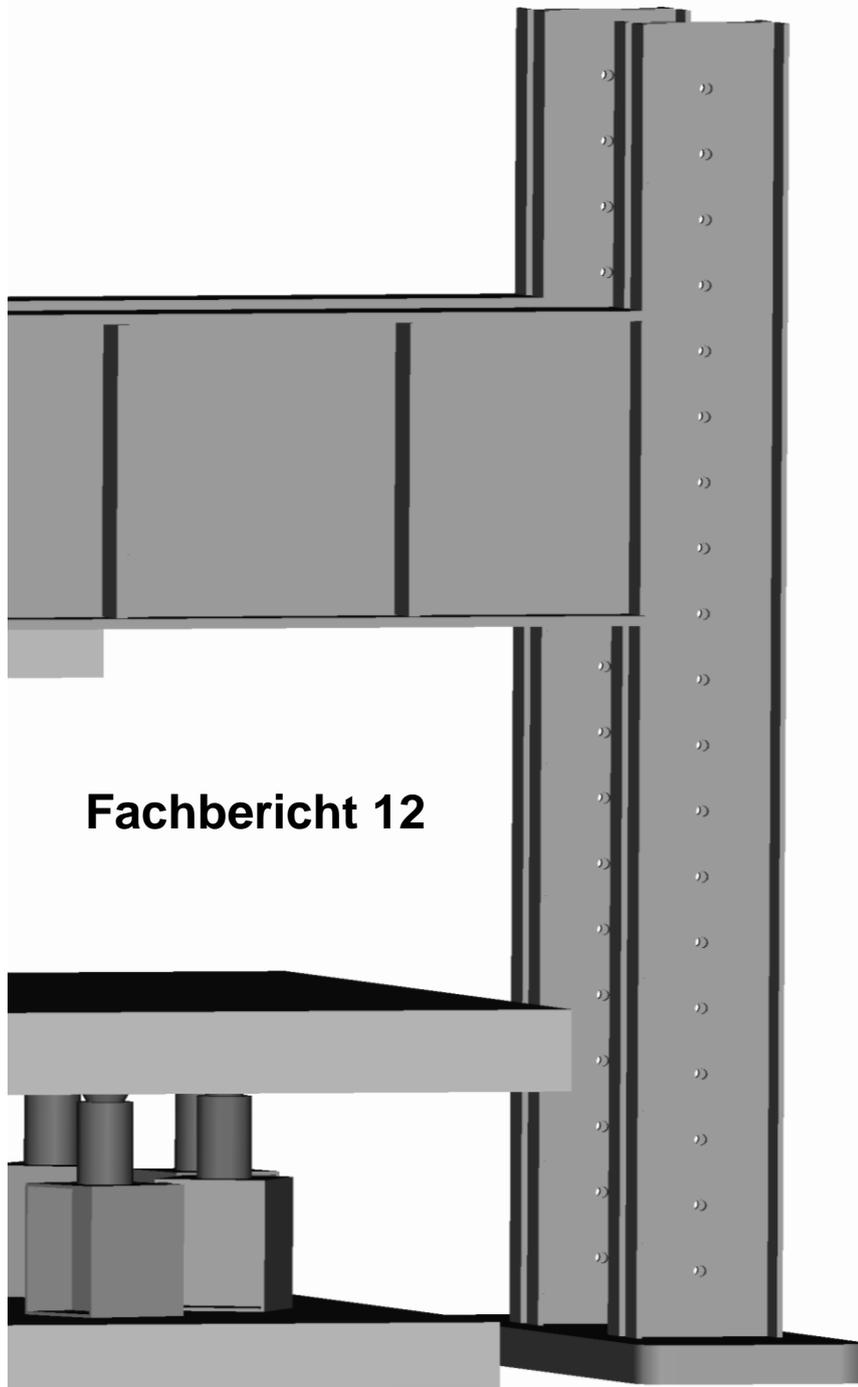




THM

TECHNISCHE HOCHSCHULE MITTELHESSEN



Untersuchungen zur Querkraft- tragfähigkeit der L- und Z- Bleche als Einbauteile

Fachbericht 12

**Alexej Herzog
Dimitri Fruk**

Inhaltverzeichnis:

1. Zielsetzung	3
2. Bemessungsgleichungen zur Querkrafttragfähigkeit nach DIN EN 1992-1-1	4
2.1 Einleitung	4
2.2 Nachweis der Querkrafttragfähigkeit	4
2.3 Betontragverhalten ohne Querkraftbewehrung	4
2.3.1 Tragmodelle.....	5
2.3.2 Tragreserven / Zahnmodell.....	6
2.3.3 Maßstabeffekt	8
2.3.4 Bemessungsgleichung.....	9
2.3.5 Versagensarten	10
2.4 Bemessung von Betonbauteilen mit Querkraftbewehrung	11
2.4.1 Bemessungsgrundlagen	12
2.4.2 Bemessungsgleichung nach DIN EN 1992-1-1 [6]	13
2.4.3 Versagensarten	20
2.5 Querkraftbemessung für die Einbauteile Clixs, L- und Z-Bleche	23
2.5.1 L-Blech	23
2.5.2 Z-Blech	24
3. Experimentelle Untersuchungen.....	25
3.1 Versuchsprogramm	25
3.1.1 Versuchsreihe A	25
3.1.2 Versuchsreihe B	26
3.2 Stahlkennwerte	27
3.3 Versuchsanlage und Versuchsdurchführung.....	28
4. Versuchsergebnisse	30
4.1 Versuchsreihe A.....	30
4.1.1 Vergleich von Körper AA6 mit "Leonhardt Balken" G5 [4].....	31
4.1.2 Abhängigkeit der Tragfähigkeit von der Querkraftbewehrung bei den	33
Rechteckbalken	33

4.2 Versuchsreihe B.....	38
4.2.1 Körper mit hoher Querkraftbewehrung	38
4.2.2 Körper mit mittlerer Querkraftbewehrung	44
4.2.3 Körper mit geringer Querkraftbewehrung	50
4.3 Zusammenfassung	57
Literaturverzeichnis.....	59

Anhang

1. Versuchsreihe A	A1
Prüfkörper AA1	A1
Prüfkörper AA2	A4
Prüfkörper AA3	A8
Prüfkörper AA4	A13
Prüfkörper AA5	A17
Prüfkörper AA6	A21
2. Versuchsreihe B	A26
Prüfkörper BA1	A26
Prüfkörper BA3	A32
Prüfkörper BA4	A38
Prüfkörper BA5	A43
Prüfkörper BA6	A48
Prüfkörper BB1	A54
Prüfkörper BB2	A59
Prüfkörper BB3	A65
Prüfkörper BB4	A71
Prüfkörper BB5	A76
Prüfkörper BB6	A82
3. Stahlkennwerte	A86

1. Zielsetzung

Das Ziel der Untersuchungen, die im Folgenden beschrieben werden, ist die Eignung der Einbauteile Clixs als Querkraftbewehrung nachzuweisen. Mit dem vorliegenden Bericht wird die Anwendbarkeit des Bewehrungssystems Clixs, L- und Z-Bleche, im querkraftbeanspruchten Bereich von Balken, Platten und Fundamenten betrachtet. Die Untersuchung der Tragfähigkeit erfolgt an Balken mit Rechteckquerschnitten und T-förmigen Balken mit 3 und 5mm dicken L- und Z-Blechen sowie einem und zwei Bügeln bei den L-Blechen. Zum direkten Vergleich werden jeweils auch Körper mit herkömmlicher Bügelbewehrung geprüft.



Abb.1: L-Blech mit einem Bügel



Abb.2: Z-Blech



Abb.3: L-Blech im Einbauzustand-Rechteckquerschnitt

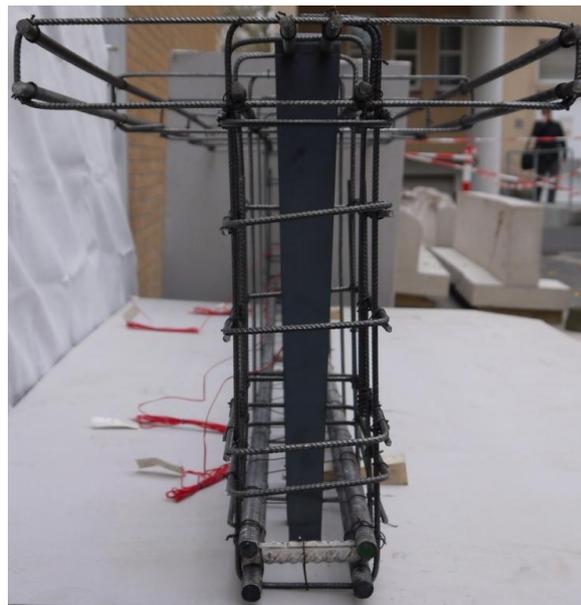


Abb.4: Z-Blech im Einbauzustand-T-Balken

2. Bemessungsgleichungen zur Querkrafttragfähigkeit nach DIN EN 1992-1-1

2.1 Einleitung

Sind Biegemomente über eine Länge veränderlich, entstehen Querkräfte an diesen Stellen.

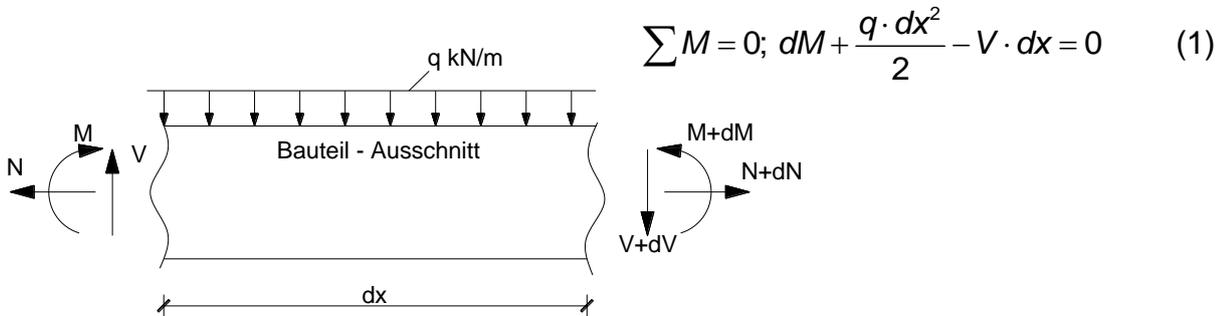


Abb.5: Gleichgewichtszustand

Die durch eine Belastung entstehenden Biege- und Schubspannungen können nach der technischen Biegelehre berechnet werden, solange das Betonbauteil nicht gerissen ist (Zustand I). Befindet sich das Betonbauteil im Zustand II, d. h. es sind Risse vorhanden, so entsteht ein komplexer Kräfteverlauf, der nur durch vereinfachte Modelle (siehe Abschnitt 2.3.1) verdeutlicht werden kann.

2.2 Nachweis der Querkrafttragfähigkeit

Der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit erfolgt durch eine Gegenüberstellung der einwirkenden Querkraft zum Querkraftwiderstand eines Bauteils.

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} \quad (2)$$

2.3 Betontragverhalten ohne Querkraftbewehrung

Ein Betonquerschnitt ohne eine zusätzliche Querkraftbewehrung weist bereits eine geringe Querkrafttragfähigkeit auf (siehe Abschnitt 2.3.2 Tragreserven / Zahnmodell.)

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,c} \quad (3)$$

$$\text{mit } V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cd} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (4)$$

Um eine „Robustheit“ des Querschnittes zu erzielen, ist immer eine Mindestquerkraftbewehrung vorzusehen. Damit werden Herstellungsfehler, wie Kiesnester oder Entmischungen des Betons, abgedeckt. Mit der Mindestquerkraftbewehrung kann ein schlagartiges Versagen verhindert werden.

2.3.1 Tragmodelle

Im ungerissenen Querschnitt (Zustand I) stellt sich folgender Hauptspannungsverlauf ein (siehe Abb. 6).

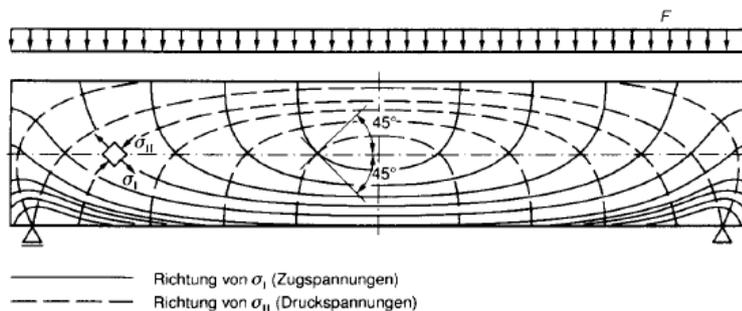


Abb.6: Hauptspannungsverlauf im Zustand I [1]

Wird durch eine steigende Belastung die Betonzugfestigkeit überschritten, so treten Risse auf (Zustand II). Diese verlaufen etwa senkrecht zu den Hauptzugspannungen und sind zur Feldmitte hin geneigt. Das komplexe Tragverhalten im Zustand II wird je nach Belastungsart durch ein vereinfachtes Sprengwerk- und Bogenzugbandmodell beschrieben.

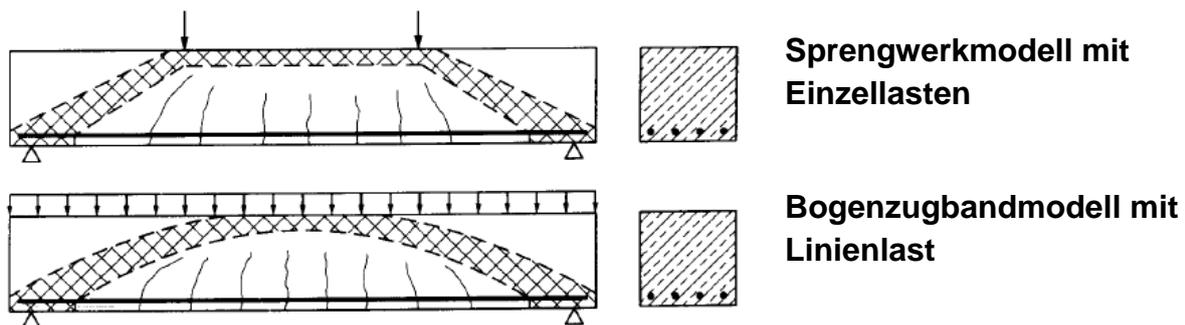


Abb.7: Sprengwerk- und Bogenzugbandmodell Zustand II [1]

Der Lastabtrag der äußeren Belastung erfolgt bei diesen Modellen über die Betondruckstreben. Es bildet sich ein Gleichgewichtszustand mit der Biegezugbewehrung. Die Voraussetzung dabei wäre ein plastisches Verhalten des Betonquerschnitts. Da der Beton kein ausgeprägtes plastisches Verformungsverhalten hat, können sich auch nur bedingt diese Tragmodelle einstellen. Bei Rissbildung können die Kräfte zwischen der Klaffung nicht übertragen werden. Es müssen andere Tragreserven (siehe 2.3.2) aktiviert werden.

Bei Ausschöpfung der Tragreserven versagt der Querschnitt schlagartig, indem der Riss die Zugzone und Druckzone verbindet (siehe Abb. 8 und 9).

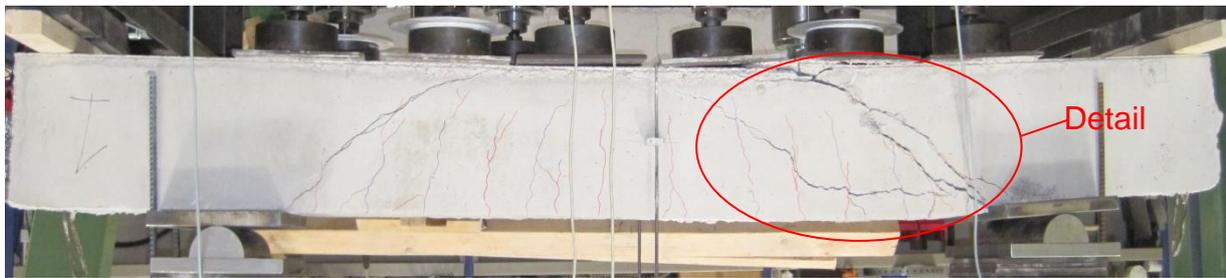


Abb.8: Biegeschubversagen eines Balkens ohne Querkraftbewehrung (Körper AA1)

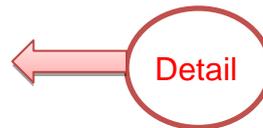
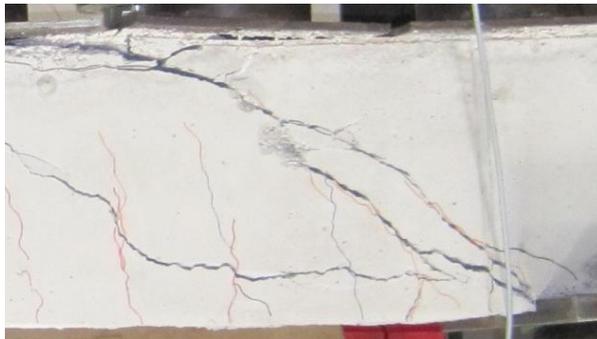


Abb.9: Biegeschubversagen, Riss verbindet Zug- und Druckzone

2.3.2 Tragreserven / Zahnmodell

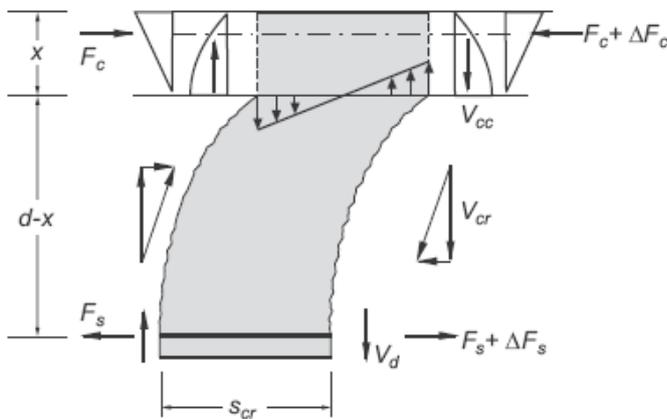


Abb.10: Kräfteverlauf im Zahnmodell [2]

Das Zahnmodell beschreibt die Traganteile, die zum Querkraftabtrag dienen. Das dargestellte Modell stellt sich zwischen einzelnen Rissen im Betonquerschnitt ein. Folgende Traganteile werden aktiviert:

V_{cc} = Querkraftanteil der Betondruckzone

V_{cr} = Querkraftanteil aus der Rissverzahnung

V_d = Querkraftanteil aus der Dübelwirkung der Biegezugbewehrung

Querkraftanteil der Betondruckzone:

Durch die Druckzone wird der größte Anteil der Querkraft abgetragen, da bei einer steigenden Belastung sich Risse in der Druckzone erst kurz vor dem Versagen einstellen. Die Druckzonenhöhe x (siehe Abb. 10) hängt von dem Längsbewehrungsgrad ρ_l ab, d. h. je größer ρ_l ist, umso größer wird der Bereich der Druckzone sowie der Querkraftanteil der Druckzone.

Querkraftanteil durch Rissverzahnung:

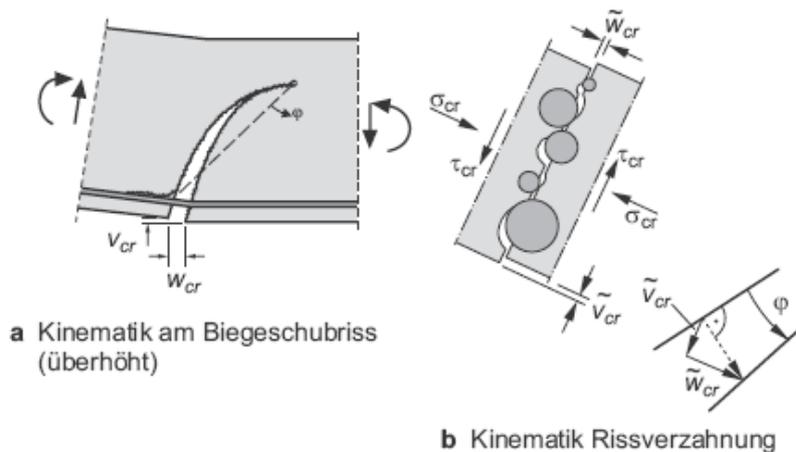


Abb.11: Querkraftanteil aus Rissverzahnung [2]

Der Querkraftanteil durch die Rissverzahnung wird aktiviert, da der Riss gekrümmt verläuft und zusätzlich zu der Rissöffnung w_{cr} eine Vertikalverschiebung v_{cr} entsteht. Durch die vertikale Verschiebung wird zwischen dem Riss eine Verzahnungsspannung aktiviert, die einen Anteil der Querkraft abtragen kann.

Querkraftanteil aus der Dübelwirkung der Biegezugbewehrung

Bei Rissbildung entsteht ein gegenseitiger Versatz der Betonzähne untereinander. Die daraus resultierende Kraft wird „Dübelkraft“ genannt und wirkt auf die Biegebewehrung. Bei hohen Dübelkräften kann es zu Abplatzungen der Betondeckung kommen, da ein horizontaler Riss entlang der Biegebewehrung entsteht (siehe Abb. 12).

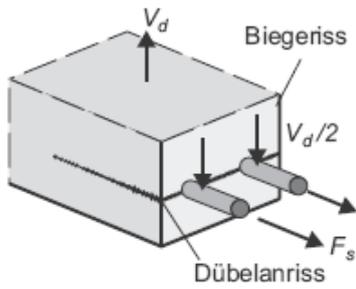


Abb.12: Modell Dübelkraft [2]

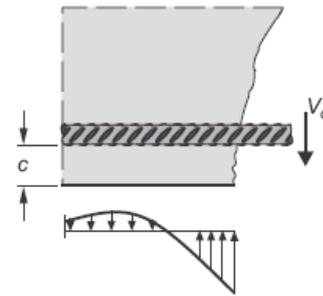


Abb.13a: Spannungen entlang der Biegebewehrung [2]

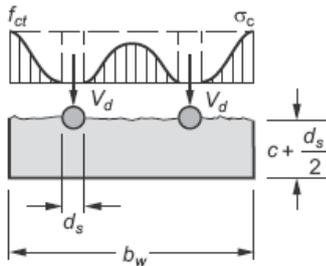


Abb.13b: Spannungen im Beton [2]

2.3.3 Maßstabseffekt

Zu den erläuterten Tragreserven des Betons fließt zusätzlich der Maßstabseffekt in die Querkrafttragfähigkeit ein.

Bei Versuchen an Balken konnte festgestellt werden, dass die Bruchlast unterproportional mit der statischen Höhe d ansteigt.

Zink zeigt in [3] ein anschauliches Modell zur Darstellung des Maßstabseffekts (siehe Abb. 14). Dabei können an der Spitze des Risses, an der „Bruchprozesszone“, begrenzt Zugspannungen übertragen werden. Die Vertikalkomponente der Zugspannung ist in der Lage Querkräfte aufzunehmen. Die Länge der Bruchprozesszone und somit der Traganteil für die Querkraft ist unabhängig von der statischen Nutzhöhe. Entscheidend ist die Betonfestigkeit. Der Traganteil bezogen auf die Gesamtquerkrafttragfähigkeit ist bei hohen Querschnitten gering, während bei kleinen Querschnitten der Anteil größer ist. Dieser Effekt wird in der empirischen Gleichung berücksichtigt.

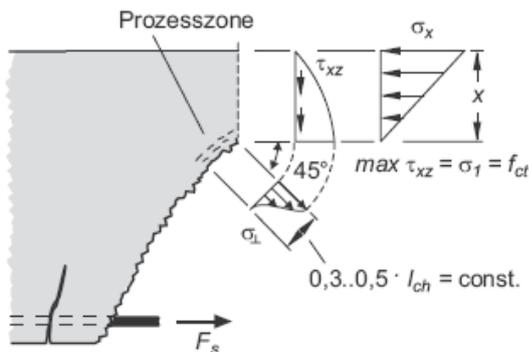


Abb.14: Modell Maßstabseffekt [3]

2.3.4 Bemessungsgleichung

Die zuvor erläuterten Traganteile fließen in eine semi-empirische Bemessungsgleichung für die Querkrafttragfähigkeit eines Betonquerschnitts ohne Querkraftbewehrung ein.

