bis zur Traglast

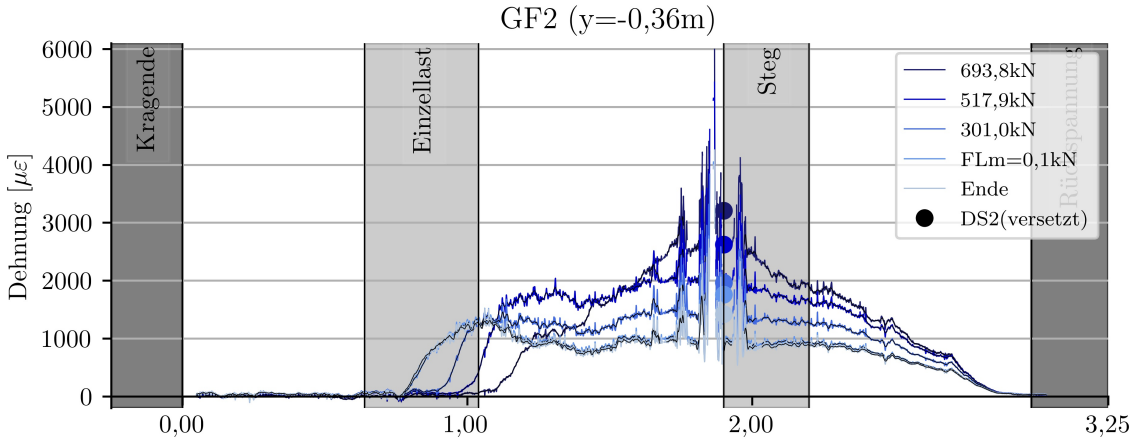

Abbildung D.73: V3 - Dehnung der Glasfaser GF2 nach dem Bruch

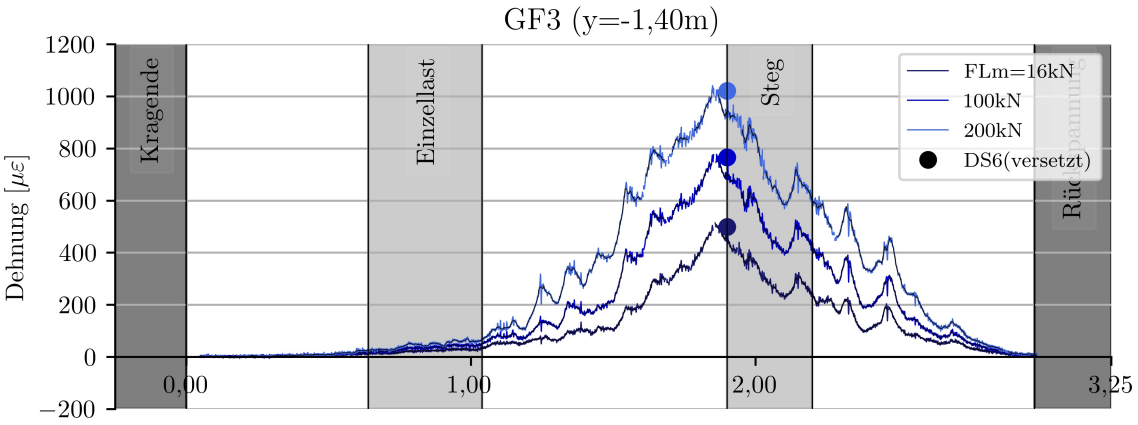

Abbildung D.74: V3 - Dehnung der Glasfaser GF3 während der Vorbelastung

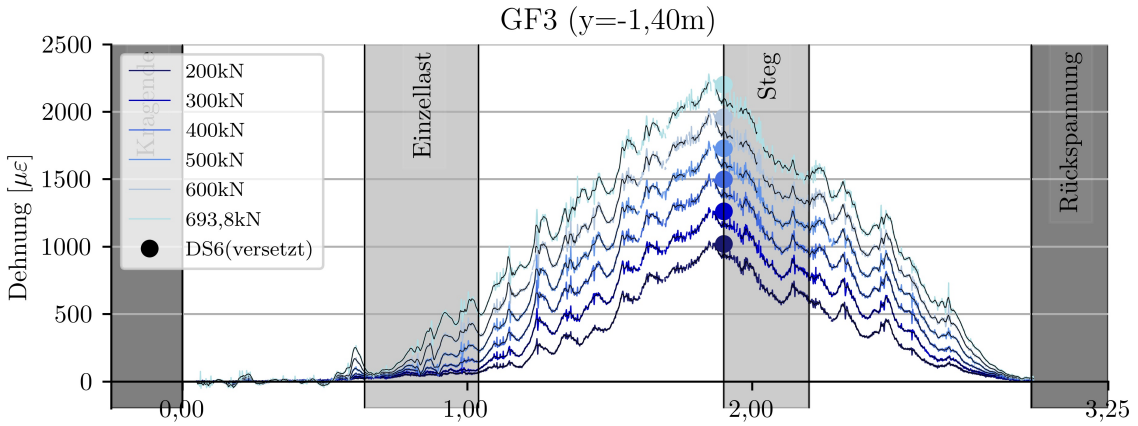

Abbildung D.75: V3 - Dehnung der Glasfaser GF3 bis zur Traglast

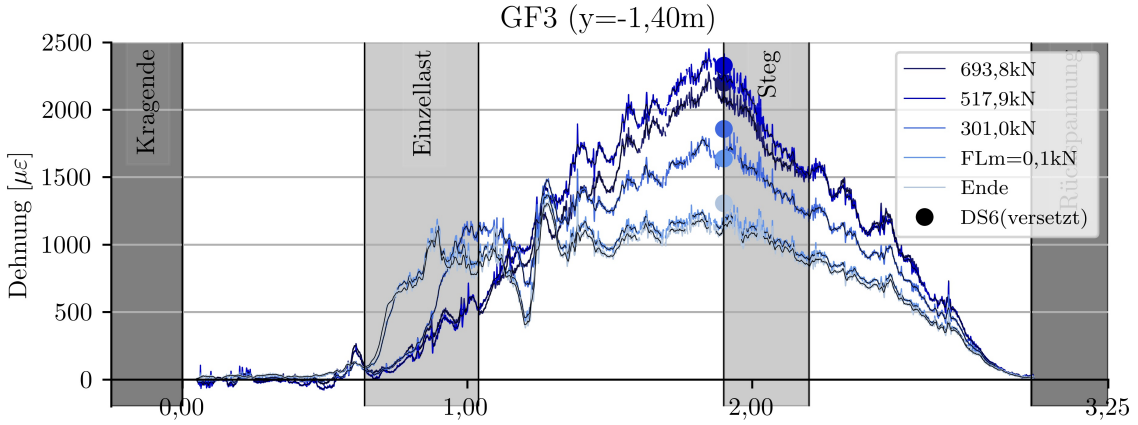

Abbildung D.76: V3 - Dehnung der Glasfaser GF3 nach dem Bruch

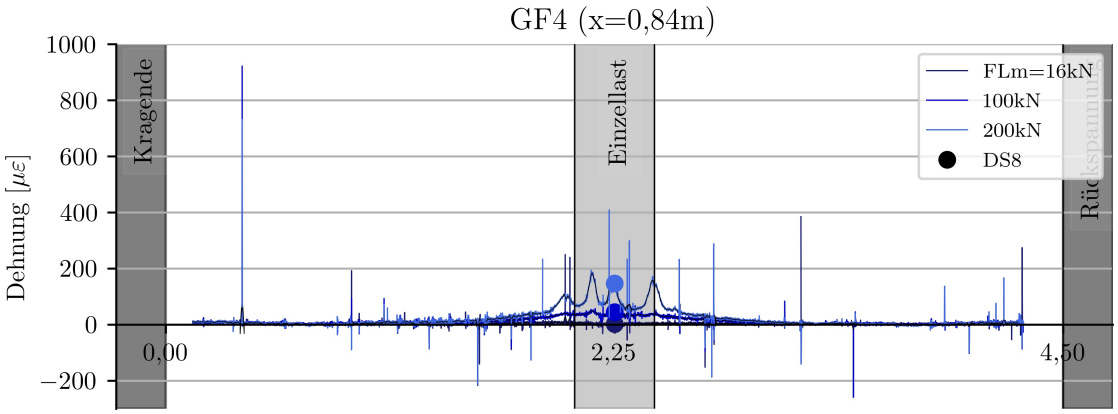

Abbildung D.77: V3 - Dehnung der Glasfaser GF4 während der Vorbelastung

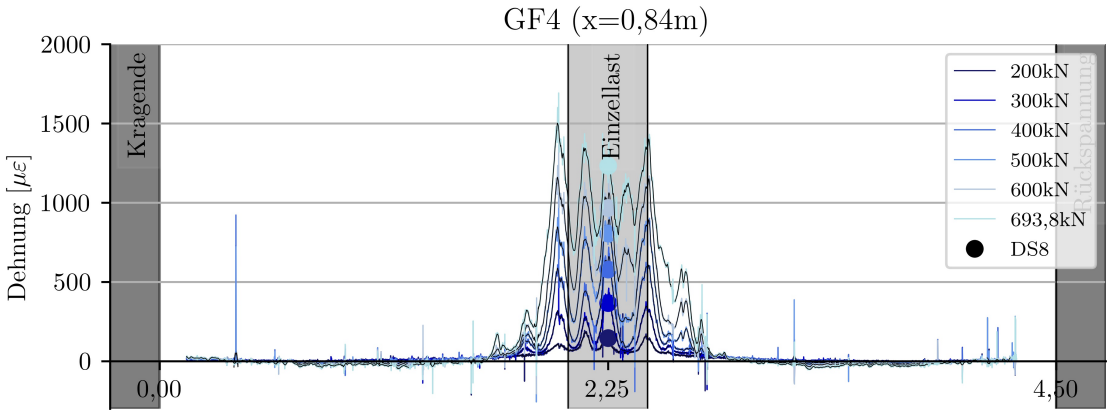

Abbildung D.78: V3 - Dehnung der Glasfaser GF4 bis zur Traglast

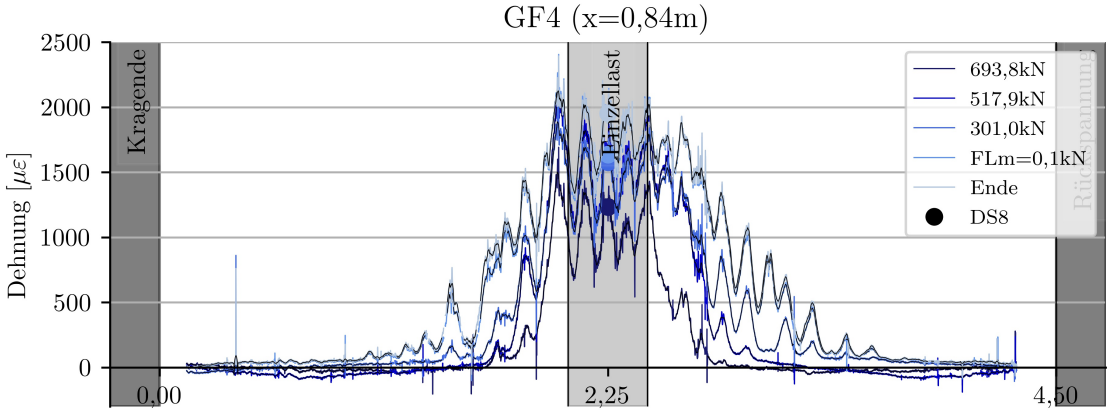

Abbildung D.79: V3 - Dehnung der Glasfaser GF4 nach dem Bruch

D.4 Versuch V4/5d-FL

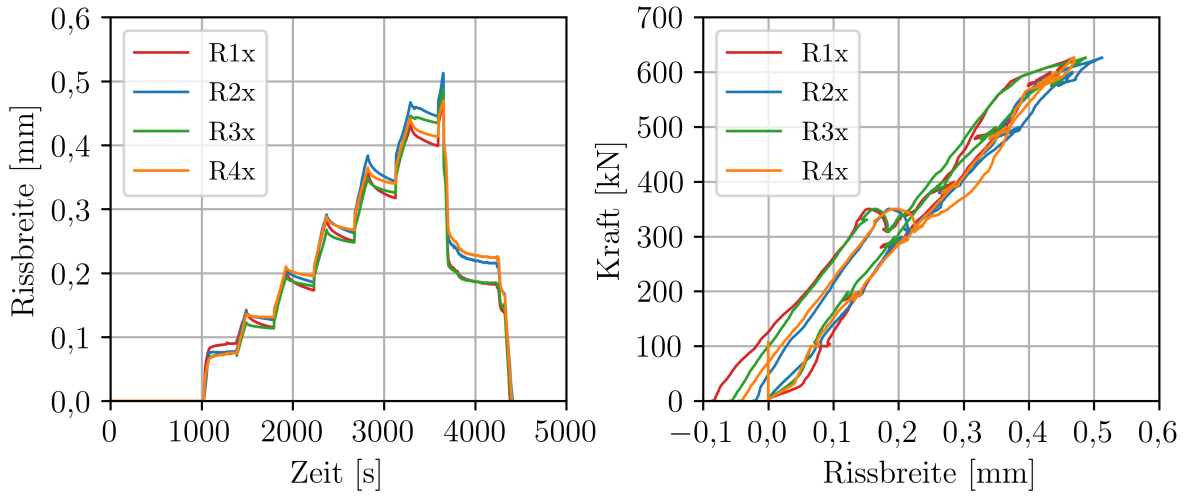

Abbildung D.80: V4 - Rissöffnungen R1x - R4x

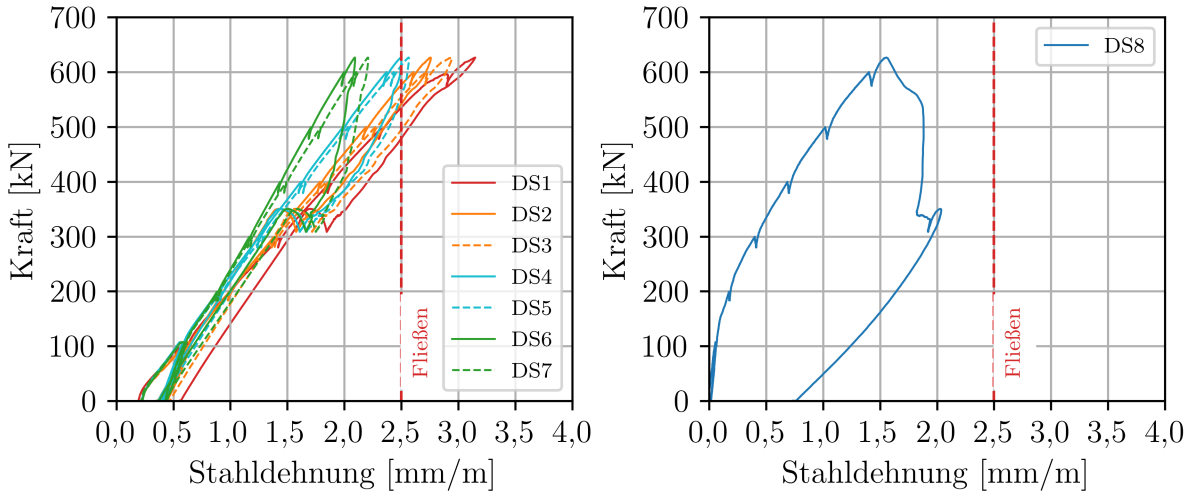

Abbildung D.81: V4 - Stahldehnungen DS1 - DS8

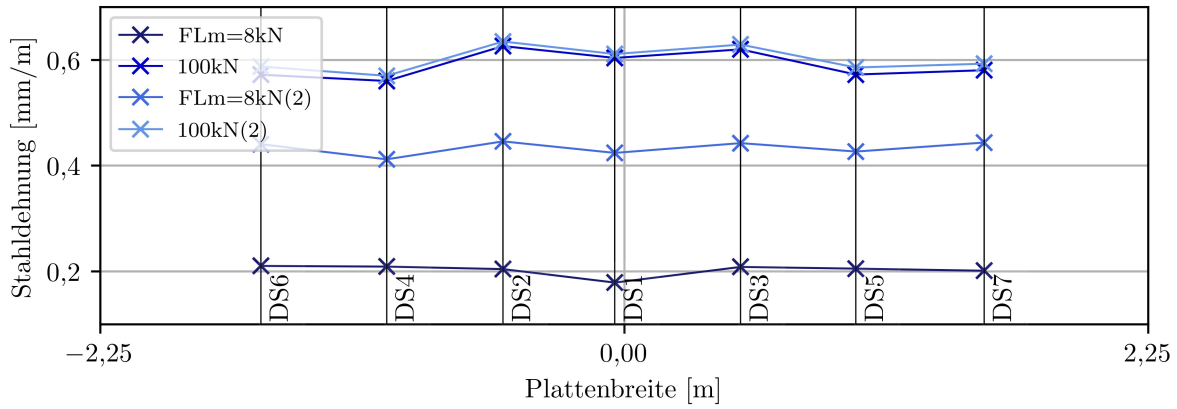

Abbildung D.82: V4 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Vorbelastung

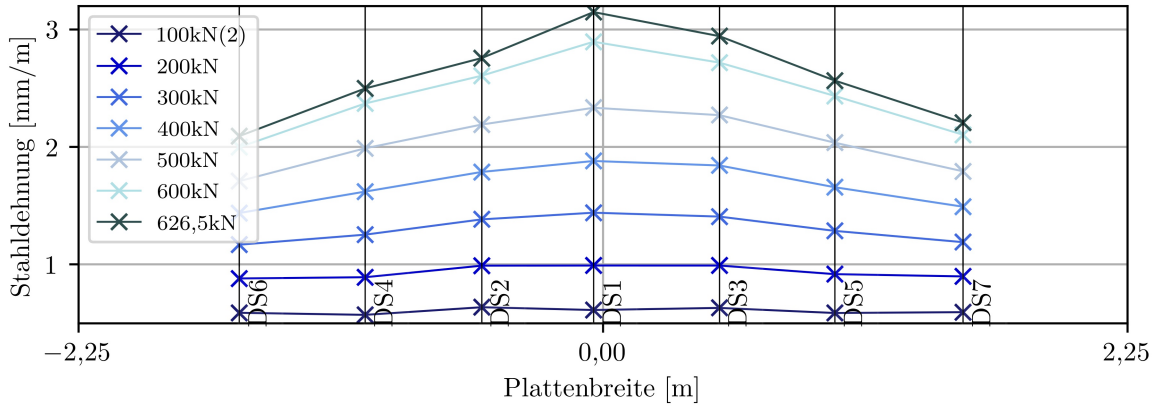

Abbildung D.83: V4 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - bis zur Traglast

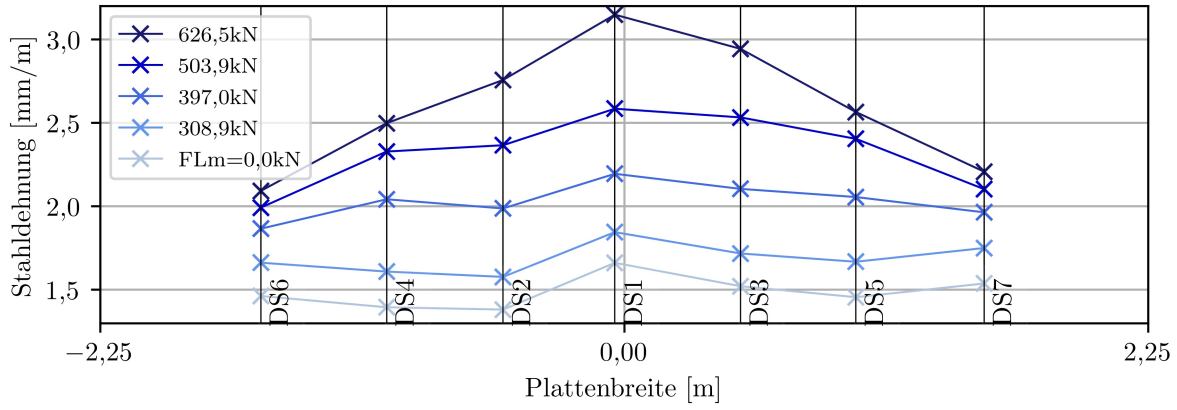

Abbildung D.84: V4 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Nachbruchverhalten

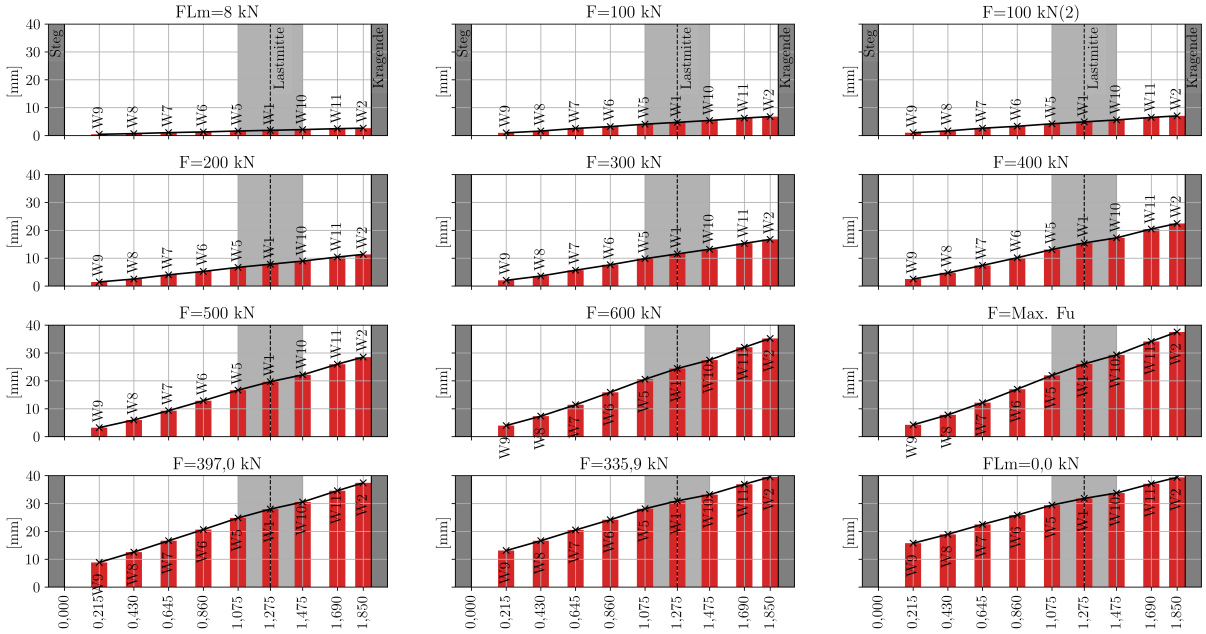

Abbildung D.85: V4 - Zeitabhängige Verformungen in Lastrichtung

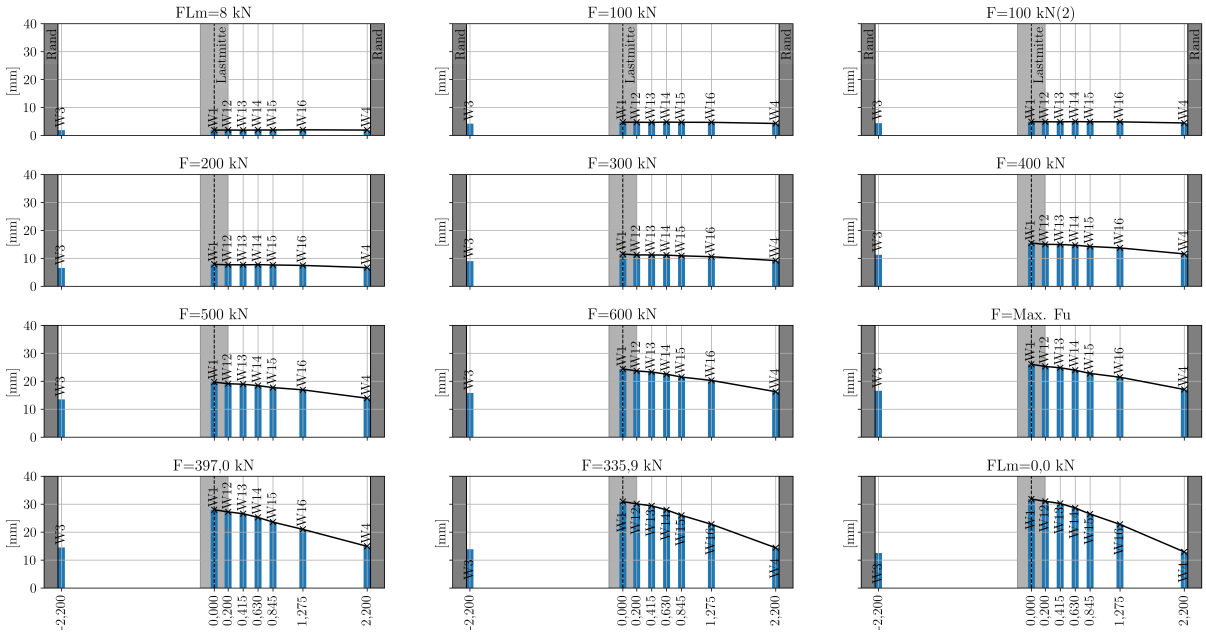

Abbildung D.86: V4 - Zeitabhängige Verformungen in der Lastachse

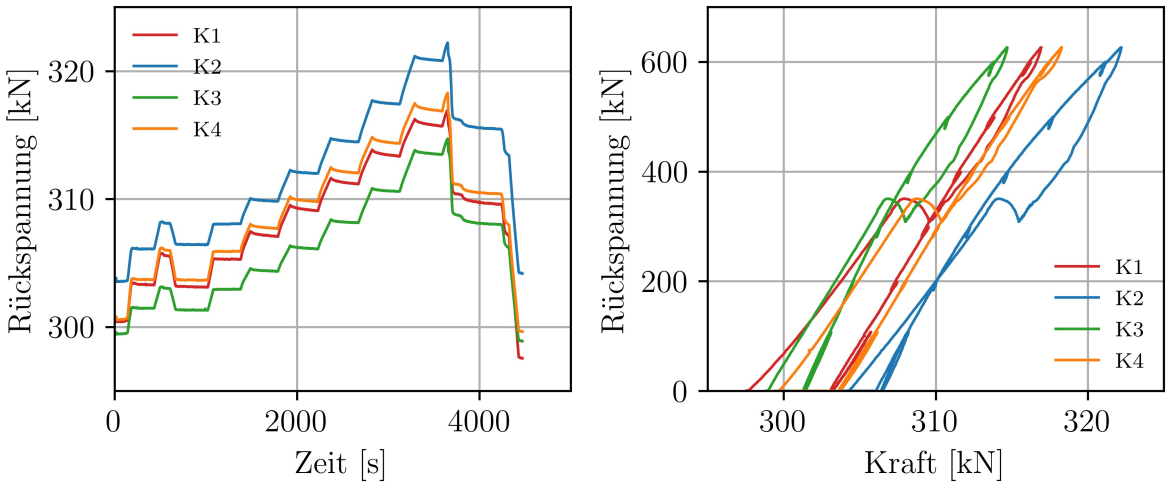

Abbildung D.87: V4 - Kräfte in der Rückspannung

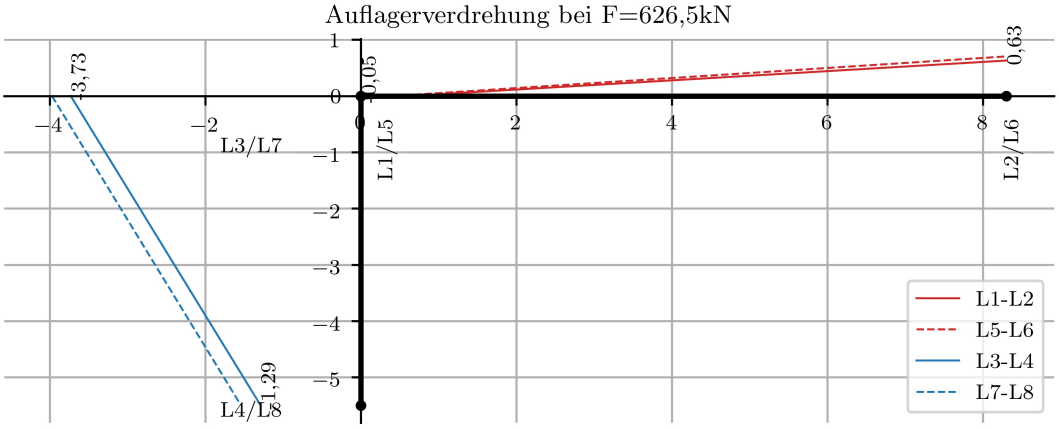

Abbildung D.88: V4 - Verdrehung bei max. Traglast F_u (Werte von L1 - L4)