Einflussgrößen eines Betonbauteils ohne Querkraftbewehrung:

- Zugfestigkeit des Betons (Rissbildung im Querschnitt, Zahnspannungen)
- Längsbewehrungsgrad (Druckzonenhöhe, Dübelwirkung)
- Querschnittsgeometrie (statische Nutzhöhe, Maßstabeffekt, Stegbreite b_w)

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} \cdot \eta_1 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cd} \right] \cdot b_w \cdot d \geq (v_{\min} \cdot \eta_1 + k_1 \cdot \sigma_{cd}) \cdot b_w \cdot d \quad (5)$$

$C_{Rd,c}$ → landesspezifischer Kalibrierbeiwert; $C_{Rd,c} = 0,15/\gamma_c$ empirischer Vorfaktor nach DIN EN 1992-1-1 NA (D) (6.2.2) [7]

η_1 → Korrekturbeiwert, für Normalbeton $\eta_1 = 1,00$

k → Maßstabsfaktor mit $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$ mit d in mm

ρ_l → Längsbewehrungsgrad mit $\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02$

f_{ck} → Betondruckfestigkeit nach DIN EN 1992-1-1 [6]

k_1 → Beiwert zur Anrechnung der Normalspannungen; für Normalbeton $k_1 = 0,12$ nach DIN EN 1992-1-1 NA (D) [7]

σ_{cd} → Bemessungswert der Betonspannung infolge Vorspannung $\sigma_{cd} = \frac{N_{Ed}}{A_c}$

b_w → kleinste Querschnittsbreite

d → statische Nutzhöhe

Längsbewehrungsgrad:

Der Bewehrungsgrad beschreibt die Gegenüberstellung der Biegezugbewehrung mit der Betonfläche (bezogen auf die statische Nutzhöhe). Der Bewehrungsgrad wurde auf 2% abgegrenzt. Dadurch soll vermieden werden, dass Bauteile überbewehrt werden und eine zu enge Bewehrungsführung den Betoneinbau erschwert.

Betonfestigkeit:

Die Betonzugfestigkeit hat einen Einfluss auf die Aktivierung der zusätzlichen Querkrafttraganteile. Diese Zugfestigkeit wird in Gleichung (5), in Anlehnung an die experimentelle Bruchlasten, berücksichtigt.

Mindestquerkrafttragfähigkeit:

v_{\min} → Beiwert zur Berechnung der Mindestquerkrafttragfähigkeit

$$v_{\min} \begin{cases} \left(\frac{0,0525}{\gamma_c} \right) \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} \text{ für } d \leq 600\text{mm} \\ \left(\frac{0,0375}{\gamma_c} \right) \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} \text{ für } d \geq 800\text{mm} \end{cases} \quad (6)$$

Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden

Die Gleichung basiert auf den semi-empirischen Lösungsansätzen. Dabei bleibt der Einfluss der Längsbewehrung unberücksichtigt. Bei Betonbauteilen ohne Längsbewehrung ergibt sich nach Gleichung (5) keine Querkraft-Tragfähigkeit.

2.3.5 Versagensarten

Bei Betonbauteilen ohne Querkraftbewehrung kann Biegeschubversagen auftreten. Der Betonquerschnitt versagt schlagartig, wenn die zuvor erläuterten Tragreserven (Abschnitt 2.3.2) erschöpft sind. Mit steigender Belastung wächst der Riss von der Zugzone in die Druckzone hinein (siehe Abbildung 8 und 9).

2.4 Bemessung von Betonbauteilen mit Querkraftbewehrung

Bei Bauteilen mit Querkraftbewehrung ist die Einwirkung der Querkraft mit der Widerstandsgröße zu überprüfen. Zur Ermittlung der erforderlichen Bewehrung wird die Querkraft in Zug- und Druckkräfte zerlegt. Die Zugkräfte werden über die Querkraftbewehrung aufgenommen.

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,s} \quad (7)$$

$$\text{mit } V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \quad (8)$$

Die Druckkräfte werden dem Beton zugewiesen. Es ist zu überprüfen, ob der Beton diese Kräfte aufnehmen kann.

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max} \quad (9)$$

$$\text{mit } V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \frac{\cot \theta + \cot \theta}{1 + \cot^2 \theta} \quad (10)$$

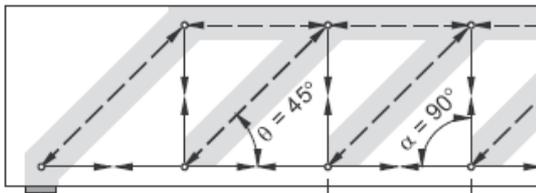


Abb.15: Fachwerkmodell mit Druckstreben unter $\theta = 45^\circ$ und Zugstreben mit $\alpha = 90^\circ$ [2]

In der Abbildung 16 ist ein statisch bestimmtes Gelenkfachwerk dargestellt. Ober- und Untergurt bilden die Betondruckzone und die Biegezugbewehrung. Die unter dem Winkel θ verlaufenden Diagonalen stellen die Betondruckstreben dar. Das mit dem Winkel α gegen die Stabachse geneigte Zugglied beschreibt die Querkraftbewehrung.

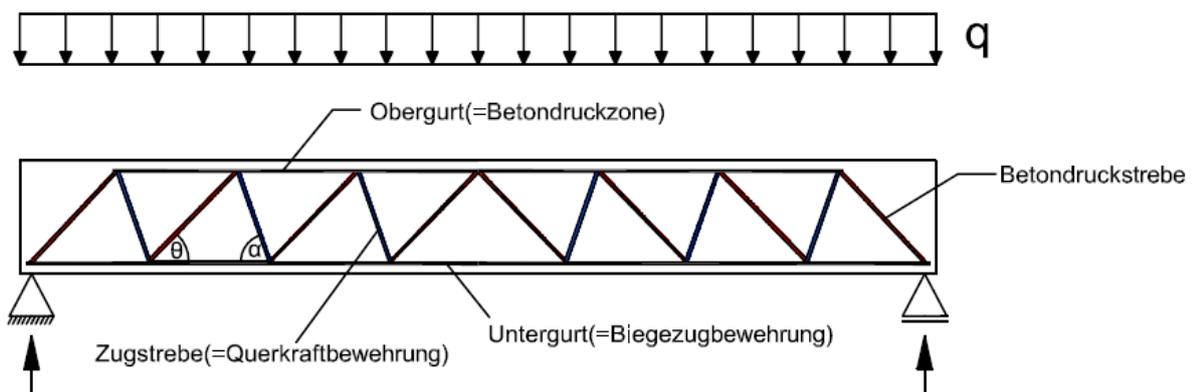


Abb.16: „einfaches Fachwerkmodell“ nach Mörsch

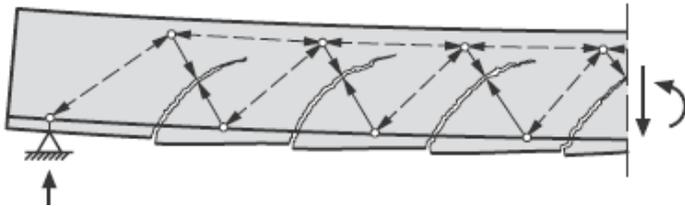


Abb.17: idealisierter Kräfteverlauf im Zustand II [2]

Sofern keine Normalkräfte z. B. infolge von Vorspannung wirken, verlaufen die Risse im Wesentlichen infolge von Querkraften unter einem Winkel von $\approx 30^\circ - 45^\circ$. Die Querkraftbewehrung wird aktiviert, wenn der Riss diese kreuzt. Bei einem Neigungswinkel der Querkraftbewehrung von ca. $45^\circ - 60^\circ$ verläuft der Riss etwa senkrecht zum Bügel. Dadurch wird eine höhere Wirksamkeit des Bügels erzielt. Durch die Querkraftbewehrung wird auch die zuvor beschriebene Rissverzahnung (siehe Abschnitt 2.3.2), im Unterschied zu Bauteilen ohne Querkraftbewehrung, deutlich verbessert.

2.4.1 Bemessungsgrundlagen

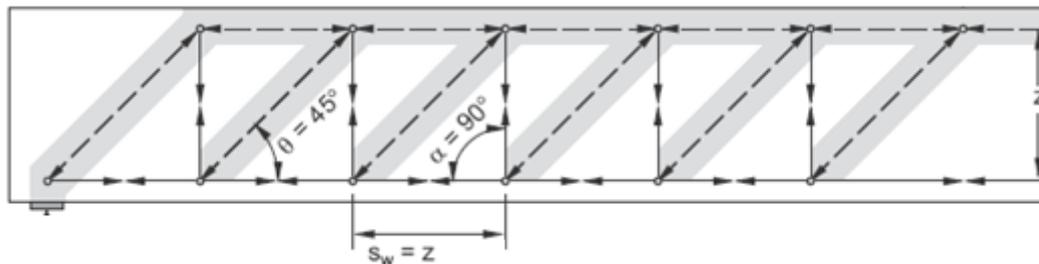


Abb.18: Fachwerkmodell nach Mörsch aus [2]

Der Kräfteverlauf im Zustand II lässt sich, wie bereits vorher erläutert, bei Biege- und Querkraftbeanspruchung durch Stabwerke abbilden. Die Druckzone des Betons und die Biegezugbewehrung bilden den Ober- und Untergurt des Modells nach Mörsch. Die Diagonalen entsprechen den Druckstreben und verlaufen unter 45° annähernd in Richtung der Hauptspannungen (siehe Abb. 18). Im Abstand $s_w = z$ verläuft die Zugstrebe (Querkraftbewehrung), die um $\alpha = 90^\circ$ gegen die Stabachse geneigt ist.

Die durch das Fachwerkmodell berechnete Zugspannung im Bügel weicht jedoch von Versuchsergebnissen nach Leonhardt [4] ab, da bei der Berechnung die Traganteile eines Bauteils ohne Querkraftbewehrung (Traganteil der Druckzone, Rissverzahnung und Dübelwirkung) nicht berücksichtigt werden.

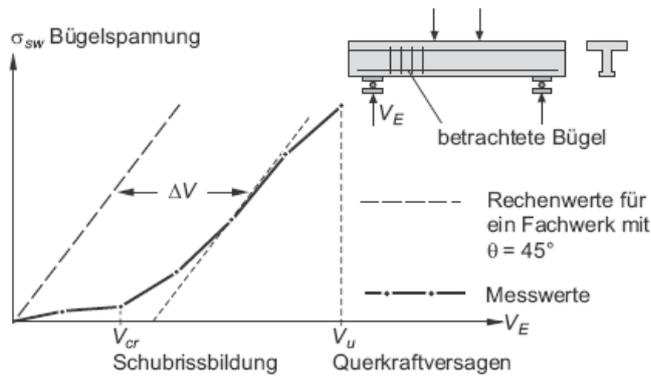


Abb.19: Kräftelauf in der Querkraftbewehrung [2]

2.4.2 Bemessungsgleichung nach DIN EN 1992-1-1 [6]

Anhand eines Ausschnitts aus dem Fachwerkmodell (siehe Abb. 20) mit geneigter Bügelbewehrung werden im Folgenden die Bemessungsgleichungen hergeleitet.

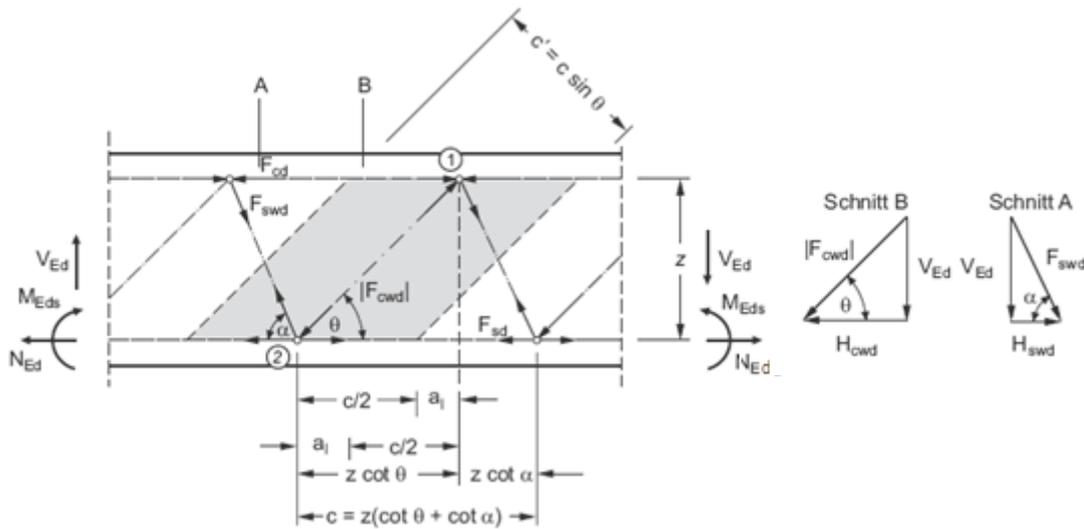


Abb.20: Stabkräfte im Fachwerkmodell [2]

Horizontalkräfte in Trägerlängsrichtung infolge geneigter Zug- und Druckstreben:

Die gegeneinander gerichteten Horizontalkräfte berechnen sich nach Abbildung 20 wie folgt:

$$H_{cwd} = |F_{cwd}| \cdot \cos \theta = V_{Ed} \cdot \cot \theta \quad (11)$$

$$H_{swd} = F_{swd} \cdot \cos \alpha = V_{Ed} \cdot \cot \alpha \quad (12)$$

$$H_{wd} = V_{Ed} \cdot \cot \theta - V_{Ed} \cdot \cot \alpha = V_{Ed} \cdot (\cot \theta - \cot \alpha) \quad (13)$$

Die Horizontalkraft H_{wd} wird zur Hälfte auf den Druck- und Zuggurt verteilt:

$$F_{sd} = \left(\frac{M_{Eds}}{z} + N_{Ed} \right) + \frac{H_{wd}}{2}; F_{sd} = \text{Zuggurtkraft} \quad (14)$$

$$F_{cd} = -\frac{M_{Eds}}{z} + \frac{H_{wd}}{2}; F_{cd} = \text{Druckgurtkraft} \quad (15)$$

Zur Berechnung der Zug- und Druckspannungen werden die folgenden Abstände benötigt.

Abstand der Querkraftbewehrung:

$$c = z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \quad (16)$$

Breite der Druckstrebe:

$$c' = c \cdot \sin \theta = z \cdot \sin \theta (\cot \theta + \cot \alpha) \quad (17)$$

Berechnung der Druckspannung und der Druckstrebentragfähigkeit infolge geneigter Querkraftbewehrung:

Schnitt B: Bestimmung der Druckstrebenkraft

$$\begin{aligned} \sum V &= 0; |F_{cwd}| \cdot \sin\theta = V_{Ed} \\ \rightarrow |F_{cwd}| &= \frac{V_{Ed}}{\sin\theta} \end{aligned} \quad (18)$$

$$|\sigma_{cwd}| = \frac{|F_{cwd}|}{b_w \cdot c'} \quad (19)$$

mit Gleichung 17,18 und 19 folgt:

$$\begin{aligned} |\sigma_{cwd}| &= \frac{\frac{V_{Ed}}{\sin\theta}}{b_w \cdot z \cdot \sin\theta \cdot (\cot\theta + \cot\alpha)} = \frac{V_{Ed}}{b_w \cdot z \cdot \sin^2\theta \cdot (\cot\theta + \cot\alpha)} \\ |\sigma_{cwd}| &= \frac{V_{Ed} \cdot (1 + \cot^2\theta)}{b_w \cdot z \cdot (\cot\theta + \cot\alpha)} \quad \text{mit: } \frac{1}{\sin^2\theta} = 1 + \cot^2\theta \end{aligned} \quad (20)$$

Im Folgenden wird die Druckspannung in eine Widerstandskraft umgewandelt:

aus Gleichung 20 folgt mit:

$$\sigma_{cwd} \text{ A Betondruckfestigkeit } f_{cd} = \alpha_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}; \quad \alpha_c = 0,85 \quad (21)$$

$$f_{cd} = \frac{V_{Ed} \cdot (1 + \cot^2\theta)}{b_w \cdot z \cdot (\cot\theta + \cot\alpha)}; \quad V_{Ed} \text{ A } V_{Rd,max} \quad (22)$$

Mit Einführung von Abminderungsbeiwerten α_{cw} und ν_1 ergibt sich die Druckstreben-tragfähigkeit:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot \nu_1 \cdot f_{cd} \cdot \frac{\cot\theta + \cot\alpha}{1 + \cot^2\theta} \text{ Druckstreben-tragfähigkeit} \quad (23)$$

b_w → kleinste Querschnittsbreite zwischen Zug- und Druckgurt

z → innerer Hebelarm

α_{cw} → Beiwert zur Berücksichtigung des Spannungszustandes im Druckgurt;
für nicht vorgespannte Tragwerke $\alpha_{cw} = 1,0$
nach DIN EN 1992 NA-1-1 (D) (6.2.3) [7]

ν_1 → Beiwert zur Abminderung der Druckstrebenfestigkeit infolge Querkzug
(Rissbildung parallel / schräg zu den Druckstreben)
nach DIN EN 1992 NA-1-1 (D) (6.2.3) [7]

$$\nu_1 = 0,75 \cdot \nu_2 \quad (24)$$

$$\nu_2 = \left(1,1 - \frac{f_{ck}}{500} \right) \leq 1,0; f_{ck} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (25)$$

Berechnung der Druckstreben­tragfähigkeit infolge lotrechter Querkraftbewehrung ($\alpha = 90^\circ$):

Aus Gleichung 23 folgt für lotrechte Bügel ($\alpha = 90^\circ$):

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta} \text{ mit } \cot \alpha = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} = \frac{\cos 90}{\sin 90} = 0 \text{ folgt:} \quad (26)$$

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot \frac{\cot \theta}{1 + \cot^2 \theta} \text{ mit } \frac{\cot \theta}{1 + \cot^2 \theta} = \frac{\cot \theta}{\cot \theta \cdot \left(\frac{1}{\cot \theta} + \cot \theta \right)} \text{ folgt:} \quad (27)$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\frac{1}{\cot \theta} + \cot \theta} \text{ mit } \frac{1}{\cot \theta} = \tan \theta \text{ ergibt sich:} \quad (28)$$

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\tan \theta + \cot \theta} \quad (29)$$

Berechnung der Zugspannung und der geneigten Zugstrebe (Querkraftbewehrung):

Schnitt A: Bestimmung der Zugstrebe (Querkraftbewehrung)

$$\begin{aligned} \sum V &= 0; F_{swd} \cdot \sin \alpha = V_{Ed} \\ \rightarrow F_{swd} &= \frac{V_{Ed}}{\sin \alpha} \end{aligned} \quad (30)$$

$$\sigma_{swd} = \frac{F_{swd}}{a_{sw} \cdot c} \quad (31)$$

a_{sw} = Querkraftbewehrung je Längeneinheit

mit Gleichung 16, 30 und 31 folgt:

$$\sigma_{swd} = \frac{V_{Ed}}{a_{sw} \cdot z \cdot \sin \alpha \cdot (\cot \theta + \cot \alpha)} \quad (32)$$

Im Folgenden wird die Zugspannung in eine Widerstandskraft umgewandelt:

aus Gleichung 32 folgt mit Umstellung nach $V_{Rd,s}$:

$$\sigma_{swd} \text{ A Streckgrenze } f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (33)$$

$$f_{yd} = \frac{V_{Ed}}{a_{sw} \cdot z \cdot \sin \alpha \cdot (\cot \theta + \cot \alpha)}; V_{Ed} \text{ A } V_{Rd,s} \quad (34)$$

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,s} = a_{sw} \cdot z \cdot f_{yd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \quad (35)$$

Die erforderliche Querkraftbewehrung ergibt sich zu:

$$\text{erf. } a_{sw} = \frac{V_{Ed}}{f_{yd} \cdot z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha} \quad (36)$$

Berechnung der Tragfähigkeit für eine lotrechte Querkraftbewehrung ($\alpha = 90^\circ$)

Aus Gleichung 35 folgt für eine lotrechte Bügelbewehrung:

$$V_{Rd,s} = a_{sw} \cdot z \cdot f_{yd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \text{ mit } \cot \alpha = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} = \frac{\cos 90}{\sin 90} = 0 \text{ folgt:} \quad (37)$$

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,s} = a_{sw} \cdot z \cdot f_{yd} \cdot \cot \theta; V_{Ed} \text{ A } V_{Rd,s} \quad (38)$$

Die erforderliche Querkraftbewehrung ergibt sich zu:

$$\text{erf. } a_{sw} = \frac{V_{Ed}}{z \cdot f_{yd} \cdot \cot \theta} \quad (39)$$

f_{yd} → Bemessungswert der Streckgrenze der Querkraftbewehrung

θ → Druckstrebenneigungswinkel nach DIN EN 1992-1-1 NA (D) (6.7a) [7]

Berechnung des Druckstrebenneigungswinkels nach DIN EN 1992-1-1 NA (D) [7]

Die Ermittlung des Druckstrebenneigungswinkels basiert auf der Plastizitätstheorie. Die Theorie ermöglicht eine freie Wahl des Winkels, da ein unbeschränktes Verformungsverhalten angenommen wird. Kräfte können umgelagert werden bis sich unter dem gewählten Winkel Gleichgewicht einstellt. Der Grenzwert des Winkels ist erreicht, wenn alle Tragreserven ausgenutzt sind ($V_{Ed} = V_{Rd,max} = V_{Rd,S}$). Die unbegrenzte Verformbarkeit des Betons ist in der Realität beschränkt, deshalb werden die Druckstrebenneigungswinkel anhand empirischer Gleichungen begrenzt.

Für lotrechte Bügelbewehrung gilt:

$$1,0 \leq \cot\theta \leq \frac{1,2 + 1,4 \cdot \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}}}{1 - \frac{V_{Rd,cc}}{V_{Ed}}} \leq 3,0 \quad \begin{array}{l} 1 \text{ A } 45^\circ \\ 3 \text{ A } 18^\circ \end{array} \quad (40)$$

Bei geneigter Bügelbewehrung darf $\cot\theta$ bis auf 0,58 A 60° ausgenutzt werden.

Desweiteren darf für $\cot\theta$ folgendes vereinfacht angesetzt werden:

- reine Biegung: $\cot\theta = 1,2 \square 40^\circ$
- Biegung und Längsdruckkraft: $\cot\theta = 1,2 \square 40^\circ$
- Biegung und Längszugkraft: $\cot\theta = 1,0 \square 45^\circ$

Einfluss der Tragreserven auf den Druckstrebenneigungswinkel θ :

Der Betontraganteil $V_{Rd,cc}$ basiert auf empirischen Ableitungen von Versuchsergebnissen und beinhaltet Tragreserven, wie den Traganteil der Druckzone, der Rissverzahnung und die Dübelwirkung (siehe Abschnitt 2.3.2).

$$V_{Rd,cc} = c \cdot 0,48 \cdot f_{ck}^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 - 1,2 \cdot \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}} \right) \cdot b_w \cdot z \quad (41)$$

c → Rauigkeitsbeiwert für die Querkraftübertragung in verzahnten Fugen

$c = 0,5$ nach DIN EN 1992-1-1 NA (D) (6.7b) [7]

z → innerer Hebelarm

σ_{cd} → Bemessungswert der Betonspannung infolge Vorspannung $\sigma_{cd} = \frac{N_{Ed}}{A_c}$

2.4.3 Versagensarten

In Abhängigkeit vom Bewehrungsgrad, der Querkraftbewehrung und der Bauteilgeometrie können sich verschiedene Bruchmechanismen einstellen.