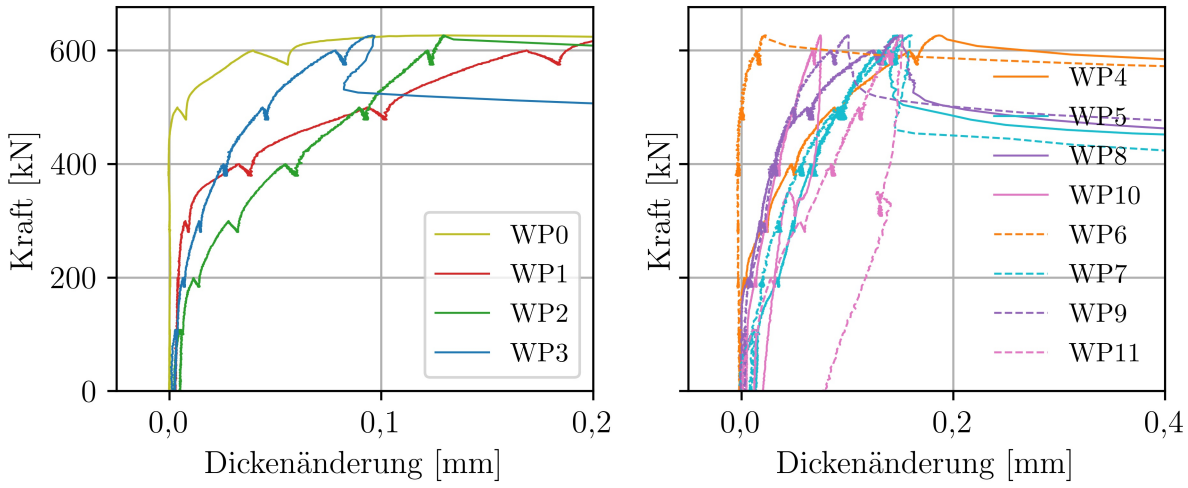

Abbildung D.89: V4 - Kraft - Dickenmessungen WP1 - WP11

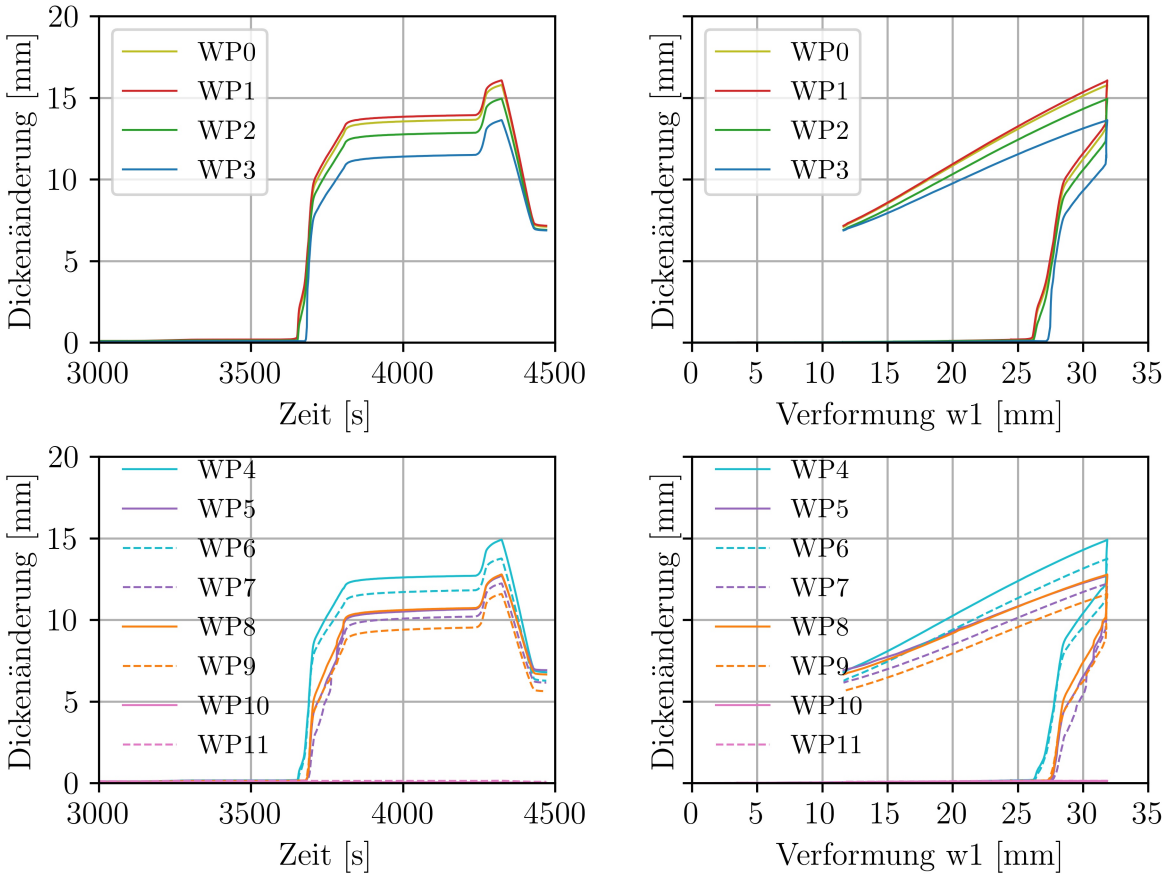

Abbildung D.90: V4 - Zeit/Verformung - Dickenmessungen WP1 - WP11

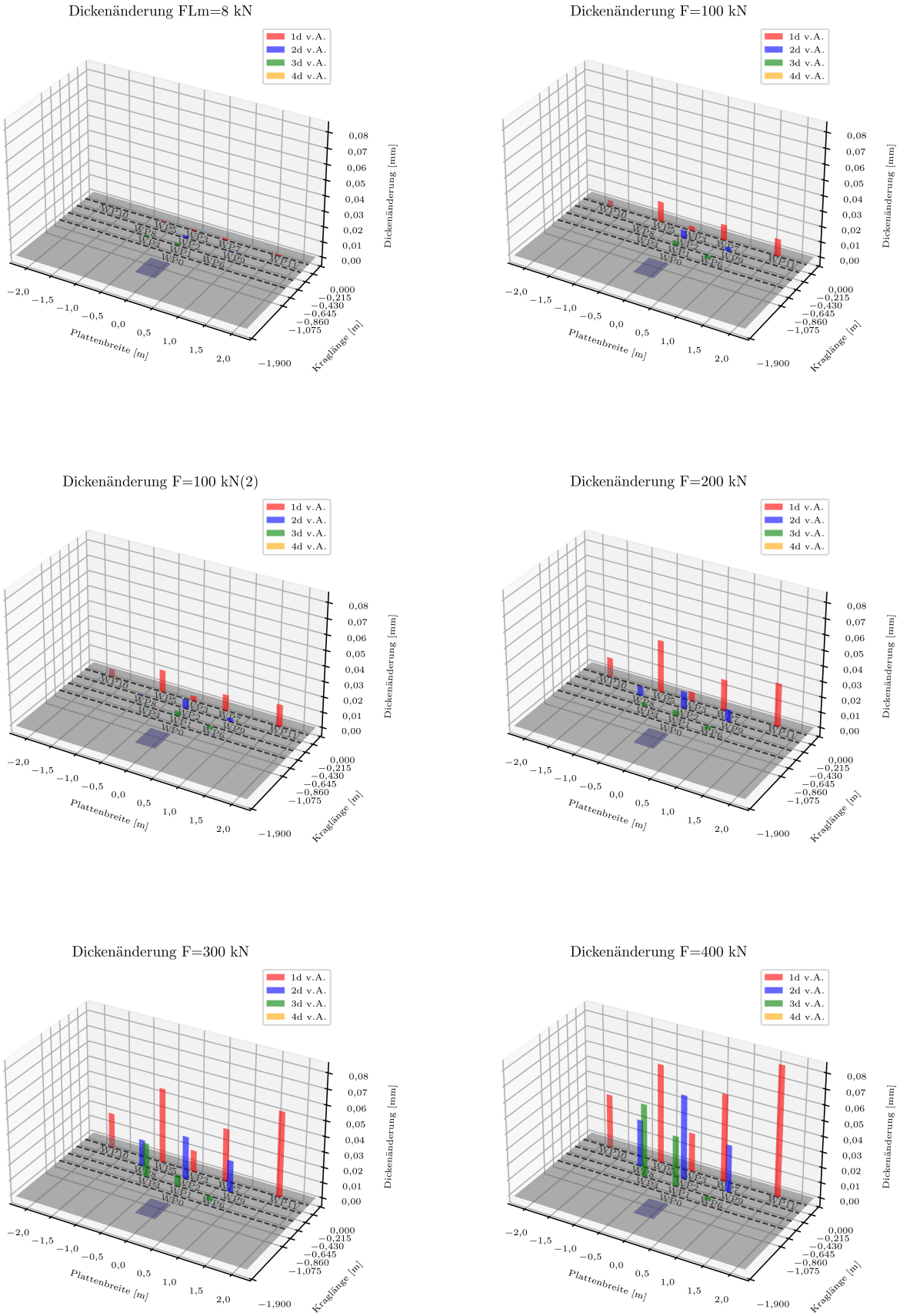

Abbildung D.91: V4 - Zeitabhängige Dickenmessungen in den ersten Laststufen

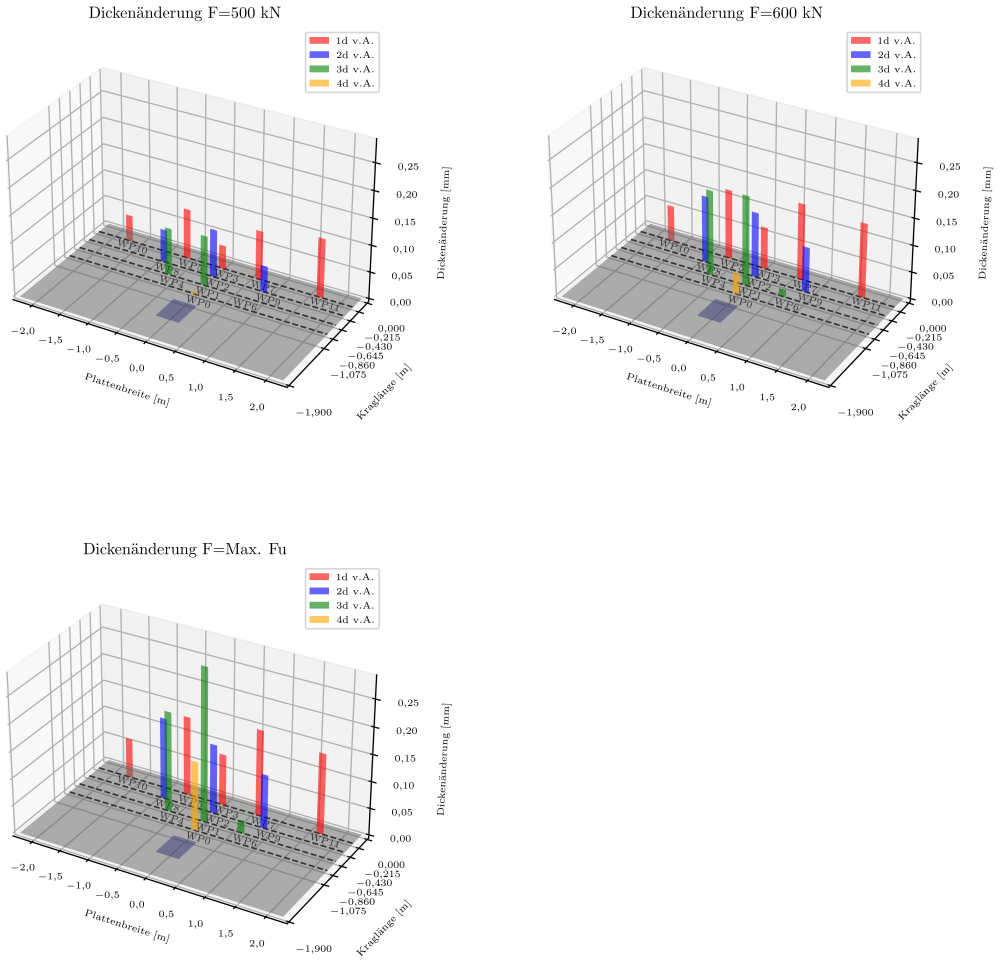

Abbildung D.92: V4 - Zeitabhängige Dickenmessungen bis zur Traglast

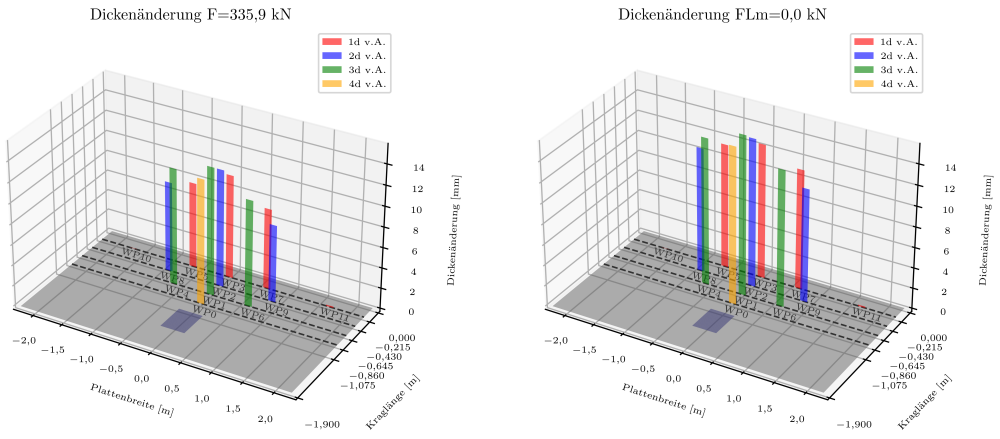

Abbildung D.93: V4 - Zeitabhängige Dickenmessungen nach dem Bruch

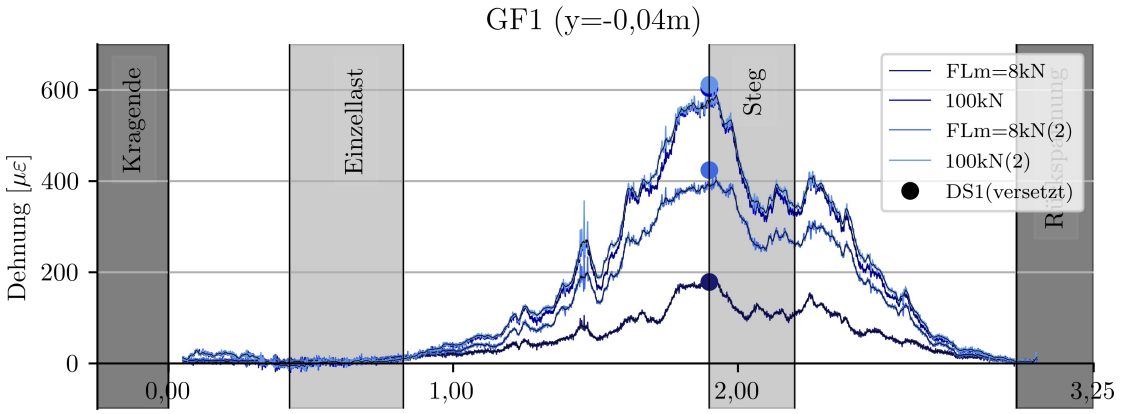

Abbildung D.94: V4 - Dehnung der Glasfaser GF1 während der Vorbelastung

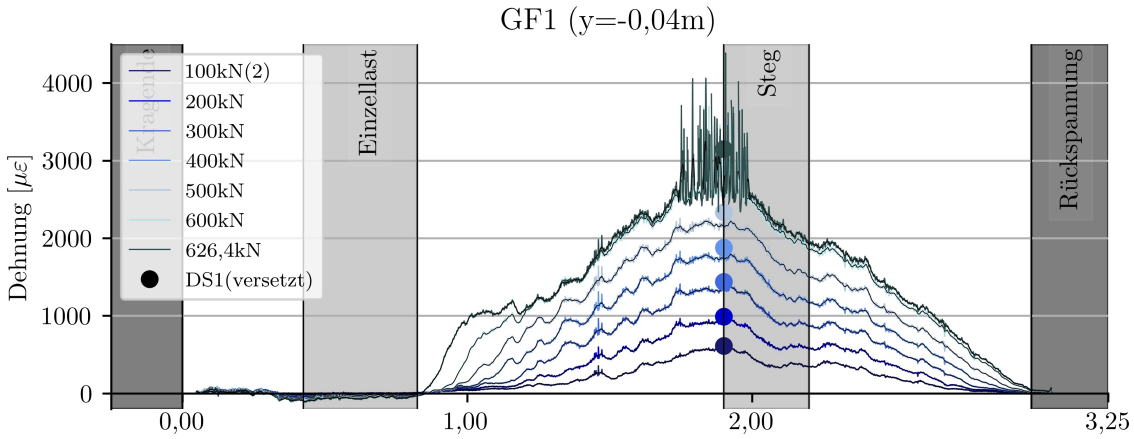

Abbildung D.95: V4 - Dehnung der Glasfaser GF1 bis zur Traglast

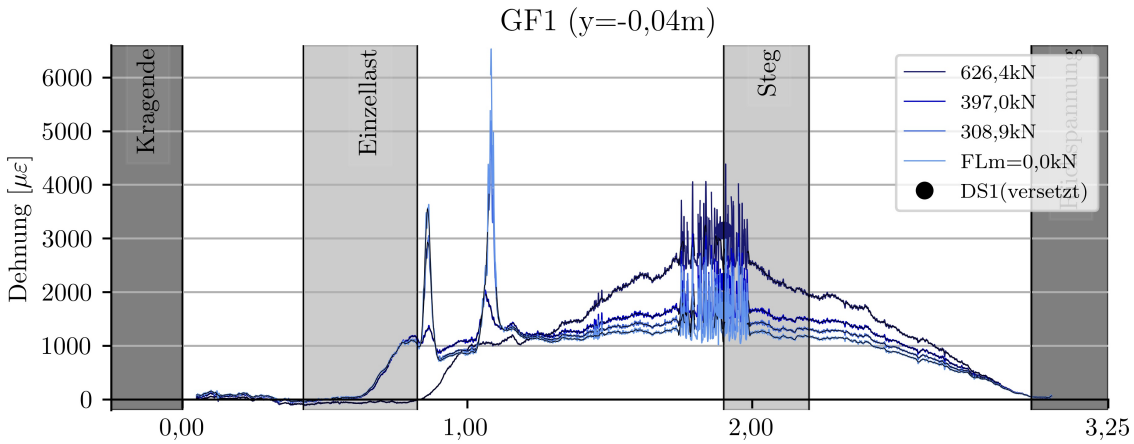

Abbildung D.96: V4 - Dehnung der Glasfaser GF1 nach dem Bruch

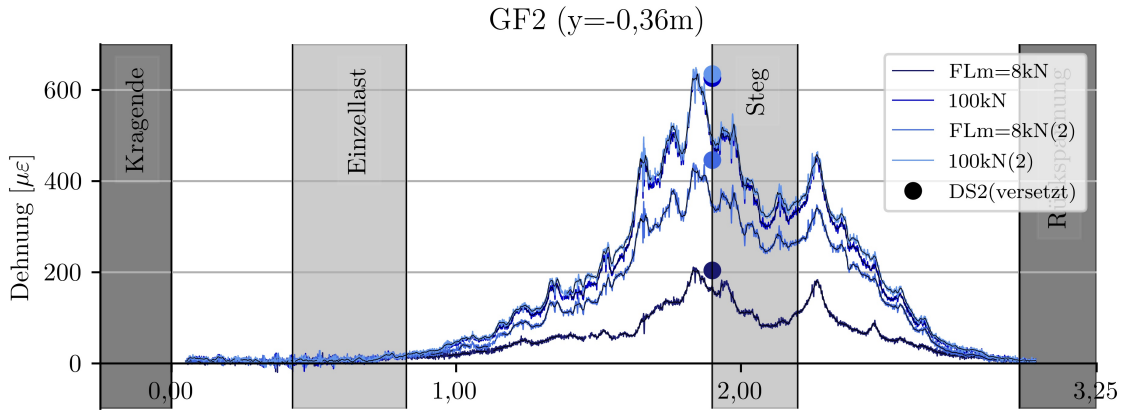

Abbildung D.97: V4 - Dehnung der Glasfaser GF2 während der Vorbelastung

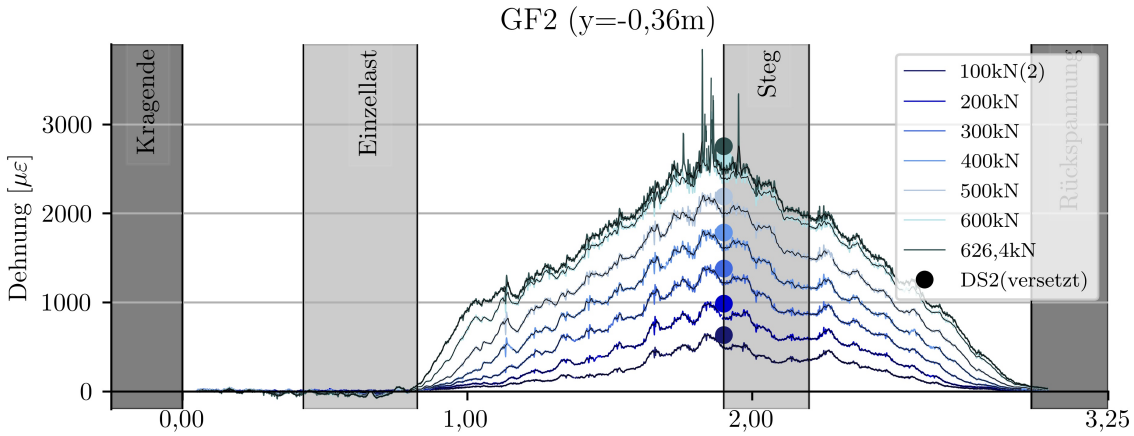

Abbildung D.98: V4 - Dehnung der Glasfaser GF2 bis zur Traglast

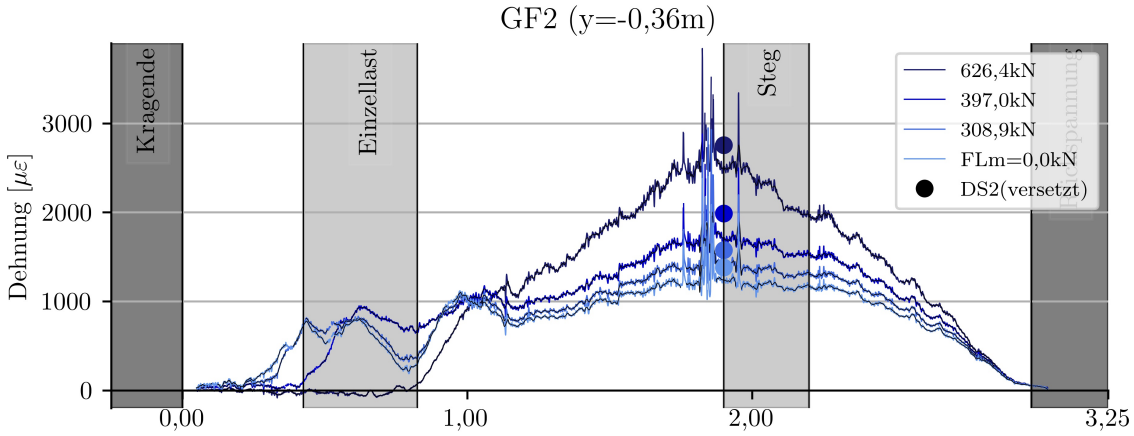

Abbildung D.99: V4 - Dehnung der Glasfaser GF2 nach dem Bruch

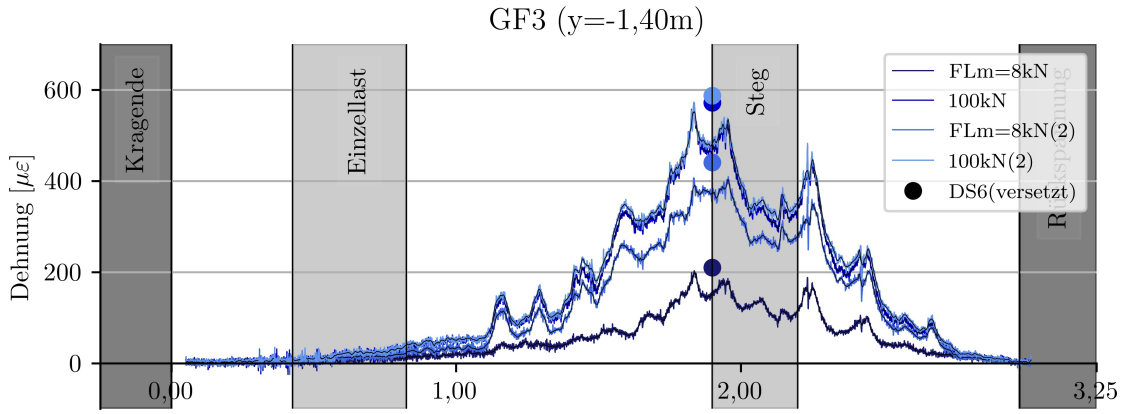

Abbildung D.100: V4 - Dehnung der Glasfaser GF3 während der Vorbelastung

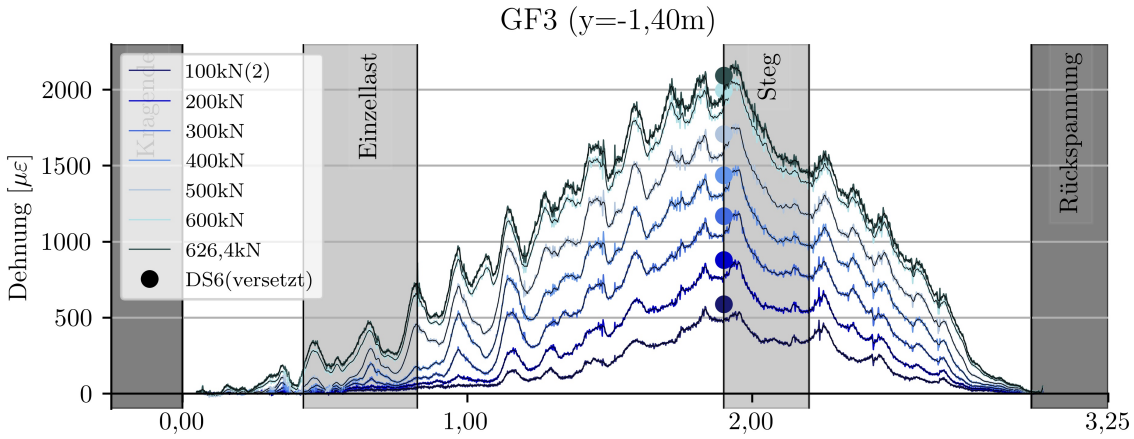

Abbildung D.101: V4 - Dehnung der Glasfaser GF3 bis zur Traglast

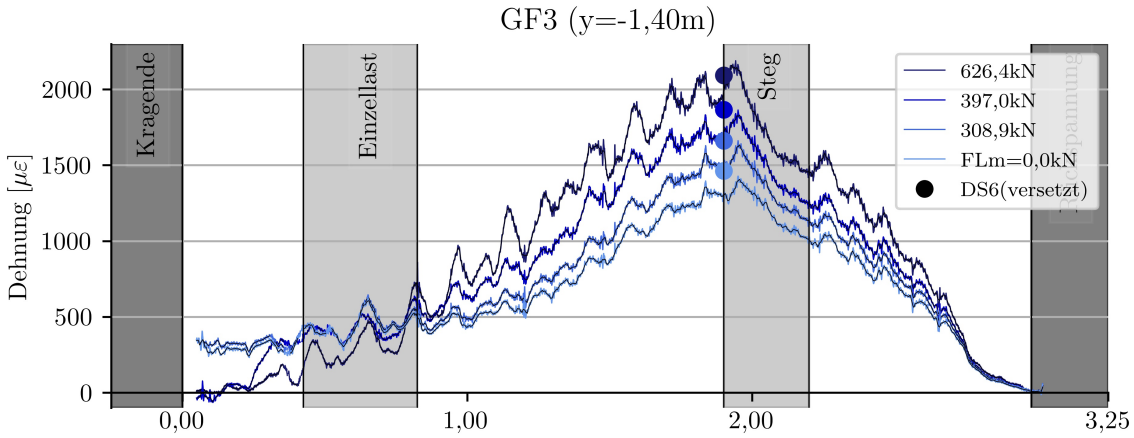

Abbildung D.102: V4 - Dehnung der Glasfaser GF3 nach dem Bruch

D.5 Versuch V5/5d-FL-2

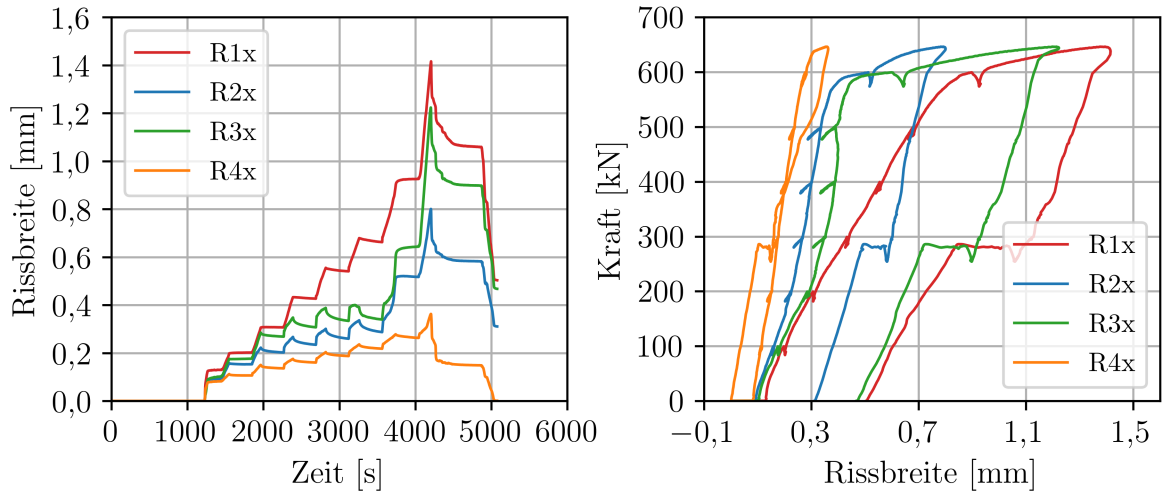

Abbildung D.103: V5 - Rissöffnungen R1x - R4x

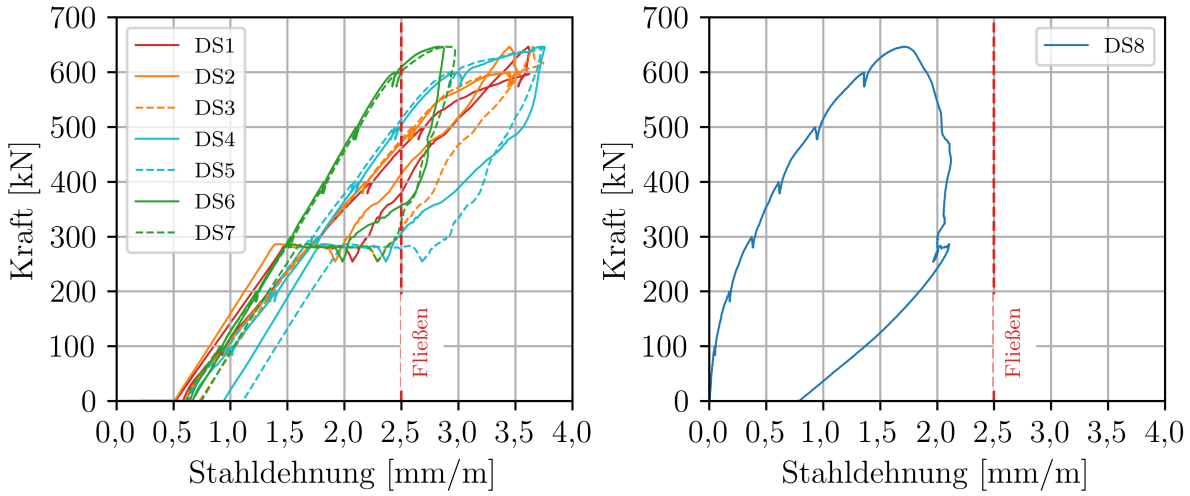

Abbildung D.104: V5 - Stahldehnungen DS1 - DS8

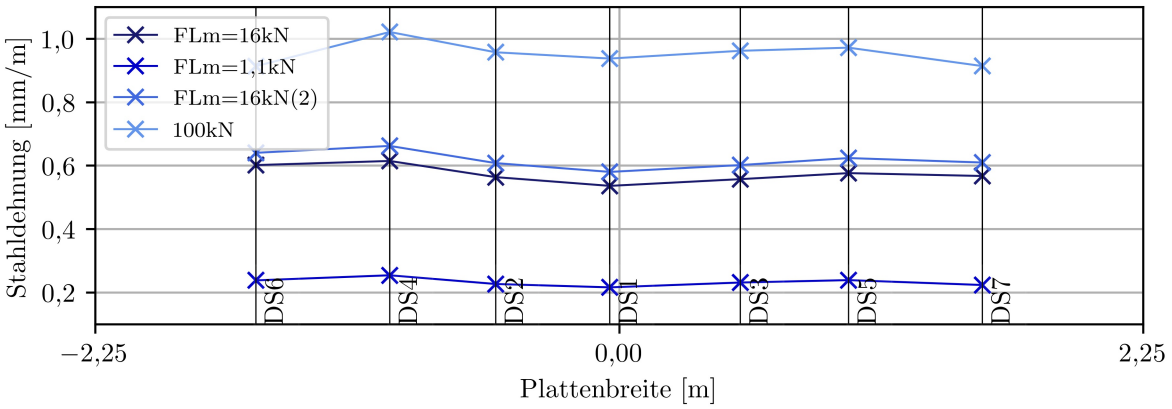

Abbildung D.105: V5 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Vorbelastung

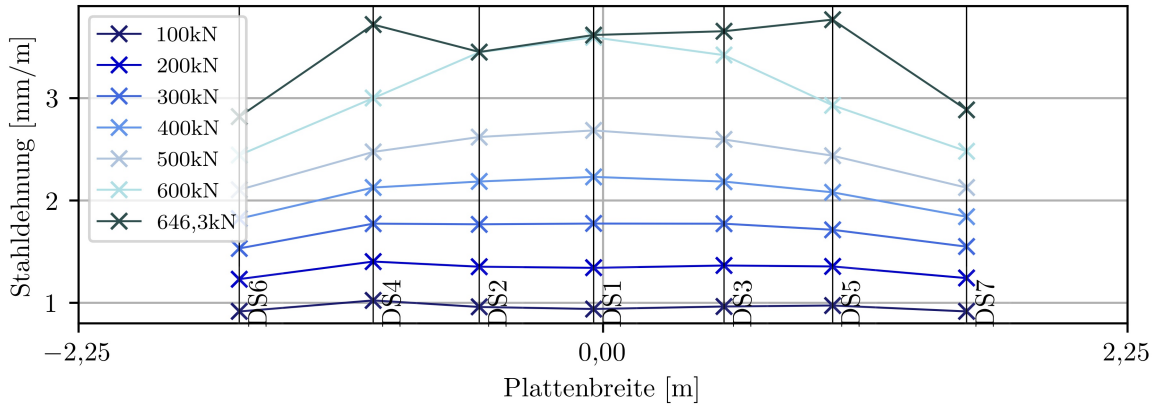

Abbildung D.106: V5 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - bis zur Traglast

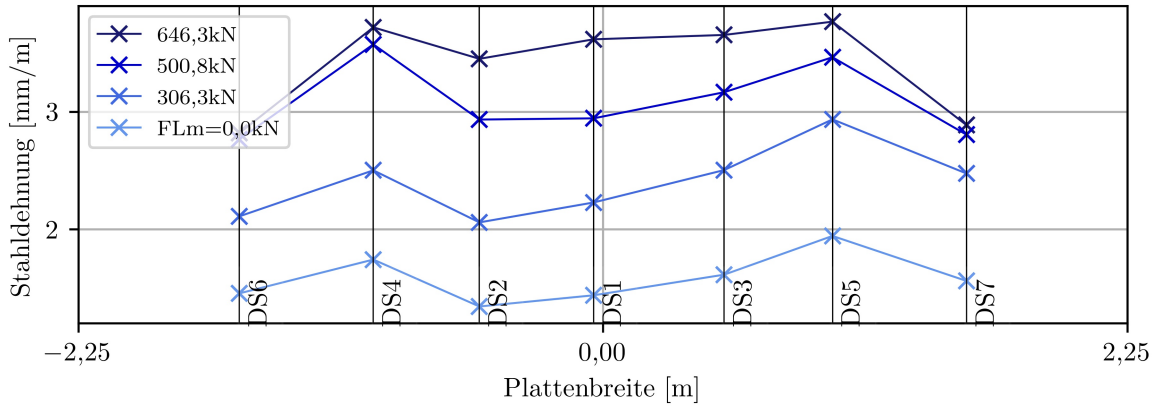

Abbildung D.107: V5 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Nachbruchverhalten