Biegeschubversagen:

Analog zu Bauteilen ohne Querkraftbewehrung entsteht ein Biegeschubversagen, wenn die Biegeschubrisse in die Druckzone vordringen. Mit steigender Belastung weiten sich die Risse auf. Dies führt zum Fließen der Querkraftbewehrung. Die Tragfähigkeit der Druckzone ist erschöpft, wenn die Biegedruckkraft und der zugehörige Querkraftanteil nicht mehr aufgenommen werden kann und der Riss die Zug- und Druckzone verbindet (siehe Abbildung 21 und 22). Das Versagen kündigt sich mit zunehmender Verformungs- und Rissentwicklung an.

Zugversagen der Querkraftbewehrung:

Die Fließgrenze der Querkraftbewehrung wird nach der Entwicklung von Biegeschub- oder Diagonalarissen erreicht. Die Druckzonentragfähigkeit ist noch gegeben. Der Bruch kündigt sich ähnlich wie beim Biegeschubversagen mit zunehmender Verformung und Rissbreite an (siehe Abbildung 23 und 24).

Biegedruckversagen:

Primäres Biegedruckversagen:

Die Druckzone wird zerstört, bevor die Biegezugbewehrung fließt. Dabei entstehen keine großen Risse und Verformungen.

Sekundäres Biegedruckversagen:

Die Tragfähigkeit ist erschöpft, wenn die Biegezugbewehrung die Streckgrenze erreicht. D. h. durch große Verformungen wird die Betondruckzone stark eingeschnürt und somit zerstört (siehe Abbildung 25 und 26).

Biegeschubversagen

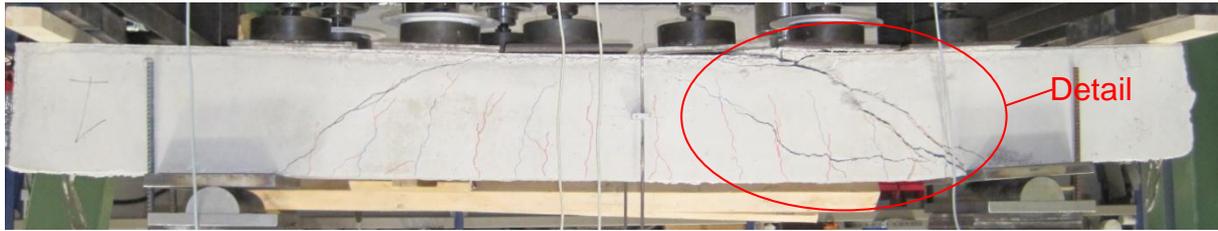


Abb.21: Biegeschubversagen eines Betonquerschnitts (Körper AA1)



Abb.22: zerstörte Betondruckzone (Körper AA1)

Zugversagen der Bügelbewehrung

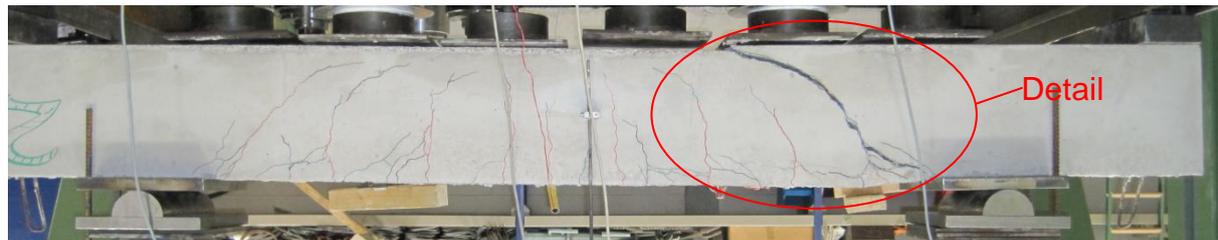


Abb.23: Zugversagen der Bügelbewehrung (Körper AA2)

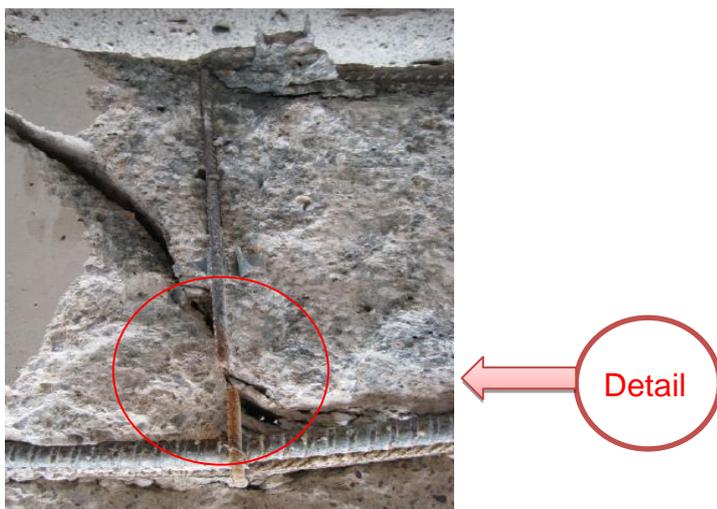


Abb.24: gerissener Bügel (Körper AA2)

Sekundäres Biegedruckversagen

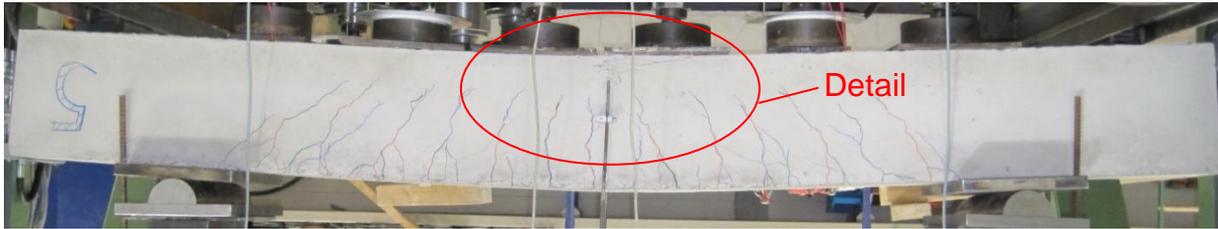


Abb.25: sekundäres Biegedruckversagen eines Betonquerschnitts (Körper AA5)

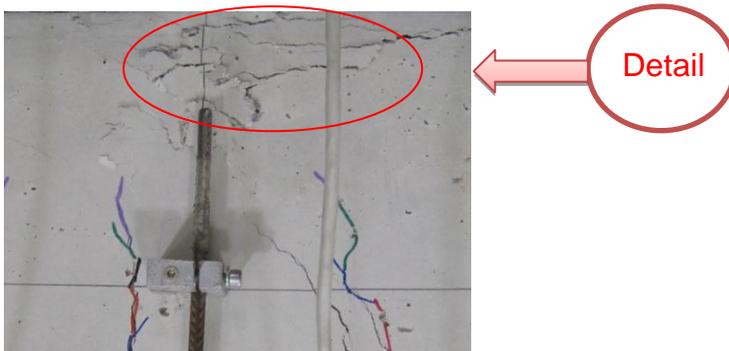


Abb.26: zerstörte Druckzone (Körper AA5)

2.5 Querkraftbemessung für die Einbauteile Clixs, L- und Z-Bleche

2.5.1 L-Blech

Für die Bemessung der erforderlichen Querkraftbewehrung wird der eingehängte Bügelquerschnitt berücksichtigt. Der Bügeldurchmesser beträgt 6mm und kann bei einem Bügel zweischnittig und bei zwei Bügeln vierschnittig angesetzt werden. Die zulässige Spannung des Bügels beträgt für BSt 500 $f_{yk} = 500\text{N/mm}^2$.

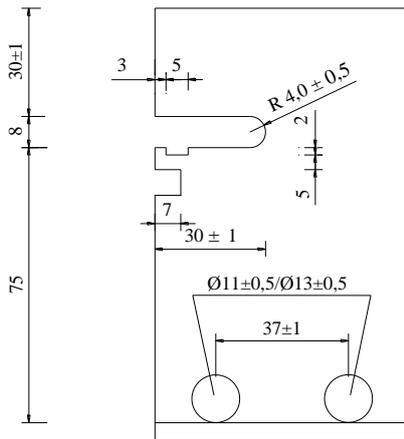


Abb.27: L-Blech Querschnitt und Abmessungen [5]



Abb.28: L-Blech mit zweischnittigem Bügel



Abb. 29: L-Blech mit vierschnittigen Bügeln

2.5.2 Z-Blech

Zur Berechnung der erforderlichen Querkraftbewehrung wird die kleinste Querschnittsfläche des Z-Blechs angesetzt.

$$A_{\min} = \text{Breite} \cdot \text{Blehdicke}$$

$$\text{Breite} = 35\text{mm}$$

$$\text{Blehdicke} = 3 \text{ oder } 5\text{mm}$$

Die zulässige Spannung des Z-Blechs beträgt für S 235 $f_{yk} = 235\text{N/mm}^2$.

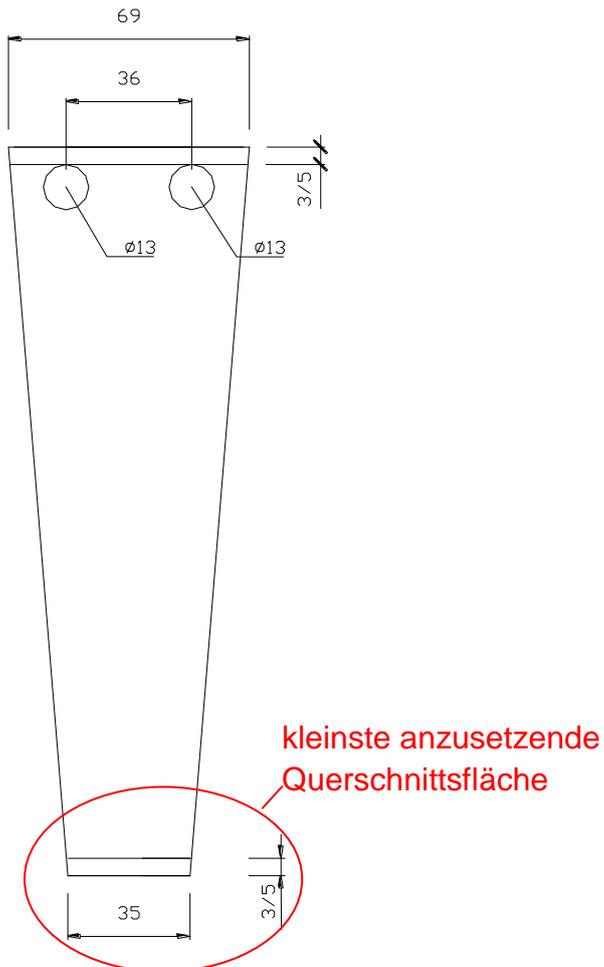


Abb.30: Querschnitt und Abmessungen Z-Blech [5]

3. Experimentelle Untersuchungen

3.1 Versuchsprogramm

Im Folgenden werden die 17 Körper aus der A- und B-Versuchsreihe in ihren wesentlichen Merkmalen zusammengefasst und beschrieben.

Die A- und B-Versuchsreihen unterscheiden sich in ihren Querschnitten, Abmessungen, Bewehrungen und den Belastungen.

3.1.1 Versuchsreihe A

Querschnitt: rechteckiger Querschnitt

Abmessungen: (b x l x h): 19 x 300 x 32 cm

Belastungsart: Gleichstreckenlast

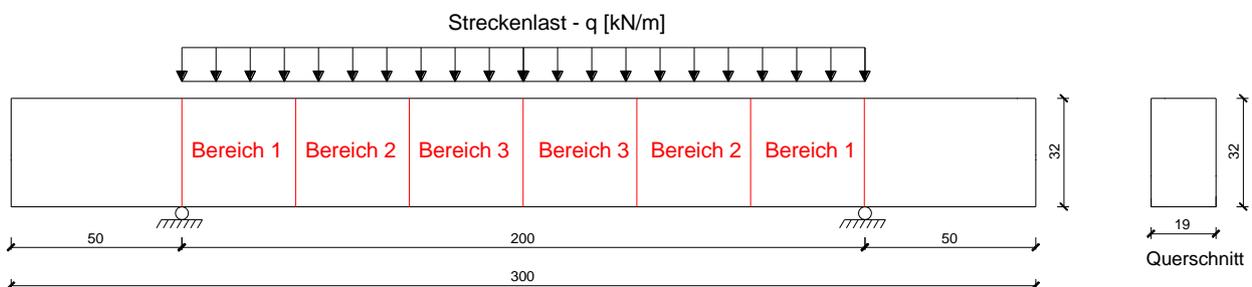


Abb.31: Querschnittsdarstellung der Versuchsreihe A

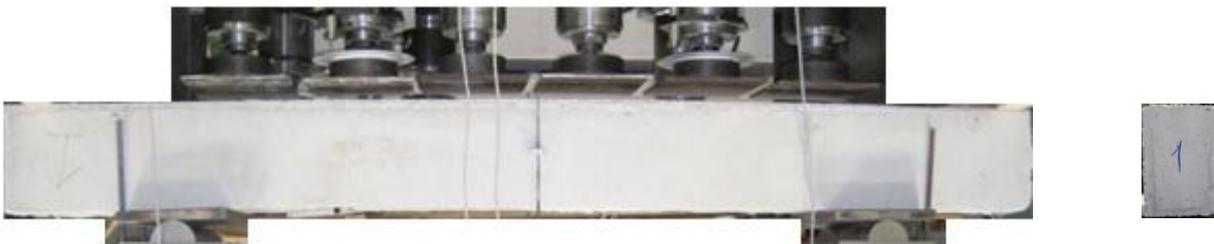


Abb.32: Körper AA1 im Einbauzustand

Körper	Biegezug - bewehrung [cm ²]	Querkraftbewehrung [cm ² /m]			Belastungsart	Querkraftbewehrung
		Bereich 1	Bereich 2	Bereich 3		
AA1	5,8	-	-	-	Streckenlast	-
AA2	5,8	2,3	2,3	2,3	Streckenlast	Bügel ø6mm
AA3	5,8	25,1	17,4	9,4	Streckenlast	Bügel ø6mm
AA4	5,8	25,1	17,4	9,4	Streckenlast	ø12 – HDB-Anker
AA5	5,8	25,1	17,4	9,4	Streckenlast	L – Blech, t=5mm, 2 Bügel
AA6	12,3	11,2	11,2	-	Streckenlast	Bügel ø8mm

Tabelle 1: Zusammenfassung der Versuchsreihe A

3.1.2 Versuchsreihe B

Querschnitt: T - Querschnitt

Abmessungen: ($b_1/b_2 \times l \times h$): 57/19 x 280 x 60 cm

Belastungsart: Einzellast

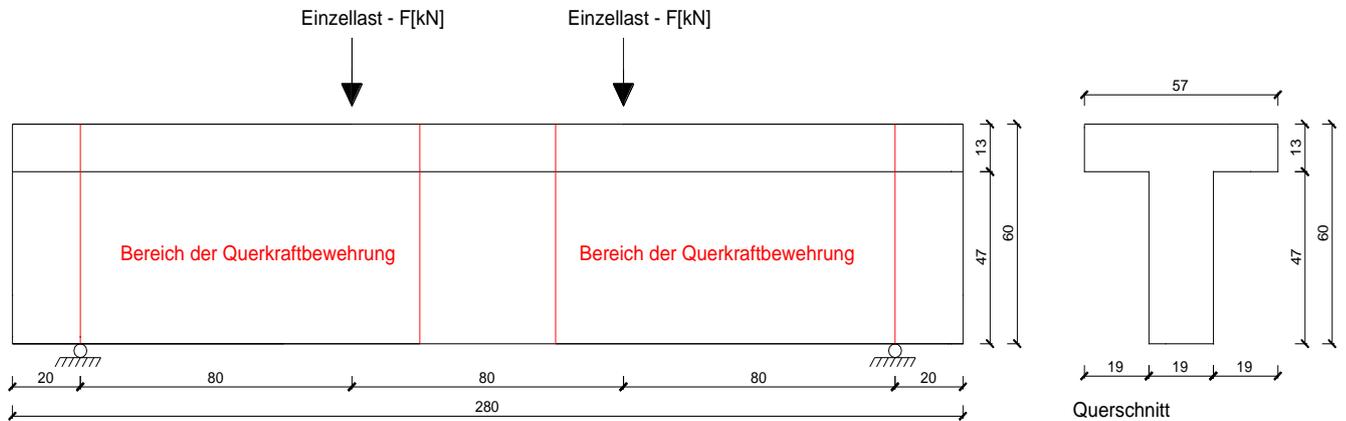


Abb.33: Querschnittsdarstellung der Versuchsreihe B

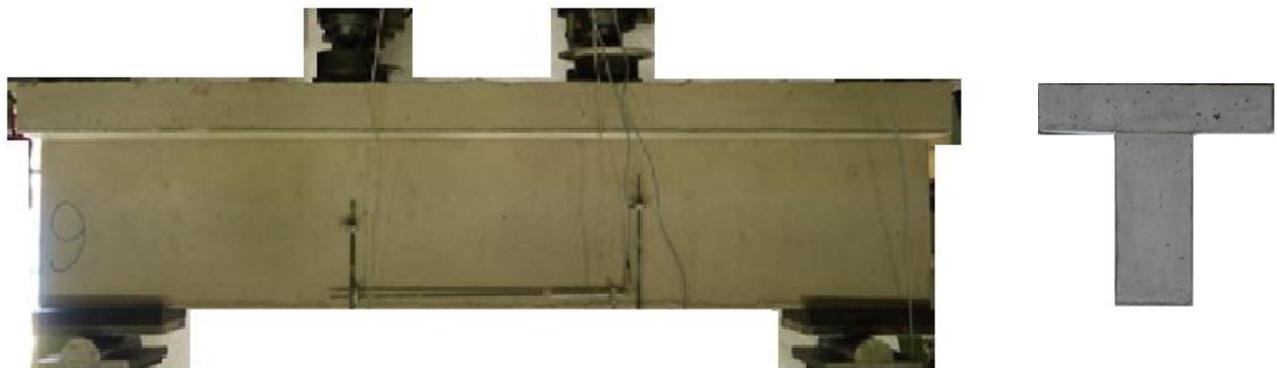


Abb.34: Körper BA6 im Einbauzustand

Körper	Biegezug - bewehrung [cm ²]	Querkraftbewehrung [cm ² /m]	Belastungsart	Querkraftbewehrung
BA1	12,4	12,56	Einzellast	L -Blech, t=5mm, 2 Bügel
BA3	12,4	12,56	Einzellast	L -Blech, t=3mm, 2 Bügel
BA4	12,4	4,07	Einzellast	L -Blech, t=3mm, 1 Bügel
BA5	12,4	12,56	Einzellast	2 Bügel ø6mm
BA6	12,4	4,07	Einzellast	1 Bügel ø6mm
BB1	12,4	12,56	Einzellast	L -Blech, t=5mm, 2 Bügel
BB2	12,4	19,44	Einzellast	Z -Blech, t=5mm
BB3	12,4	8,07	Einzellast	L -Blech, t=5mm, 2 Bügel
BB4	12,4	12,5	Einzellast	Z -Blech, t=5mm
BB5	12,4	4,07	Einzellast	L -Blech, t=5mm, 1 Bügel
BB6	12,4	4,07	Einzellast	1 Bügel ø6mm

Tabelle 2: Zusammenfassung der Versuchsreihe B

3.2 Stahlkennwerte

Körper	Typ	Material	Bügel der L-Bleche BSt 500			
			Streckgrenze f_y	Zugfestigkeit f_u	Streckgrenze f_y	Zugfestigkeit f_u
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
AA2; AA3	Bügel ø6	BSt 500	572	610	-	-
AA4	HDB-Anker	BSt 500G	486	801	-	-
AA5	L5-Blech	S235JR	346	433	575	621
AA6	Bügel ø8	BSt 500	501	615	-	-
BA1; BB1; BB3; BB5	L5-Blech	S235JR	346	433	545	617
BA3;BA4	L3-Blech	S235JR	340	416	545	617
BA5 ¹⁾ ; BA6; BB6	Bügel ø6	BSt 500	575	632	-	-
BA5 ²⁾	Bügel ø6	BSt 500	566	625	-	-
BB2; BB4	Z5-Blech	S235JR	289	443	-	-

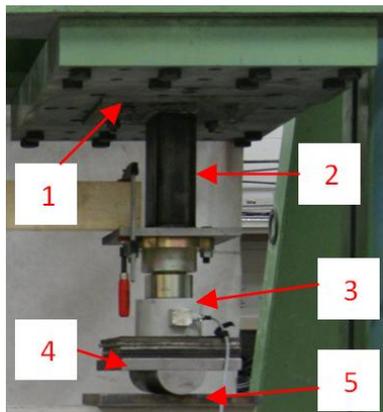
Tabelle 3: Zusammenstellung der Stahlkennwerte

¹⁾ Körper BA5 – äußerer Bügel

²⁾ Körper BA5 – innerer Bügel

3.3 Versuchsanlage und Versuchsdurchführung

Der Aufbau der Versuchsanlage erfordert den Einbau der Körper mit der Längsbewehrung nach oben. Die Körper der Versuchsreihe A lagern auf sechs in Reihe gestellten hydraulischen Einzelzylindern, die eine Gleichstreckenlast erzeugen (siehe Abb. 37). In der Versuchsreihe B liegen die Körper auf 2x2 hydraulischen Zylindern, die jeweils hintereinander angeordnet sind und zwei Einzellasten simulieren (siehe Abb. 37). Die Zylinder sind jeweils auf einer Seite an einem Ölkreislauf angeschlossen. Die Prüflast wird über die Auflagerkonstruktion (siehe Abb.35) in den Prüfraumen eingeleitet.



- 1 Stahlplatte am Spannfeldrahmen befestigt
- 2 Stahlstütze
- 3 Kraftmessdose
- 4 Kipplager
- 5 Stahlplatte als Auflagerfläche am Körper

Abb.35: Auflagerkonstruktion

Die Dehnungsbehinderung der Körper infolge von Reibungskräften im Bereich der Einzelzylinder wird durch eine gleitende Lagerung mit gefetteten Stahlplatten weitgehend verhindert (siehe Abb.36).



- 1 hydraulischer Zylinder
- 2 Fettschicht zwischen den Platten

Abb.36: Sechs Zylinder als Streckenlast mit gefetteten Stahlplatten

Bei der Prüfung werden die einwirkenden Kräfte, die Körperverformungen in horizontaler und vertikaler Richtung, sowie die Dehnungen der Biegezug- und der Querkraftbewehrungen erfasst.

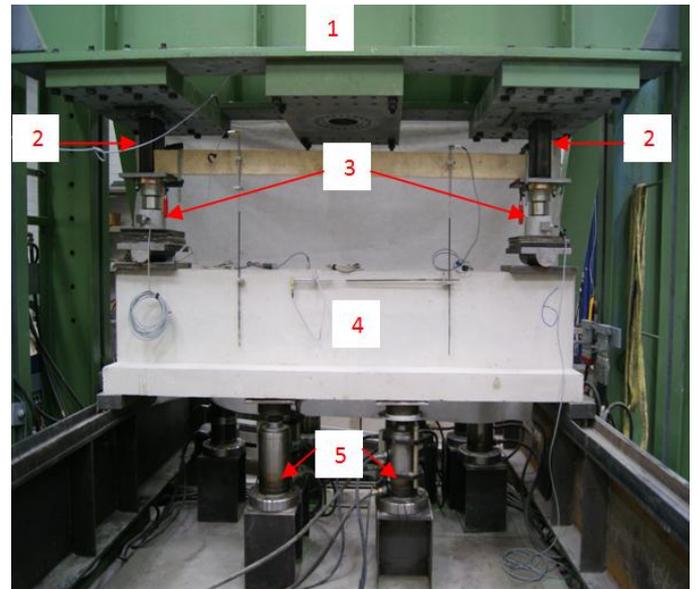
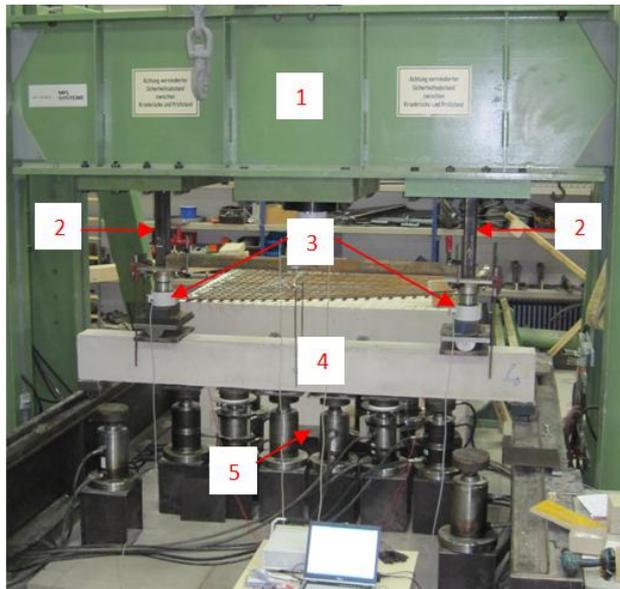


Abb.37: Spannfeldrahmen mit sechs Zylinder als Streckenlast (links) und 2x2 Zylinder (jeweils hintereinander angeordnet) als Einzellast (rechts)

- 1** Spannfeldrahmen
- 2** Stahlstütze
- 3** Kraftmessdose
- 4** Körper
- 5** 6 Prüfzylinder (links) / 2x2 Prüfzylinder (rechts)

Die Belastung der Körper wird in mehreren Laststufen durchgeführt. Nach jeder Stufe werden die entstandenen Risse farblich markiert.