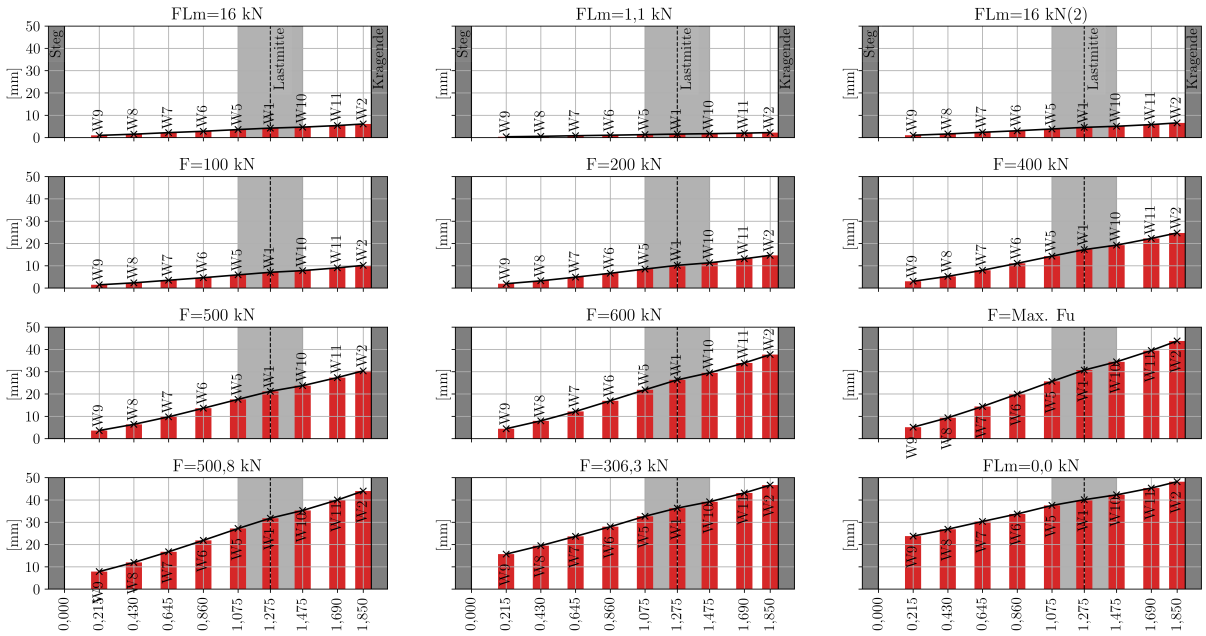

Abbildung D.108: V5 - Zeitabhängige Verformungen in Lastrichtung

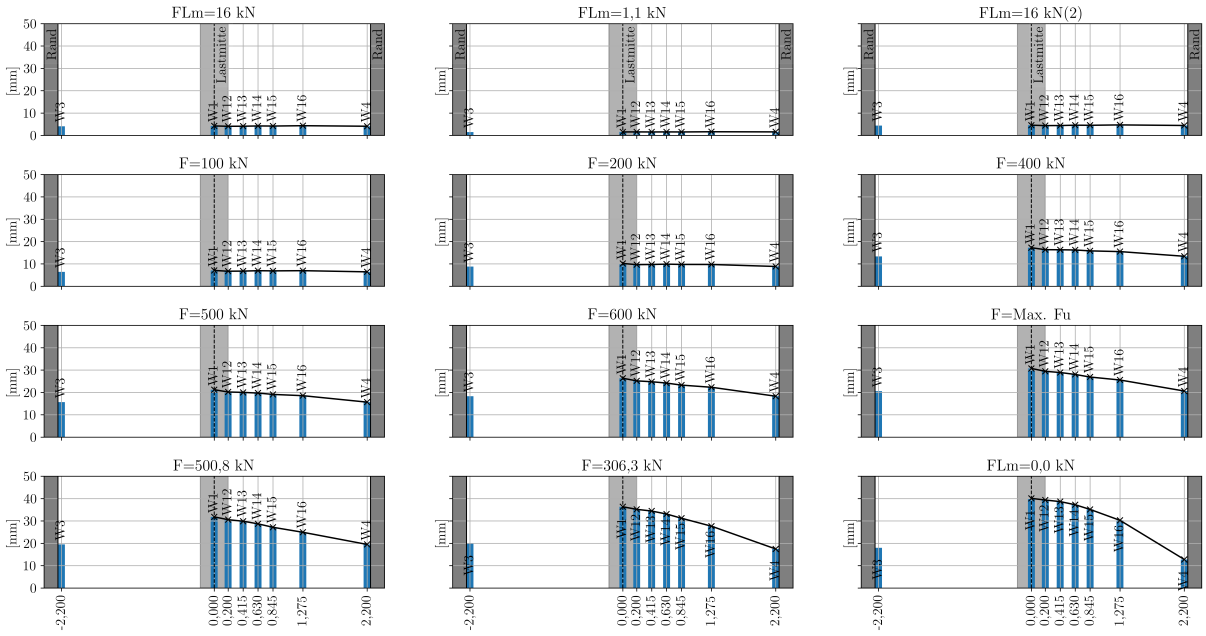

Abbildung D.109: V5 - Zeitabhängige Verformungen in der Lastachse

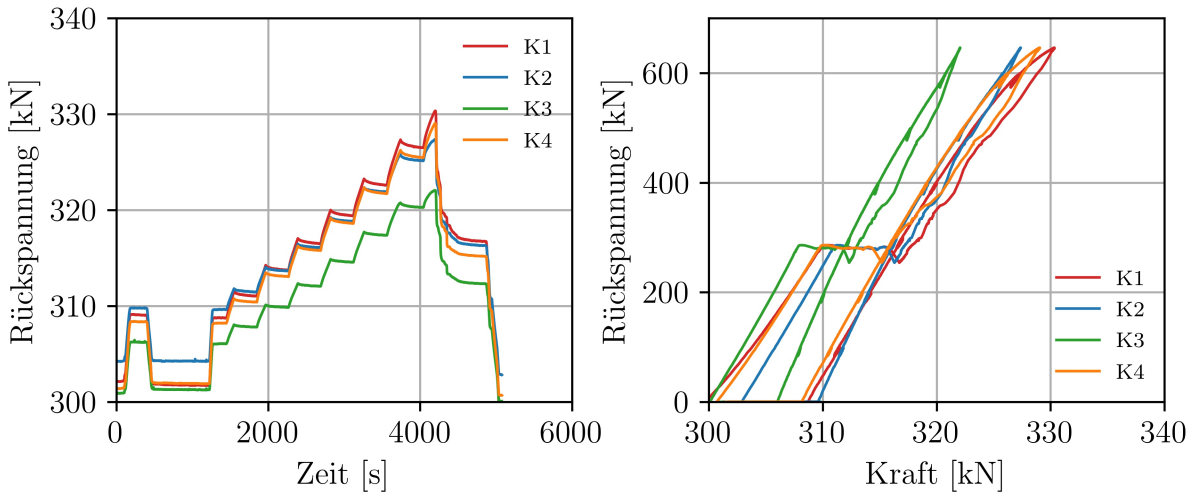

Abbildung D.110: V5 - Kräfte in der Rückspannung

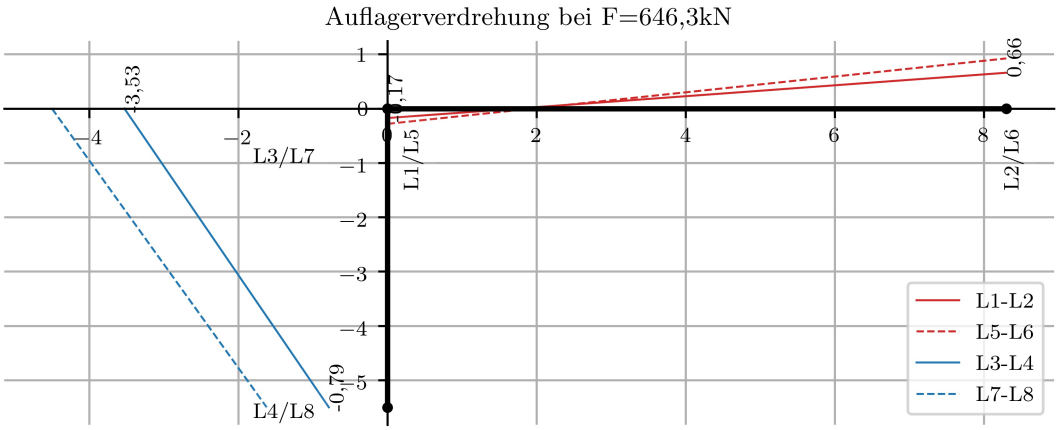

Abbildung D.111: V5 - Verdrehung bei max. Traglast F_u (Werte von L1 - L4)