4. Versuchsergebnisse

4.1 Versuchsreihe A

Körper	$f_{c,cube}$ [N/mm ²]	Biegezugbewehrung [cm ²]	Querkräftbewehrung [cm ² /m]	Querkräftbewehrung – Tragfähigkeit ¹ V_{R1} [kN/m]	Querkräftbewehrung [cm ² /m]	Querkräftbewehrung – Tragfähigkeit ¹ V_{R2} [kN/m]	Querkräftbewehrung [cm ² /m]	Querkräftbewehrung – Tragfähigkeit ¹ V_{R3} [kN/m]	Belastungsart	Bruchlast V_u [kN/m]	V_u / V_{R1} [-]	Querkräftbewehrung
			Bereich 1		Bereich 2		Bereich 3					
AA1	34,2	5,8	-	-	-	-	-	-	Streckenlast	147,9		-
AA2	34,2	5,8	2,3	131,6	2,3	131,6	2,3	131,6	Streckenlast	182,9		Bügel ø6mm
AA3	34,2	5,8	25,1	1435,7	17,4	995,3	9,4	537,7	Streckenlast	235,5	0,16	Bügel ø6mm
AA4	35,3	5,8	25,1	1219,9	17,4	845,6	9,4	456,8	Streckenlast	231,2	0,19	ø12 HDB- Anker
AA5	35,3	5,8	25,1	1443,3	17,4	1000	9,4	540,5	Streckenlast	250,9	0,17	L-Blech, t=5mm, 2 Bügel
AA6	35,3	12,3	11,2	561,1	11,2	561,1	-	-	Streckenlast	300,3		Bügel ø8mm

Tabelle 4: Zusammenfassung der Versuchsreihe A

¹ Querkräftbewehrung – Tragfähigkeit: $a_s \cdot f_{yk}$

4.1.1 Vergleich von Körper AA6 mit "Leonhardt Balken" G5 [4]

	Körper AA6	Balken „G5“ nach Leonhardt/Walther (DAfStb Heft 151; Balken G5; S.41)
Lagerung bis zur Prüfung	8 Tage	28 Tage
Betonfestigkeit $f_{c,cube}$	$f_{c,cube} = 35,3 \frac{N}{mm^2}$	$\beta_w = 33,2 \frac{N}{mm^2}$
Biegezugbewehrung [cm ²] / Durchmesser	12,3 cm ² / Ø16 und Ø20	12,3 cm ² / Ø16 und Ø20
Querkraftbewehrung [cm ² /m] / Durchmesser: Stahlfestigkeit [N/mm ²]	11,2 cm ² /m Ø8: $f_{yk} = 501 \frac{N}{mm^2}$	11,2 cm ² /m <i>links: Rundstahl (BSt I)</i> Ø8: $\beta_z = 380 \frac{N}{mm^2}$ <i>rechts: Rippentorstahl (BSt IIIb)</i> Ø8: $\beta_z = 578 \frac{N}{mm^2}$
Max. Streckenlast	$V_u = 300,3 \frac{kN}{m}$	$P_u = 296,5 \frac{kN}{m}$
Bruchart	Biegedruckversagen	Biegedruckversagen
Anzahl der Hauptrisse	19 Stück	20 Stück

Tabelle 5: Vergleich des Körpers AA6 mit Balken G5 nach Leonhardt/Walther

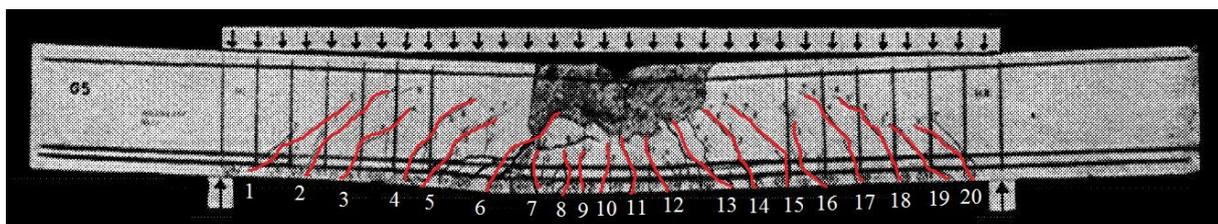


Abb.38: Rissbild Balken G5

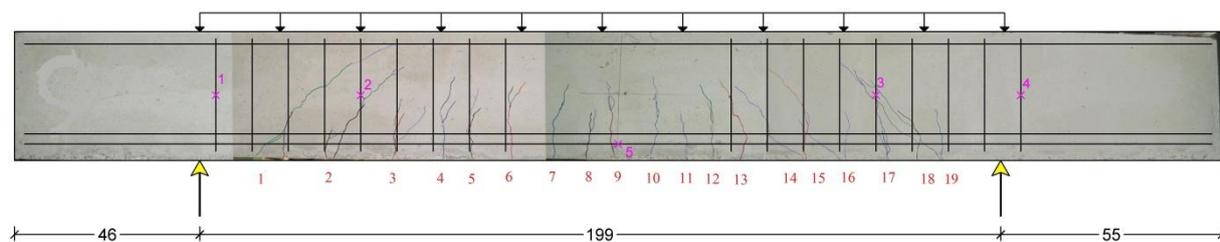
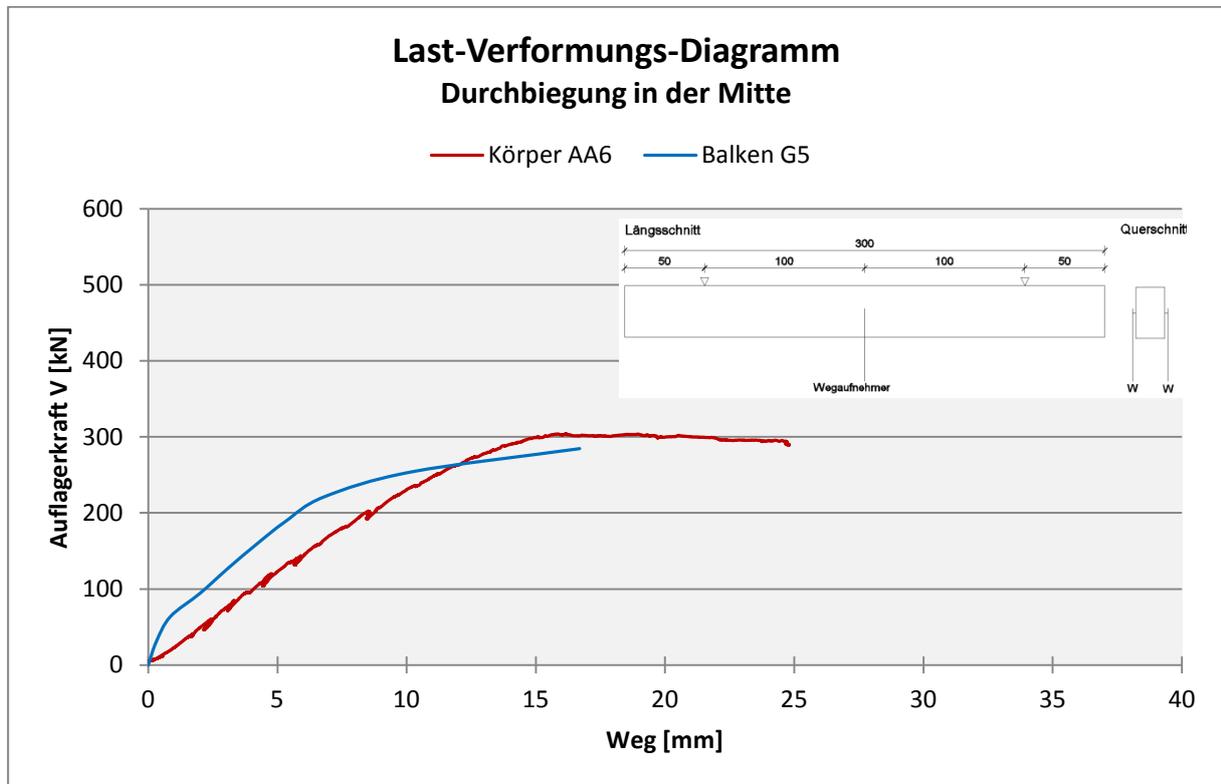


Abb.39: Rissbild Körper AA6

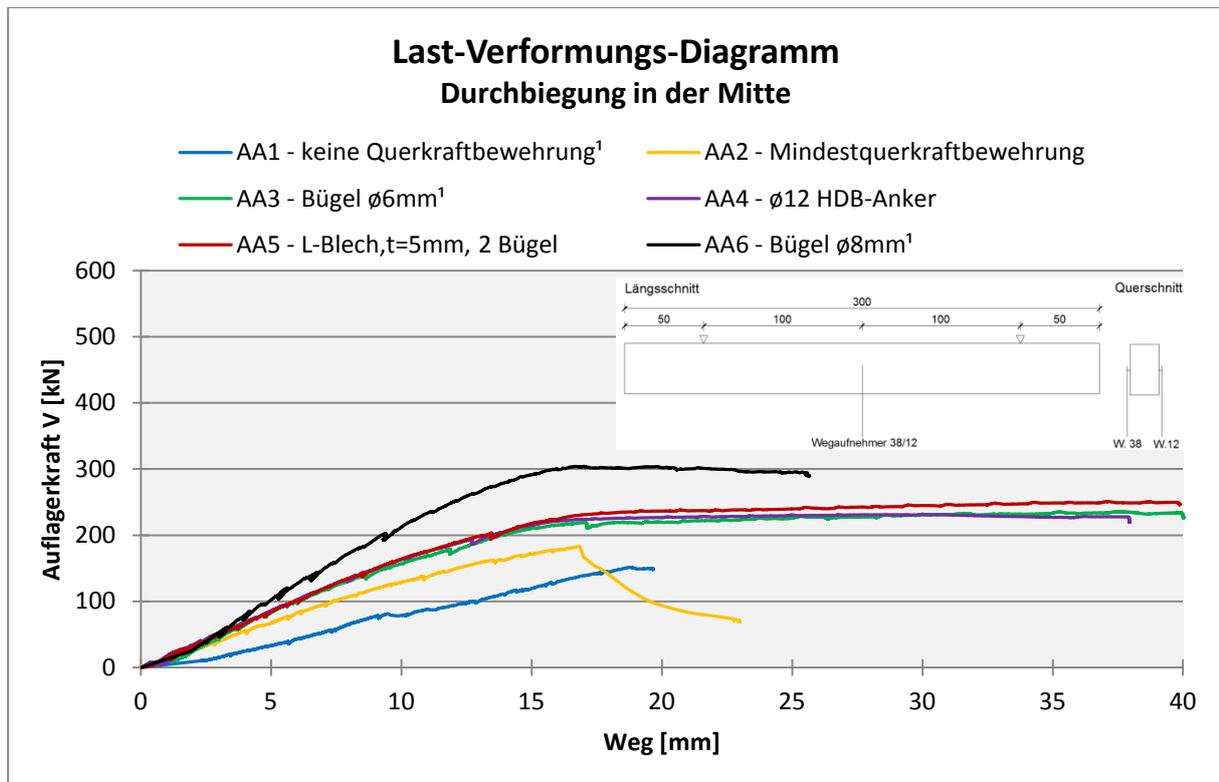
Anhand der Abbildungen 38 und 39 ist zu erkennen, dass der Rissverlauf und die Rissanzahl der Körper G5 und AA6 gut übereinstimmen.



Diagr. 1: Last-Verformungs-Diagramm (Vergleich von Körpern AA6 und G5)

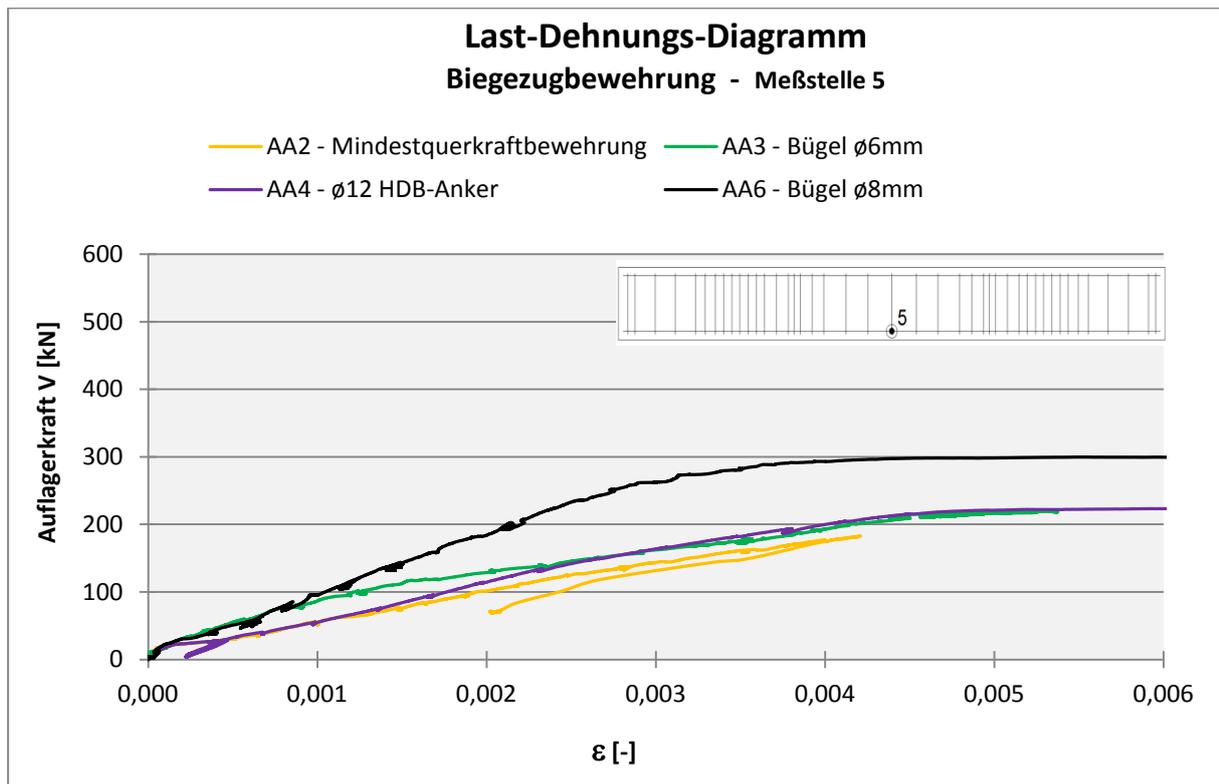
Das Last-Verformungs-Verhalten der beiden Körper zeigt ein ähnliches Verhalten. Die Bruchlasten sind ebenfalls nahezu identisch.

4.1.2 Abhängigkeit der Tragfähigkeit von der Querkraftbewehrung bei den Rechteckbalken

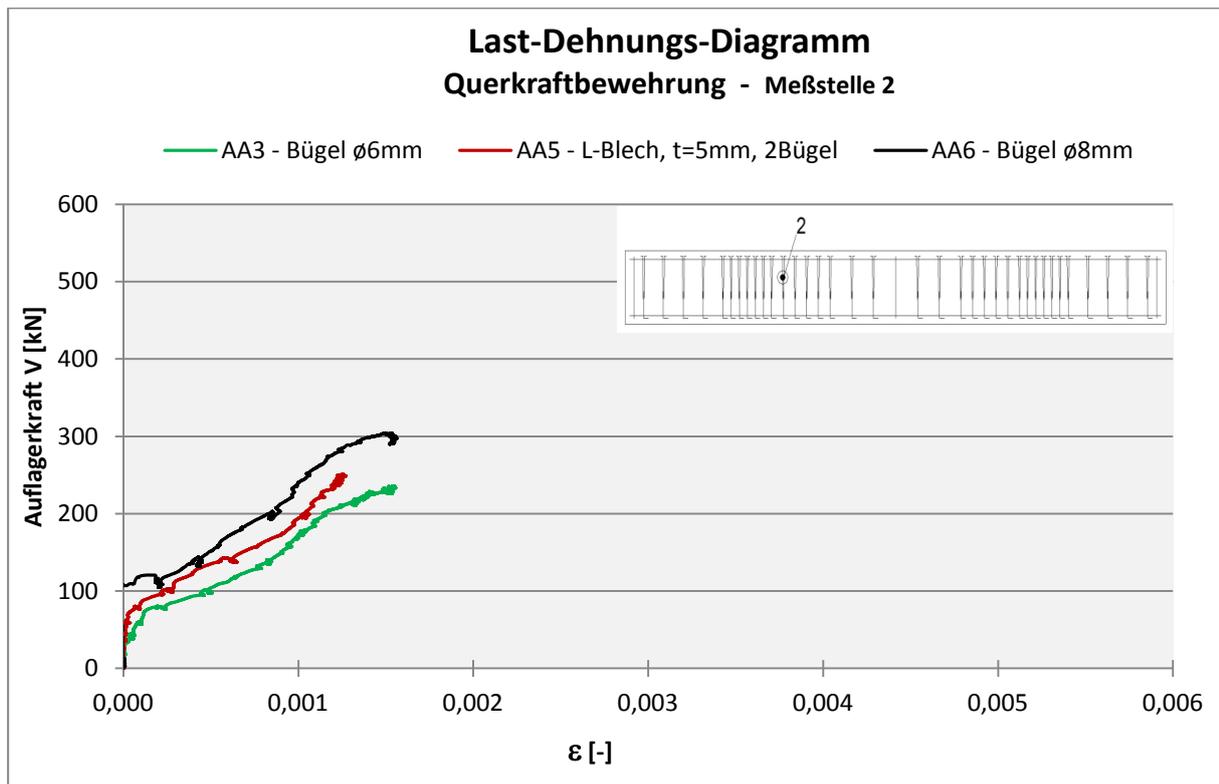


Diagr.2: Last-Verformungs-Diagramm (Mittelwert aus den Wegaufnehmern 38 und 12)

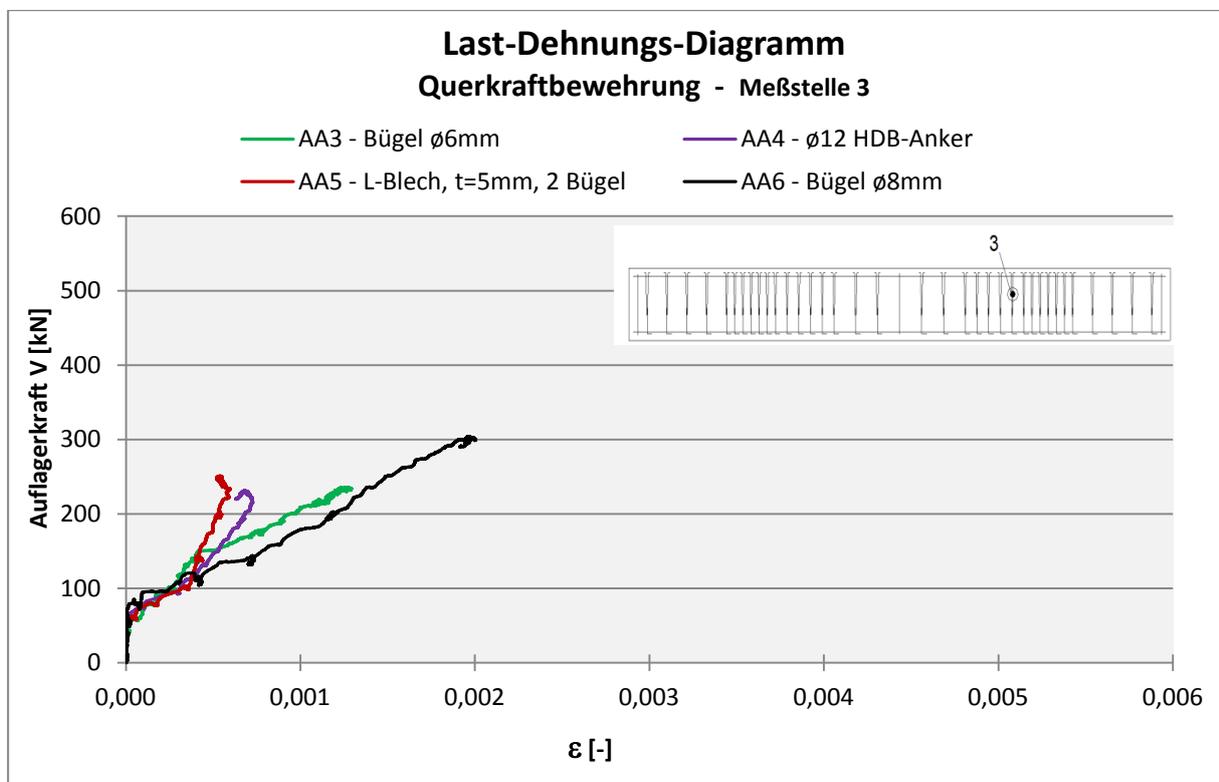
¹ Anfangsverschiebung herausgenommen



Diagr.3: Dehnung: Spannstahl



Diagr.4: Dehnung: Bügel / HDB-Anker



Diagr.5: Dehnung: Bügel / HDB-Anker

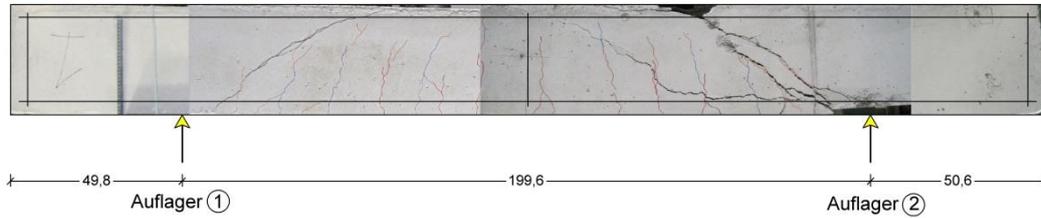
Bruchart und Rissanzahl:

	Körper AA1	Körper AA2	Körper AA3	Körper AA4	Körper AA5	Körper AA6
Versagens- art	Biege- schub- versagen	Zug- versagen der Bügel	Sekundäres Biegedruck- versagen	Sekundäres Biegedruck- versagen	Sekundäres Biegedruck- versagen	Sekundäres Biegedruck- versagen
Anzahl der Hauptrisse	12	10	20	19	18	19

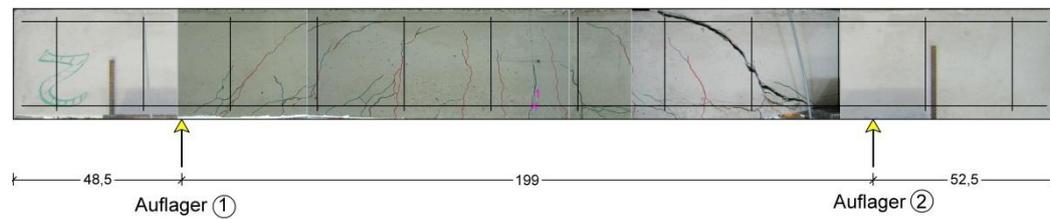
Tabelle 6: *Bruchart und Risszahl der Versuchsreihe AA*