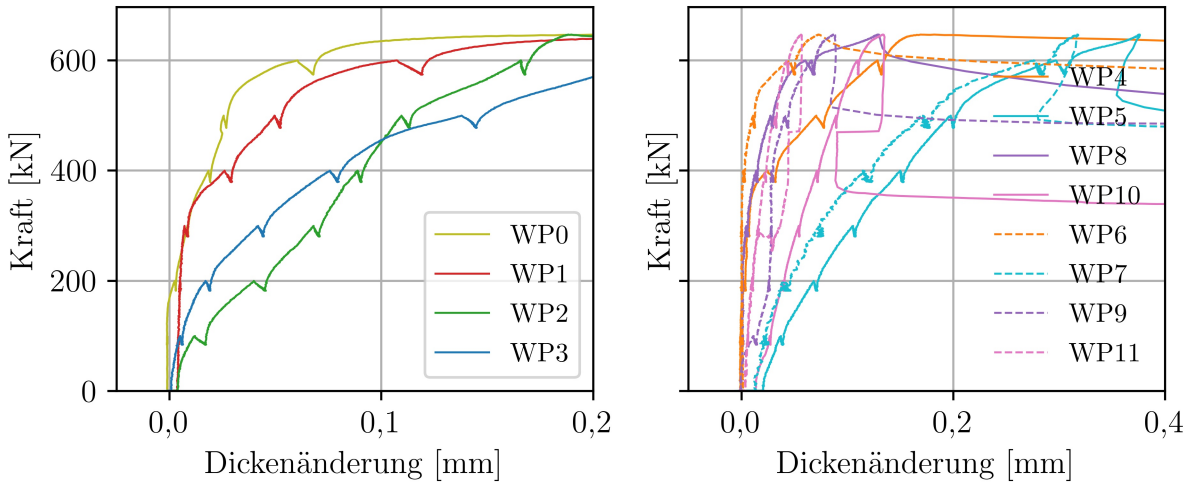

Abbildung D.112: V5 - Kraft - Dickenmessungen WP1 - WP11

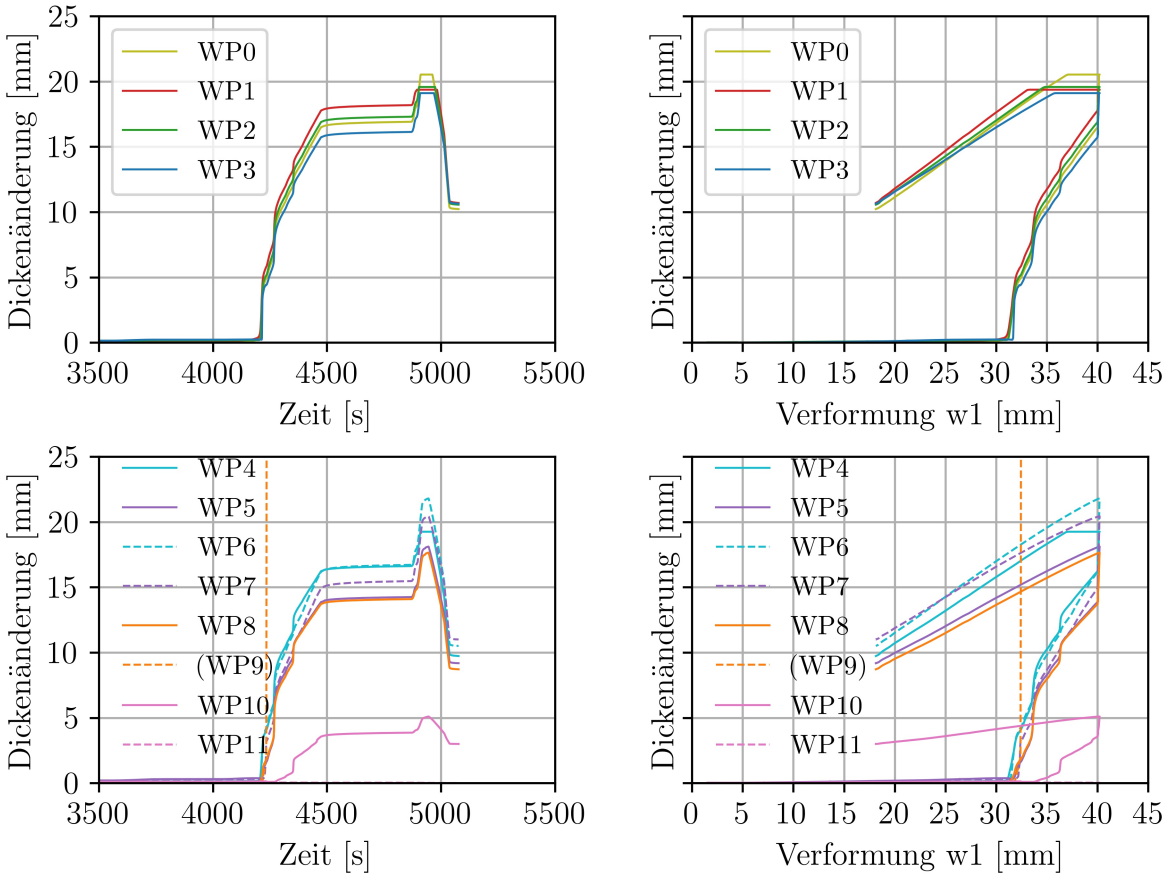

Abbildung D.113: V5 - Zeit/Verformung - Dickenmessungen WP1 - WP11

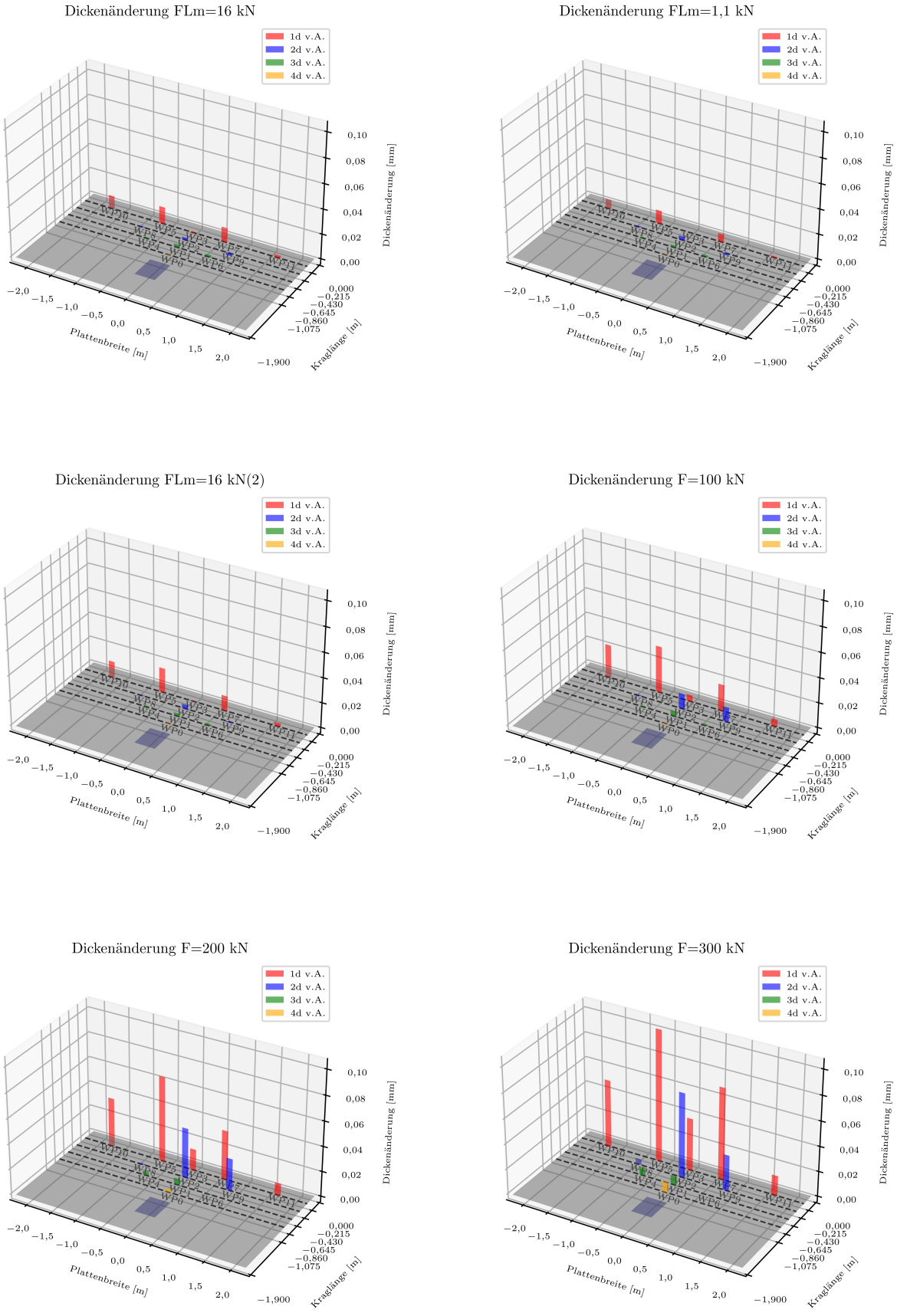

Abbildung D.114: V5 - Zeitabhängige Dickenmessungen in den ersten Laststufen

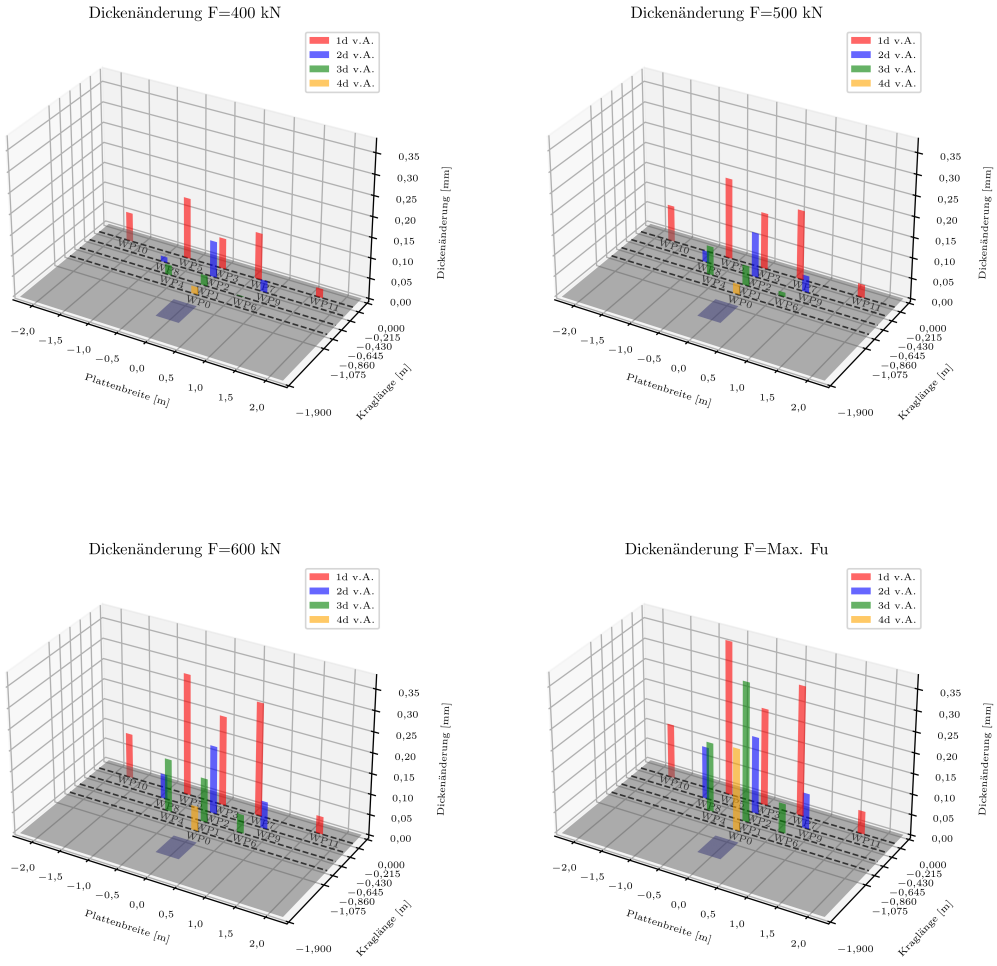

Abbildung D.115: V5 - Zeitabhängige Dickenmessungen bis zur Traglast

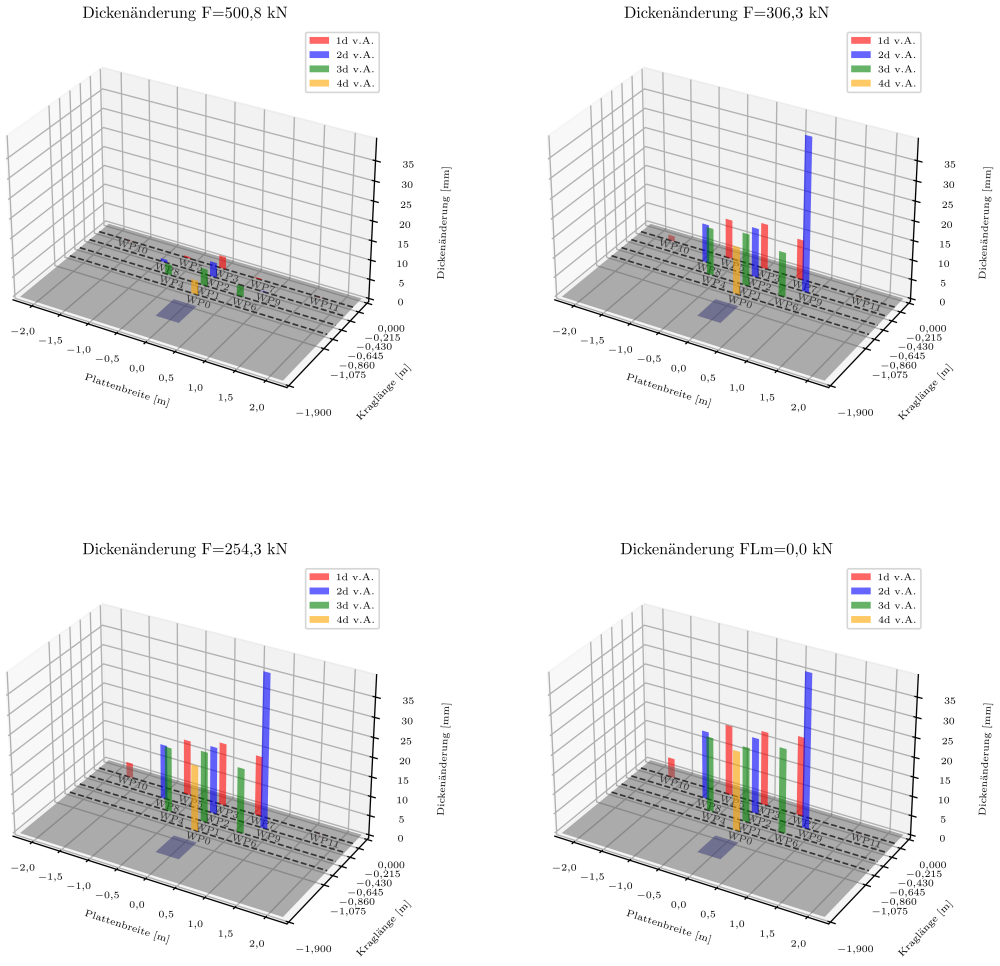

Abbildung D.116: V5 - Zeitabhängige Dickenmessungen nach dem Bruch

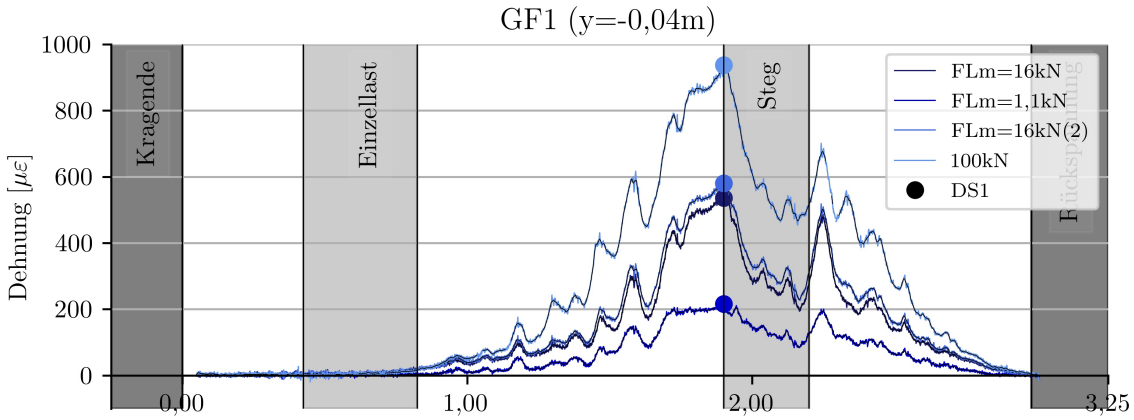

Abbildung D.117: V5 - Dehnung der Glasfaser GF1 während der Vorbelastung

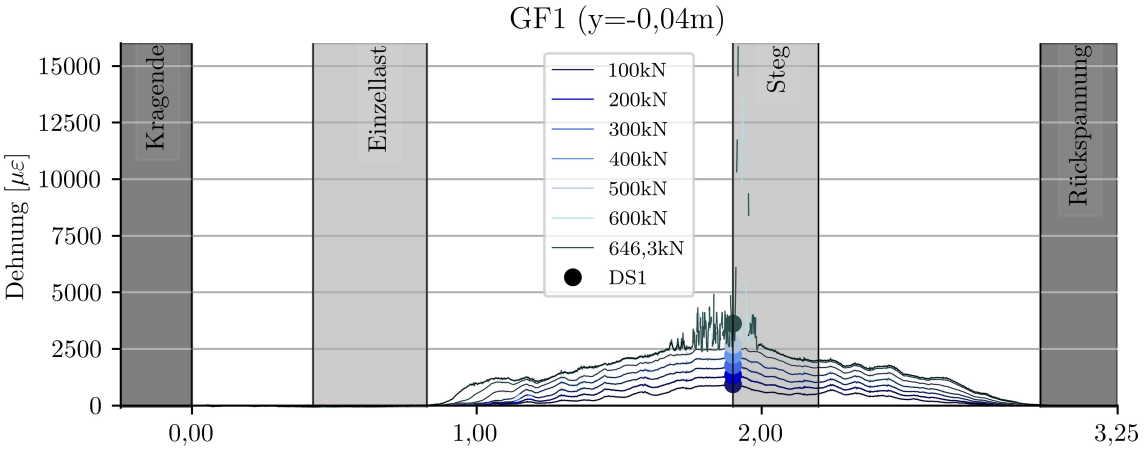

Abbildung D.118: V5 - Dehnung der Glasfaser GF1 bis zur Traglast

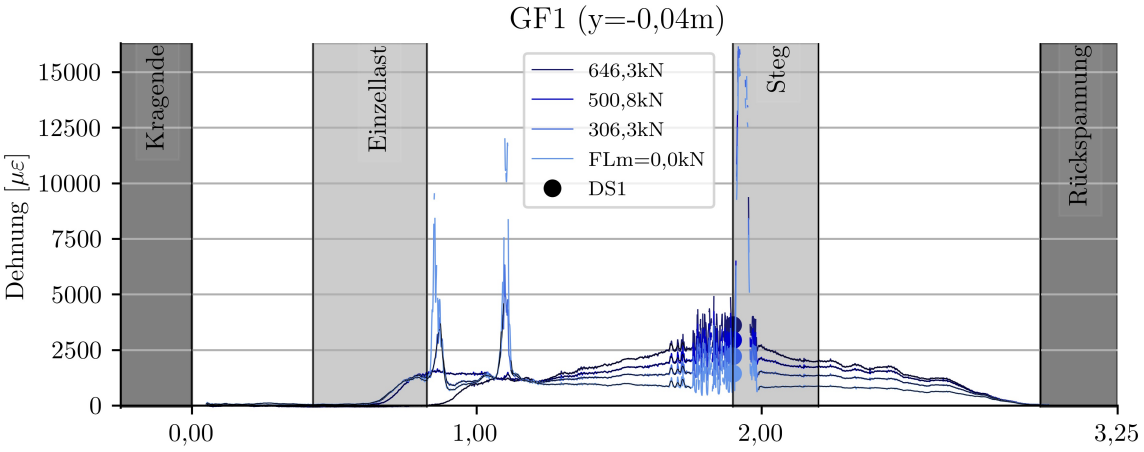

Abbildung D.119: V5 - Dehnung der Glasfaser GF1 nach dem Bruch

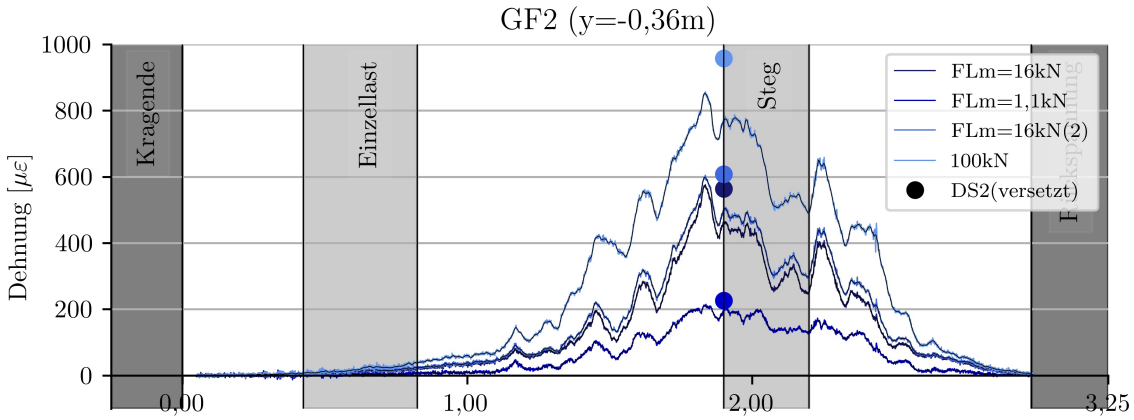

Abbildung D.120: V5 - Dehnung der Glasfaser GF2 während der Vorbelastung

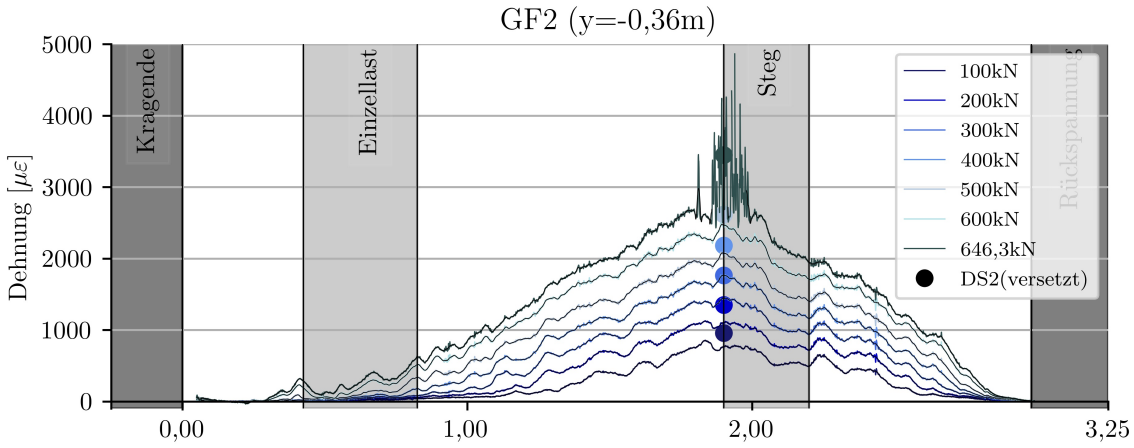

Abbildung D.121: V5 - Dehnung der Glasfaser GF2 bis zur Traglast

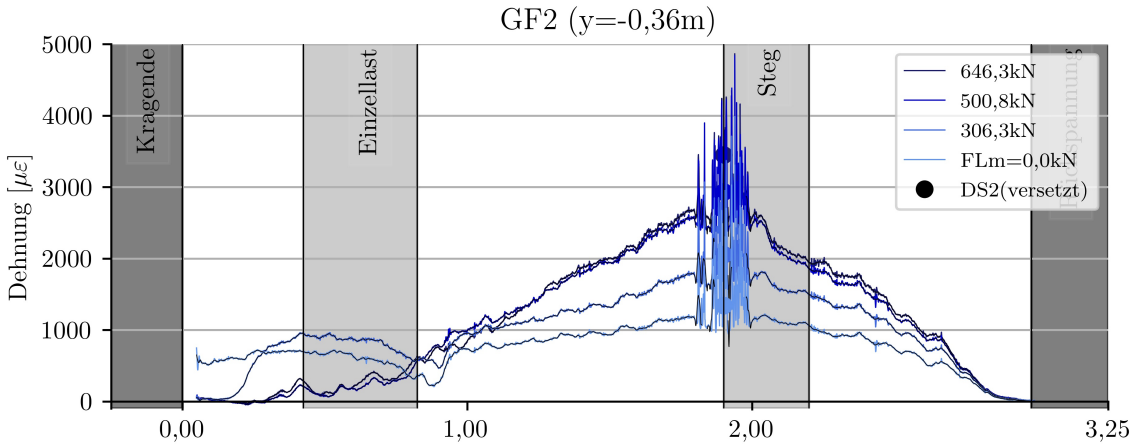

Abbildung D.122: V5 - Dehnung der Glasfaser GF2 nach dem Bruch

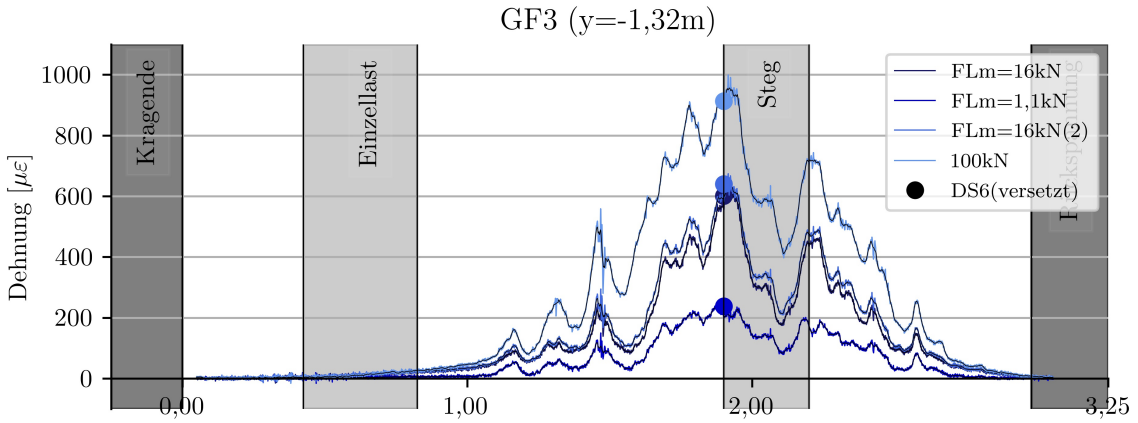

Abbildung D.123: V5 - Dehnung der Glasfaser GF3 während der Vorbelastung

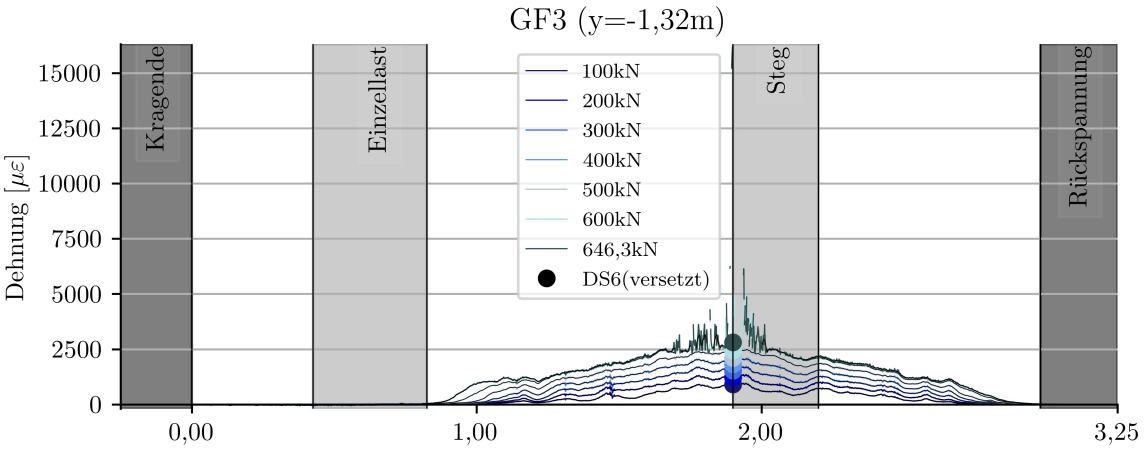

Abbildung D.124: V5 - Dehnung der Glasfaser GF3 bis zur Traglast

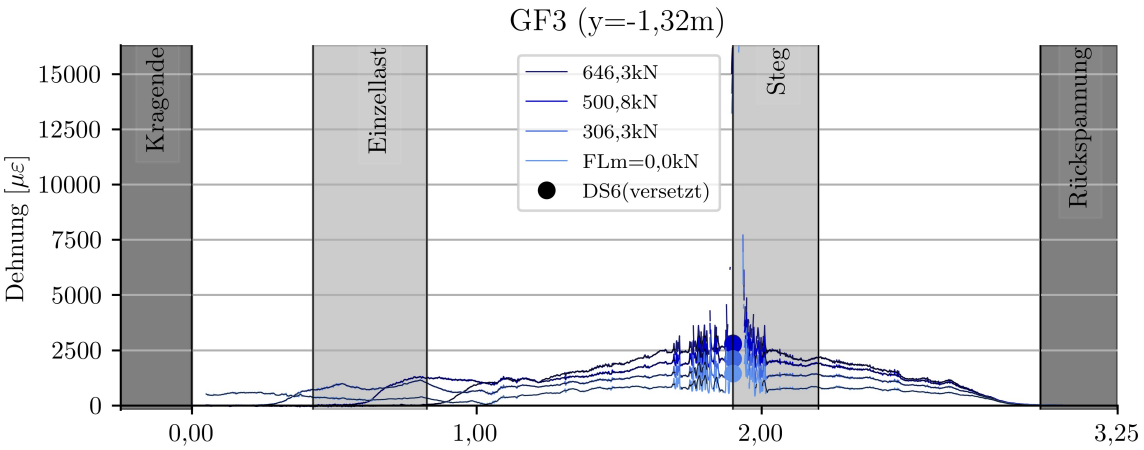

Abbildung D.125: V5 - Dehnung der Glasfaser GF3 nach dem Bruch

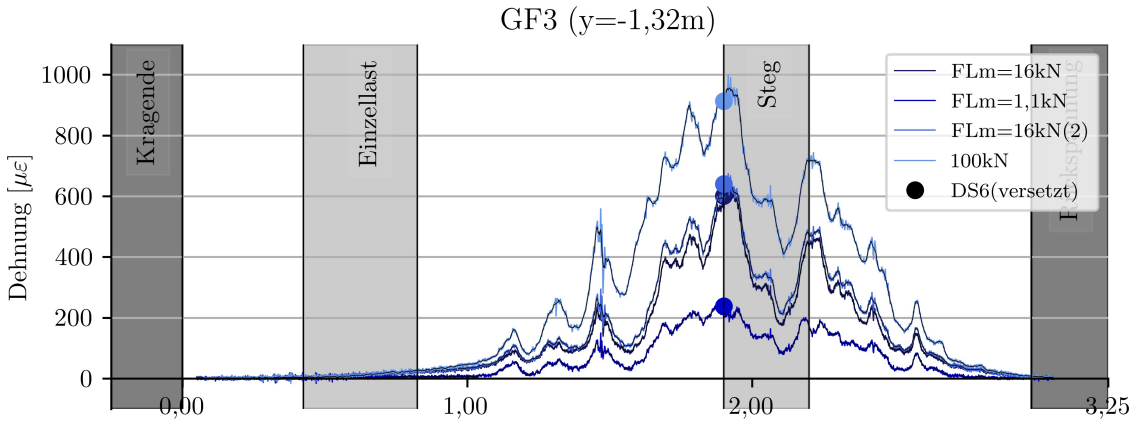

Abbildung D.126: V5 - Dehnung der Glasfaser GF4 während der Vorbelastung

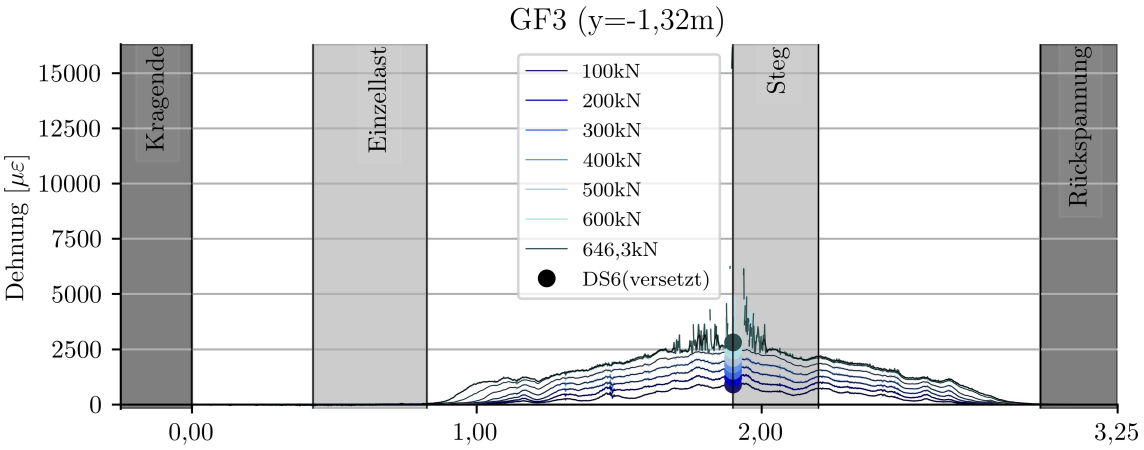

Abbildung D.127: V5 - Dehnung der Glasfaser GF4 bis zur Traglast

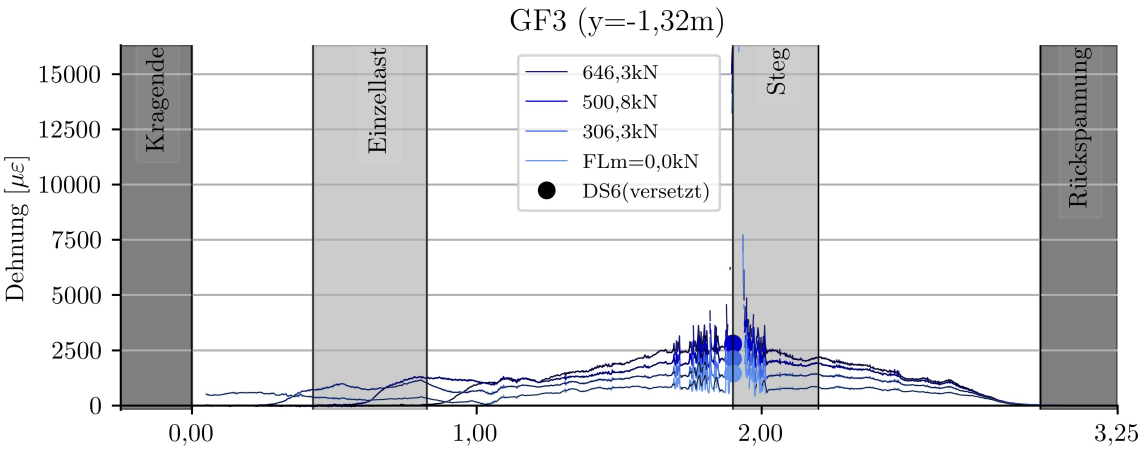

Abbildung D.128: V5 - Dehnung der Glasfaser GF4 nach dem Bruch

D.6 Versuch V6/5d-LL

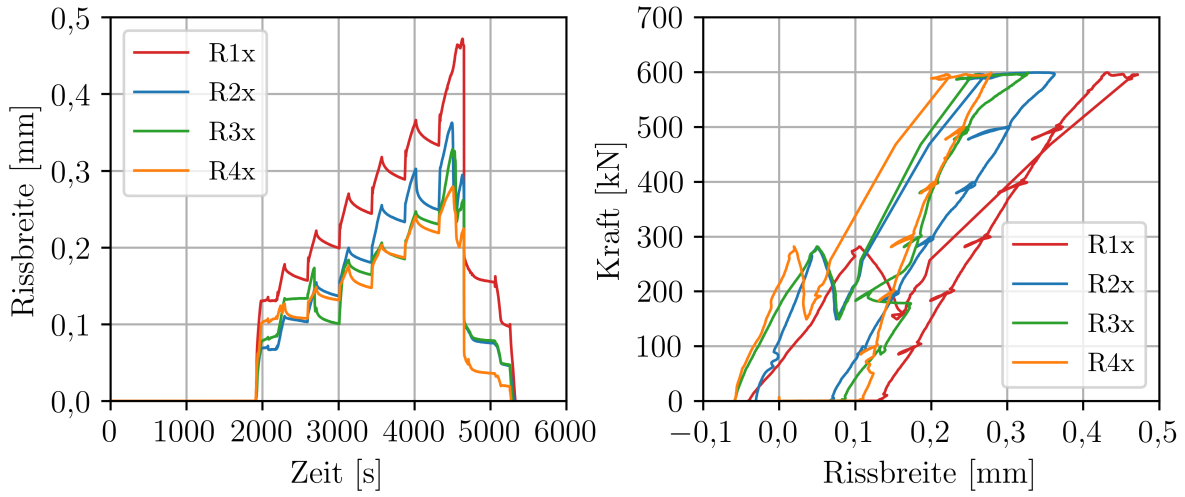

Abbildung D.129: V6 - Rissöffnungen R1x - R4x

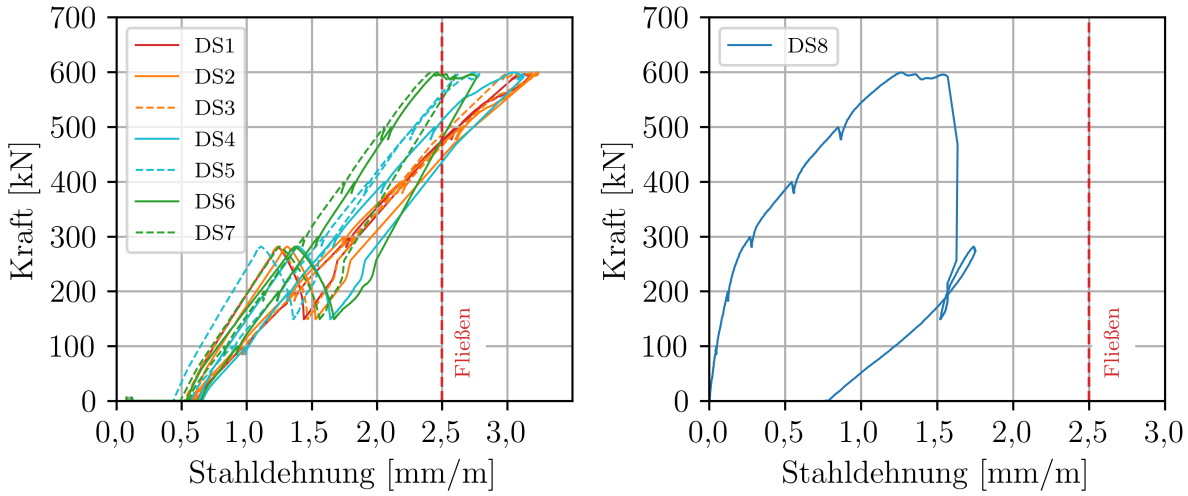

Abbildung D.130: V6 - Stahldehnungen DS1 - DS8

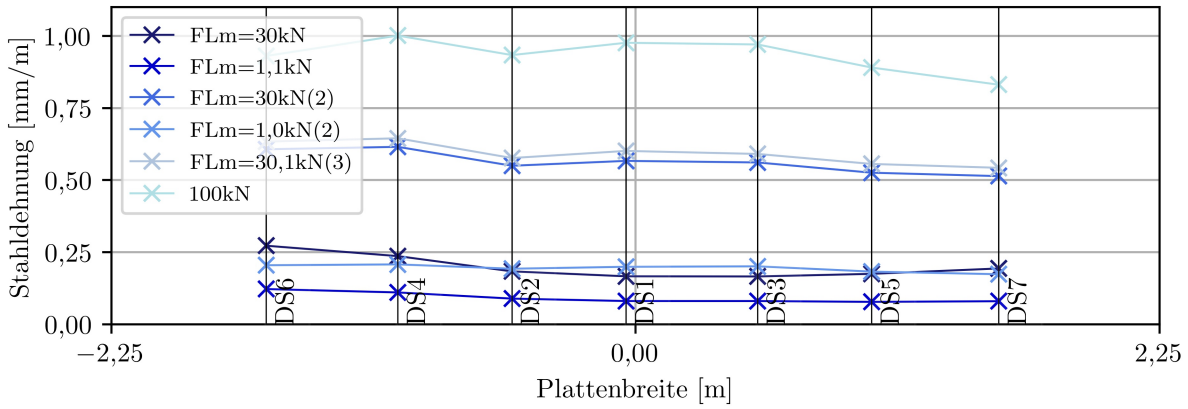

Abbildung D.131: V6 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Vorbelastung

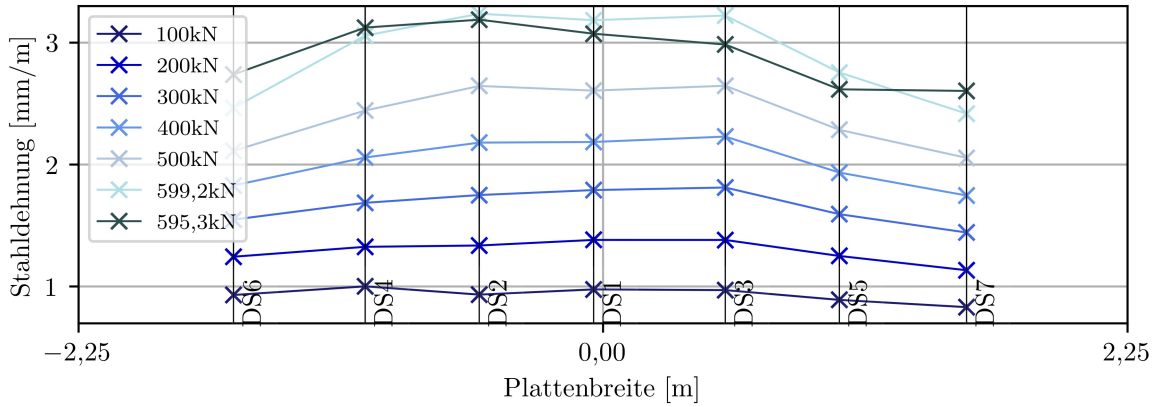

Abbildung D.132: V6 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - bis zur Traglast

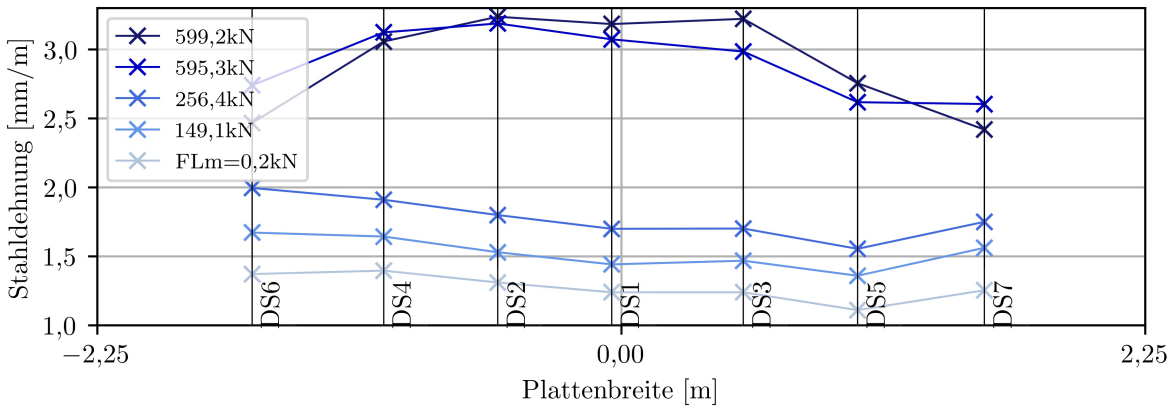

Abbildung D.133: V6 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Nachbruchverhalten

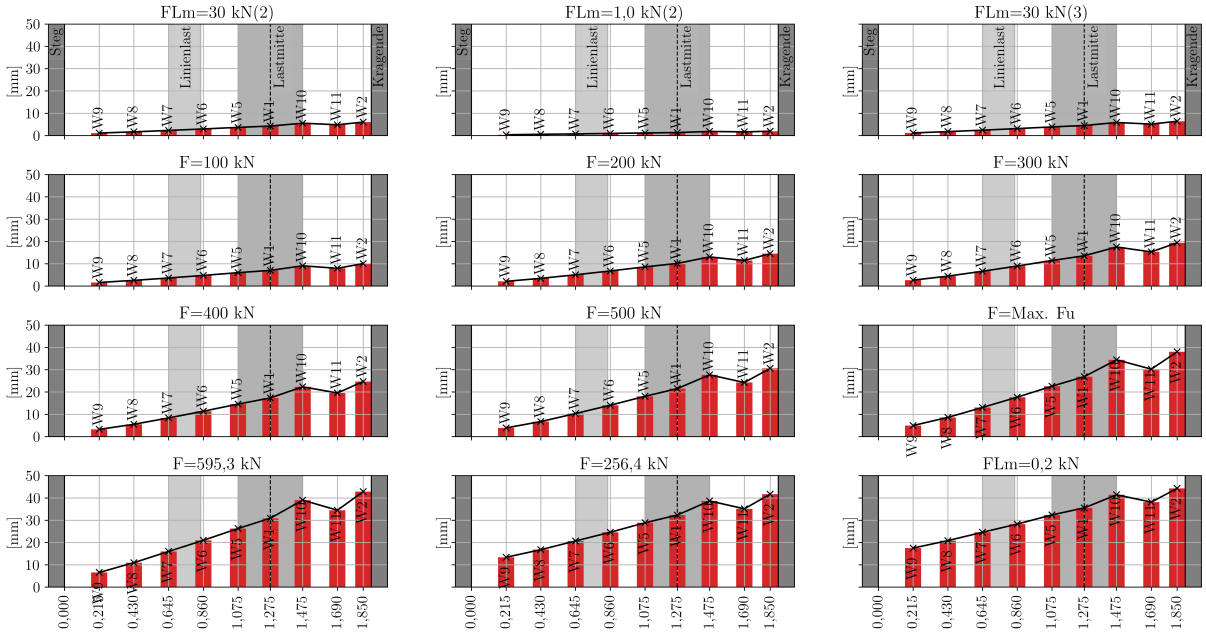

Abbildung D.134: V6 - Zeitabhängige Verformungen in Lastrichtung

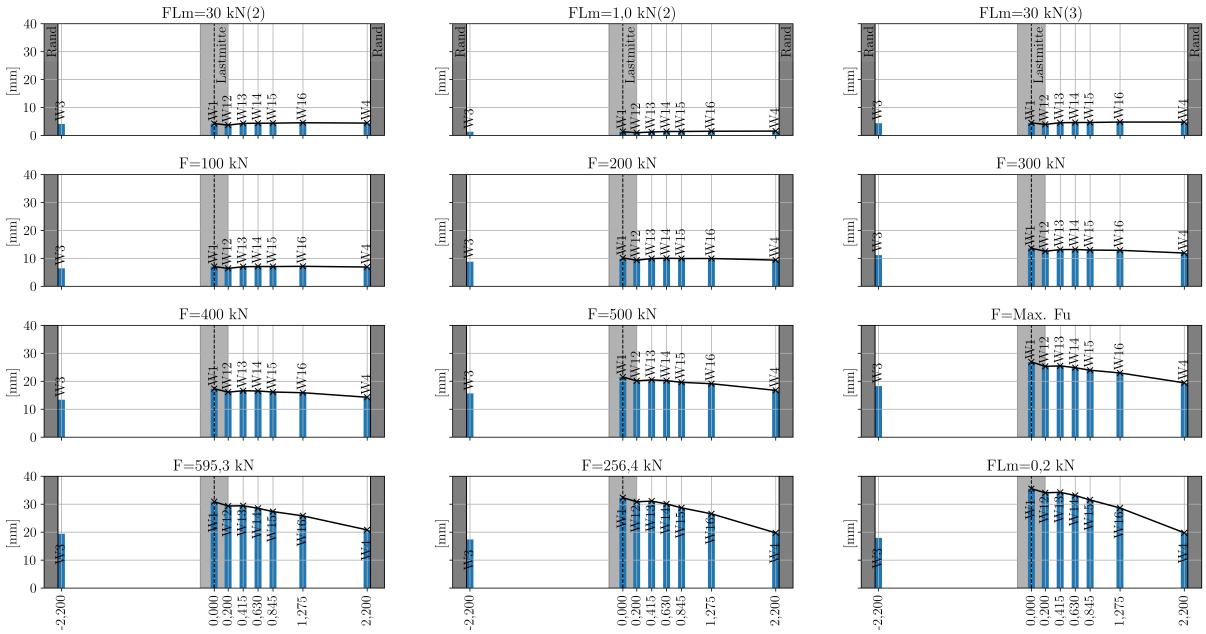

Abbildung D.135: V6 - Zeitabhängige Verformungen in der Lastachse

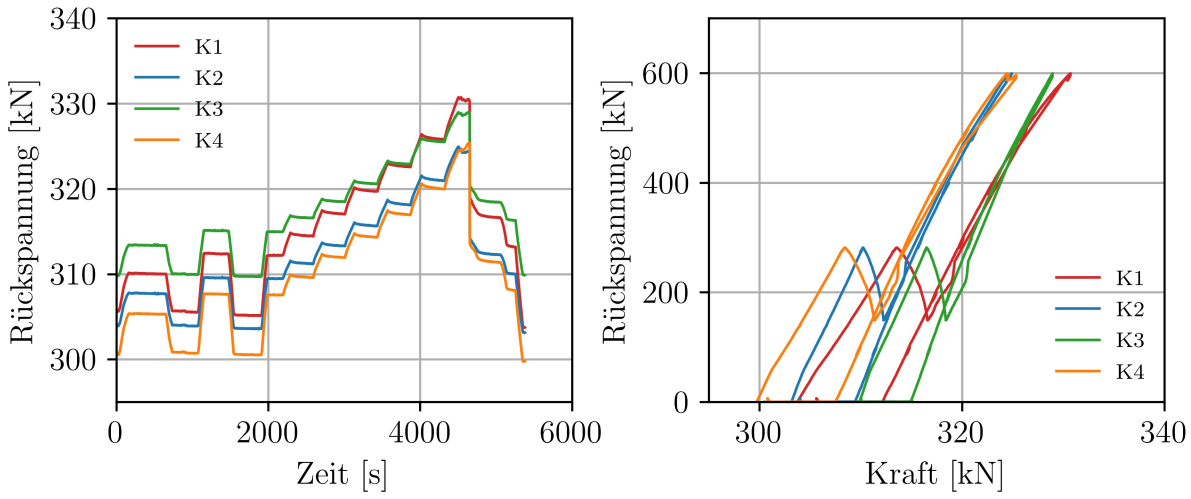

Abbildung D.136: V6 - Kräfte in der Rückspannung

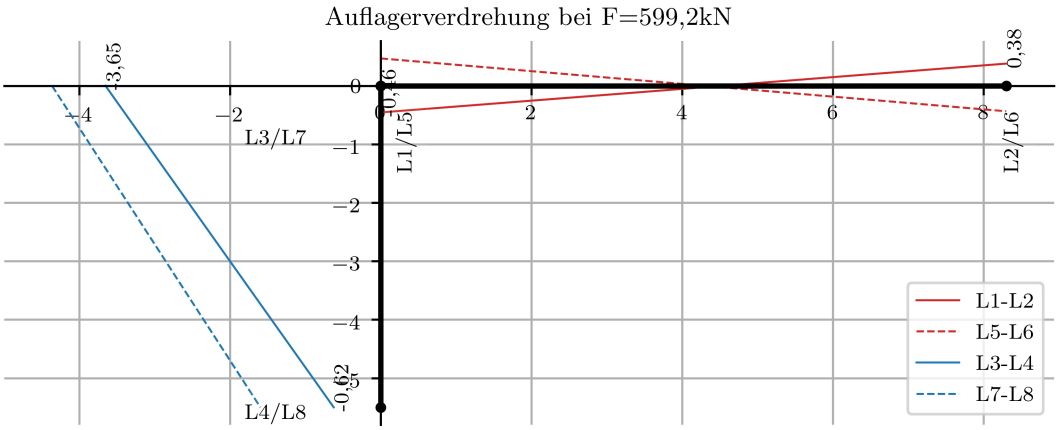

Abbildung D.137: V6 - Verdrehung bei max. Traglast F_u (Werte von L1 - L4)

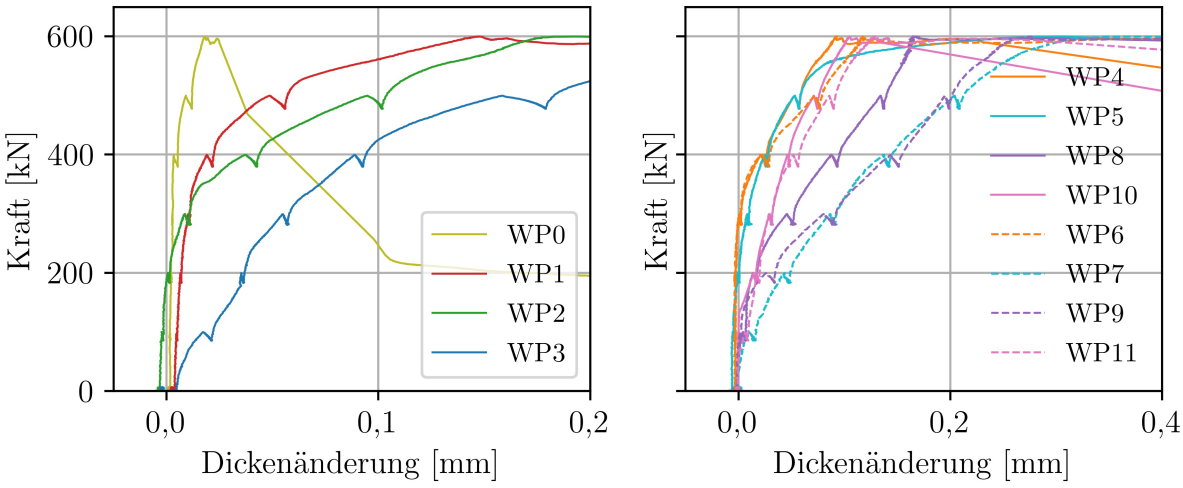

Abbildung D.138: V6 - Kraft - Dickenmessungen WP1 - WP11

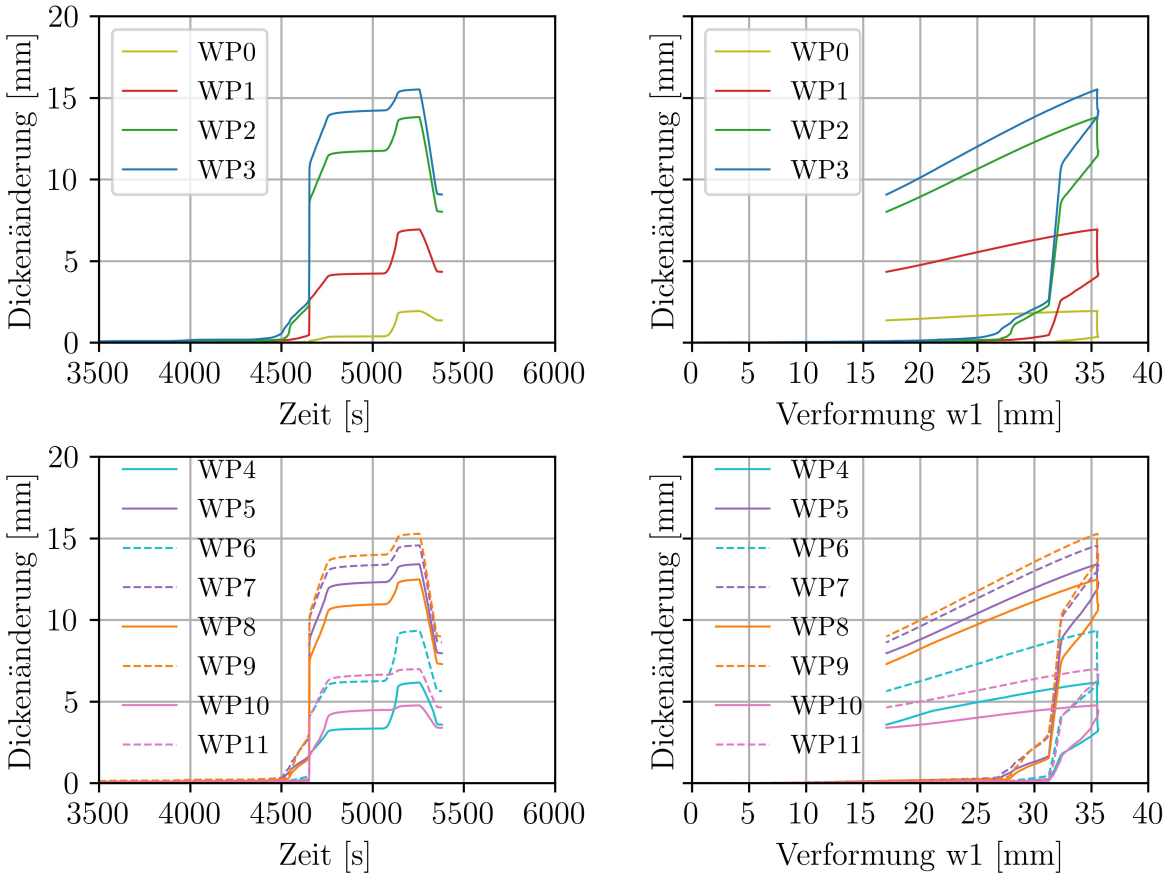

Abbildung D.139: V6 - Zeit/Verformung - Dickenmessungen WP1 - WP11

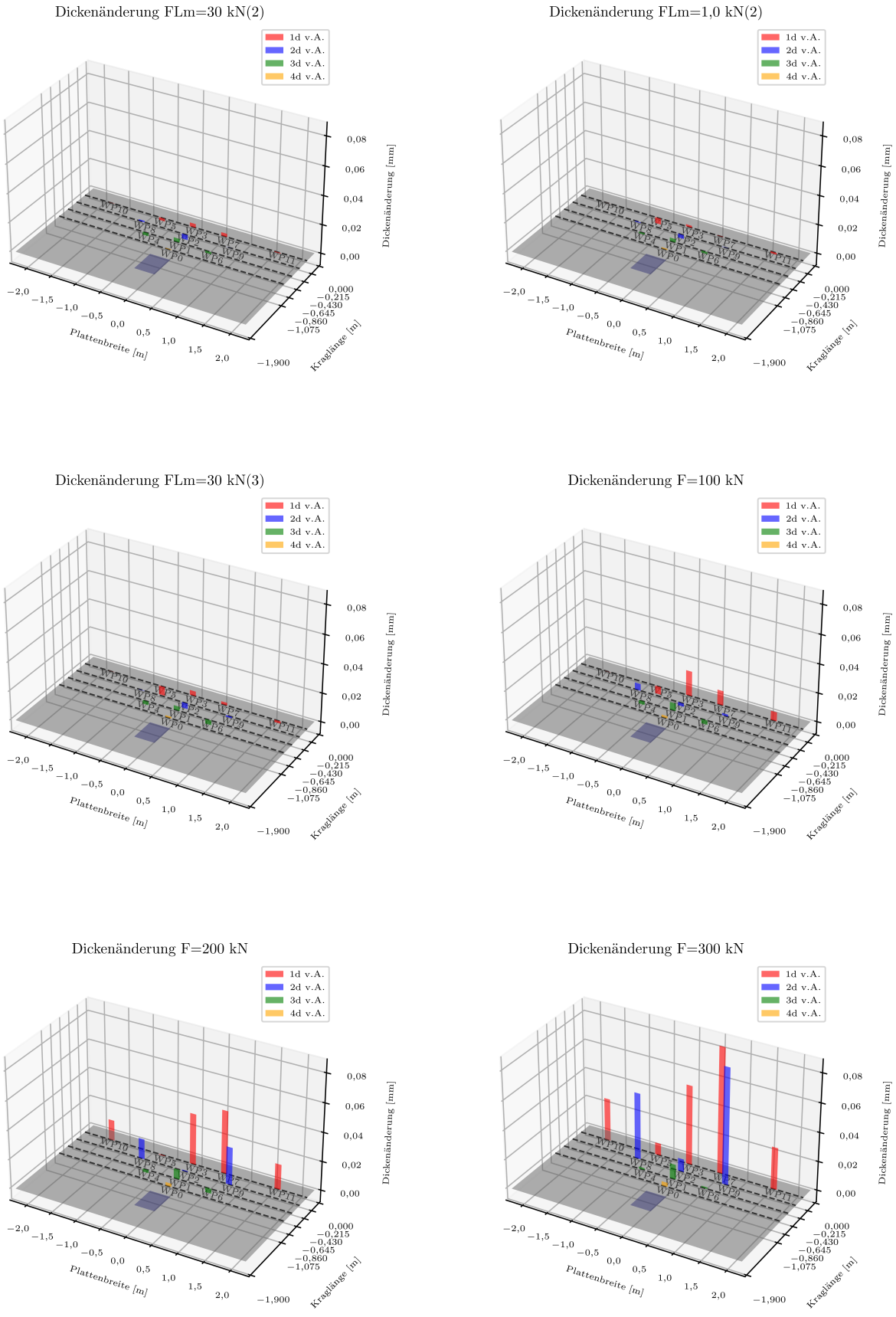

Abbildung D.140: V6 - Zeitabhängige Dickenmessungen in den ersten Laststufen

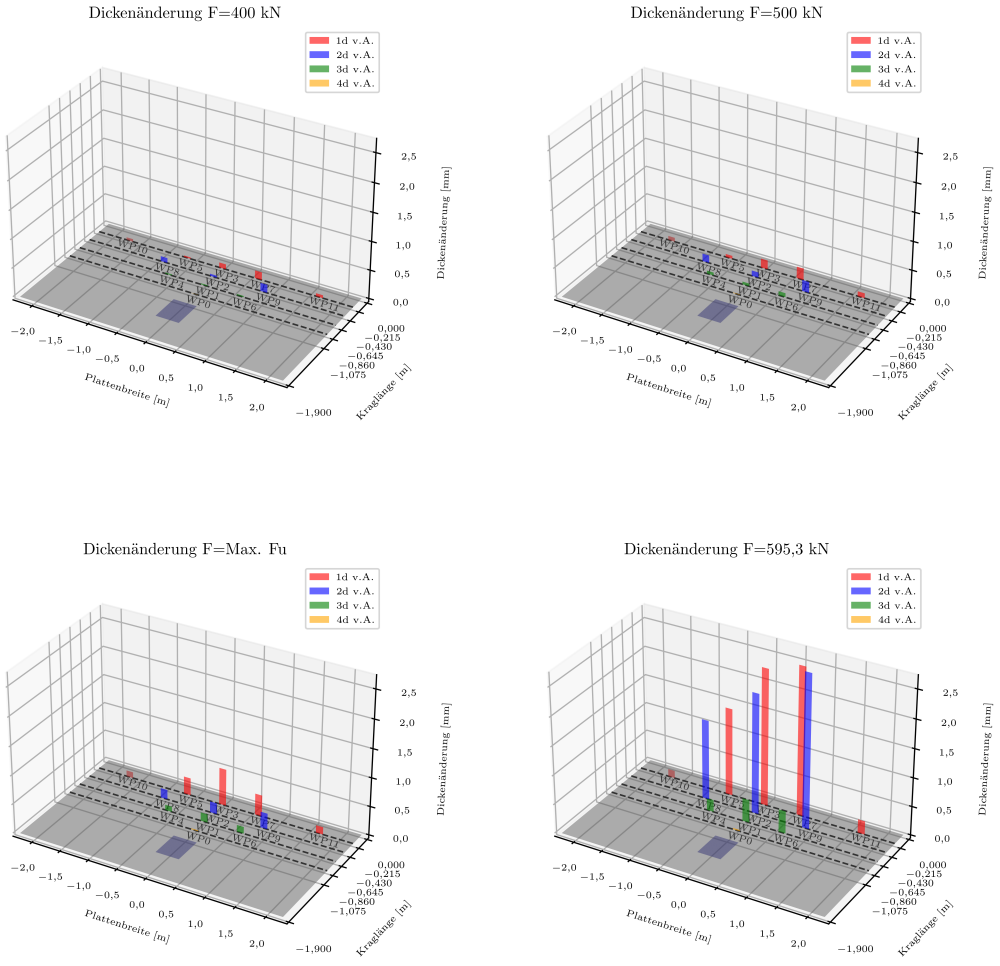

Abbildung D.141: V6 - Zeitabhängige Dickenmessungen bis zur Traglast

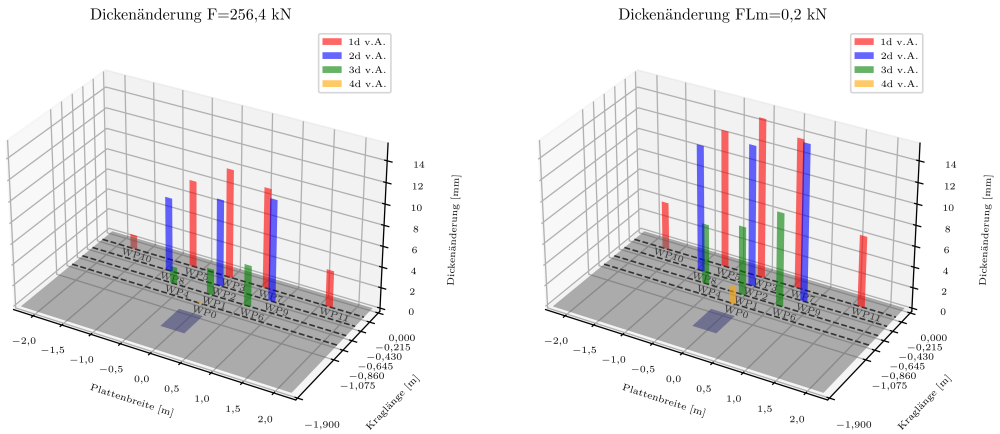

Abbildung D.142: V6 - Zeitabhängige Dickenmessungen nach dem Bruch

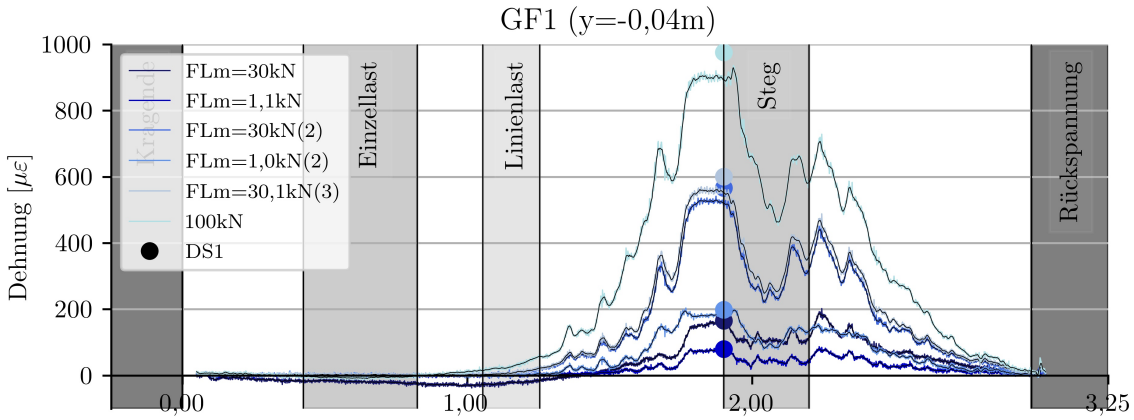

Abbildung D.143: V6 - Dehnung der Glasfaser GF1 während der Vorbelastung

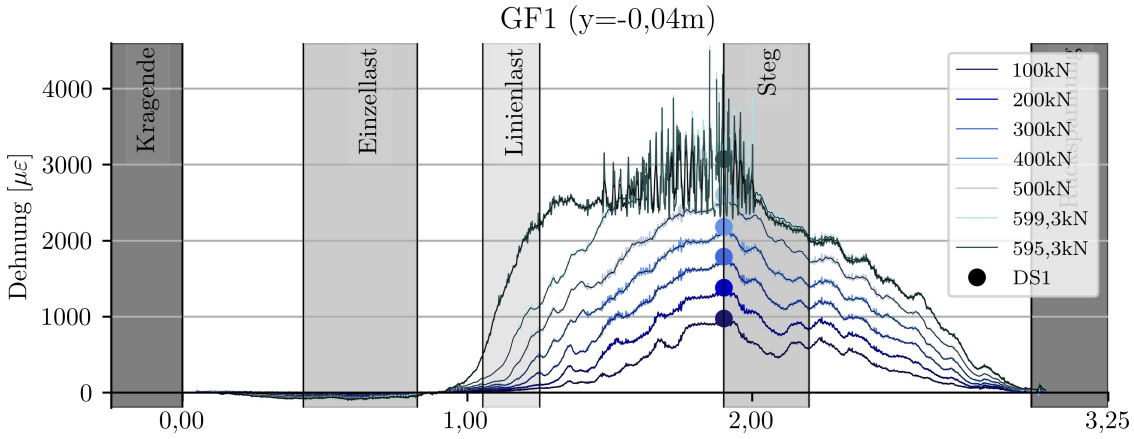

Abbildung D.144: V6 - Dehnung der Glasfaser GF1 bis zur Traglast

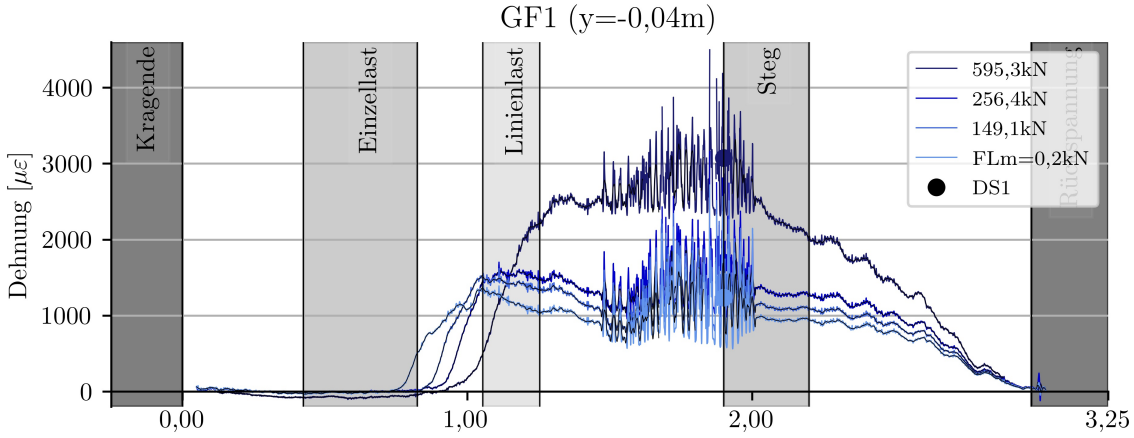

Abbildung D.145: V6 - Dehnung der Glasfaser GF1 nach dem Bruch

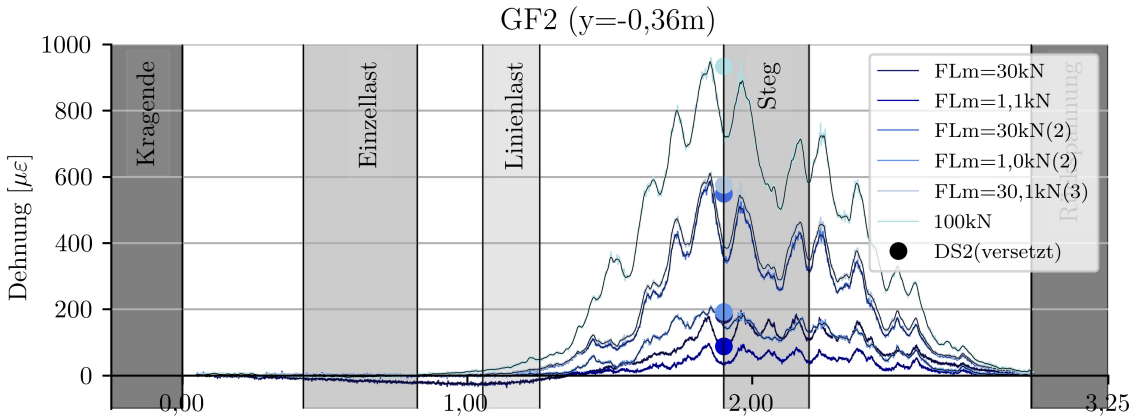

Abbildung D.146: V6 - Dehnung der Glasfaser GF2 während der Vorbelastung

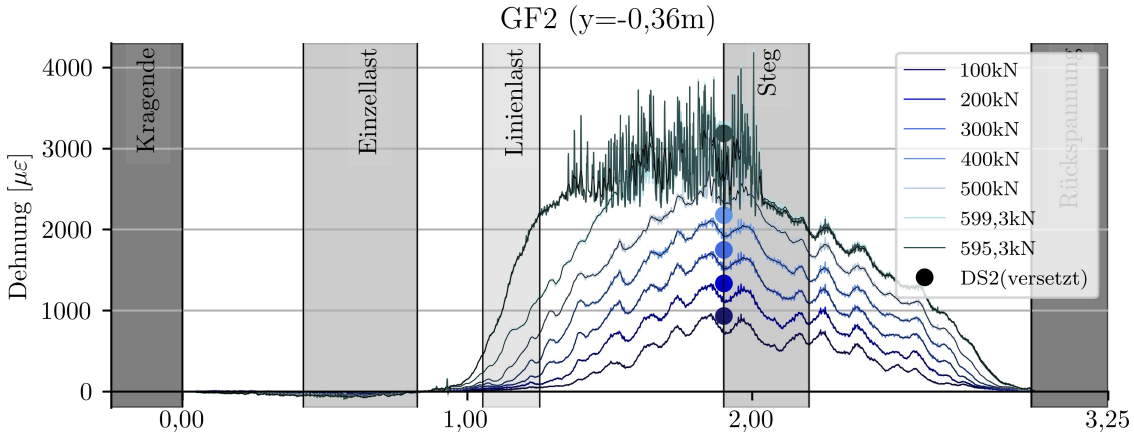

Abbildung D.147: V6 - Dehnung der Glasfaser GF2 bis zur Traglast

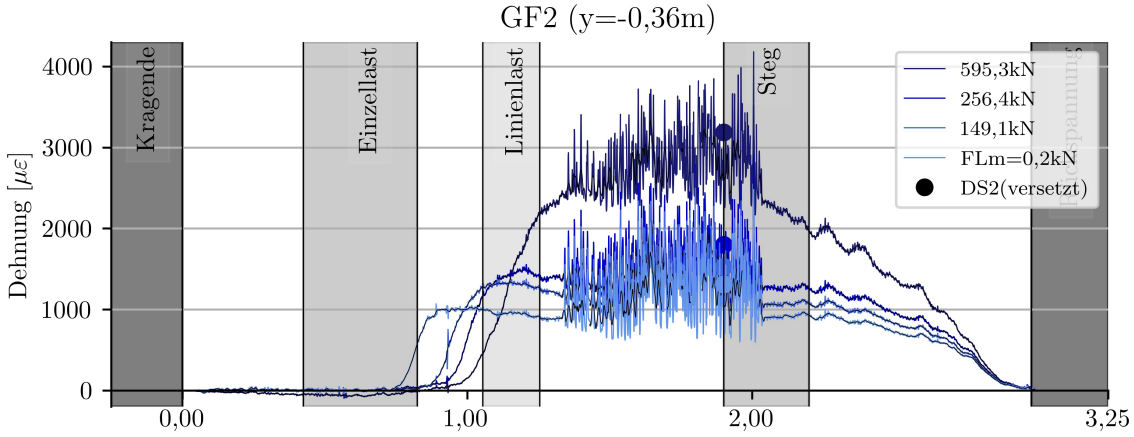

Abbildung D.148: V6 - Dehnung der Glasfaser GF2 nach dem Bruch

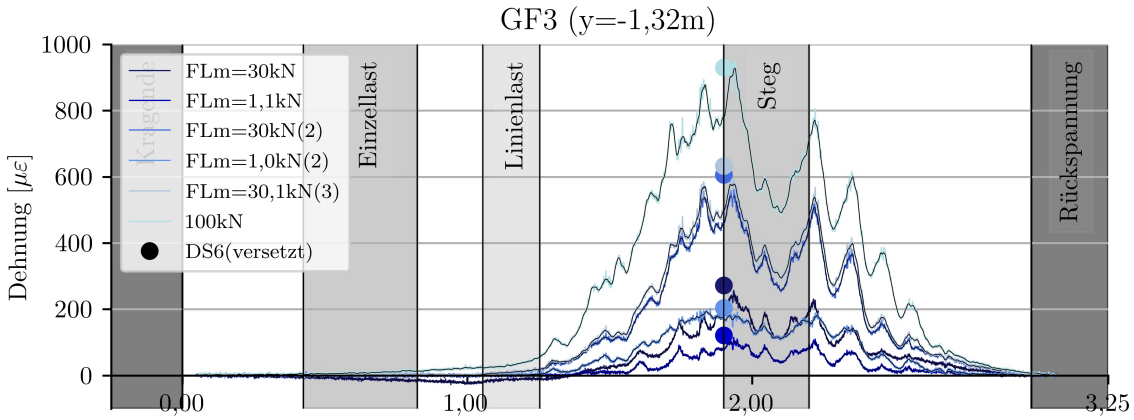

Abbildung D.149: V6 - Dehnung der Glasfaser GF3 während der Vorbelastung

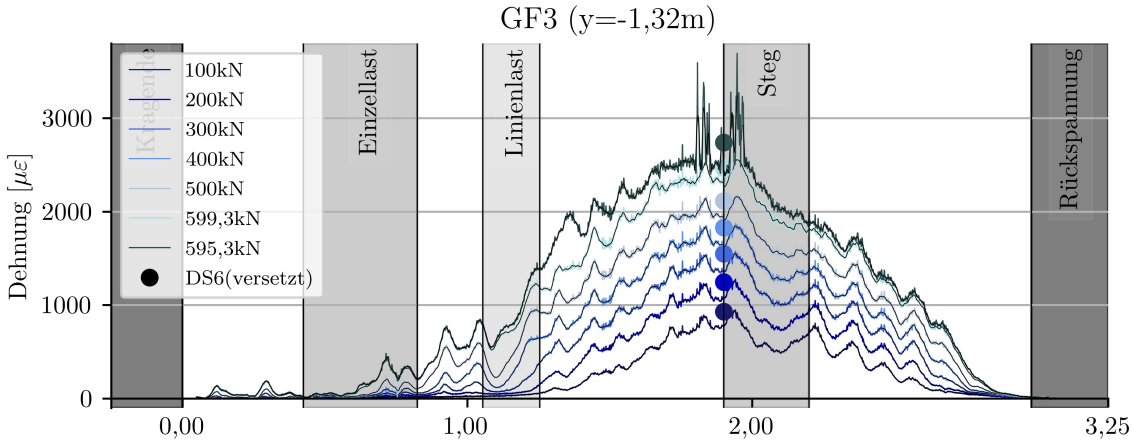

Abbildung D.150: V6 - Dehnung der Glasfaser GF3 bis zur Traglast

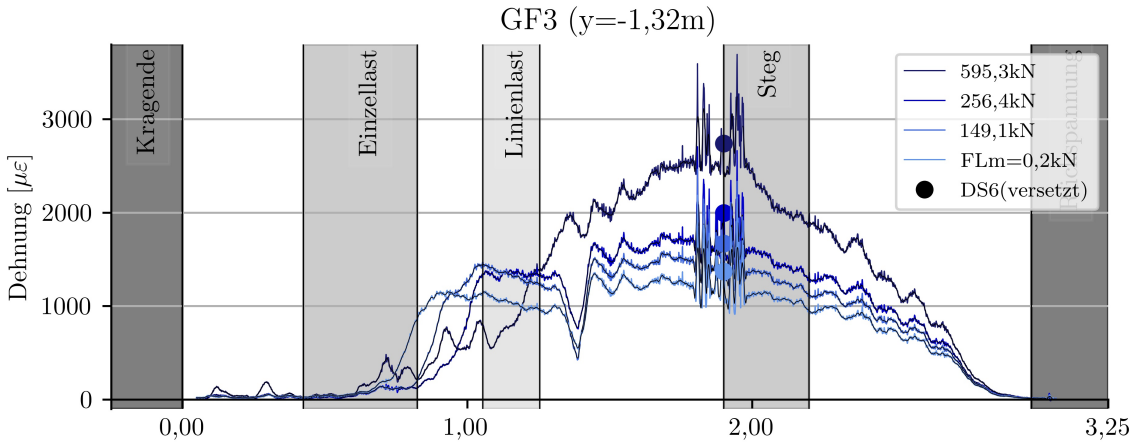

Abbildung D.151: V6 - Dehnung der Glasfaser GF3 nach dem Bruch

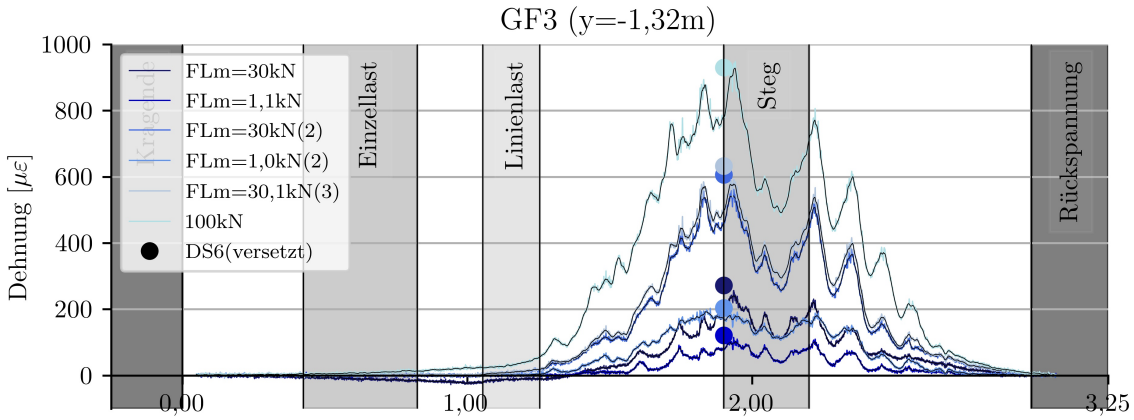

Abbildung D.152: V6 - Dehnung der Glasfaser GF4 während der Vorbelastung

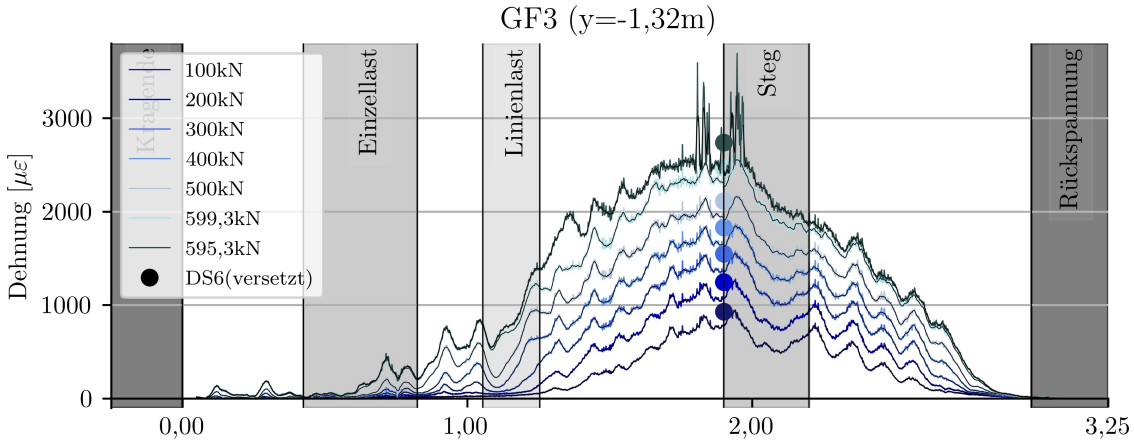

Abbildung D.153: V6 - Dehnung der Glasfaser GF4 bis zur Traglast

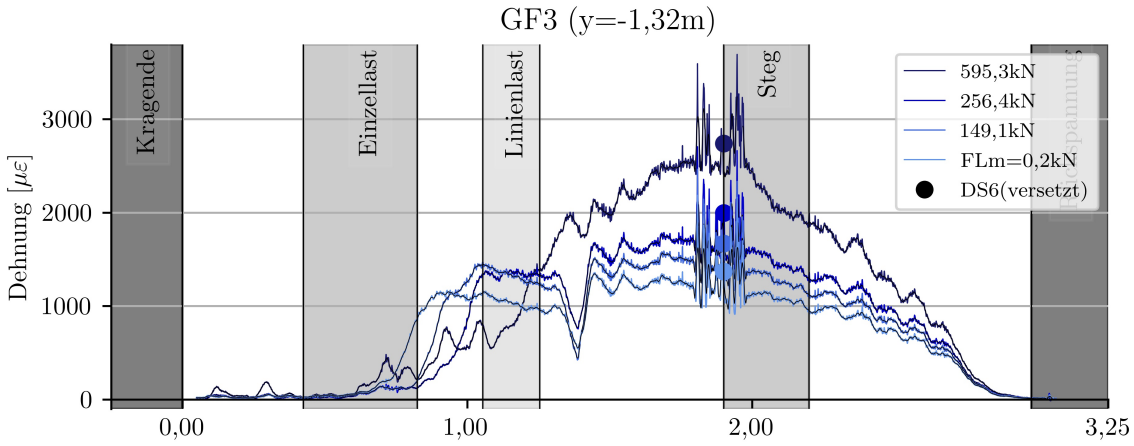

Abbildung D.154: V6 - Dehnung der Glasfaser GF4 nach dem Bruch

D.7 Versuch V7/3d-FL

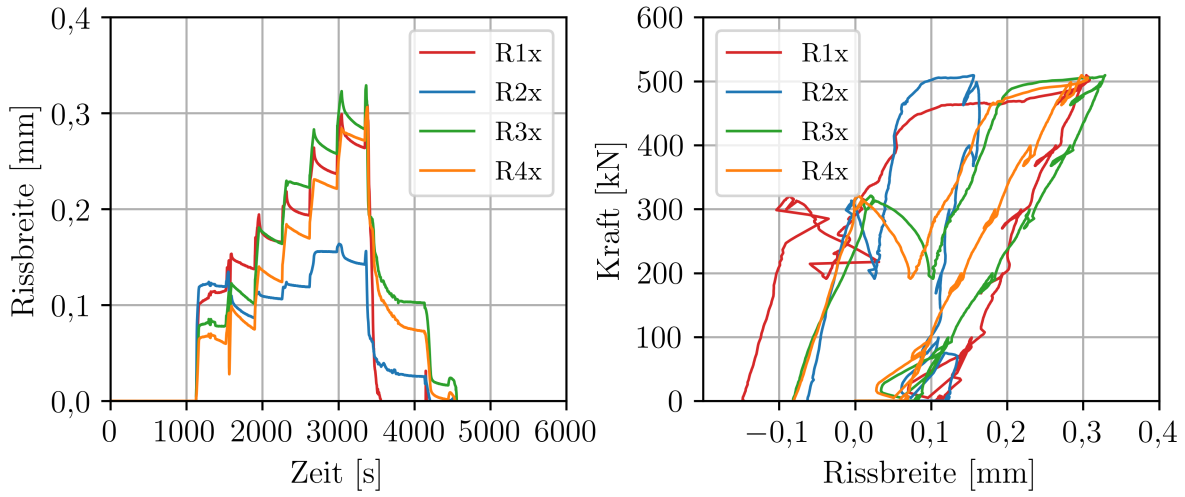

Abbildung D.155: V7 - Rissöffnungen R1x - R4x

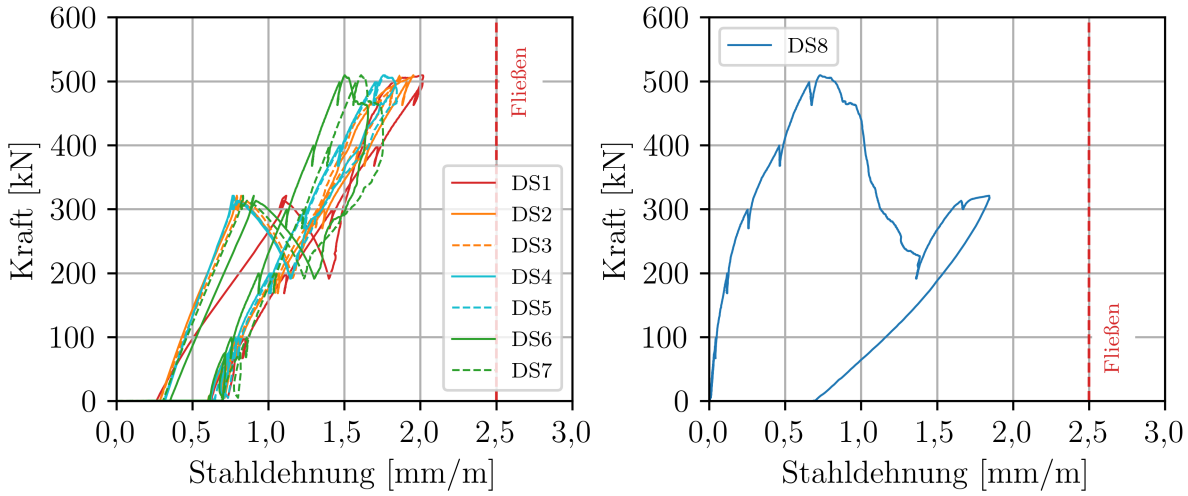

Abbildung D.156: V7 - Stahldehnungen DS1 - DS8

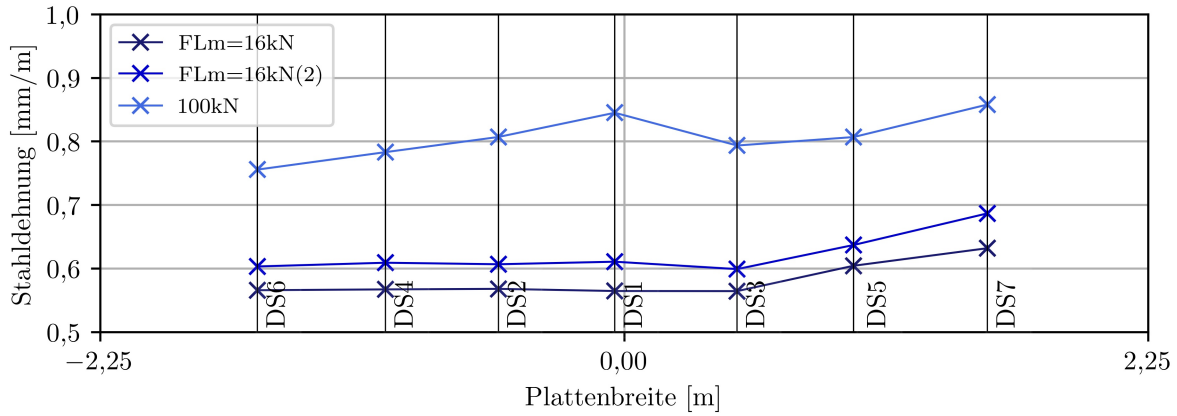

Abbildung D.157: V7 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Vorbelastung