Rissbilder:

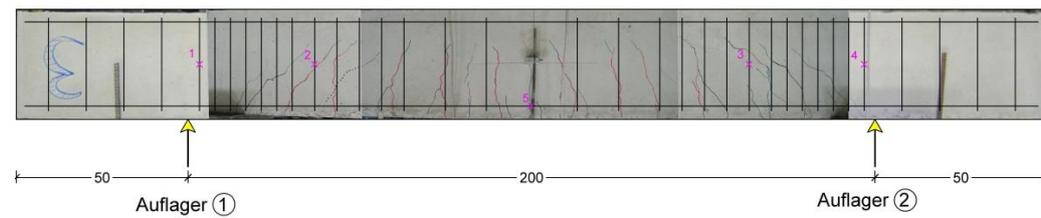
Körper AA1: ohne Querkraftbewehrung



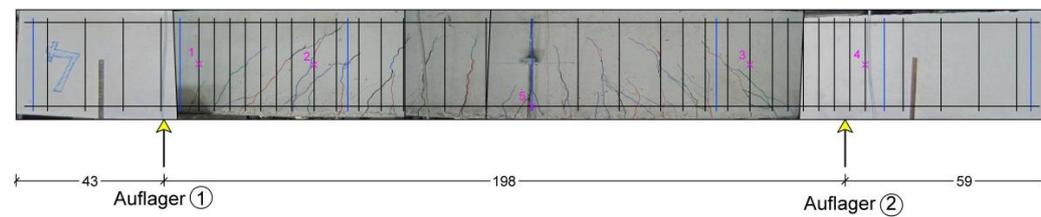
Körper AA2: Mindestkraftbewehrung – Bügel $\varnothing 6\text{mm}$



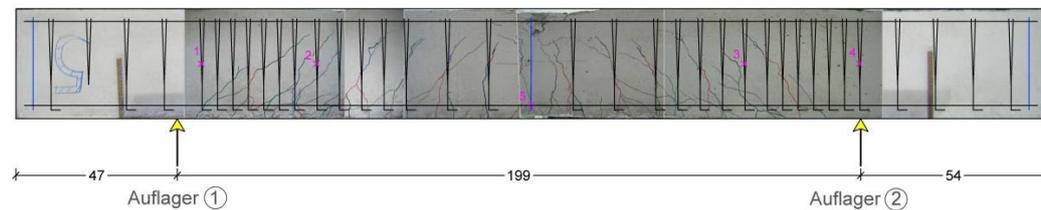
Körper AA3: Bügelbewehrung – Bügel $\varnothing 6\text{mm}$



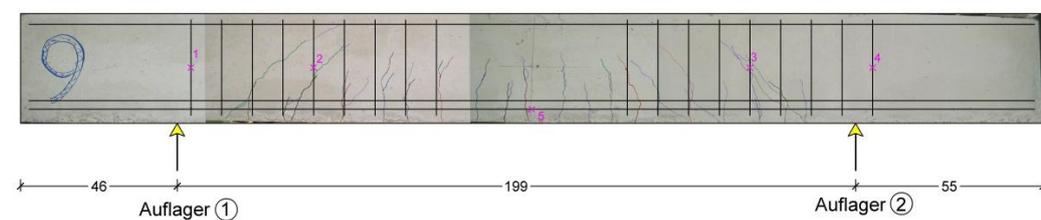
Körper AA4: $\varnothing 12$ HDB - Anker



Körper AA5: „Clixs“ – Bewehrungssystem: L-Blech; $t=5\text{mm}$; 2 Bügel



Körper AA6: Bügelbewehrung – Bügel $\varnothing 8\text{mm}$ (Nachbau „G5“ Leonhardt/Walther)



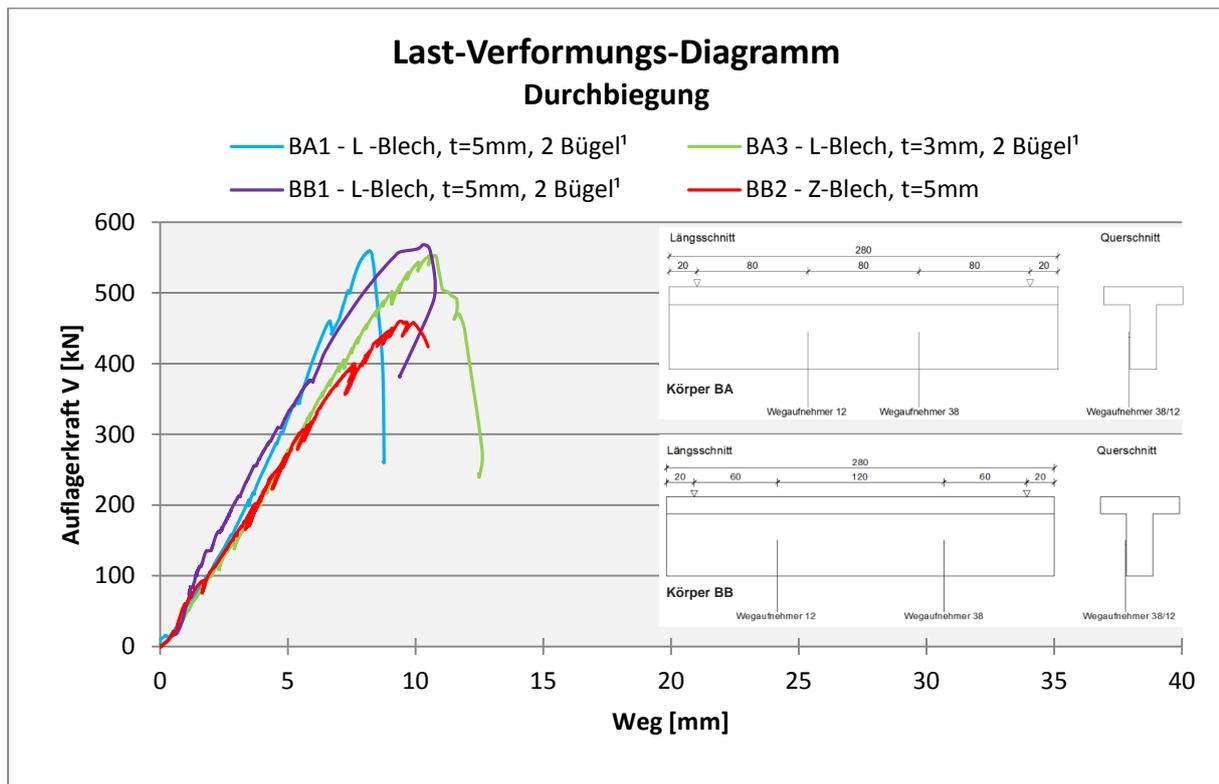
4.2 Versuchsreihe B

4.2.1 Körper mit hoher Querkraftbewehrung

Körper	$f_{c,cube}$ [N/mm ²]	Biegezugbewehrung [cm ²]	Querkraftbewehrung [cm ² /m]	Querkraftbewehrung – Tragfähigkeit ¹ V_R [kN/m]	Belastungsart	Bruchlast V_u [kN]	V_u / V_R [-]	Querkraftbewehrung
BA1	32,4	12,4	12,56	684,5	Einzellast	559,4	0,82	L-Blech, t=5mm, 2 Bügel
BA3	35,3	12,4	12,56	684,5	Einzellast	552,8	0,81	L-Blech, t=3mm, 2 Bügel
BA5	36,6	12,4	12,56	716,5	Einzellast	482,7	0,67	Bügel ø6mm
BB1	26,9	12,4	12,56	684,5	Einzellast	568,3	0,83	L-Blech, t=5mm, 2 Bügel
BB2	26,9	12,4	19,44	561,8	Einzellast	460	0,82	Z-Blech, t=5mm

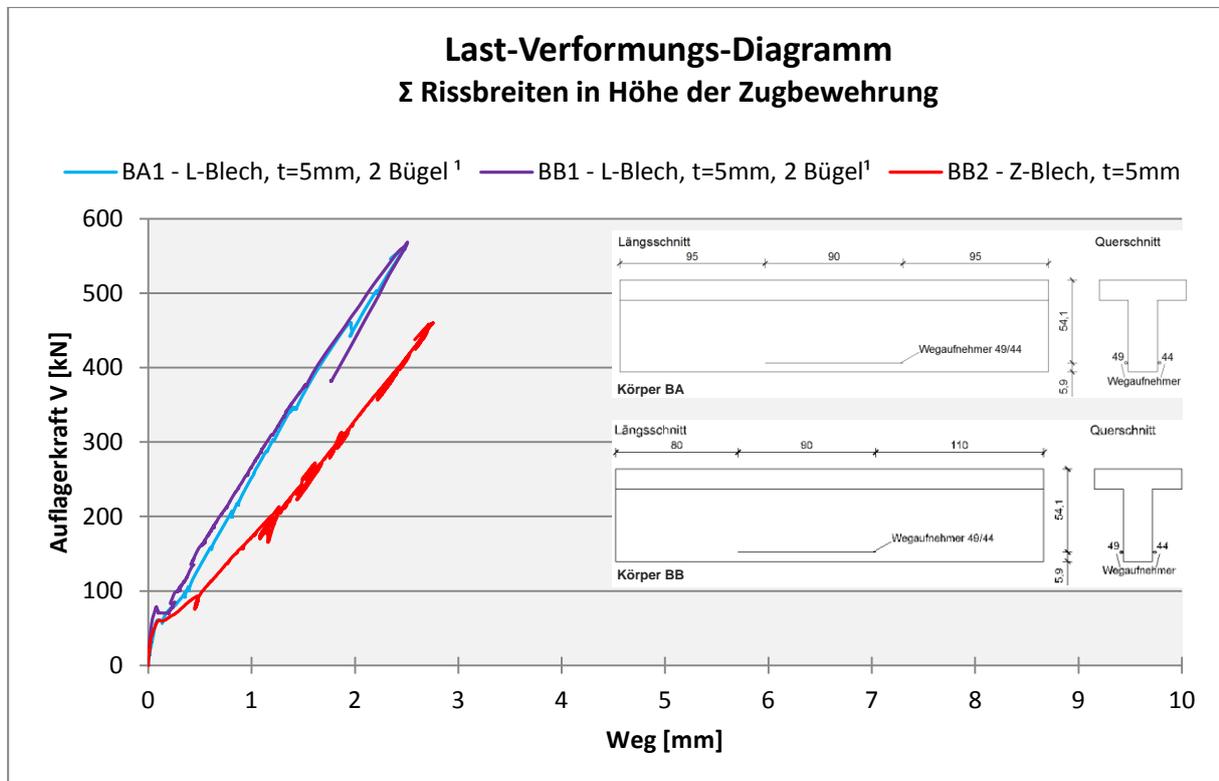
Tabelle 7: Zusammenfassung der Versuchsreihe B mit hoher Querkraftbewehrung

¹ Querkraftbewehrung – Tragfähigkeit: $a_s \cdot f_{yk}$



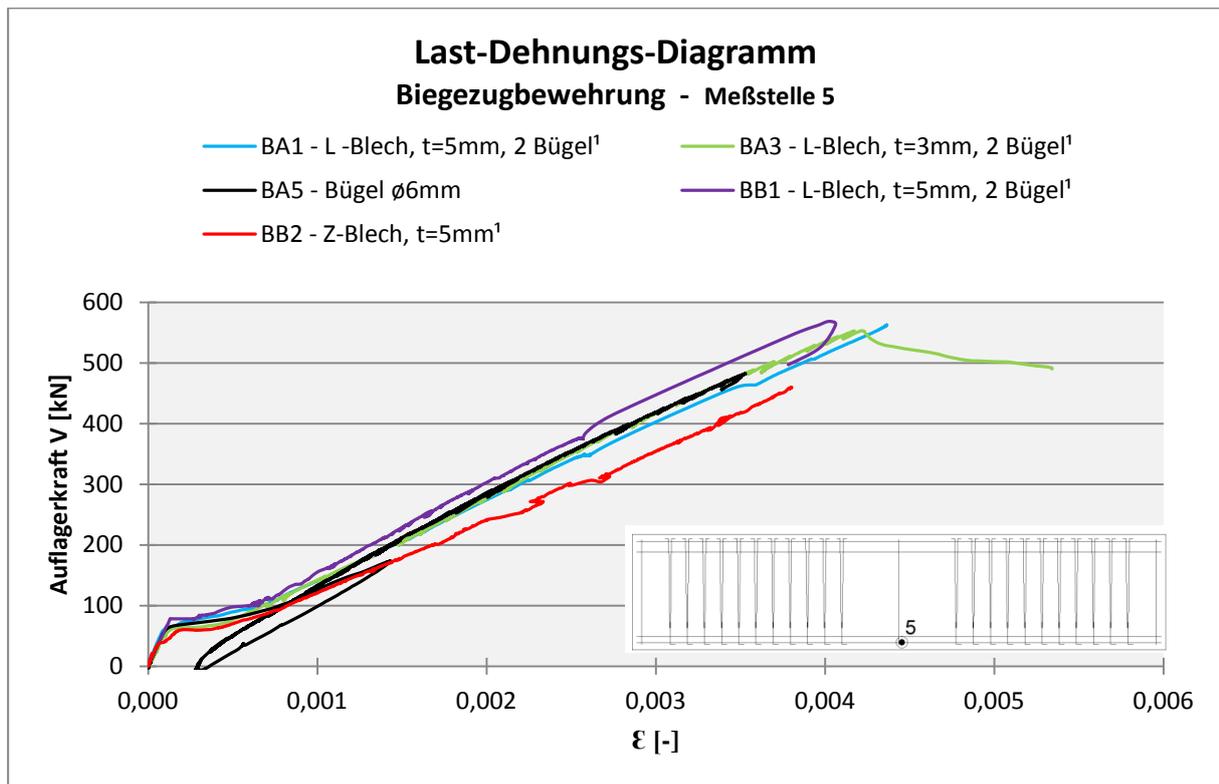
Diagr.6: Last-Verformungs-Diagramm (Mittelwert aus den Wegaufnehmern 38 und 12)

¹⁾ Entlastungen herausgenommen



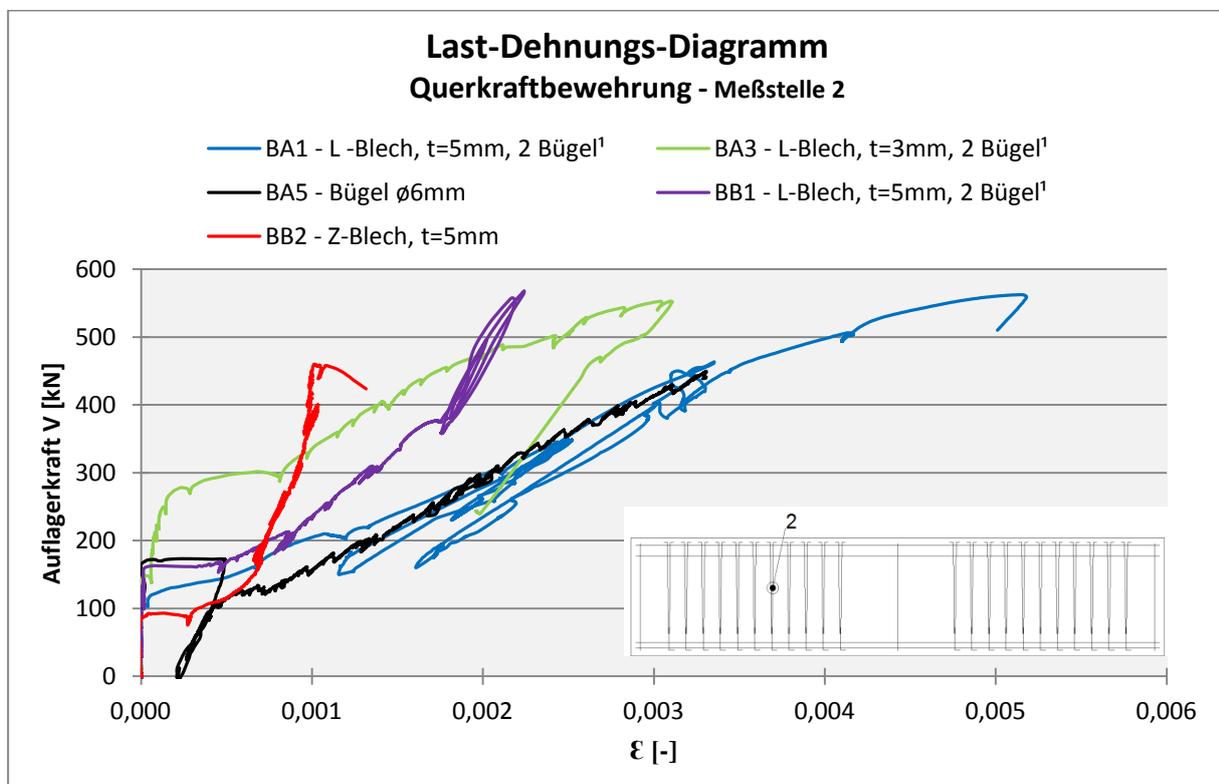
Diagr.7: Last-Verformungs-Diagramm (Mittelwert aus den Wegaufnehmern 49 und 44)

¹⁾ Entlastungen herausgenommen

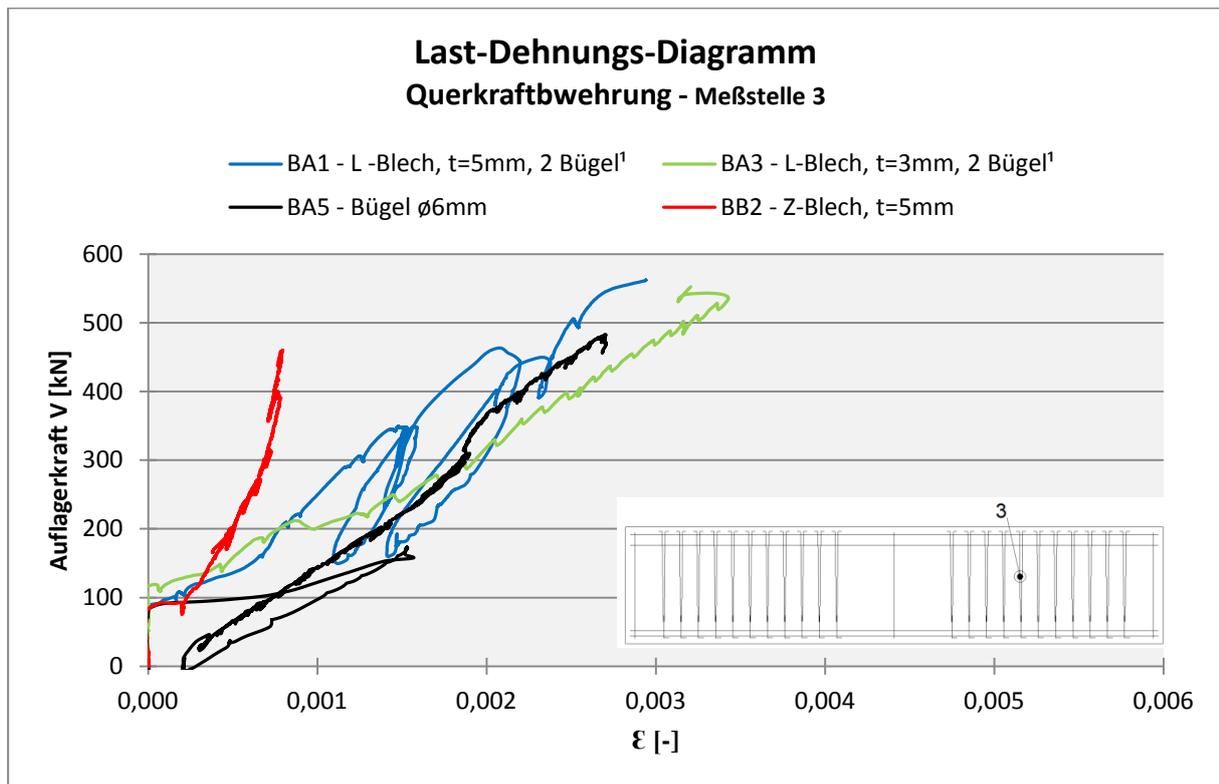


Diagr.8: Dehnung: Spannstahl

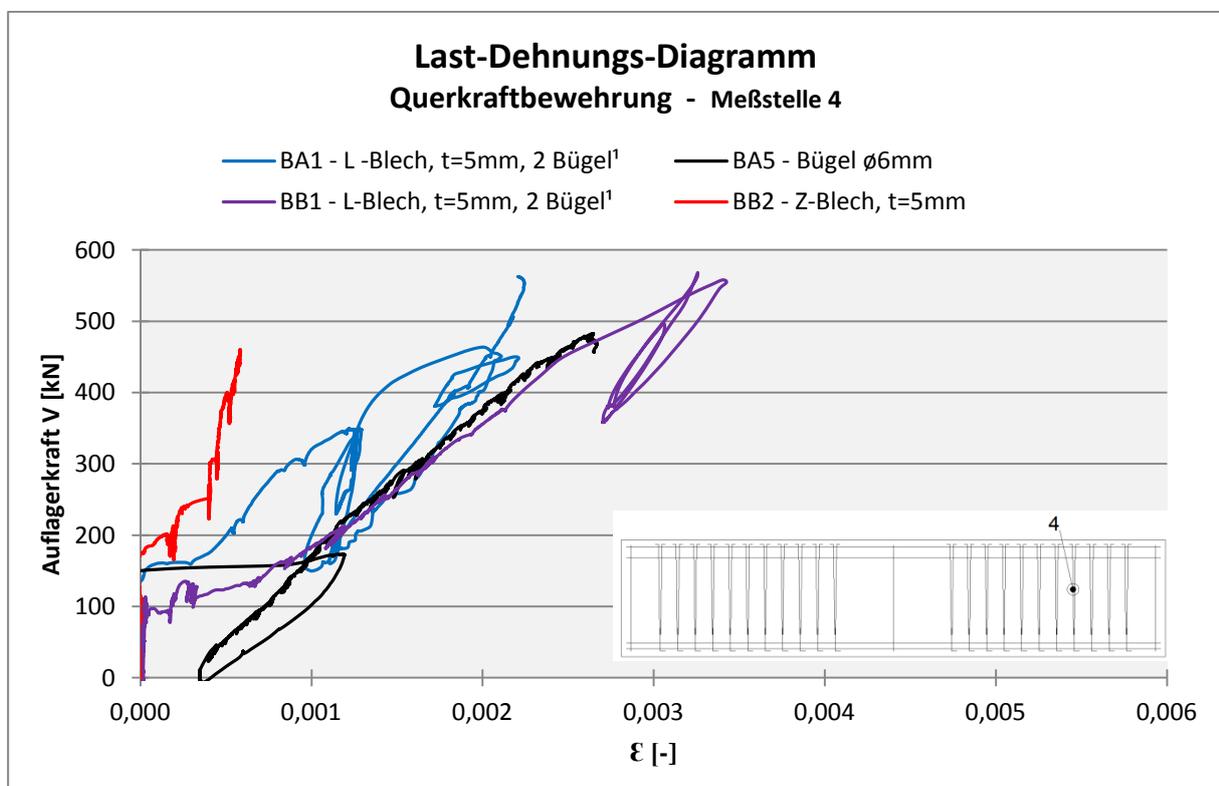
¹⁾ Entlastungen herausgenommen



Diagr.9: Dehnung: Bügel / Z-Bleche



Diagr.10: Dehnung: Bügel / Z-Bleche



Diagr.11: Dehnung: Bügel / Z-Bleche

Bruchart und Rissanzahl:

	Körper BA1	Körper BA3	Körper BA5	Körper BB1	Körper BB2
Versagensart	Zugversagen der Querkraftbewehrung	Zugversagen der Querkraftbewehrung ²	Zugversagen der Querkraftbewehrung	Zugversagen der Querkraftbewehrung	Zugversagen: Verformung der Kantung des Z-Blechs
Anzahl der Hauptrisse ¹	16	17	16	17	18

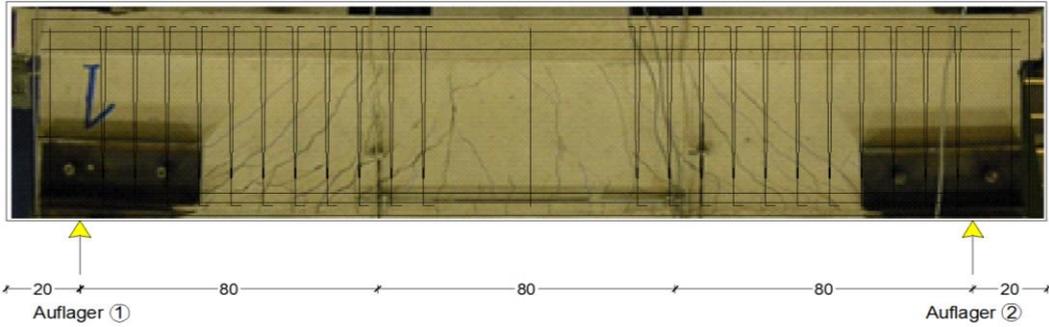
Tabelle 8: Bruchart und Risszahl der Versuchsreihe B mit hoher Querkraftbewehrung

¹ Hauptrisse in Höhe der Zugsbewehrung

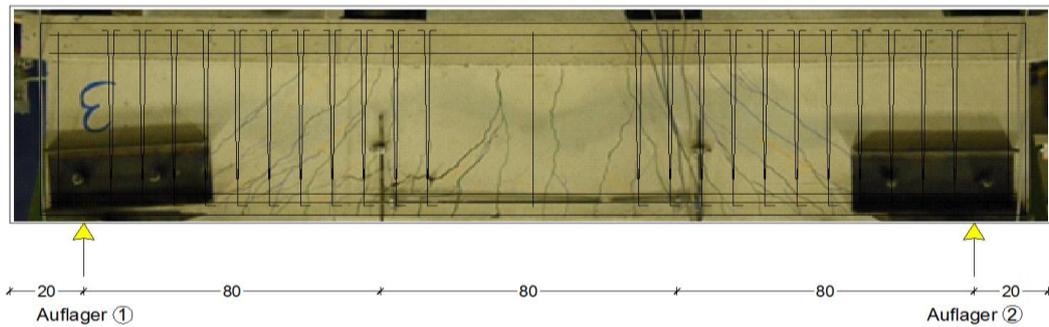
² Anhand der Rissentwicklung wurde ein Zugversagen der Querkraftbewehrung erwartet. Kurz vor dem Versagen wurde der Versuch aufgrund der plötzlich auftretenden Torsionsbeanspruchung durch einen technischen Ausfall der Hydraulikzylinder beendet.