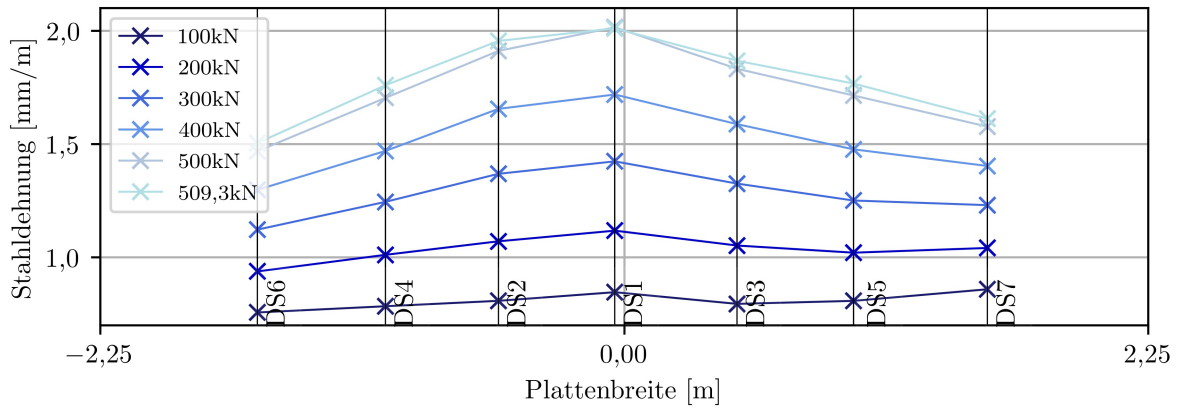

Abbildung D.158: V7 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - bis zur Traglast

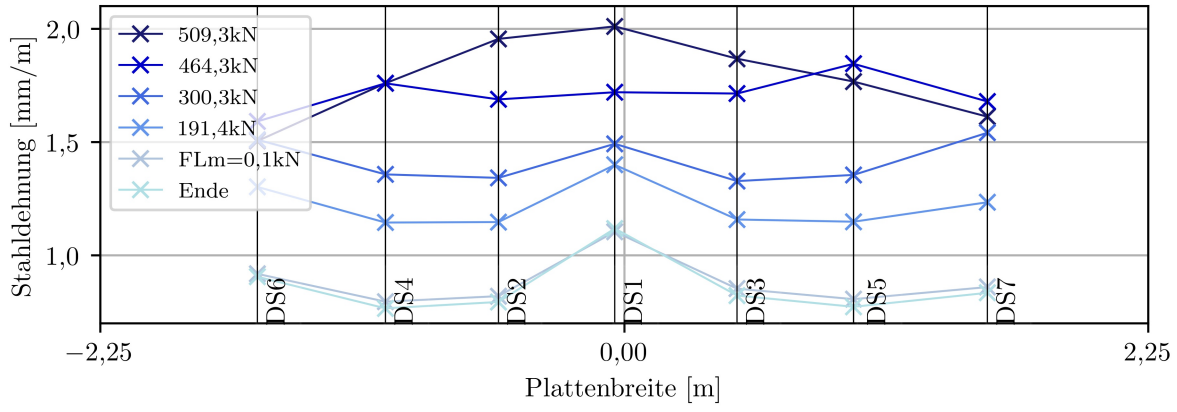

Abbildung D.159: V7 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Nachbruchverhalten

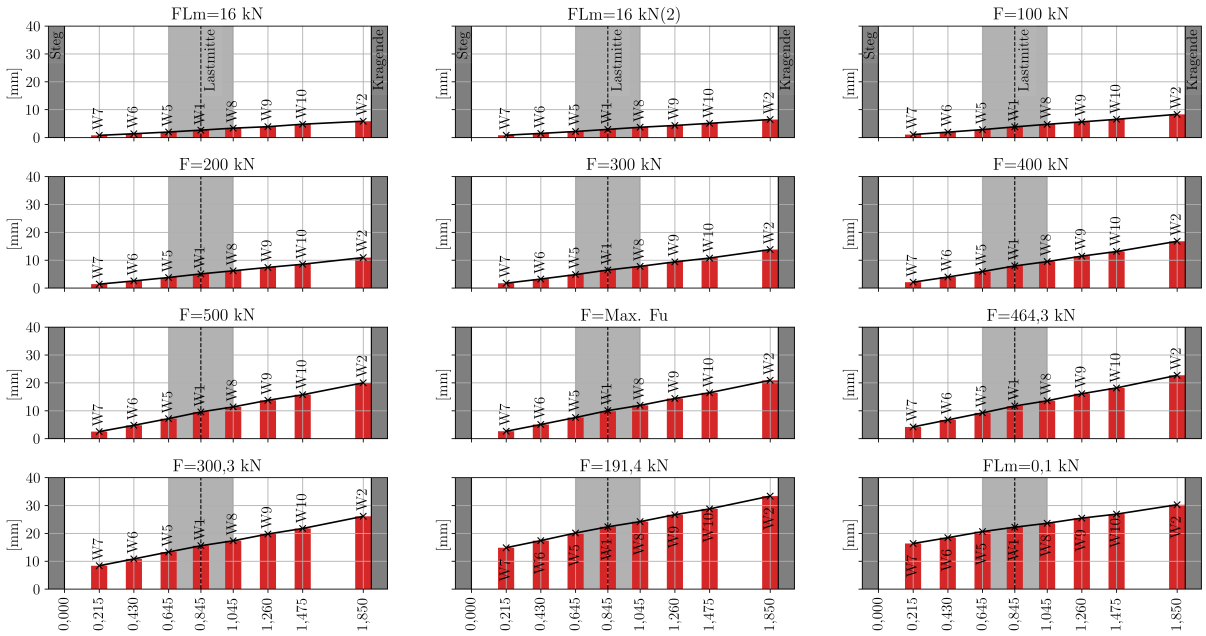

Abbildung D.160: V7 - Zeitabhängige Verformungen in Lastrichtung

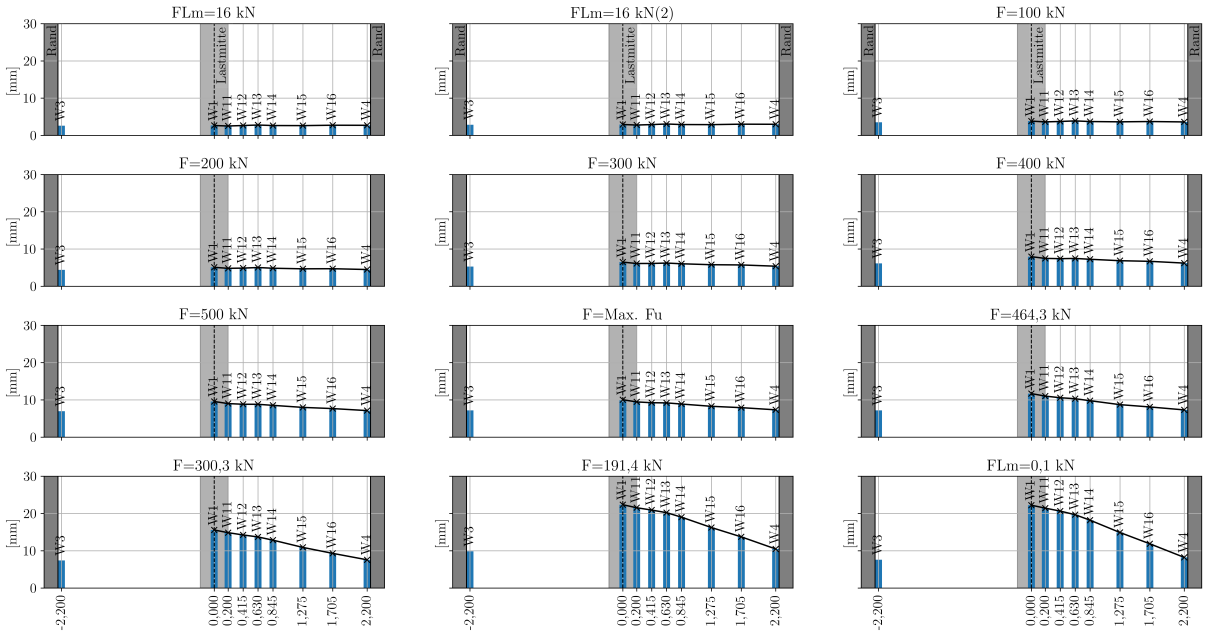

Abbildung D.161: V7 - Zeitabhängige Verformungen in der Lastachse

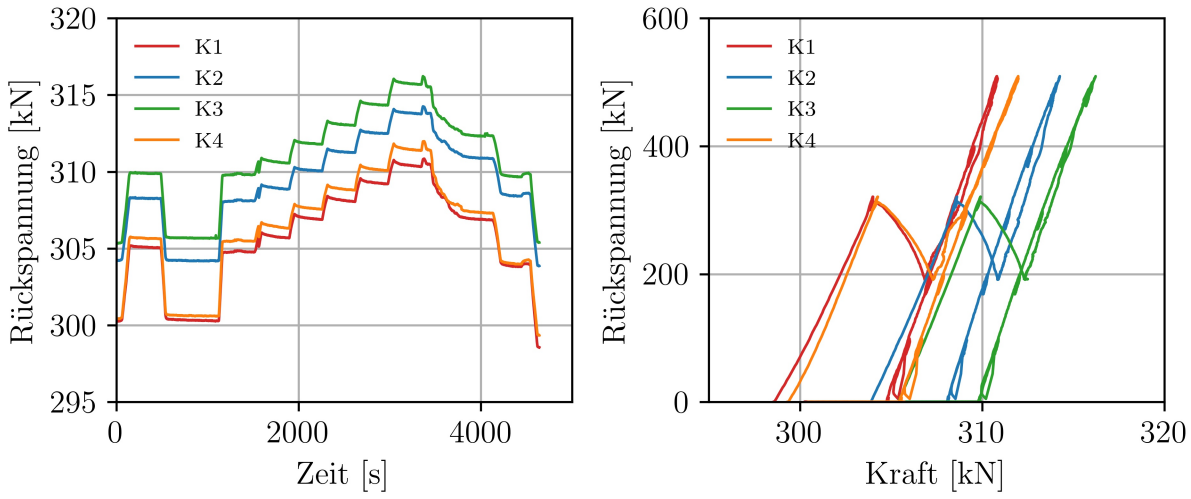

Abbildung D.162: V7 - Kräfte in der Rückspannung

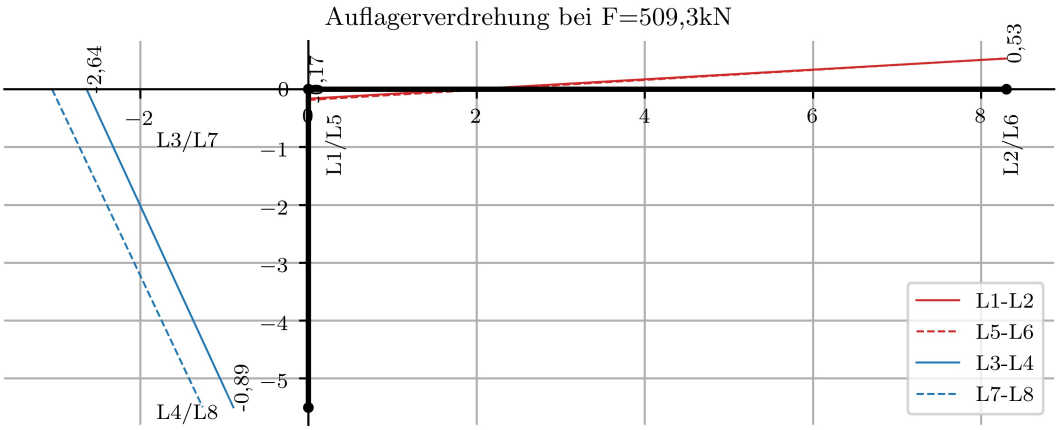

Abbildung D.163: V7 - Verdrehung bei max. Traglast F_u (Werte von L1 - L4)

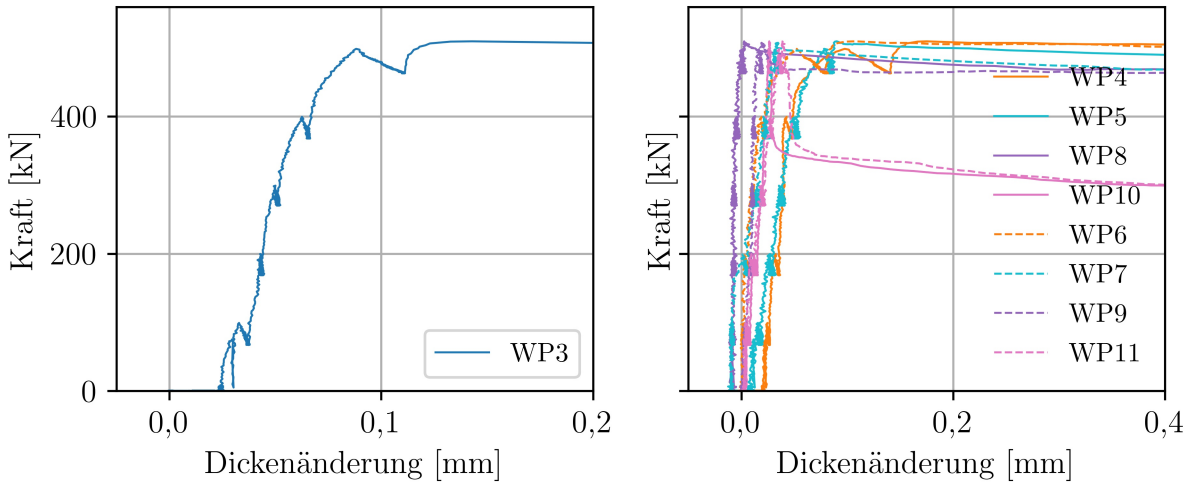

Abbildung D.164: V7 - Kraft - Dickenmessungen WP1 - WP11

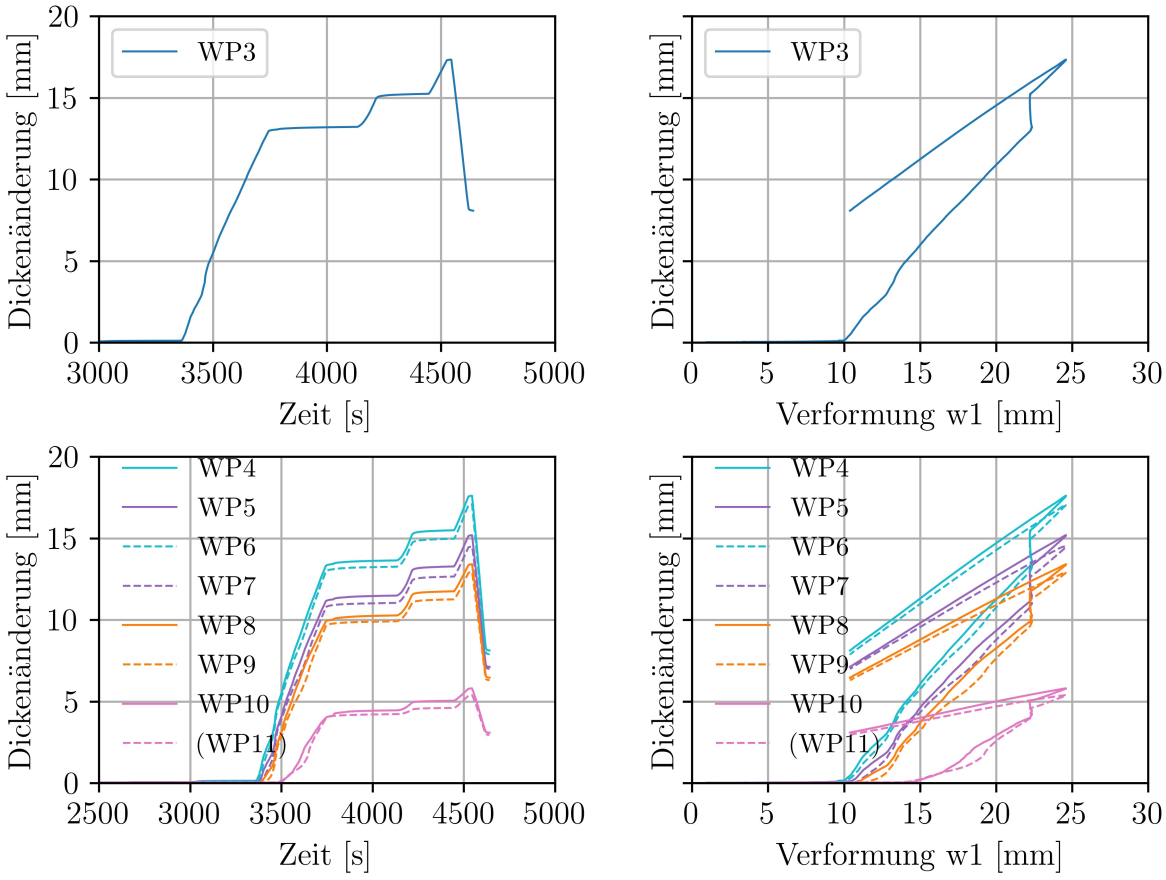

Abbildung D.165: V7 - Zeit/Verformung - Dickenmessungen WP1 - WP11

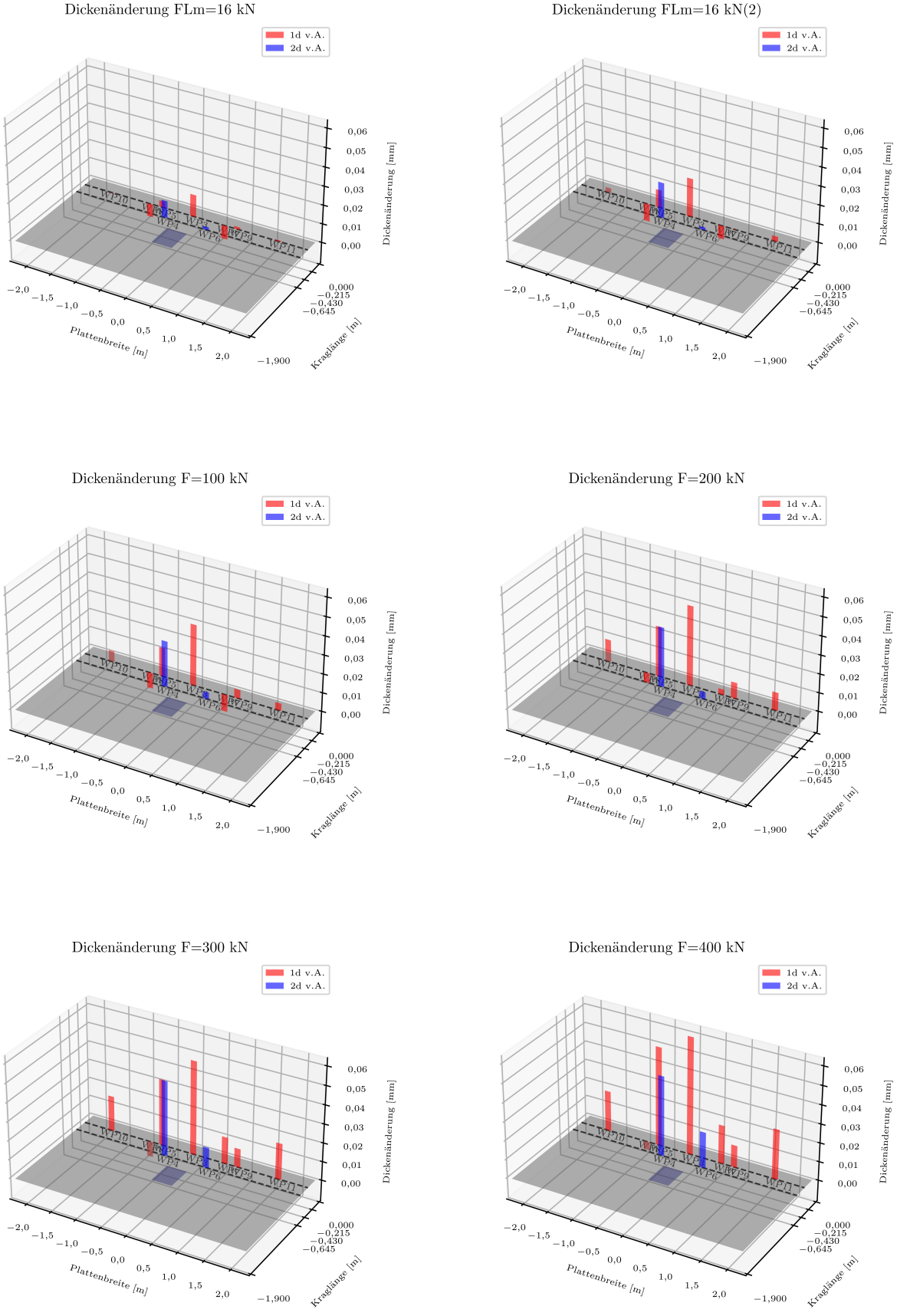

Abbildung D.166: V7 - Zeitabhängige Dickenmessungen in den ersten Laststufen

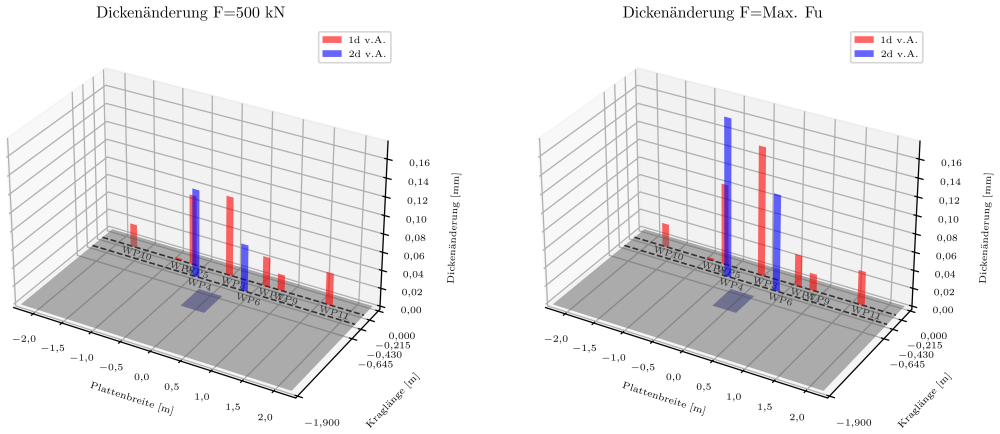

Abbildung D.167: V7 - Zeitabhängige Dickenmessungen bis zur Traglast

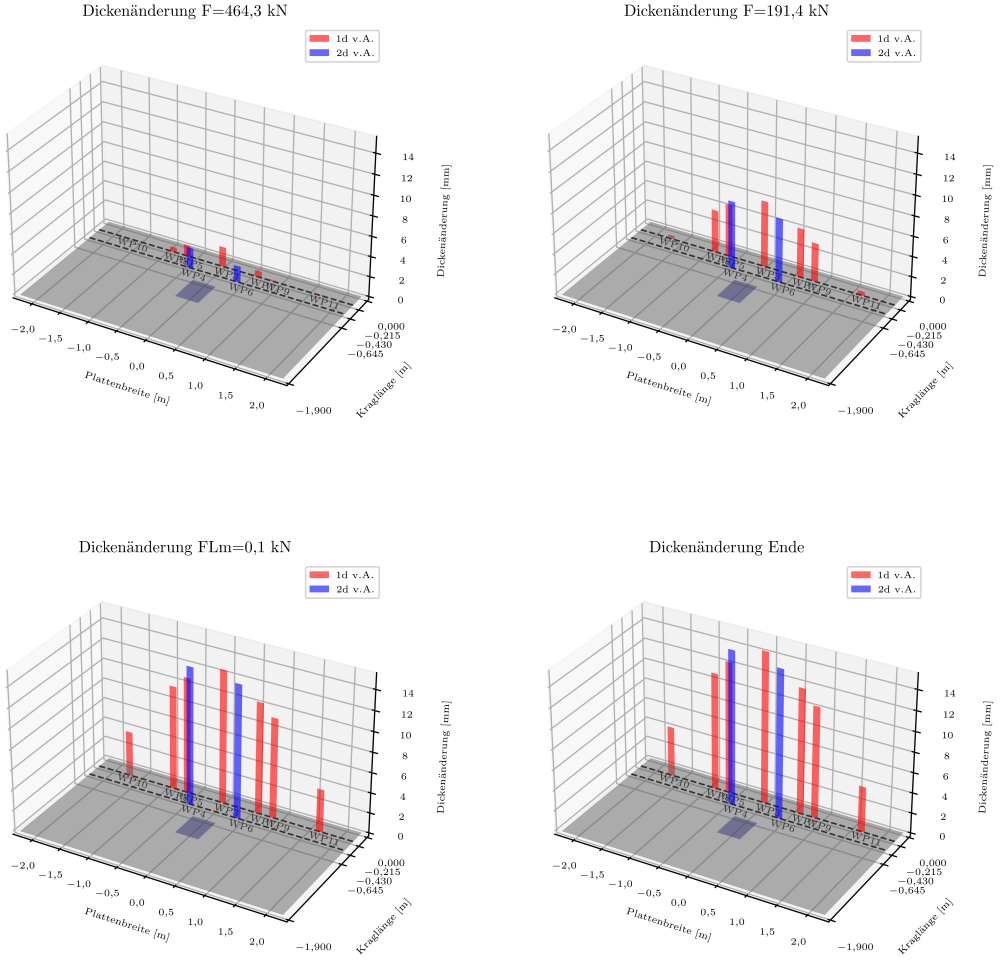

Abbildung D.168: V7 - Zeitabhängige Dickenmessungen nach dem Bruch

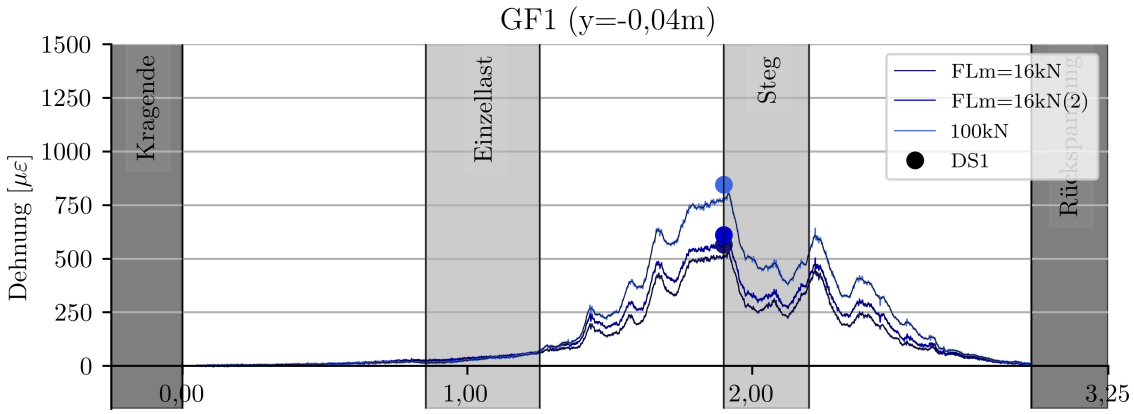

Abbildung D.169: V7 - Dehnung der Glasfaser GF1 während der Vorbelastung

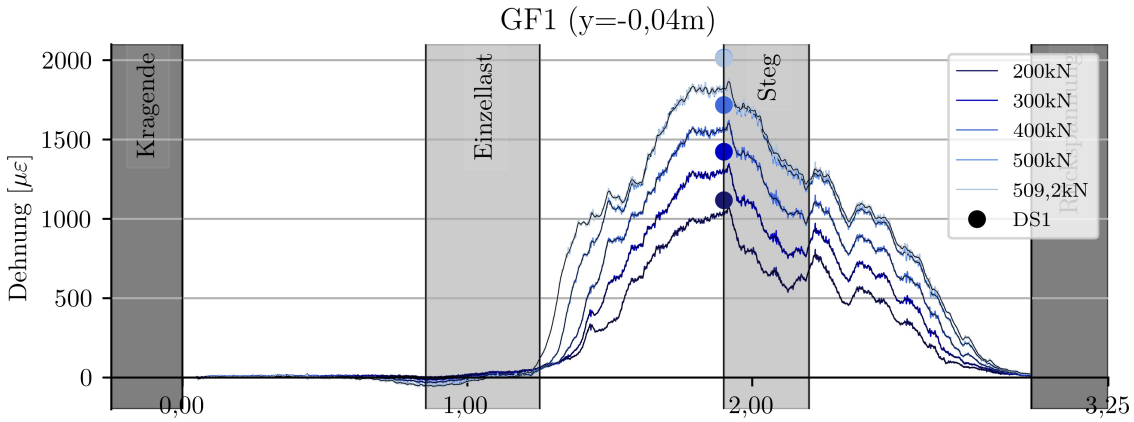

Abbildung D.170: V7 - Dehnung der Glasfaser GF1 bis zur Traglast

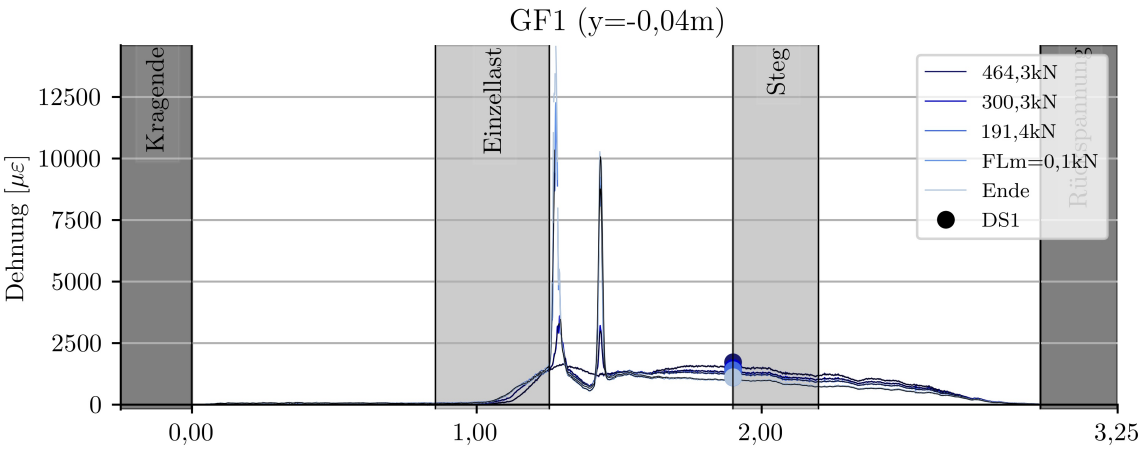

Abbildung D.171: V7 - Dehnung der Glasfaser GF1 nach dem Bruch

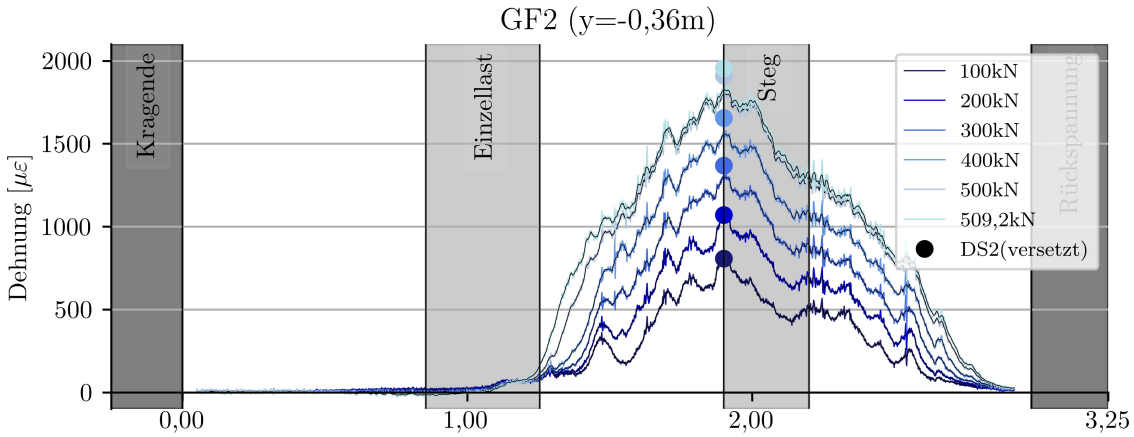

Abbildung D.172: V7 - Dehnung der Glasfaser GF2 während der Vorbelastung

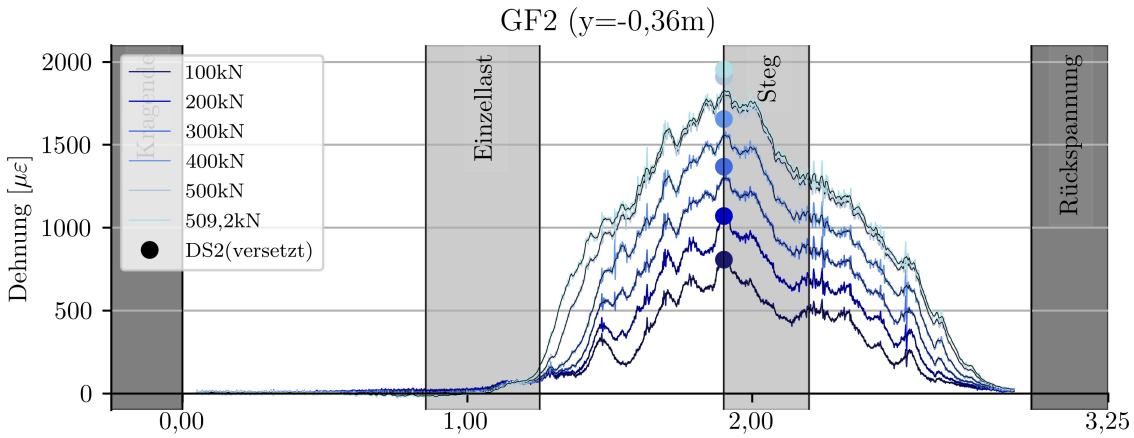

Abbildung D.173: V7 - Dehnung der Glasfaser GF2 bis zur Traglast

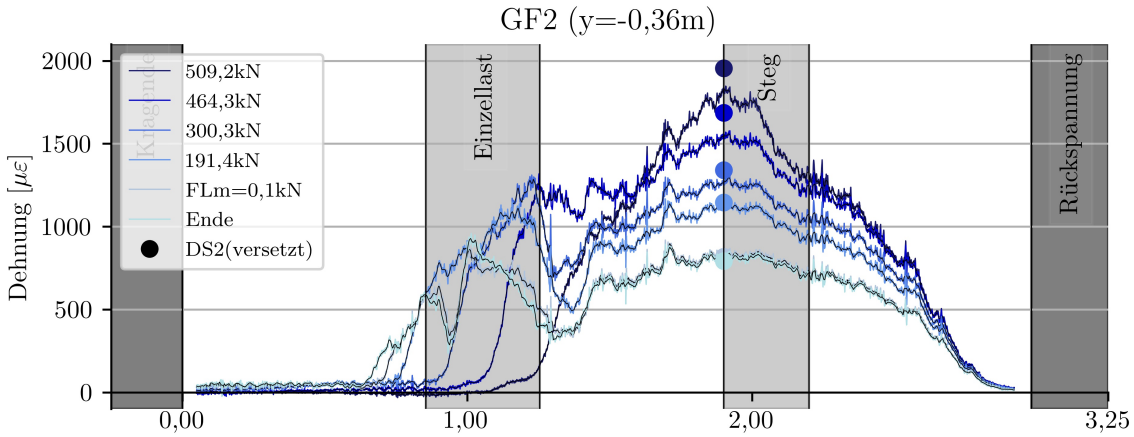

Abbildung D.174: V7 - Dehnung der Glasfaser GF2 nach dem Bruch

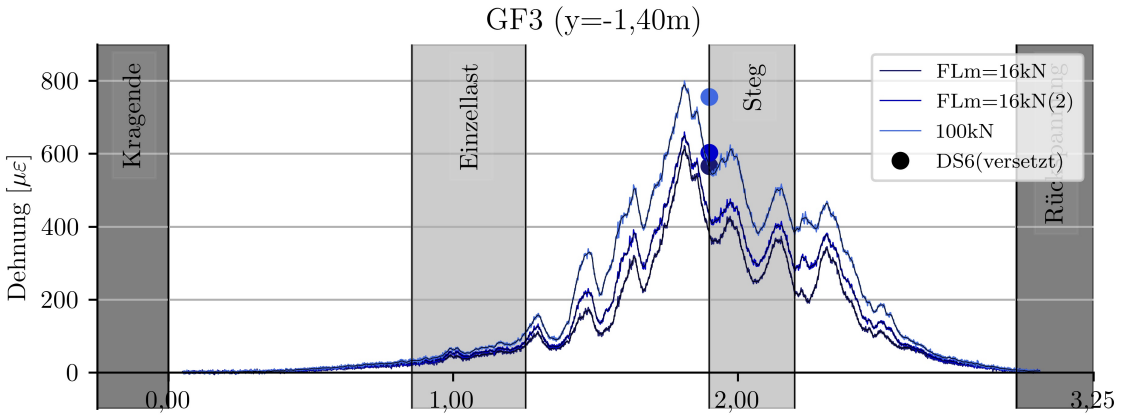

Abbildung D.175: V7 - Dehnung der Glasfaser GF3 während der Vorbelastung

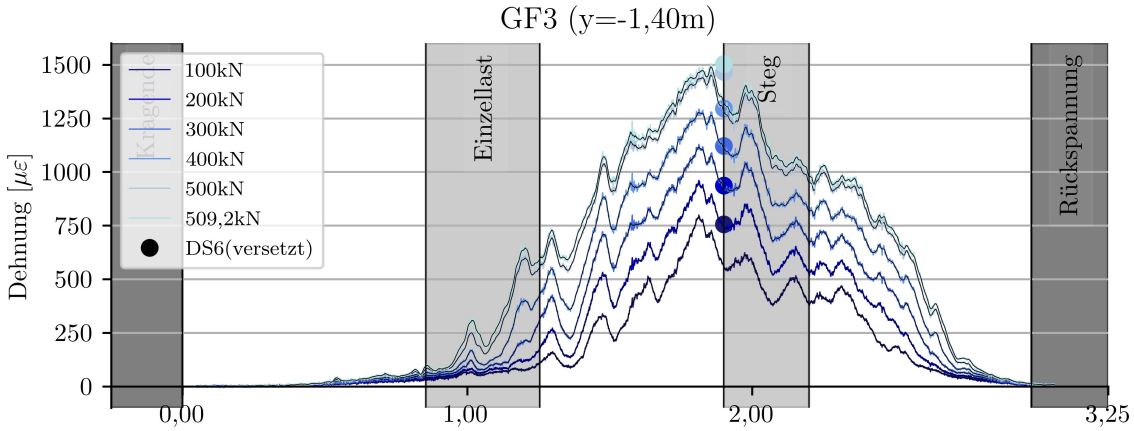

Abbildung D.176: V7 - Dehnung der Glasfaser GF3 bis zur Traglast

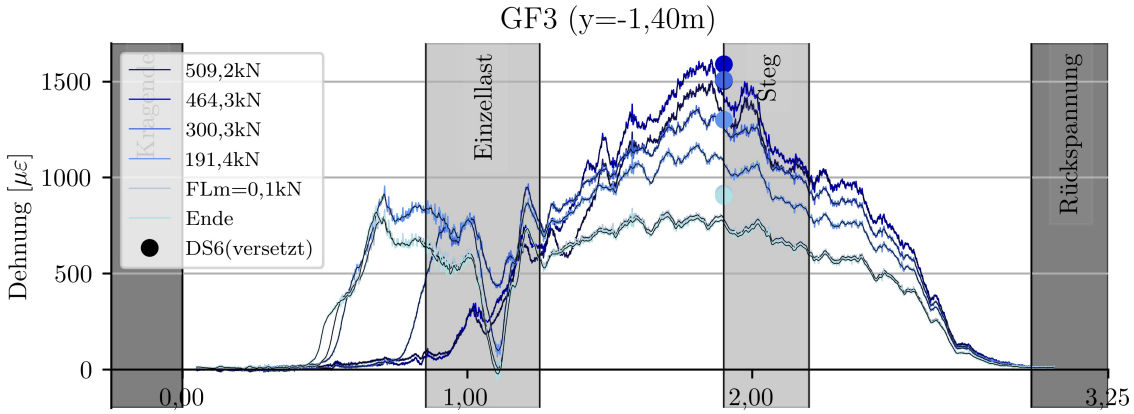

Abbildung D.177: V7 - Dehnung der Glasfaser GF3 nach dem Bruch

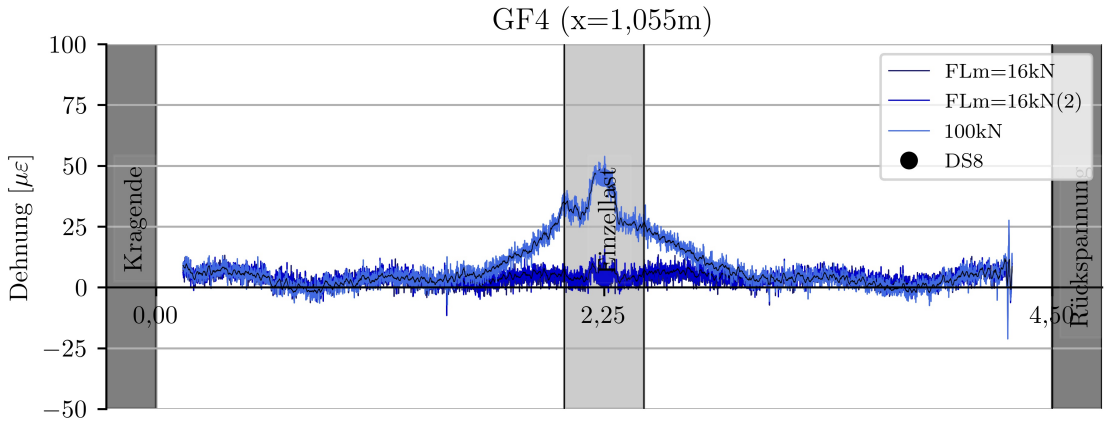

Abbildung D.178: V7 - Dehnung der Glasfaser GF4 während der Vorbelastung

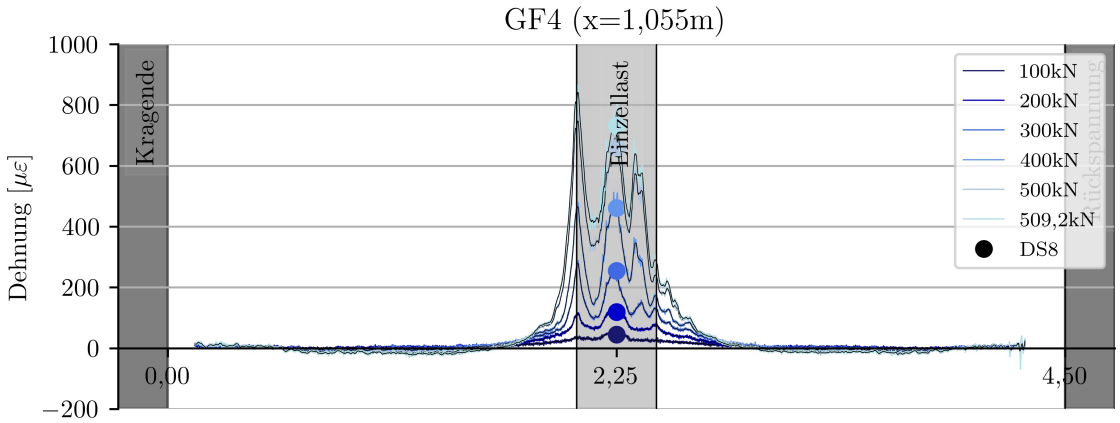

Abbildung D.179: V7 - Dehnung der Glasfaser GF4 bis zur Taglast

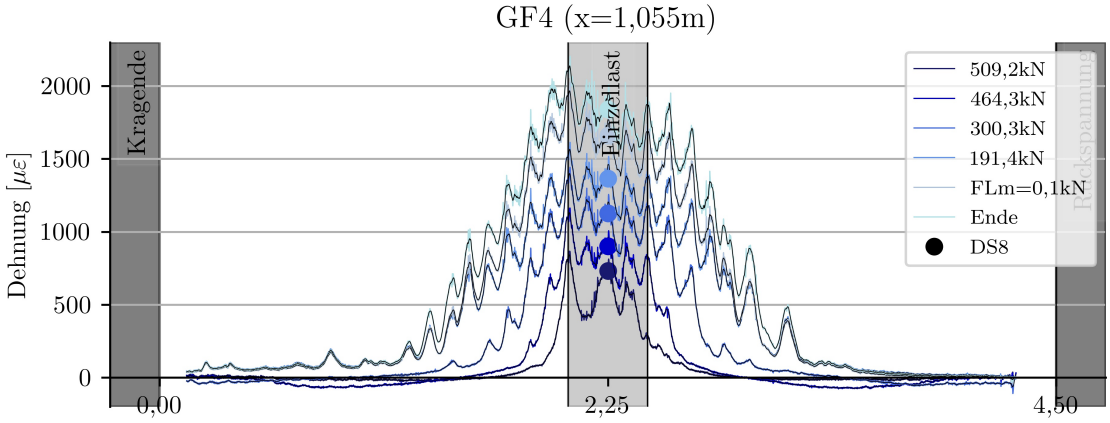

Abbildung D.180: V7 - Dehnung der Glasfaser GF4 nach dem Bruch

D.8 Versuch V8/⌀8-300-2

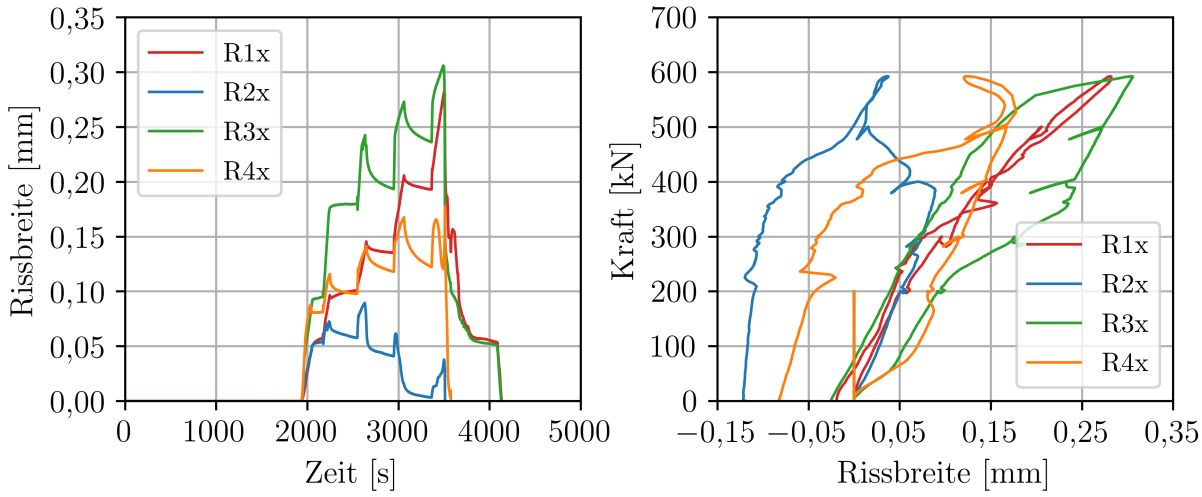

Abbildung D.181: V8 - Rissöffnungen R1x - R4x

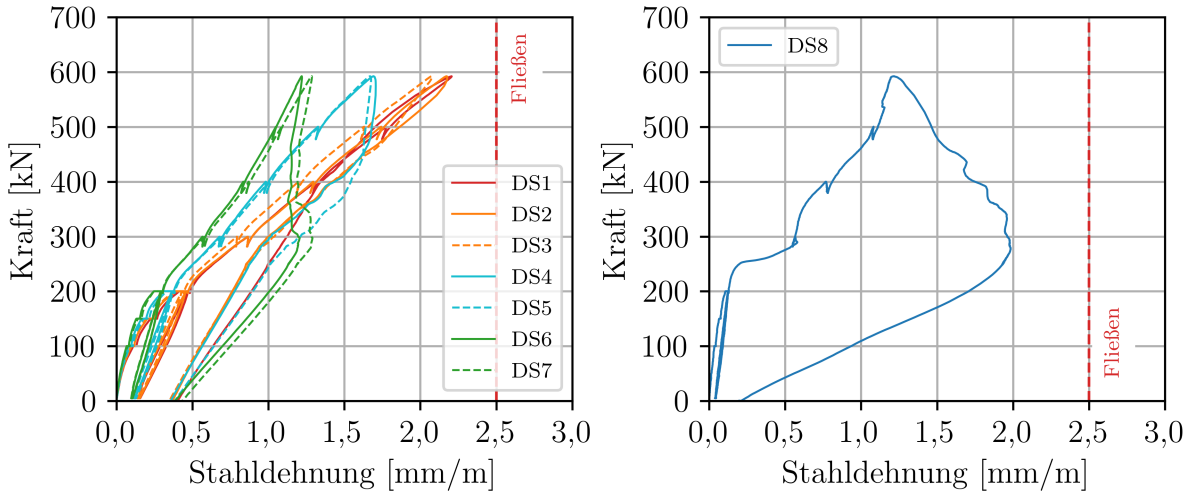

Abbildung D.182: V8 - Stahldehnungen DS1 - DS8

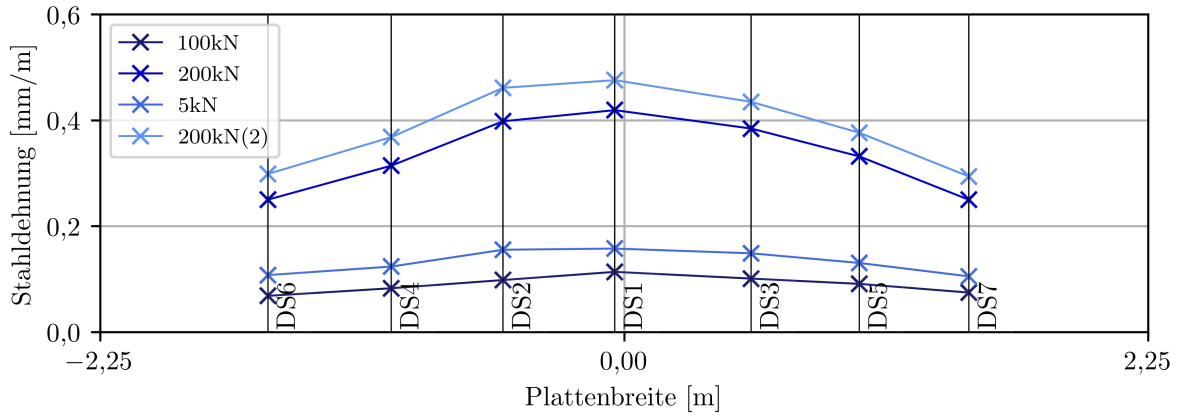

Abbildung D.183: V8 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Vorbelastung

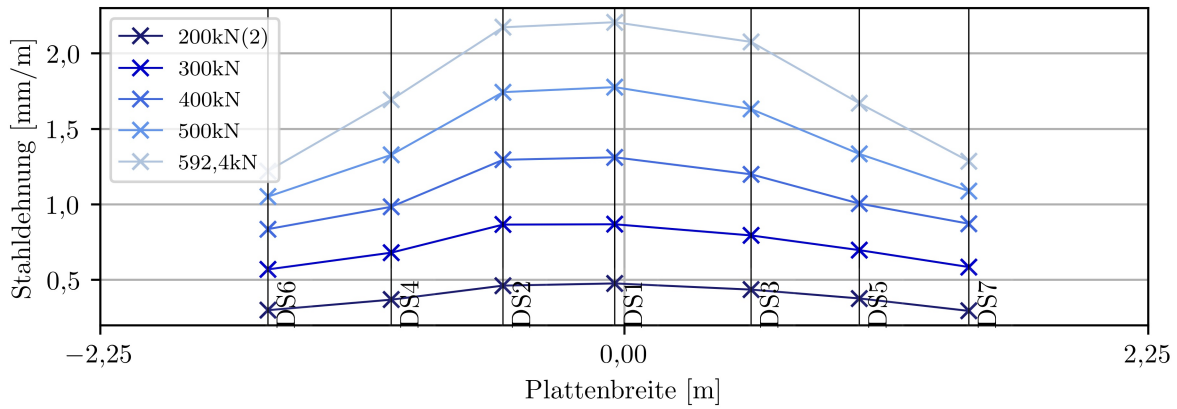

Abbildung D.184: V8 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - bis zur Traglast

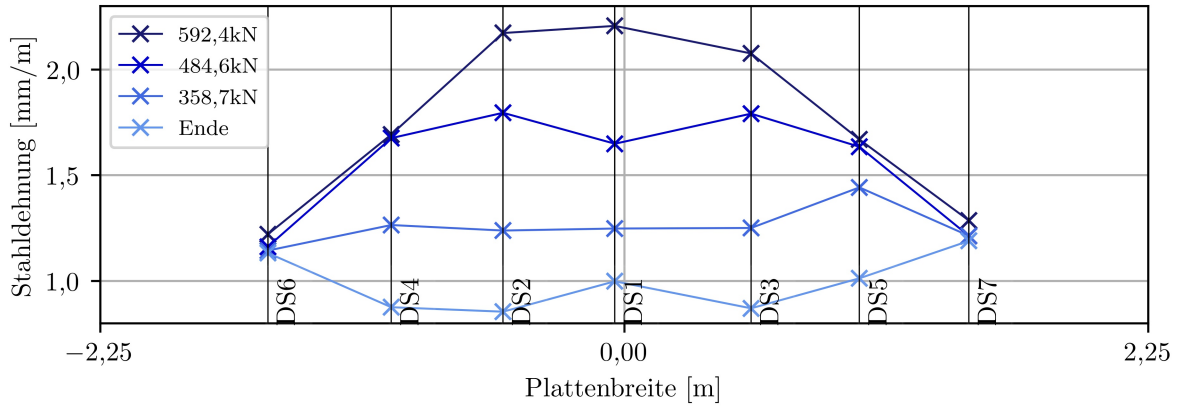

Abbildung D.185: V8 - Zeitabhängige Stahldehnungen am Anschnitt - Nachbruchverhalten

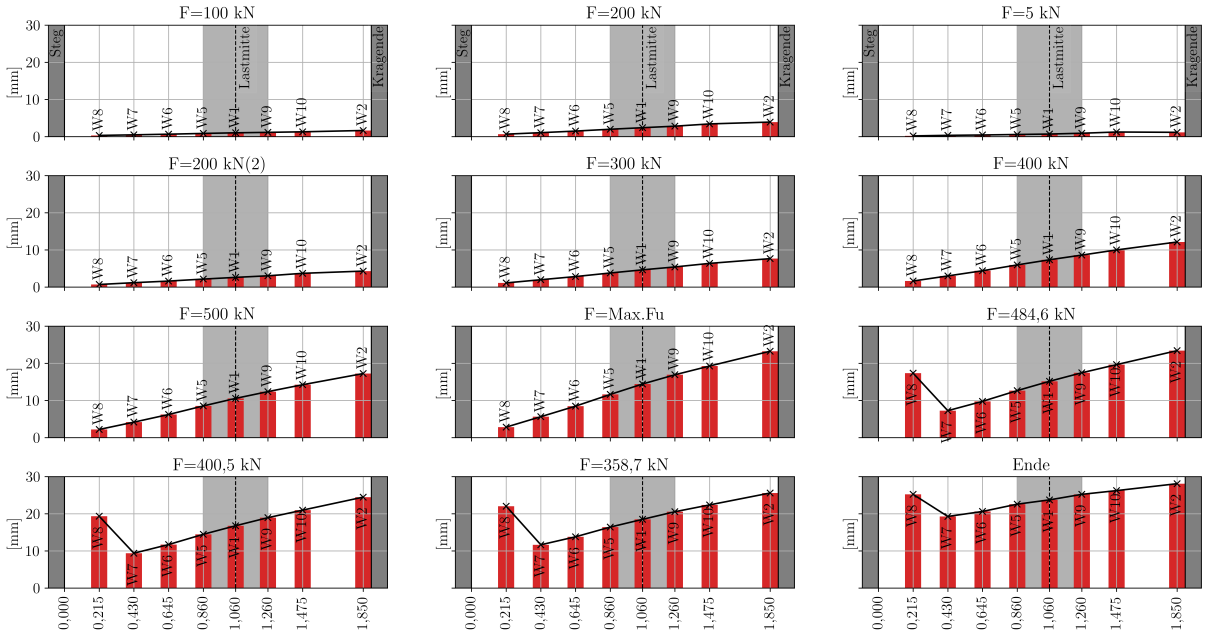

Abbildung D.186: V8 - Zeitabhängige Verformungen in Lastrichtung

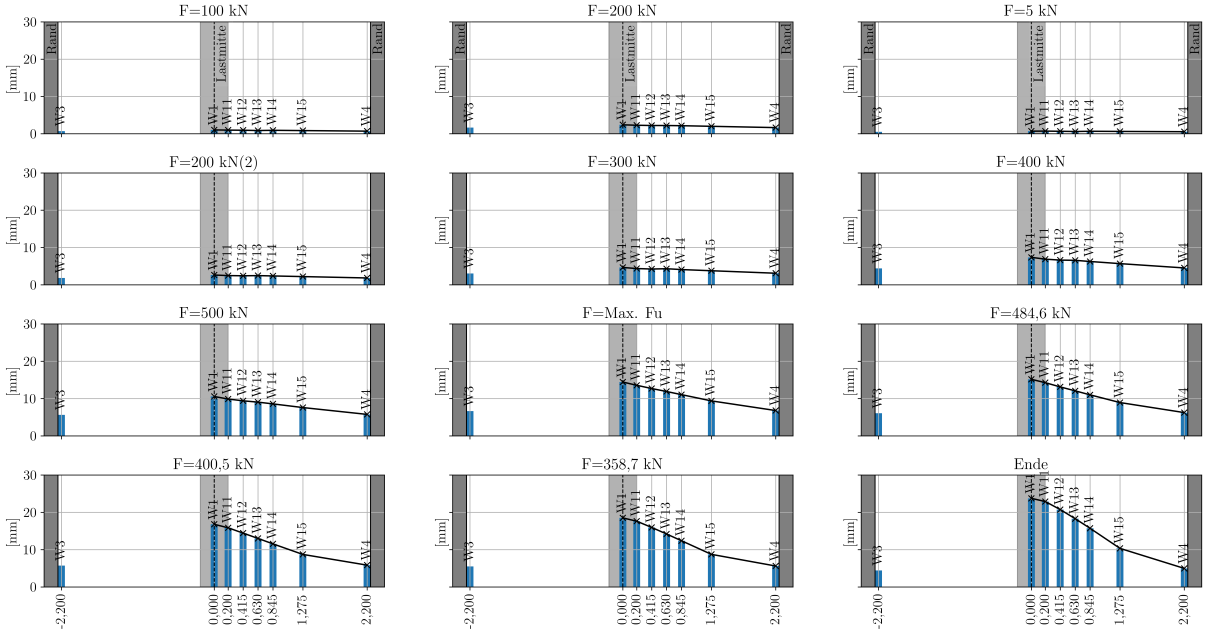

Abbildung D.187: V8 - Zeitabhängige Verformungen in der Lastachse

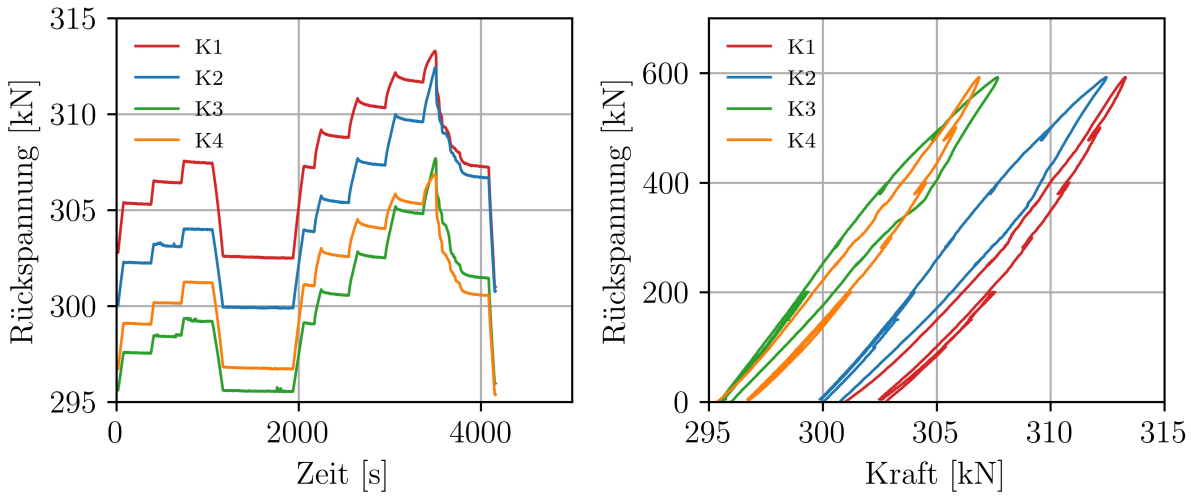

Abbildung D.188: V8 - Kräfte in der Rückspannung

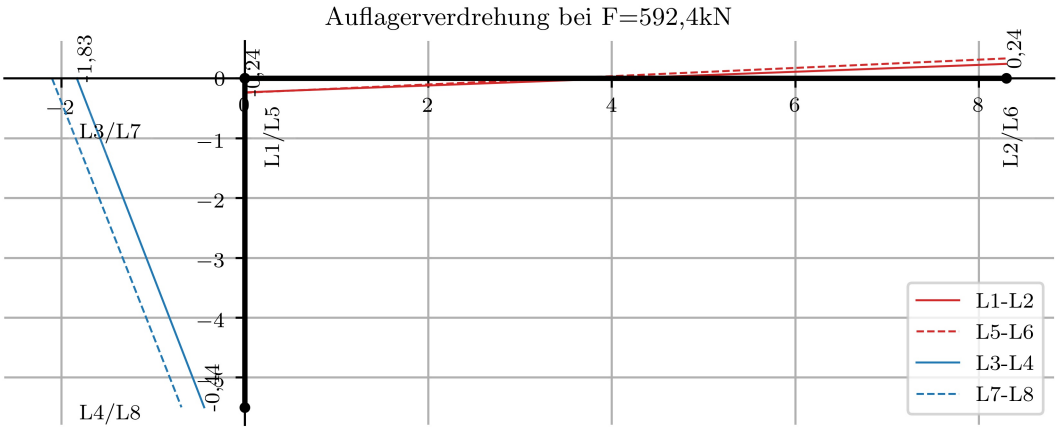

Abbildung D.189: V8 - Verdrehung bei max. Traglast F_u (Werte von L1 - L4)