Rissbilder:

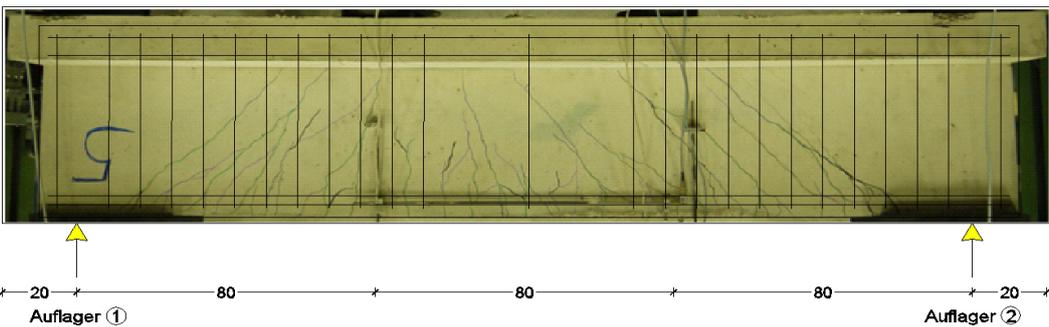
Körper BA1: „Clixs“ – Bewehrungssystem: L-Blech; $t=5\text{mm}$; 2 Bügel



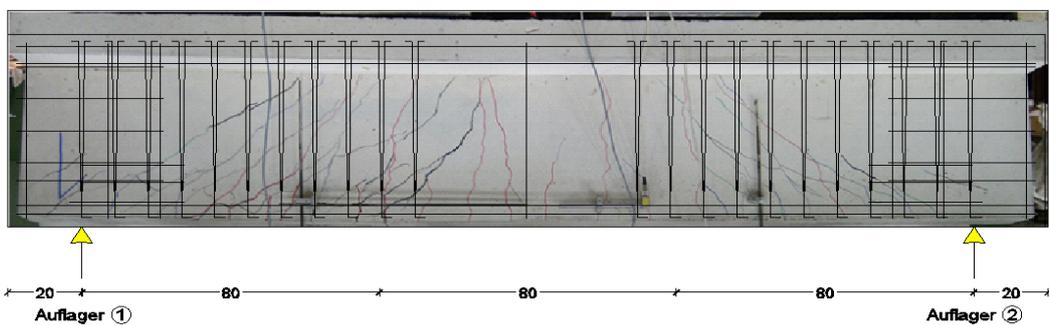
Körper BA3: „Clixs“ – Bewehrungssystem: L-Blech; $t=3\text{mm}$; 2 Bügel



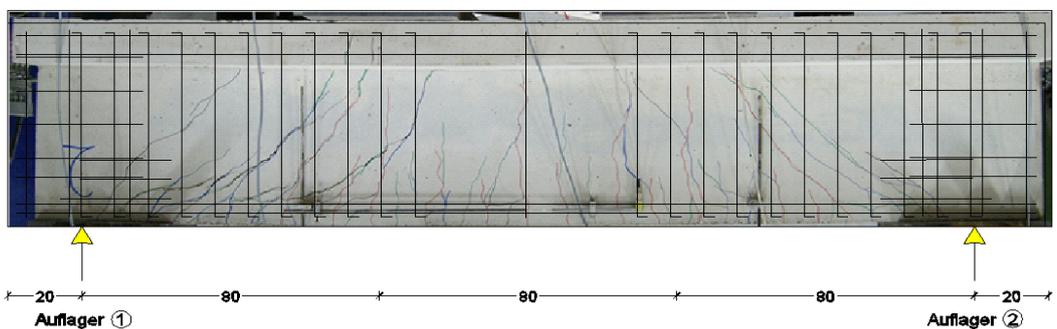
Körper BA5: Bügelbewehrung – Bügel $\varnothing 6\text{mm}$



Körper BB1: „Clixs“ – Bewehrungssystem: L-Blech; $t=5\text{mm}$; 2 Bügel



Körper BB2: „Clixs“ – Bewehrungssystem: Z-Blech; $t=5\text{mm}$

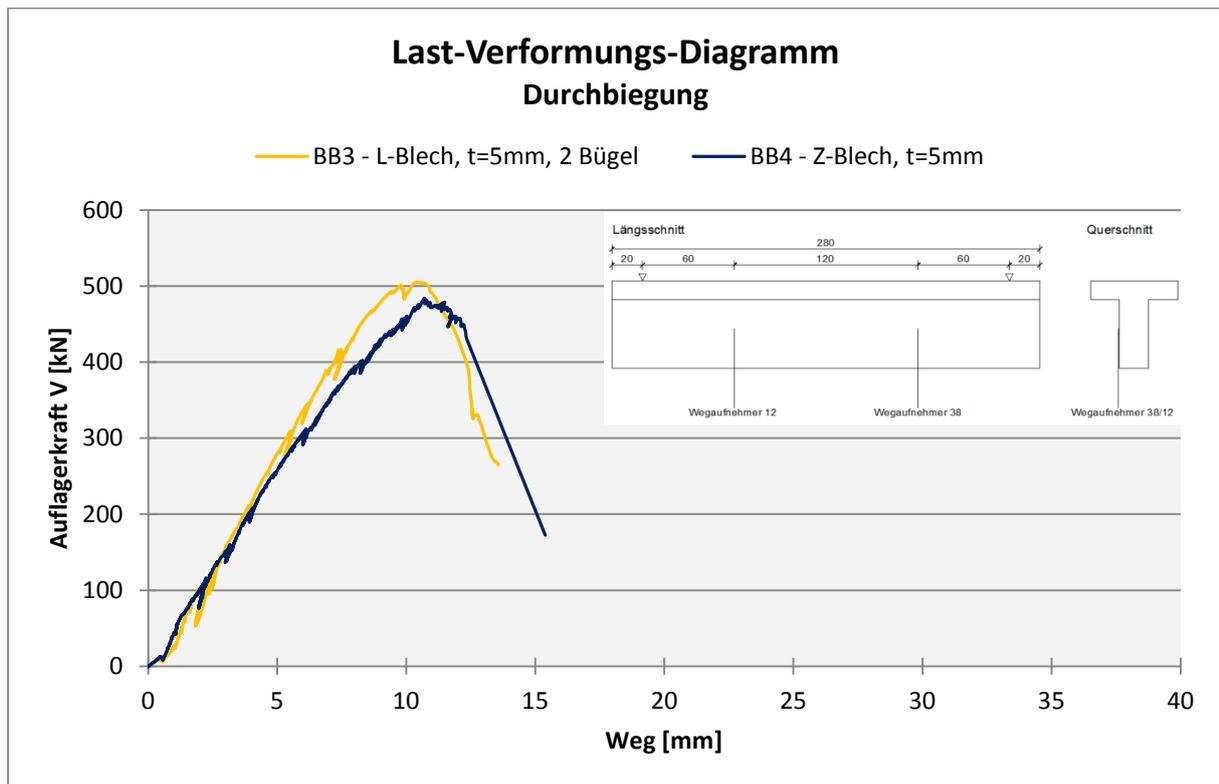


4.2.2 Körper mit mittlerer Querkraftbewehrung

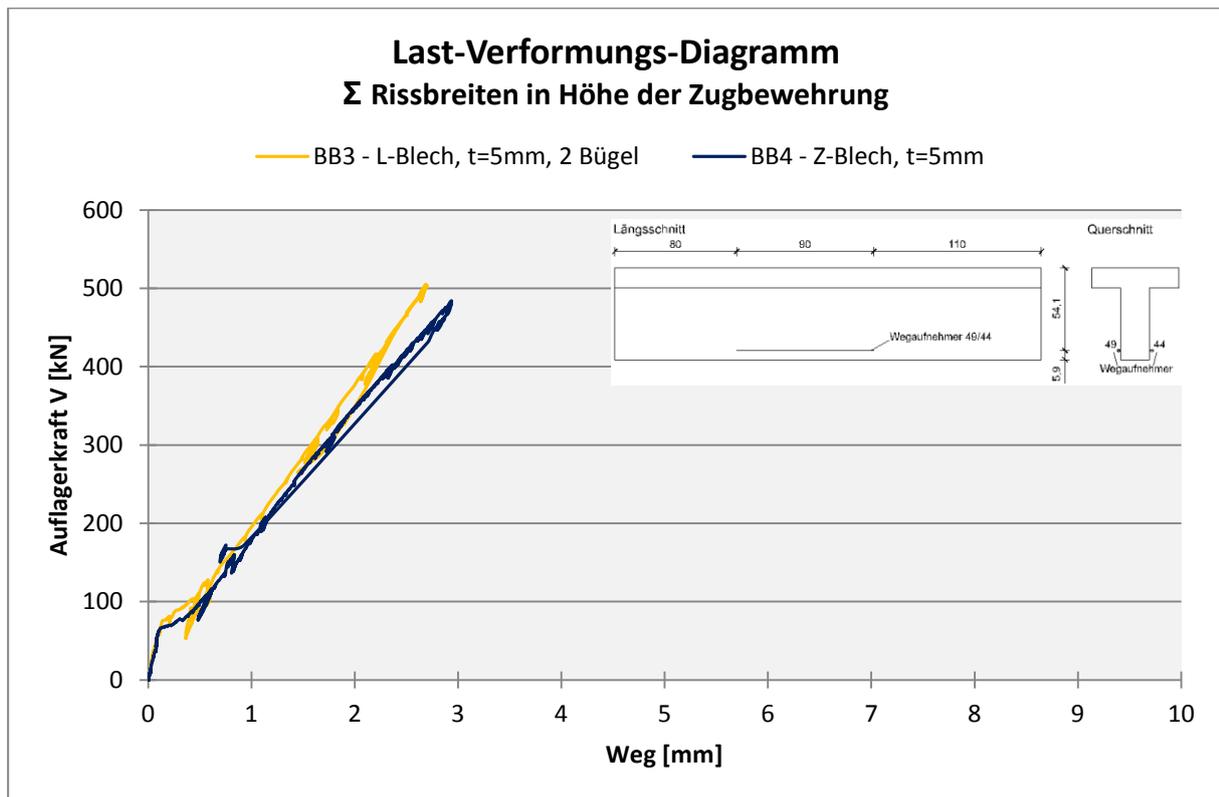
Körper	$f_{c,cube}$ [N/mm ²]	Biegezugbewehrung [cm ²]	Querkraftbewehrung [cm ² /m]	Querkraftbewehrung – Tragfähigkeit ¹ V_R [kN/m]	Belastungsart	Bruchlast V_u [kN]	V_u / V_R [-]	Querkraftbewehrung
BB3	31,8	12,4	8,07	439,8	Einzellast	505	1,15	L-Blech, t=5mm, 2 Bügel
BB4	31,8	12,4	12,5	361,3	Einzellast	484	1,34	Z-Blech, t=5mm

Tabelle 9: Zusammenfassung der Versuchsreihe B mit mittlerer Querkraftbewehrung

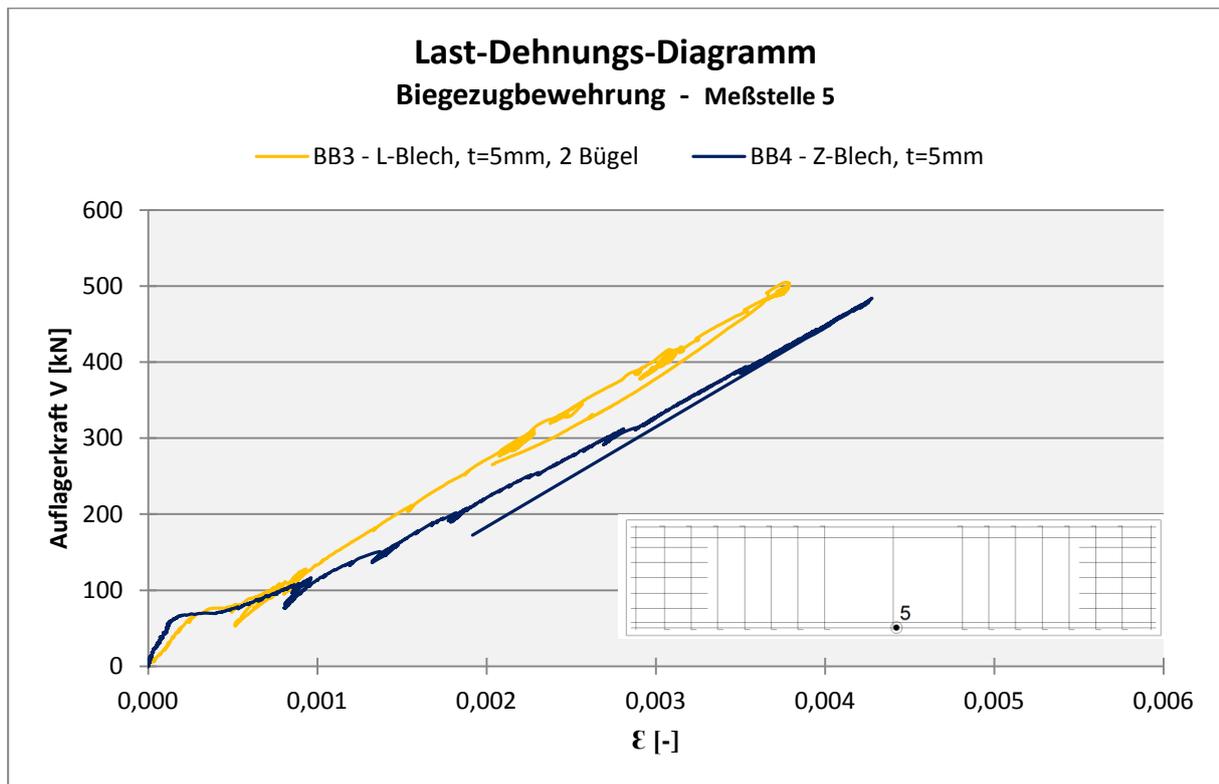
¹ Querkraftbewehrung – Tragfähigkeit: $a_s \cdot f_{yk}$



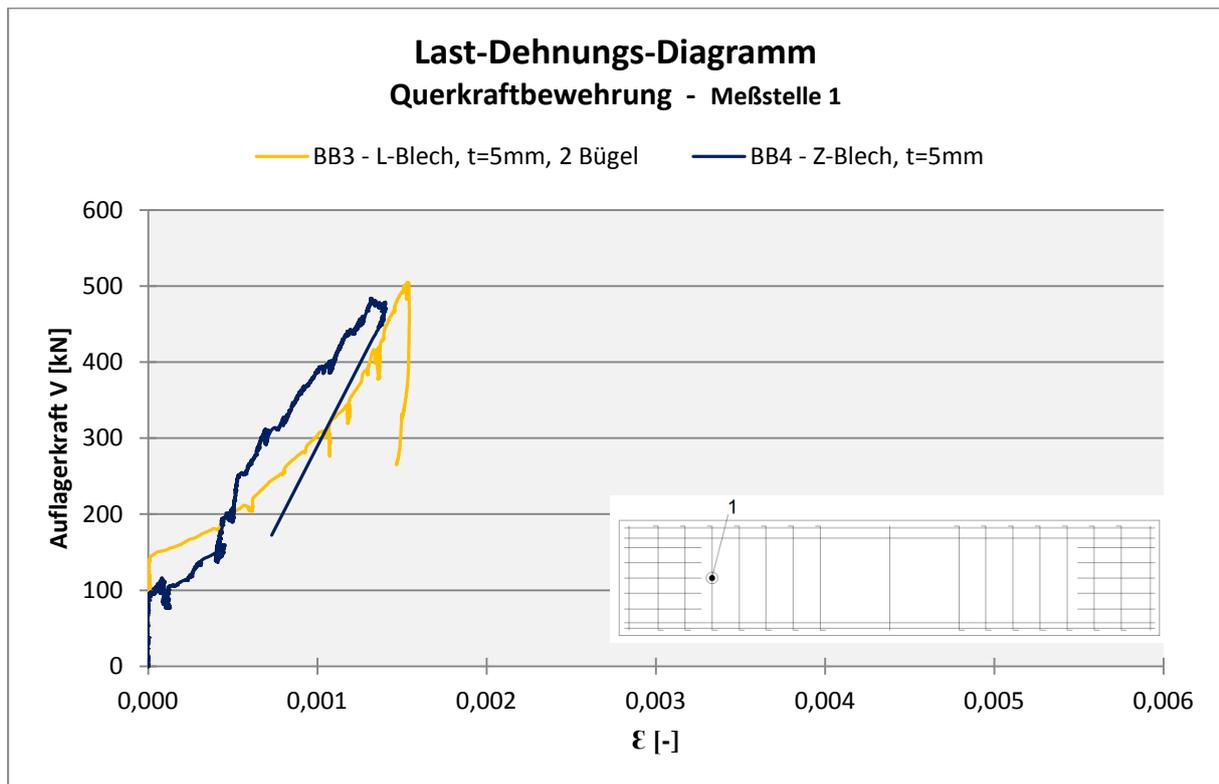
Diagr. 12: Last-Verformungs-Diagramm (Mittelwert aus den Wegaufnehmern 38 und 12)



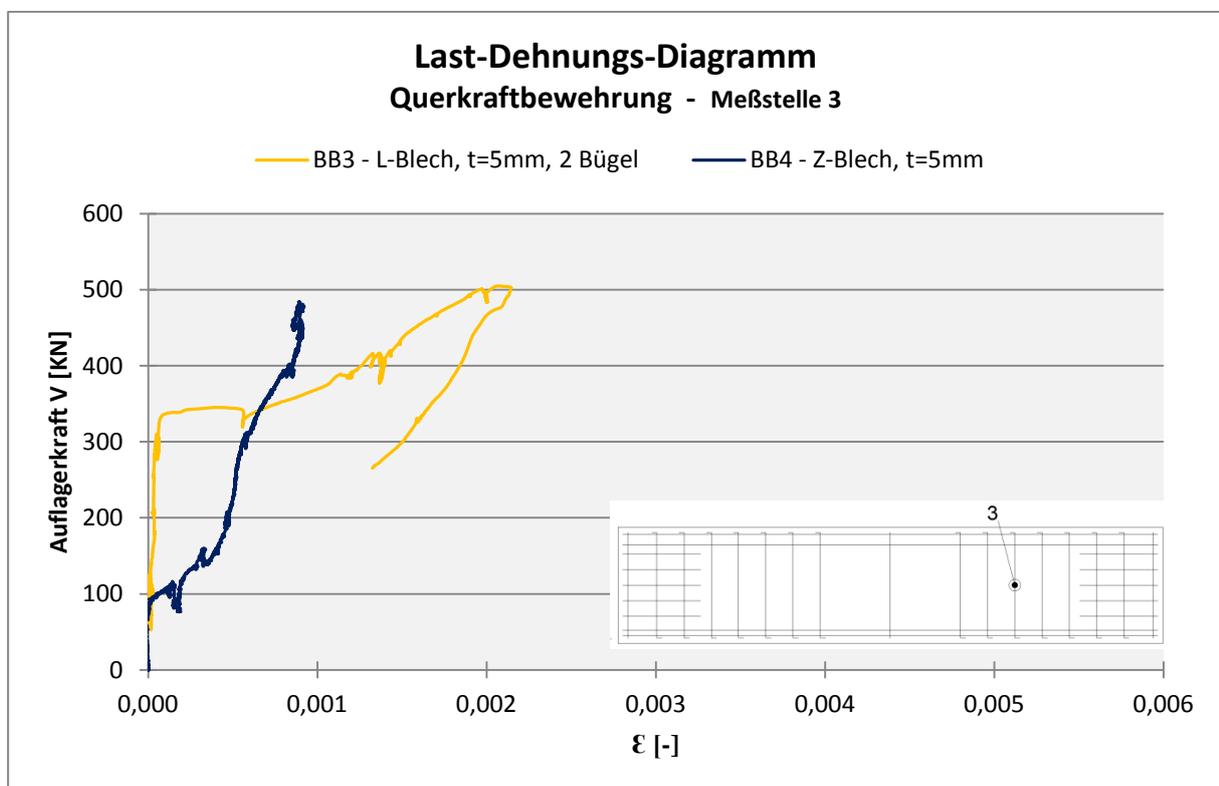
Diagr.13: Last-Verformungs-Diagramm (Mittelwert aus den Wegaufnehmern 49 und 44)



Diagr.14: Dehnung: Spannstahl



Diagr.15: Dehnung: Bügel / Z-Bleche



Diagr.16: Dehnung: Bügel / Z-Bleche

Bruchart und Rissanzahl:

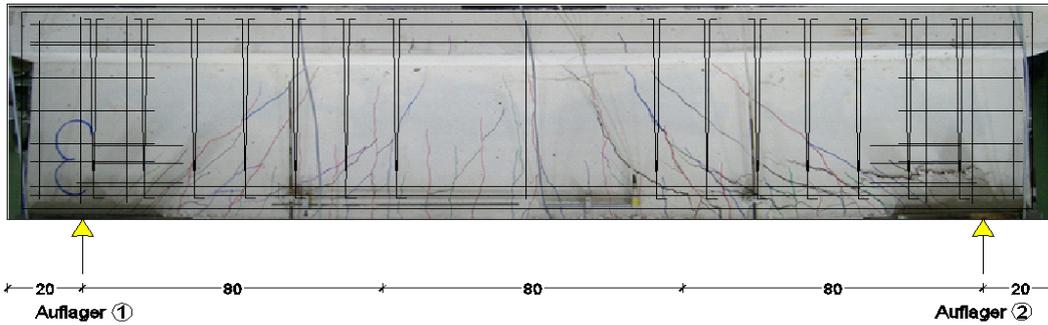
	Körper BB3	Körper BB4
Versagensart	Zugversagen der Querkraftbewehrung	Verformung der Kantung des Z-Blechs
Anzahl der Hauptrisse ¹	13	14