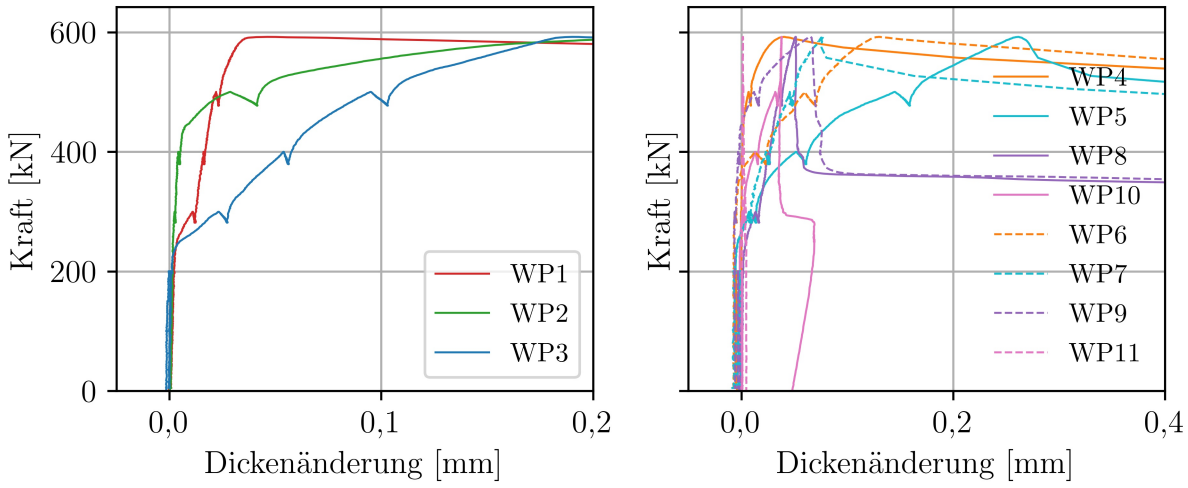

Abbildung D.190: V8 - Kraft - Dickenmessungen WP1 - WP11

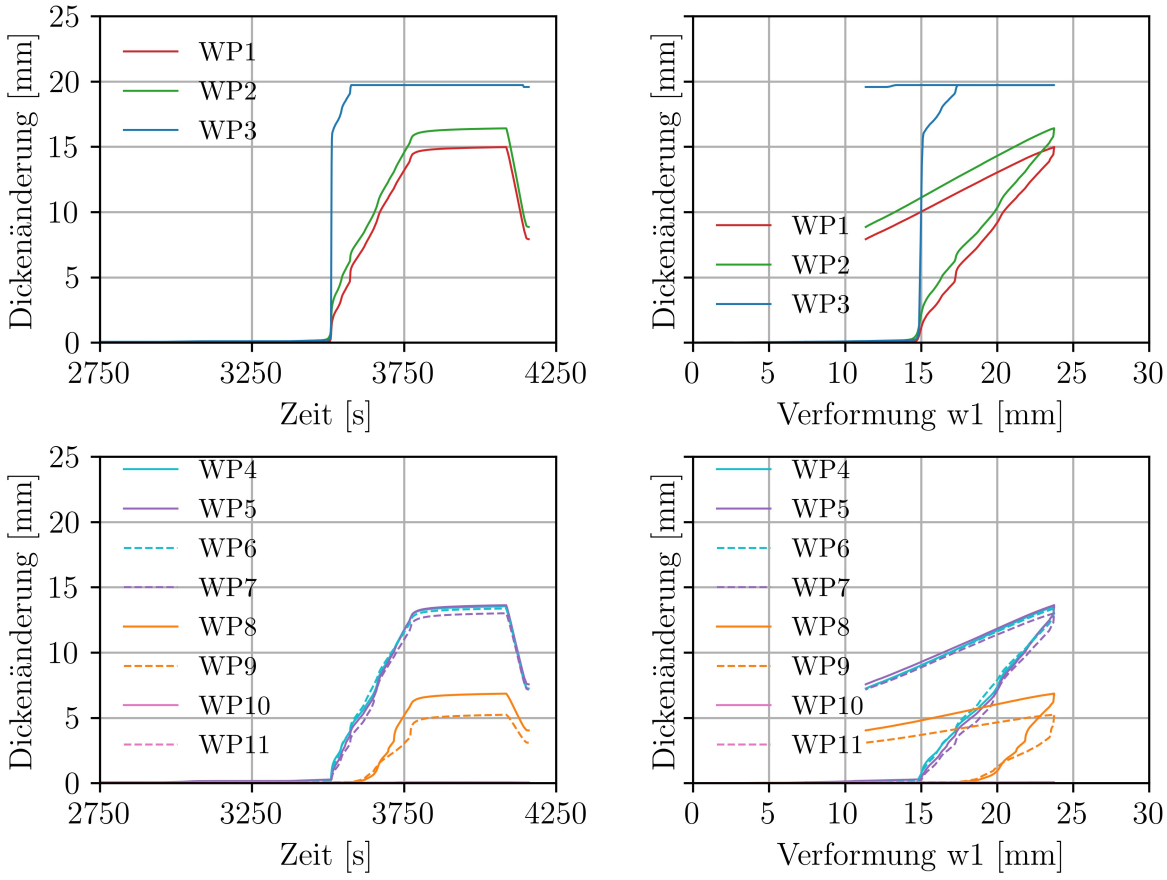

Abbildung D.191: V8 - Zeit/Verformung - Dickenmessungen WP1 - WP11

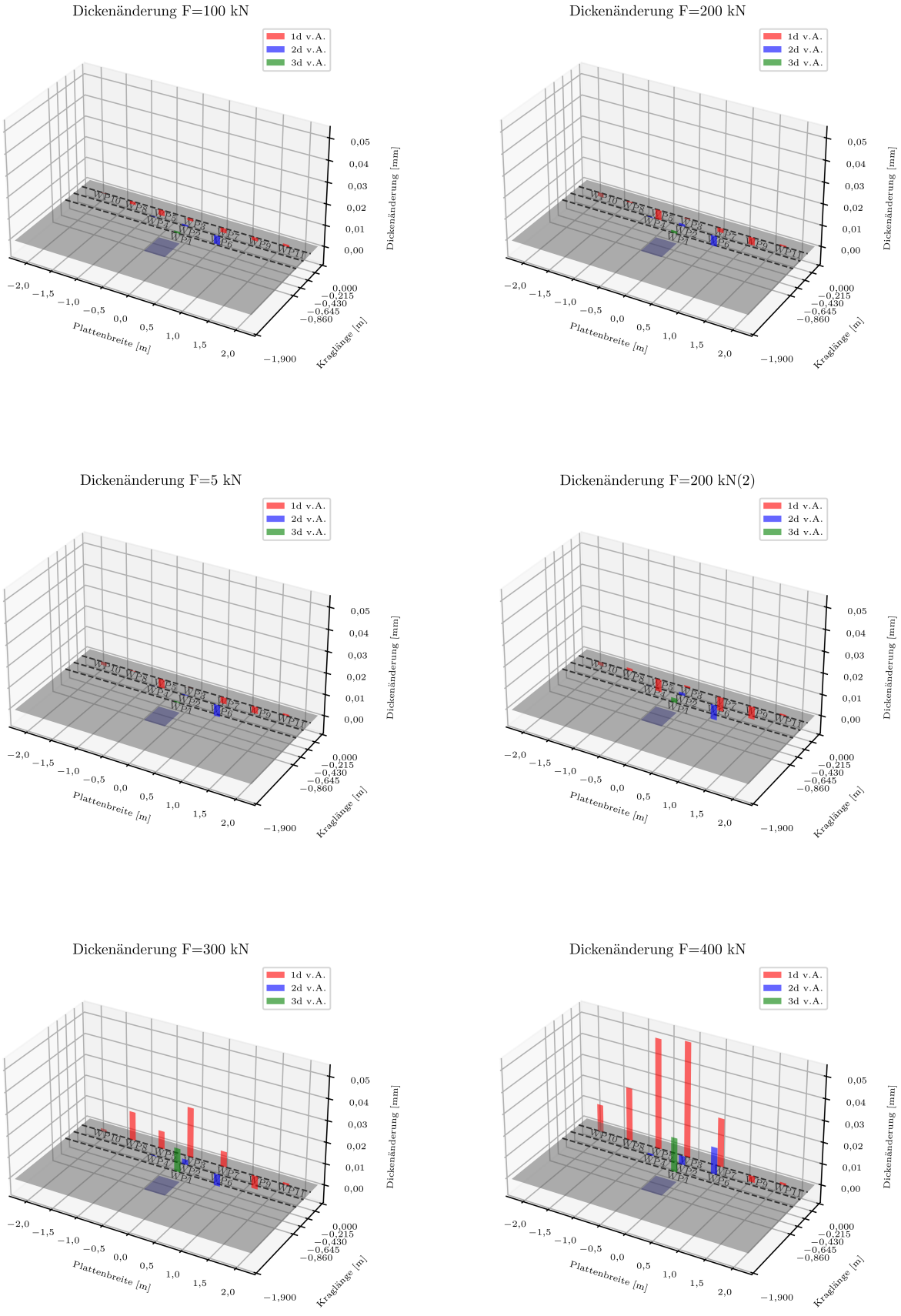

Abbildung D.192: V8 - Zeitabhängige Dickenmessungen in den ersten Laststufen

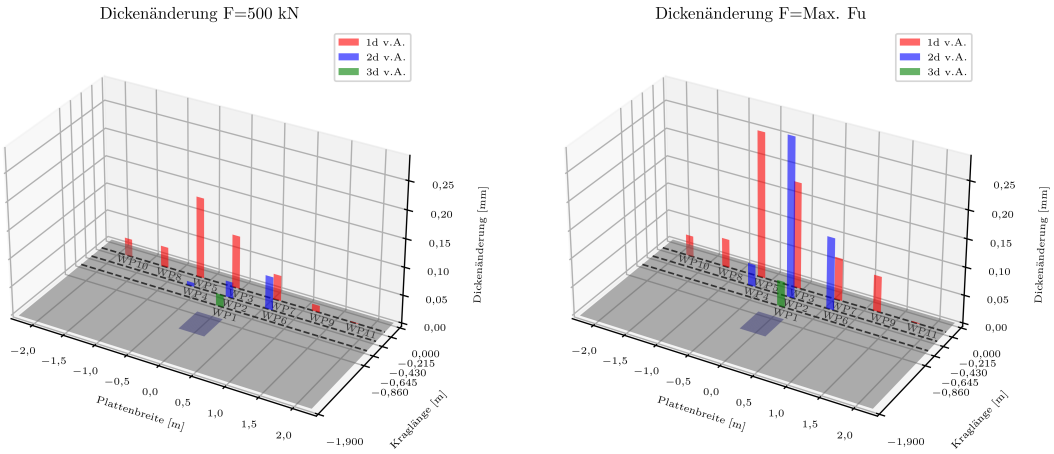

Abbildung D.193: V8 - Zeitabhängige Dickenmessungen bis zur Traglast

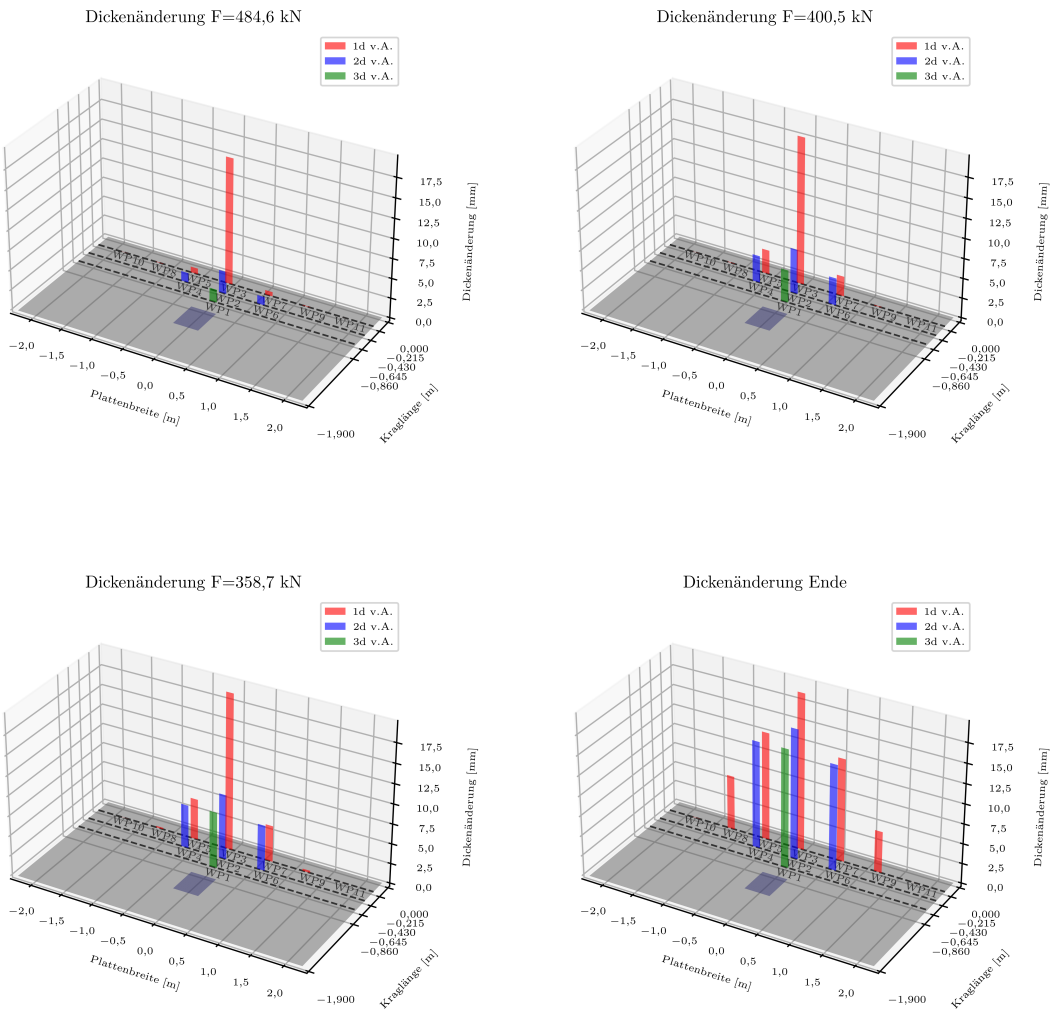

Abbildung D.194: V8 - Zeitabhängige Dickenmessungen nach dem Bruch

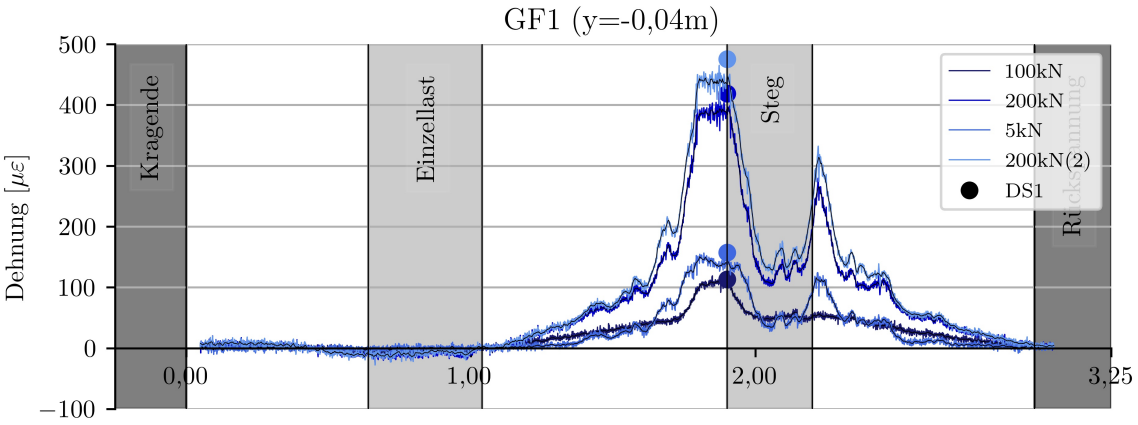

Abbildung D.195: V8 - Dehnung der Glasfaser GF1 während der Vorbelastung

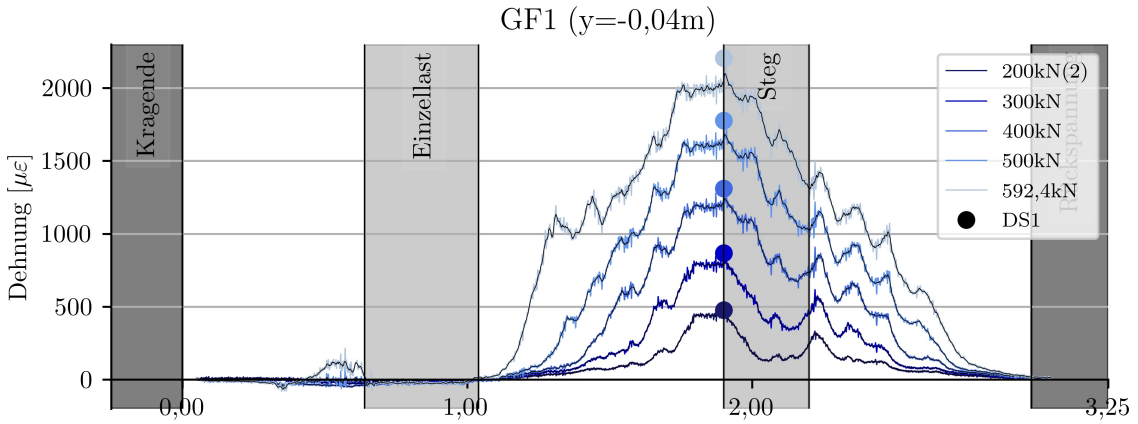

Abbildung D.196: V8 - Dehnung der Glasfaser GF1 bis zur Traglast

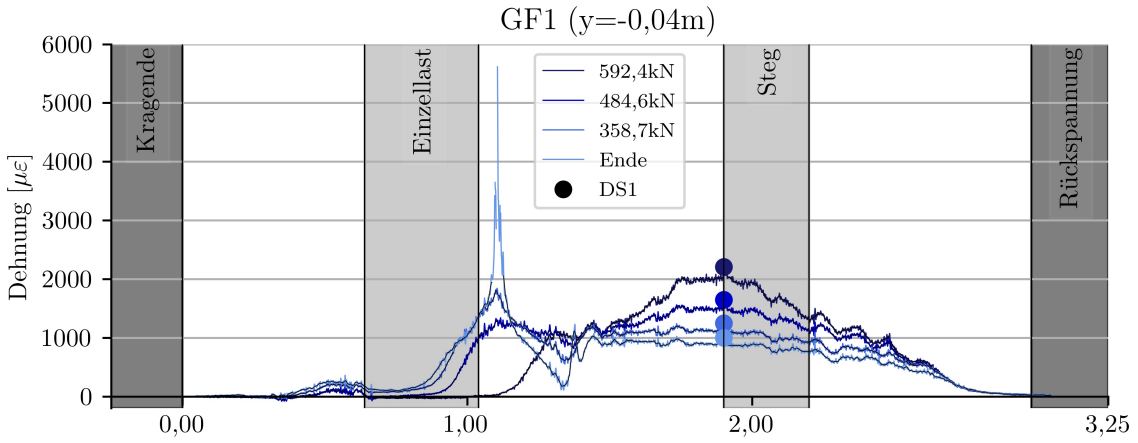

Abbildung D.197: V8 - Dehnung der Glasfaser GF1 nach dem Bruch

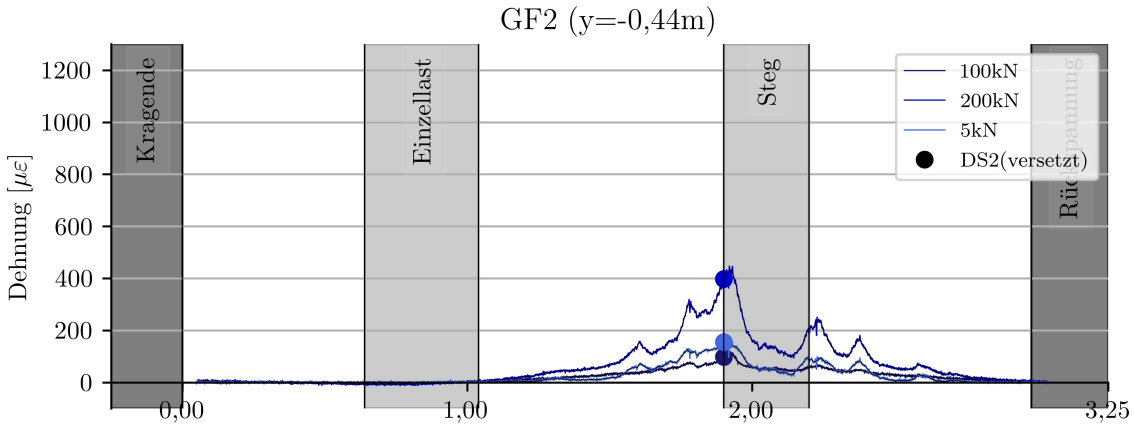

Abbildung D.198: V8 - Dehnung der Glasfaser GF2 während der Vorbelastung

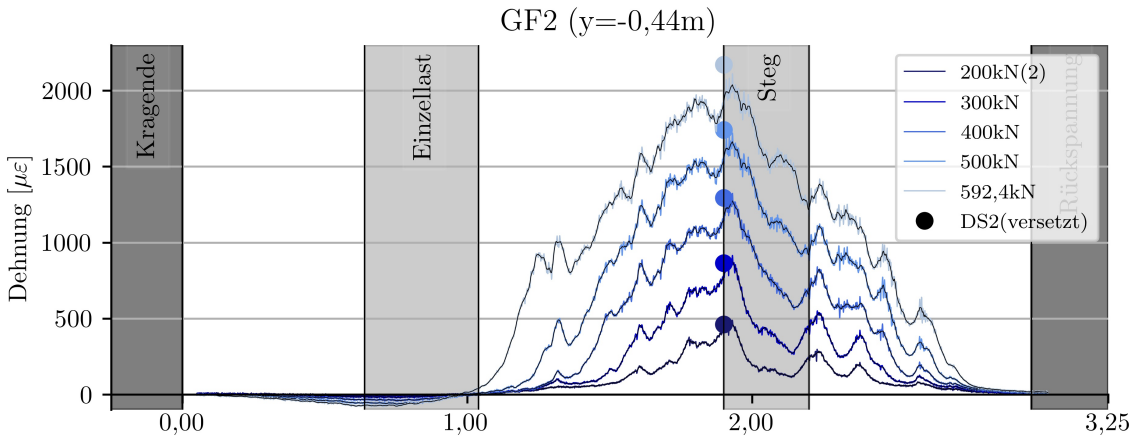

Abbildung D.199: V8 - Dehnung der Glasfaser GF2 bis zur Traglast

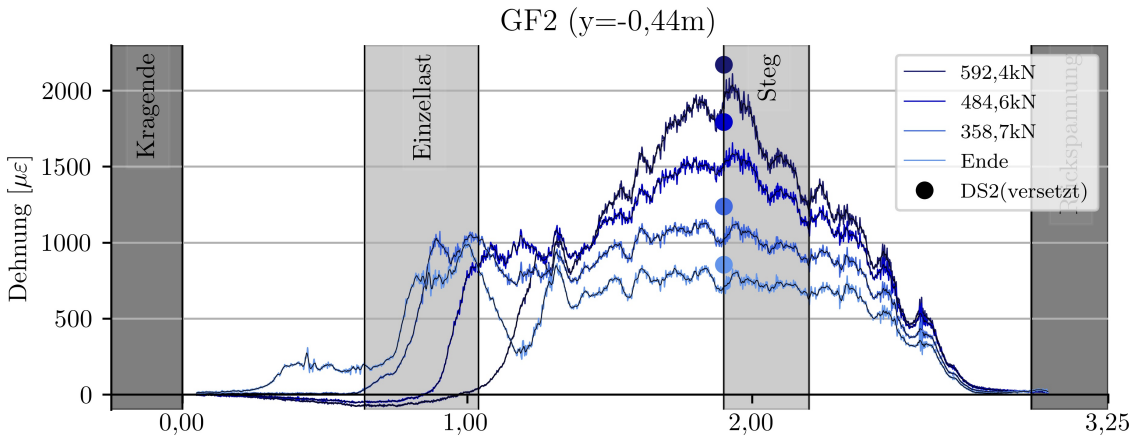

Abbildung D.200: V8 - Dehnung der Glasfaser GF2 nach dem Bruch

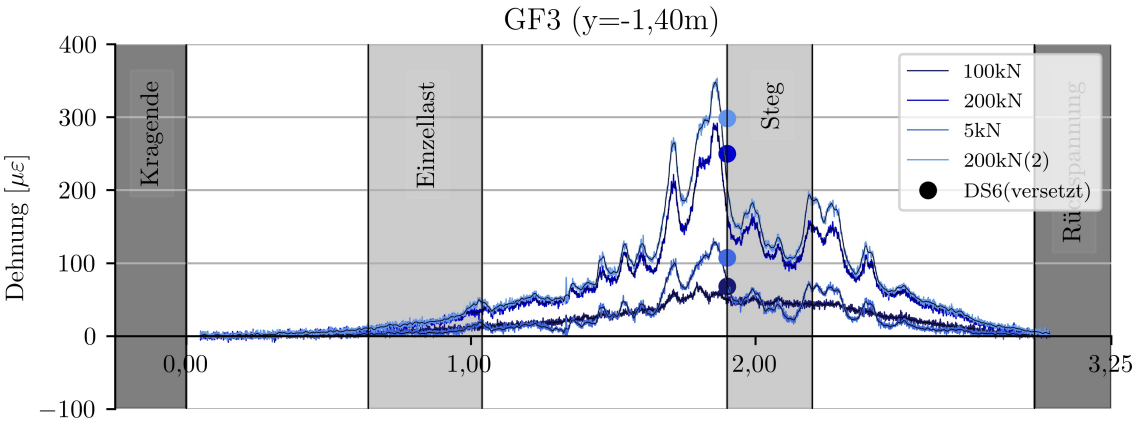

Abbildung D.201: V8 - Dehnung der Glasfaser GF3 während der Vorbelastung

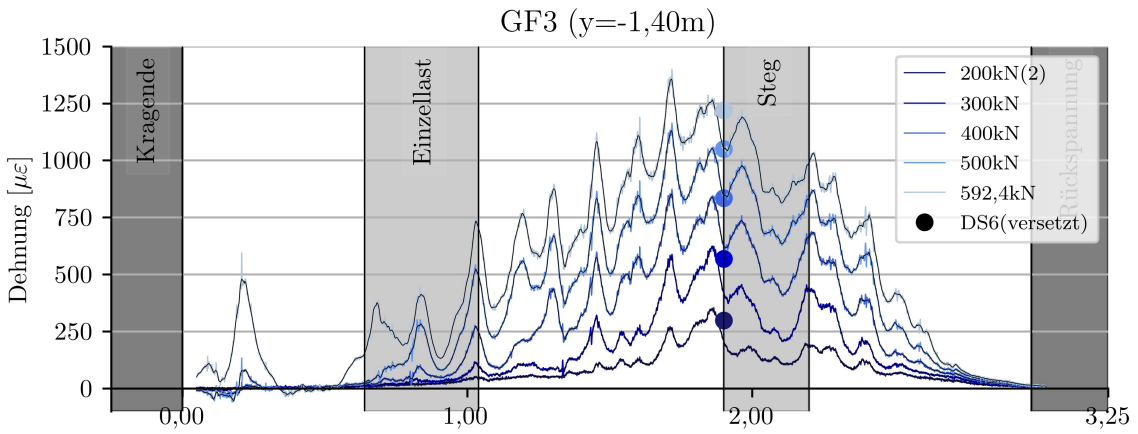

Abbildung D.202: V8 - Dehnung der Glasfaser GF3 bis zur Traglast

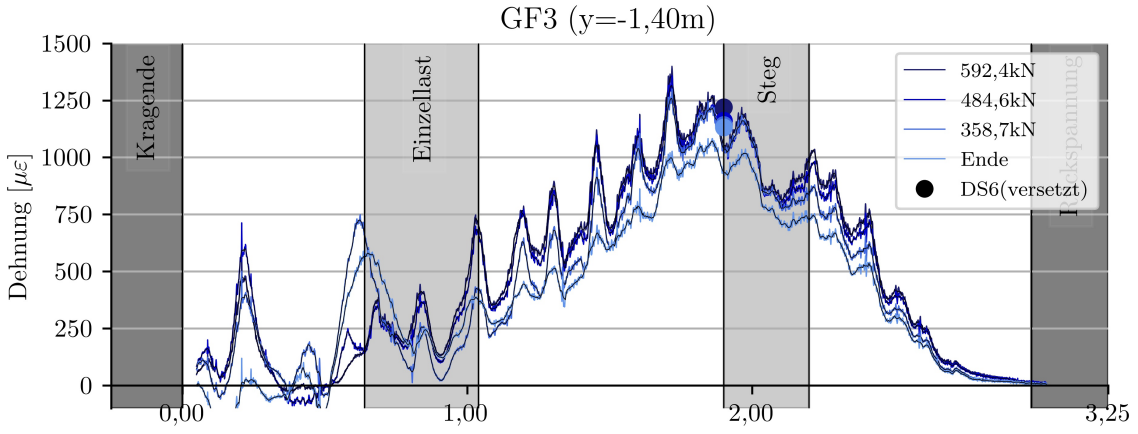

Abbildung D.203: V8 - Dehnung der Glasfaser GF3 nach dem Bruch

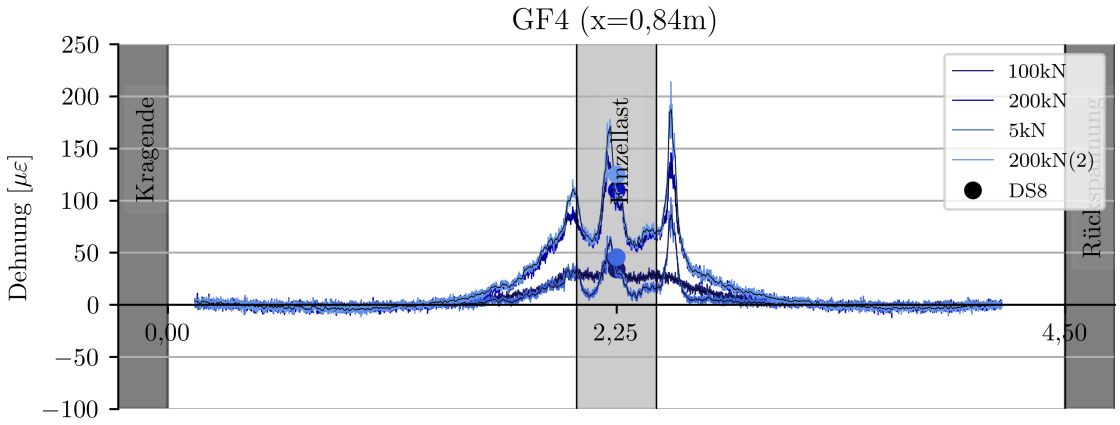

Abbildung D.204: V8 - Dehnung der Glasfaser GF4 während der Vorbelastung

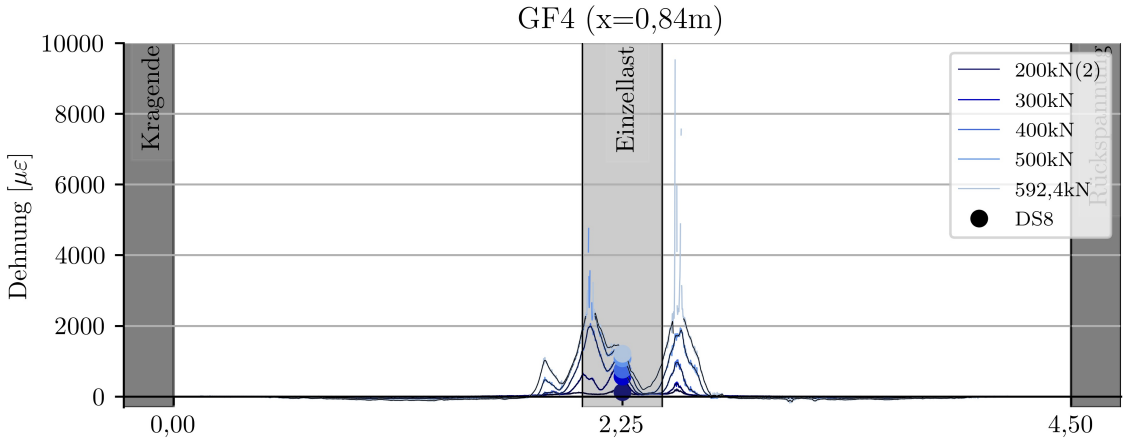

Abbildung D.205: V8 - Dehnung der Glasfaser GF4 bis zur Traglast

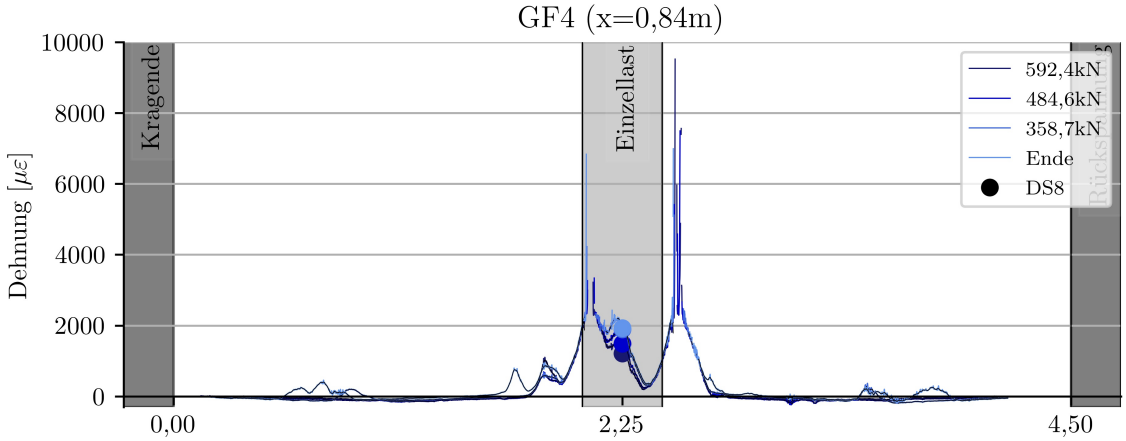

Abbildung D.206: V8 - Dehnung der Glasfaser GF4 nach dem Bruch