Tabelle 10: Bruchart und Risszahl der Versuchsreihe B mit mittlerer Querkraftbewehrung

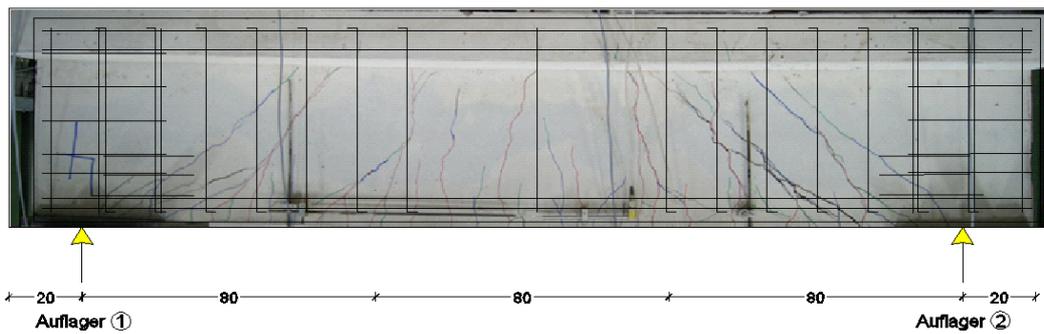
¹ Hauptrisse in Höhe der Zugbewehrung

Rissbilder:

Körper BB3: „Clixs“ – Bewehrungssystem: L-Blech; t=5mm; 2 Bügel



Körper BB4: „Clixs“ – Bewehrungssystem: Z-Blech; t=5mm

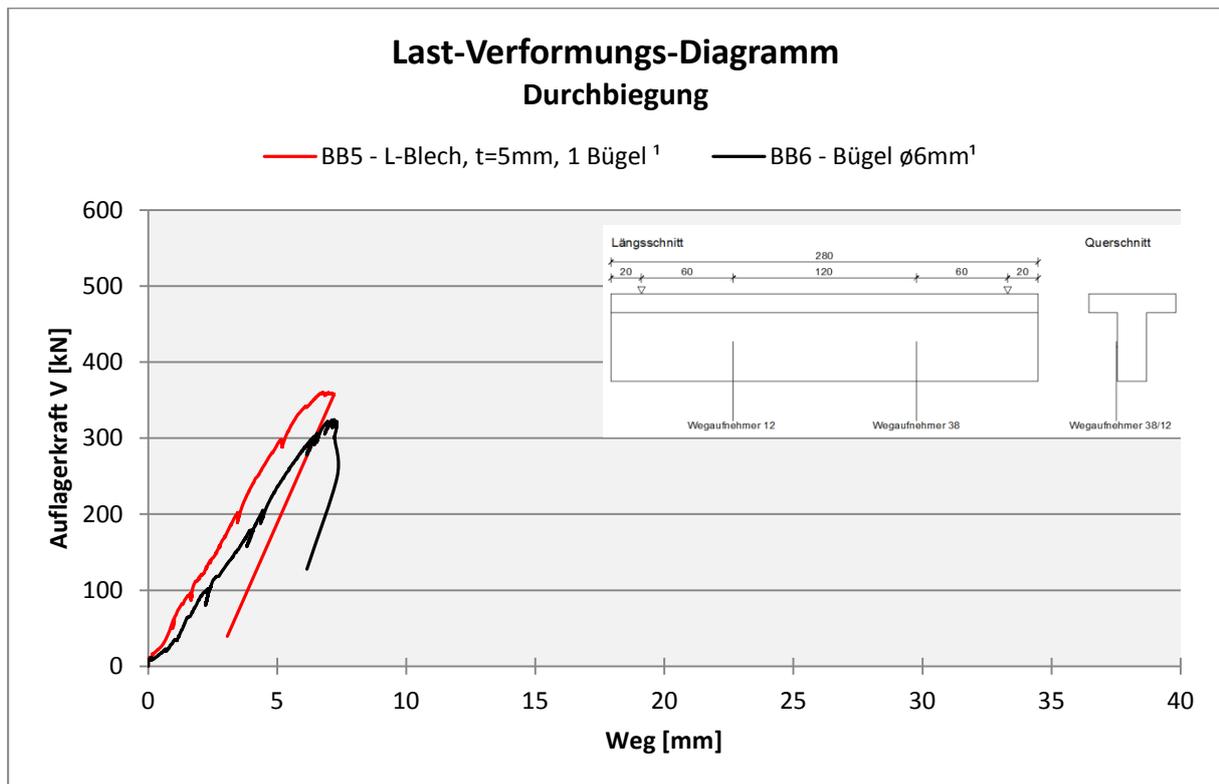


4.2.3 Körper mit geringer Querkraftbewehrung

Körper	$f_{c,cube}$ [N/mm ²]	Biegezugbewehrung [cm ²]	Querkraftbewehrung [cm ² /m]	Querkraftbewehrung – Tragfähigkeit ¹ V_R [kN/m]	Belastungsart	Bruchlast V_u [kN]	V_u / V_R [-]	Querkraftbewehrung
BA4	35,6	12,4	4,07	221,8	Einzellast	440,2	1,98	L–Blech, t=3mm, 1 Bügel
BA6	36,3	12,4	4,07	234	Einzellast	419,6	1,79	1 Bügel ø6mm
BB5	24,1	12,4	4,07	221,8	Einzellast	359,7	1,62	L–Blech, t=5mm, 1 Bügel
BB6	24,1	12,4	4,07	234	Einzellast	323,9	1,38	1 Bügel ø6mm

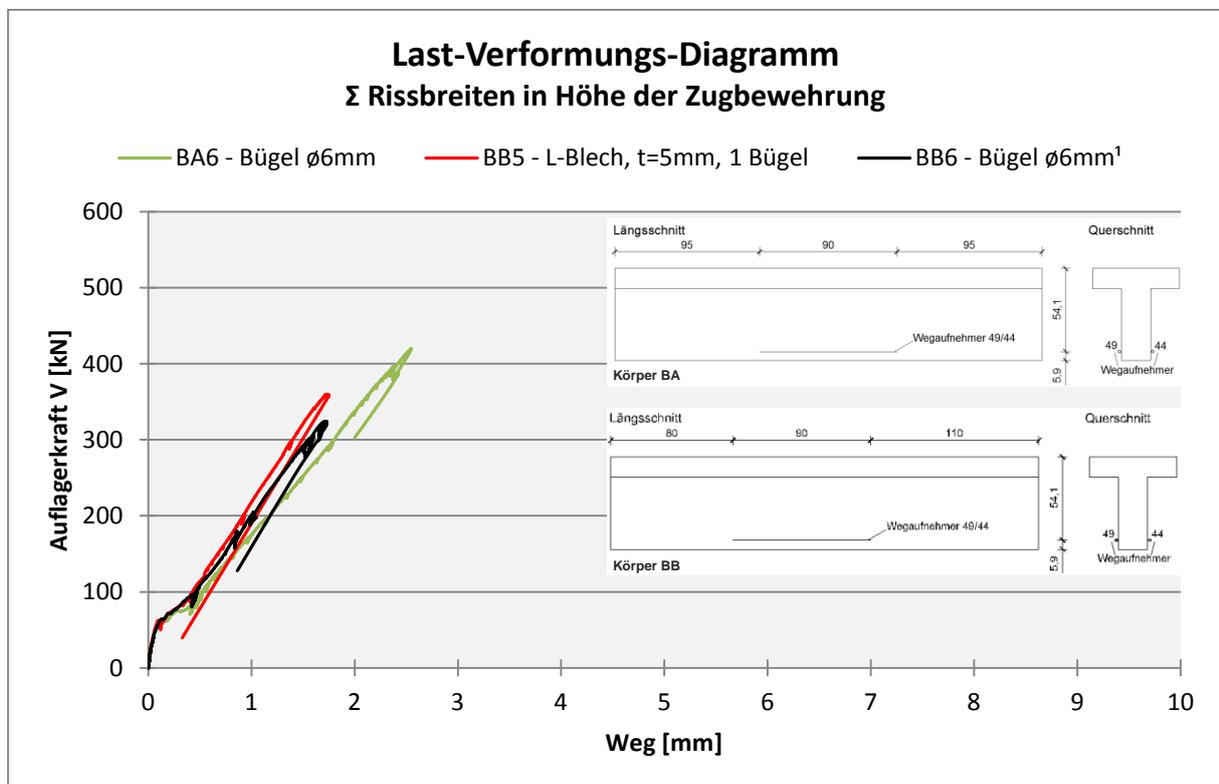
Tabelle 11: Zusammenfassung der Versuchsreihe B mit geringer Querkraftbewehrung

¹ Querkraftbewehrung – Tragfähigkeit: $a_s \cdot f_{yk}$

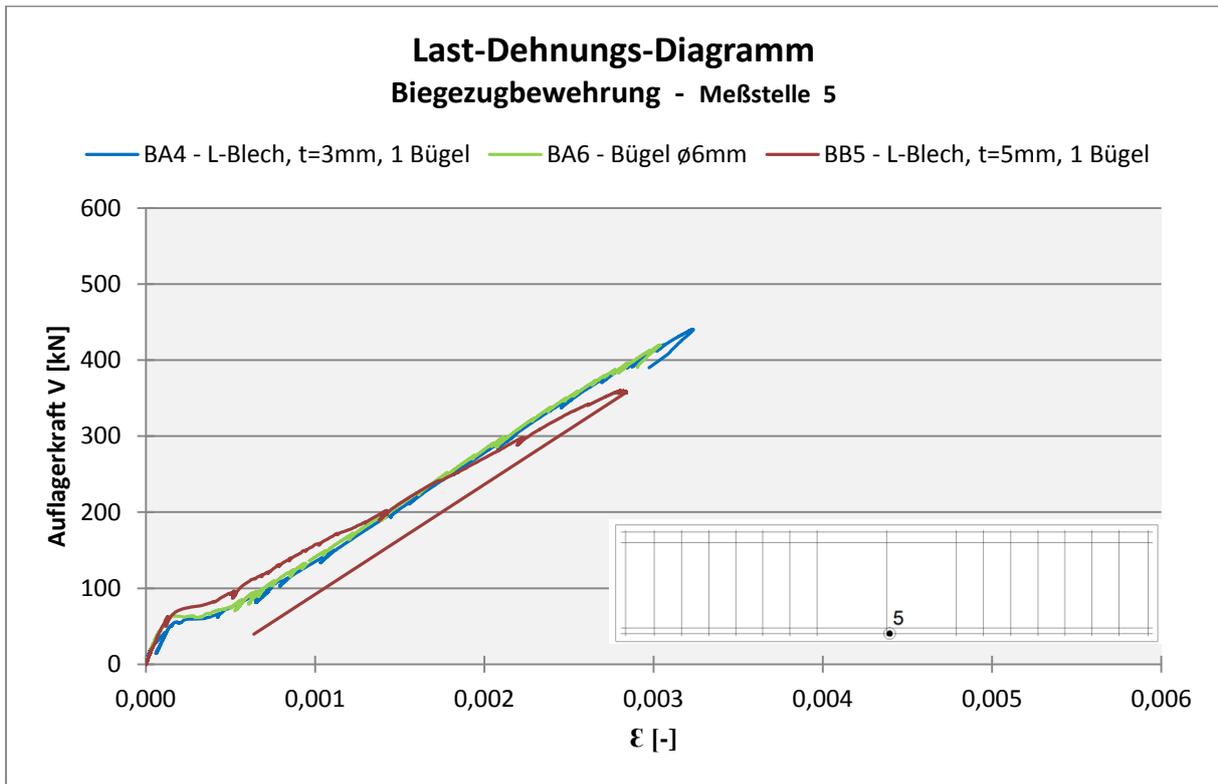


Diagr. 17: Last-Verformungs-Diagramm (Mittelwert aus den Wegaufnehmern 38 und 12)

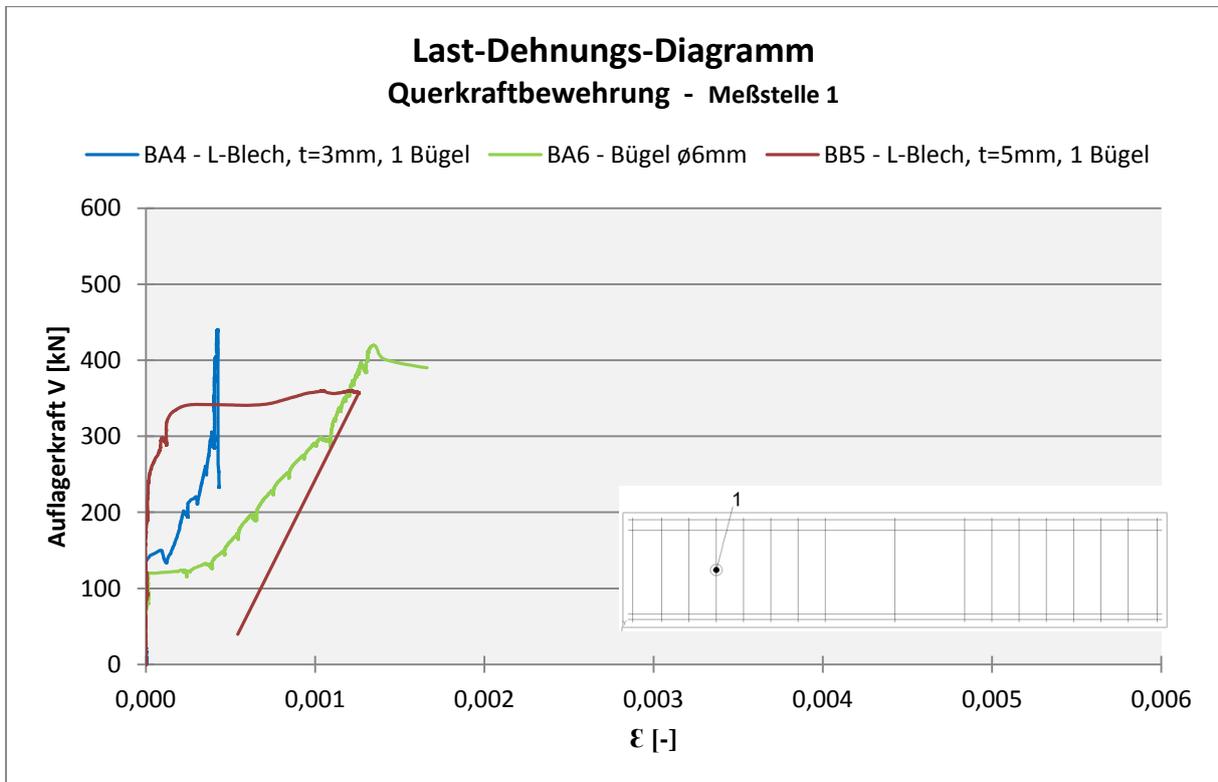
¹⁾ Anfangsverschiebungen herausgenommen



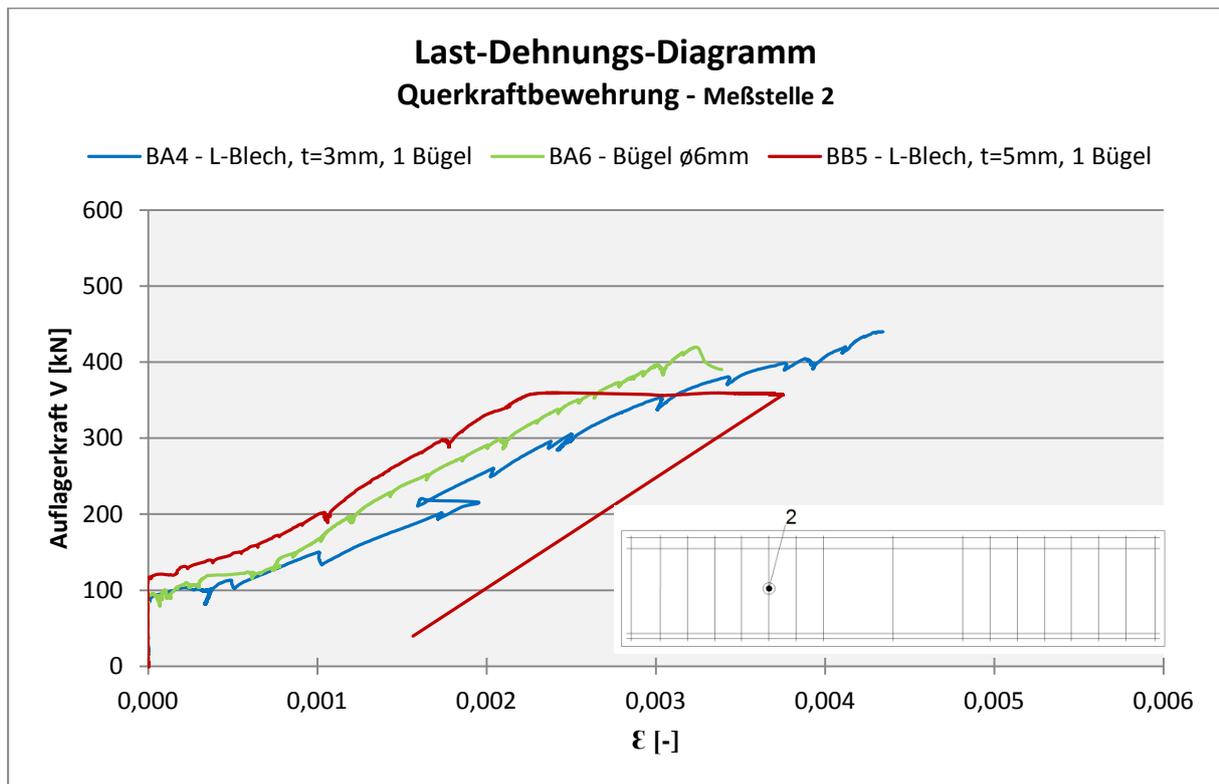
Diagr. 18: Last-Verformungs-Diagramm (Mittelwert aus den Wegaufnehmern 49 und 44)



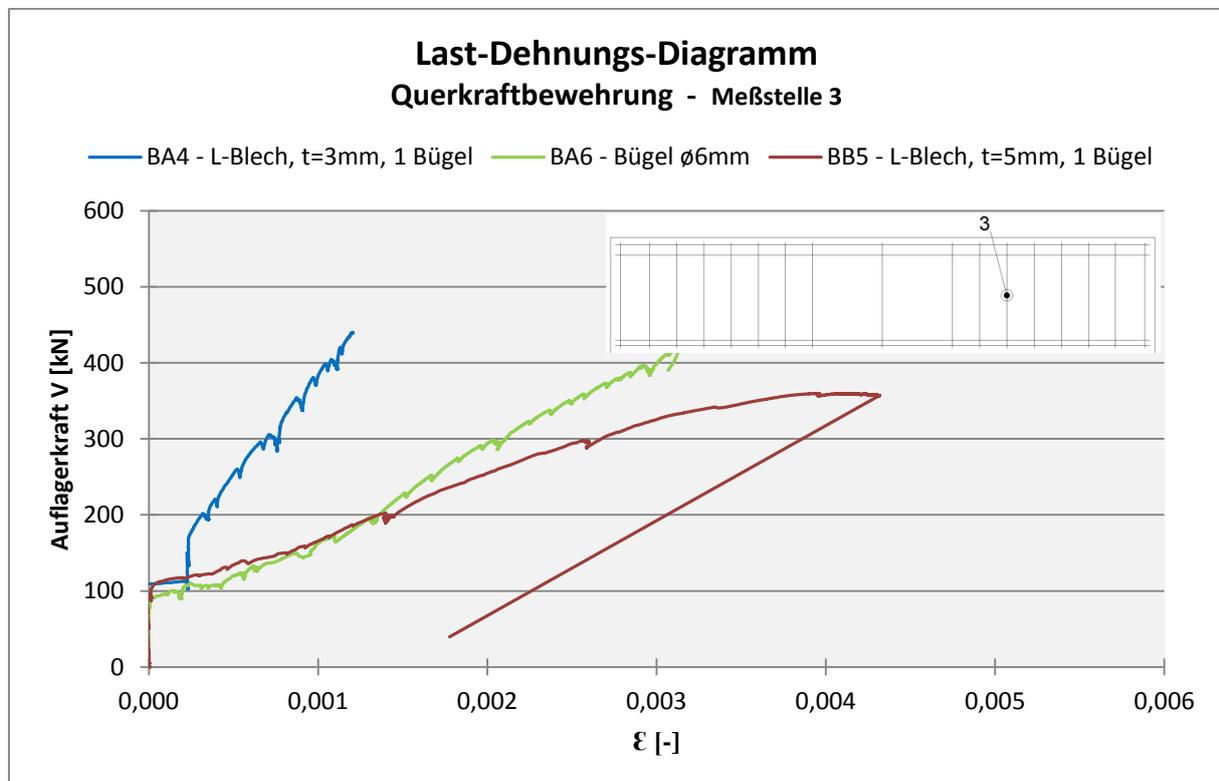
Diagr.19: Dehnung: Spannstahl



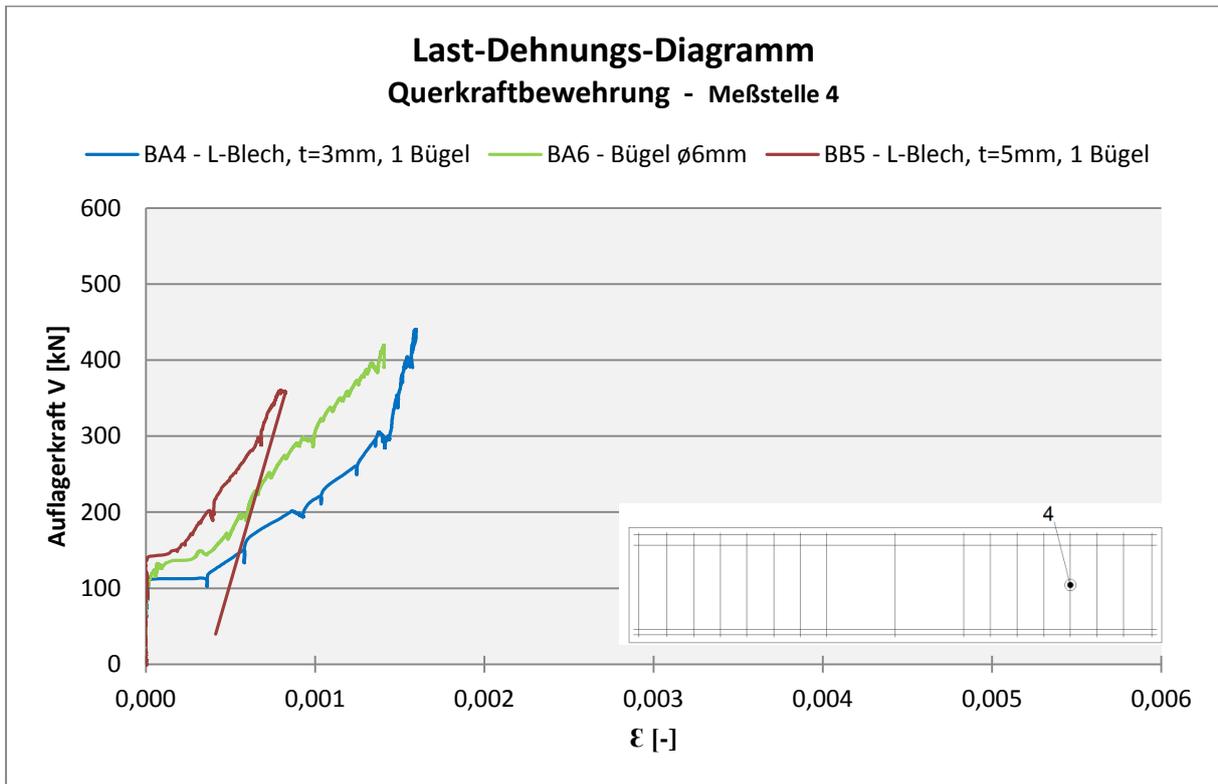
Diagr.20: Dehnung: Bügel



Diagr.21: Dehnung: Bügel



Diagr.22: Dehnung: Bügel



Diagr.23: Dehnung: Bügel

Bruchart und Rissanzahl:

	Körper BA4	Körper BA6	Körper BB5	Körper BB6
Versagensart	Zugversagen der Bügelbewehrung	Zugversagen der Bügelbewehrung	Zugversagen der Bügelbewehrung	Zugversagen der Bügelbewehrung ²
Anzahl der Hauptrisse ¹	15	14	15	12

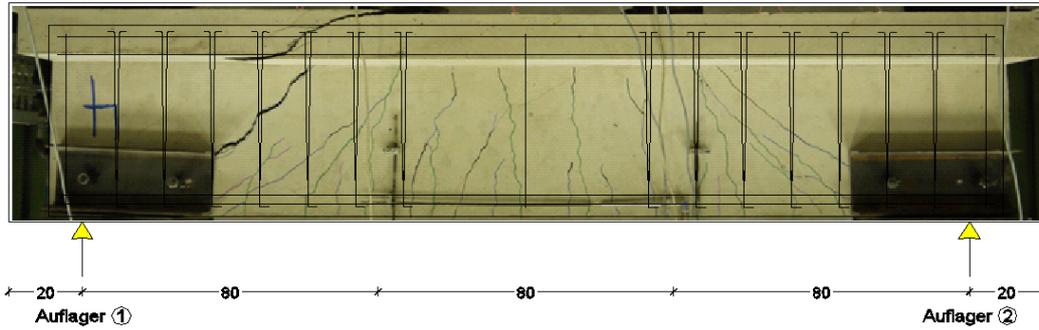
Tabelle 12: Bruchart und Risszahl der Versuchsreihe B mit geringer Querkraftbewehrung

¹ Hauptrisse in Höhe der Zugbewehrung

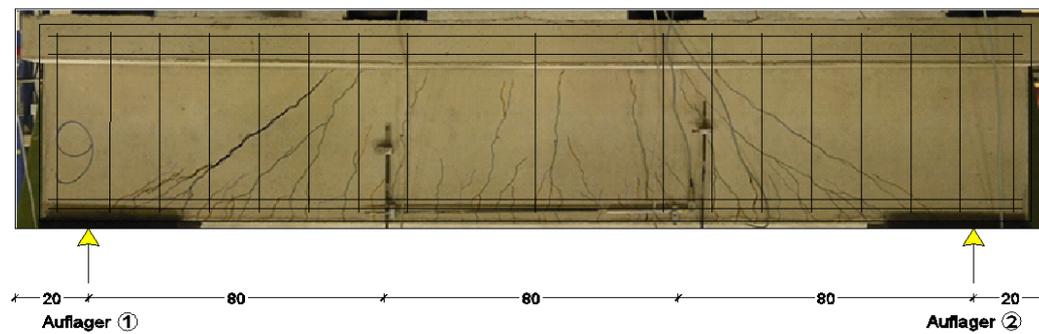
² Kurz vor dem Zugversagen der Bügelbewehrung wurde der Versuch aufgrund des vorzeitigen technischen Ausfalls der Hydraulikzylinder beendet.

Rissbilder:

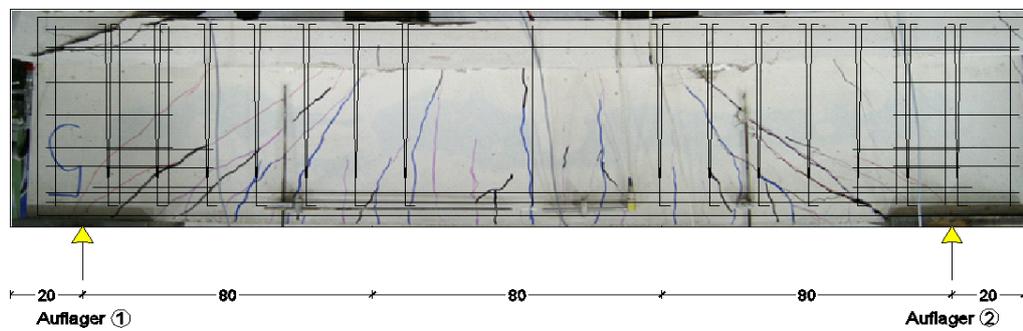
Körper BA4: „Clixs“ – Bewehrungssystem: L-Blech; $t=3\text{mm}$; 1 Bügel



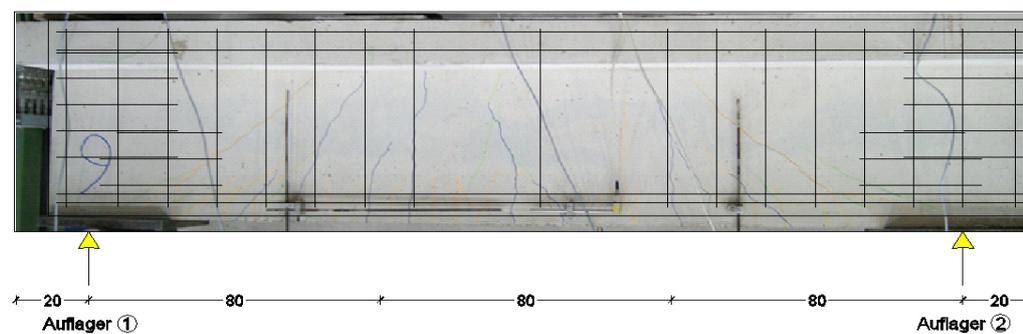
Körper BA6: Bügelbewehrung – 1 Bügel $\varnothing 6\text{mm}$



Körper BB5: „Clixs“ – Bewehrungssystem: L-Blech; $t=5\text{mm}$; 1 Bügel



Körper BB6: Bügelbewehrung – 1 Bügel $\varnothing 6\text{mm}$



4.3 Zusammenfassung

Die Funktion der Versuchsanlage wurde durch den Vergleich des Körpers AA6 und G5 nach Leonhardt/Walther überprüft.

Tragfähigkeit der L- und Z-Bleche

Die L- und Z-Bleche haben unabhängig von der Querschnittsform, dem Bewehrungsgrad und der Betongüte eine höhere Tragfähigkeit als die herkömmliche Bügelbewehrung (siehe Tabelle 4, 7, 9 und 11).

Einfluss der Blechstärke der L – Bleche auf die Tragfähigkeit:

Der Vergleich der Körper BA1, BA3 und BB1 zeigt in der Tabelle 7, dass die Blechstärke keine Auswirkung auf die Querkrafttragfähigkeit hat. Der Körper BA4 mit L-Blech ($t = 3\text{mm}$) hat im Vergleich zum Körper BA6 mit Bügelbewehrung eine höhere Tragfähigkeit (siehe Tabelle 11).

Einfluss der Betongüte auf die Querkrafttragfähigkeit:

In Tabelle 7 ist zu erkennen, dass die Bruchlasten der Körper BA1 und BB1 mit hoher Querkraftbewehrung unabhängig von der Betonfestigkeit nahezu identisch sind. Die Betonfestigkeit hat einen Einfluss auf Tragfähigkeit bei gering bewehrten Körpern (siehe Tabelle 11).

Lastverformungsverhalten:

Die Körper mit L- und Z-Blechen weisen ein ähnliches Lastverformungsverhalten wie die Körper mit herkömmlicher Bügelbewehrung auf (siehe Diagramme 2, 6, 12 und 17).

Einfluss der L- und Z-Bleche auf die Rissbreiten:

Die L- und Z-Bleche weisen eine annähernd gleiche Rissbreite und Rissanzahl wie die Körper mit Bügelbewehrung (siehe Diagramme 7, 13, 18 und Tabelle 6, 8, 10, 12) auf.

Versagensarten der Körper:

Bei den in hoch, mittel und niedrig bewehrten Körpern der Baureihe B lag immer Zugversagen der Bügelbewehrung vor (siehe Tabelle 8, 10, 12).

Beim L-Blech versagt der eingehängte Bügel durch Überschreitung der Zugfestigkeit. Die Tragfähigkeit des Z-Blechs ist offensichtlich erschöpft, wenn der kleinere Schenkel aufgebogen wird.

Bemessung

Die L- und Z-Bleche können im querkraftbeanspruchten Bereich von Balken, Platten und Fundamenten eingesetzt werden. Die Berechnung kann nach DIN EN 1992-1-1 erfolgen:

L-Blech, $t=3$ oder 5mm , 1 oder 2 Bügel:

$$V_{Rd,s} = a_{sw} \cdot z \cdot f_{yd} \cdot \cot \theta$$

a_{sw} = Querschnittsfläche des Bügels ($\varnothing 6\text{mm}$)

$$f_{yd} = 500\text{N/mm}^2$$

Z-Blech, $t=5\text{mm}$:

$$V_{Rd,s} = a_{sw} \cdot z \cdot f_{yd} \cdot \cot \theta$$

a_{sw} = kleinste Querschnittsfläche des Z-Blechs

$$f_{yd} = 235\text{N/mm}^2$$

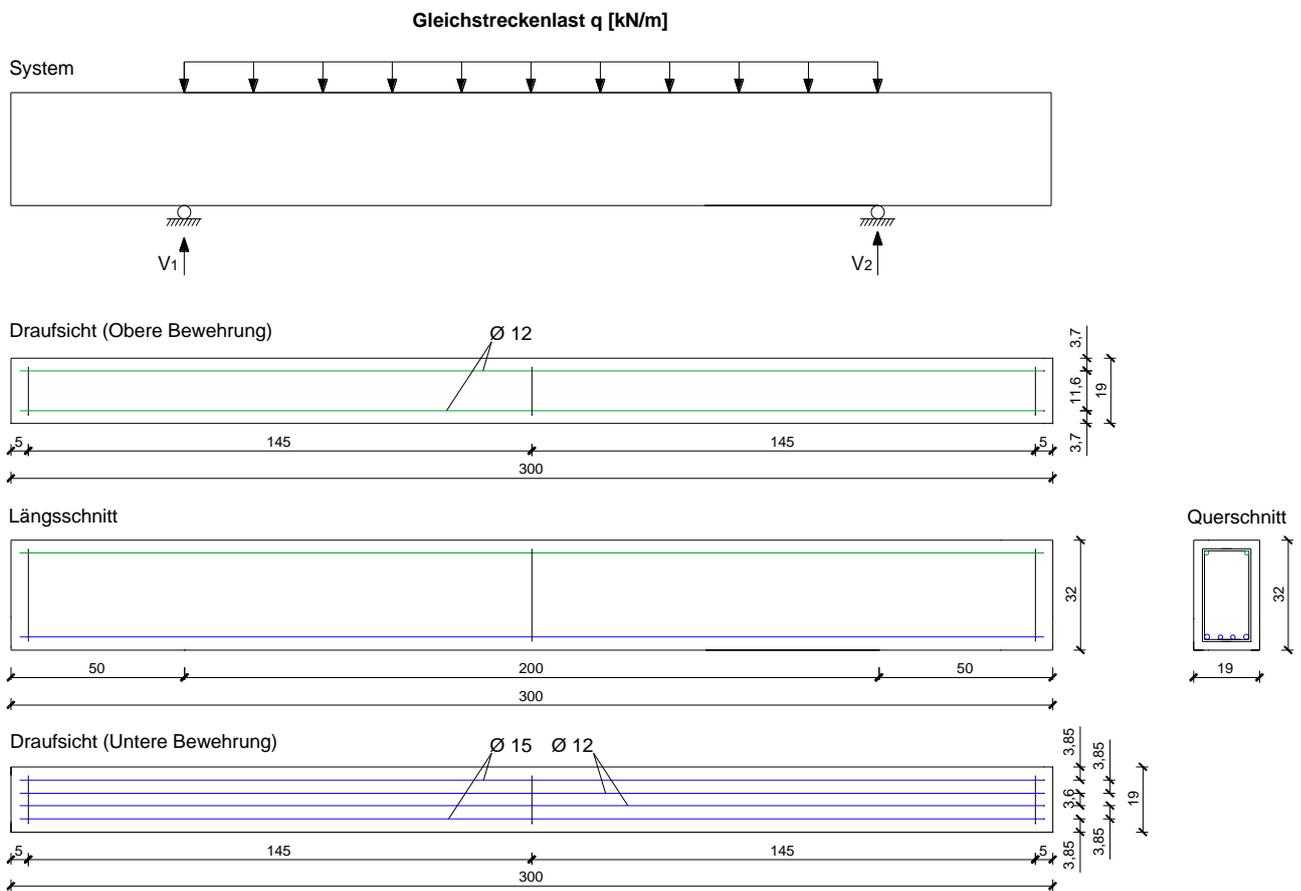
Literaturverzeichnis

- [1] Baumgart, R.: Massivbauskript: Bemessung für Querkraft;
<http://www.rudolfbaumgart.de/scripte/schubbem.pdf>; 2012
- [2] Zilch, K./Zehetmaier G.: Bemessung im konstruktiven Betonbau; 2.Auflage; München, Springer-Verlag, 2010.
- [3] Zink, M.: Zum Biegeschubversagen schlanker Bauteile aus Hochleistungsbeton mit und ohne Vorspannung; Leipzig, Vieweg+Teubner, 2000.
- [4] Leonhardt, F./Walther, R. : DAfStb Heft 151, Schubversuche an einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung; Berlin, Ernst & Sohn, 1962.
- [5] DIBt: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung: Z-15.1-281, TransMIT Durchstanz-Bewehrungssystem mit Stahlblechen; Berlin, 2009.
- [6] DIN EN 1992 Teil 1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerke, Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Beuth, 2011.
- [7] DIN EN 1992 Teil 1/NA: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerke, Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Beuth, 2011

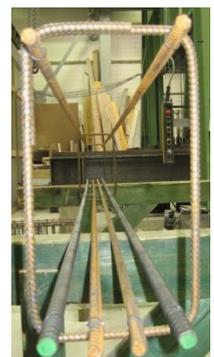
1. Versuchsreihe A

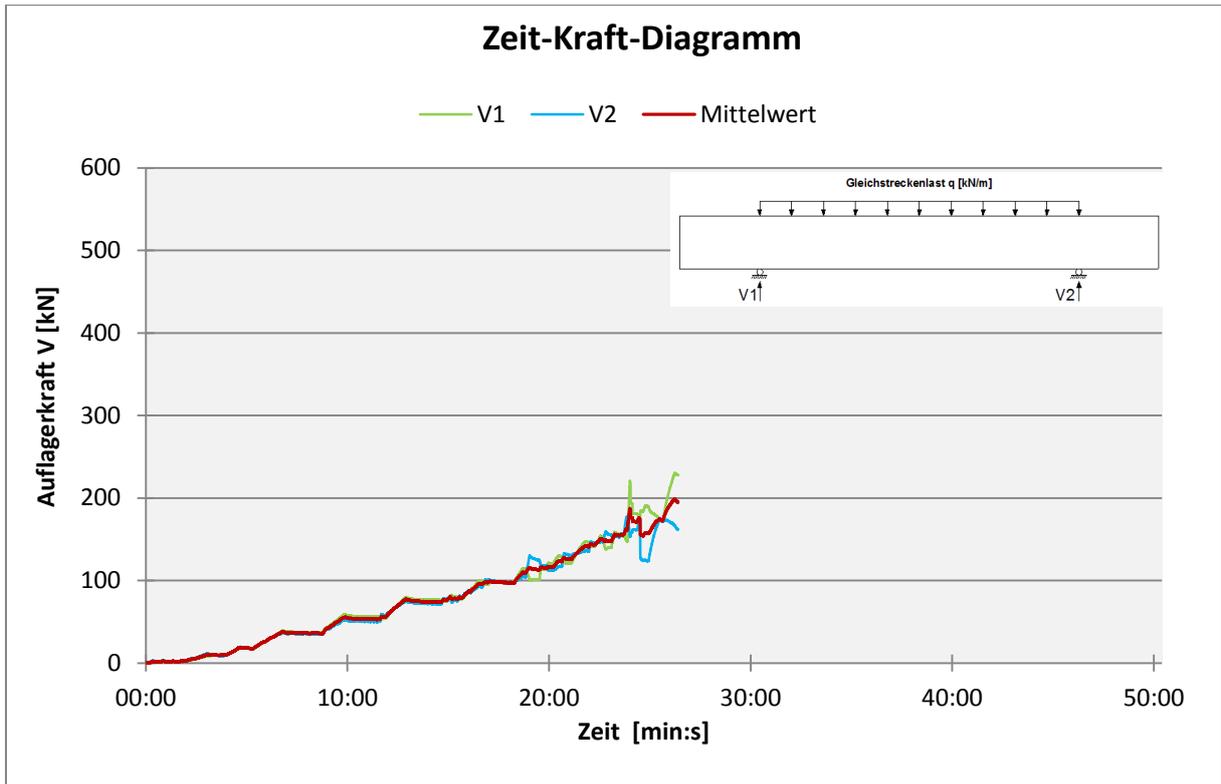
Körper AA1

Körper	$f_{c,cube}$	Biegezugbewehrung	statische Nutzhöhe	Querkraftbewehrung			Belastungsart	Bruchlast V_u	Querkraftbewehrung
				Bereich 1	Bereich 2	Bereich 3			
	N/mm ²	cm ²	cm	cm ² /m	cm ² /m	cm ² /m		kN/m	
AA1	34,2	2Ø15 2Ø12	28	-			Streckenlast	147,9	-
		5,8		-					

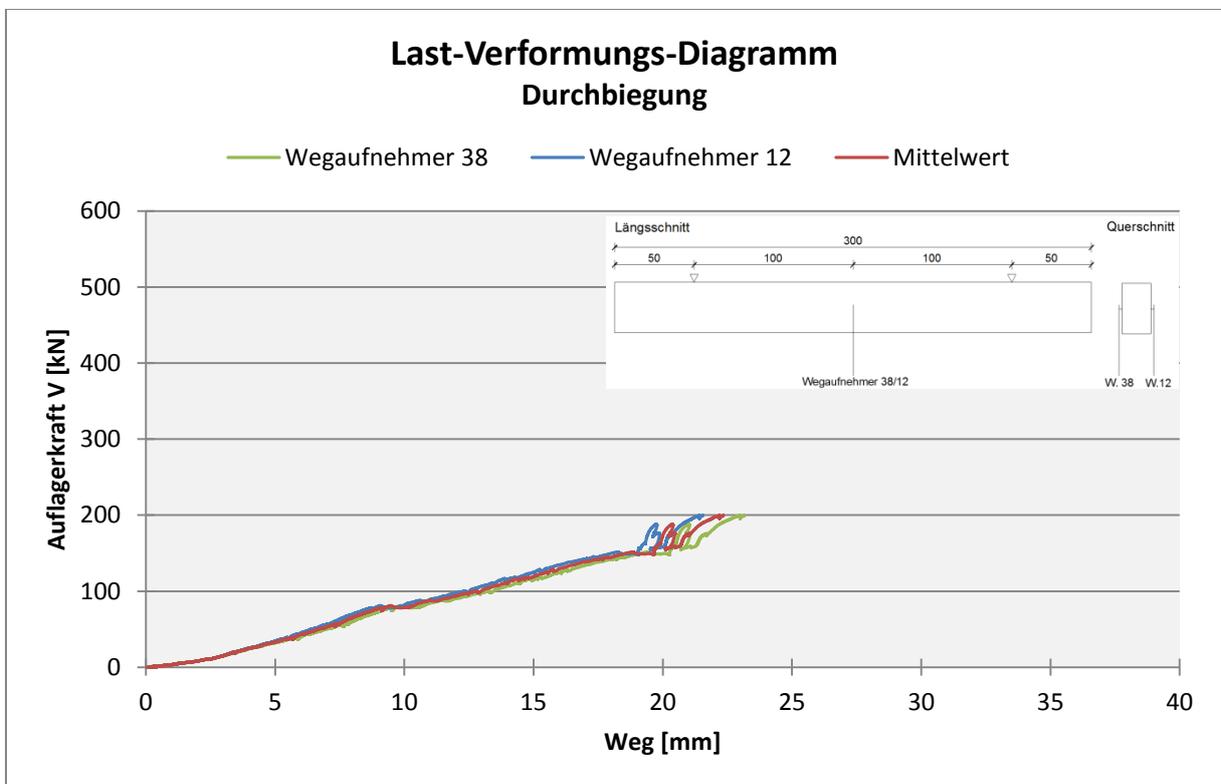


Die drei vorhandenen Bügel dienen zur Stabilisierung der oberen Bewehrungslage

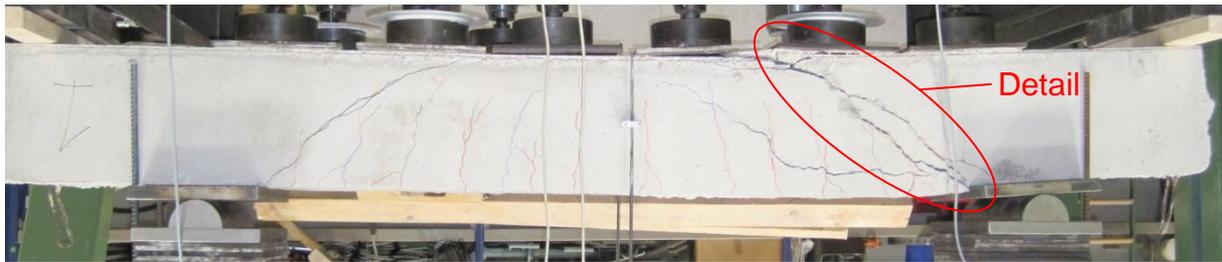




Zeit-Kraft-Diagramm – Körper AA1



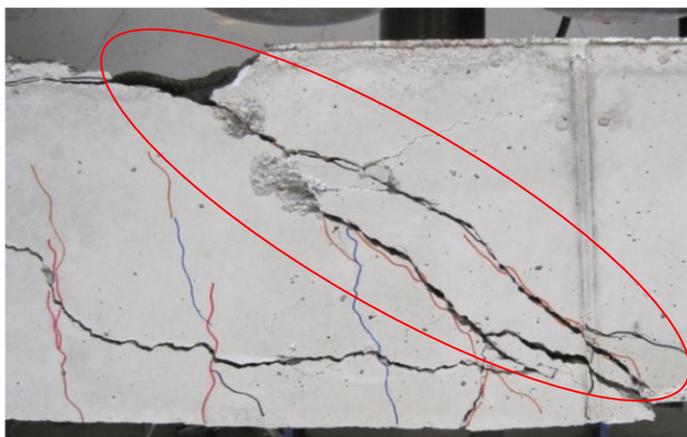
Messwerte der Durchbiegung in Feldmitte – Körper AA1



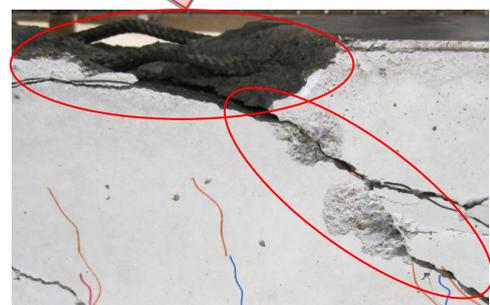
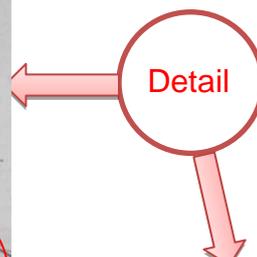
Rissbild – Körper AA1

Laststufe	40kN	60kN	80kN	100kN	140kN	200kN
Markierungsfarbe	Rot	Blau	Orange	Schwarz	Grün	Lila

Anzahl der Hauptrisse in Höhe der Zugbewehrung = 12



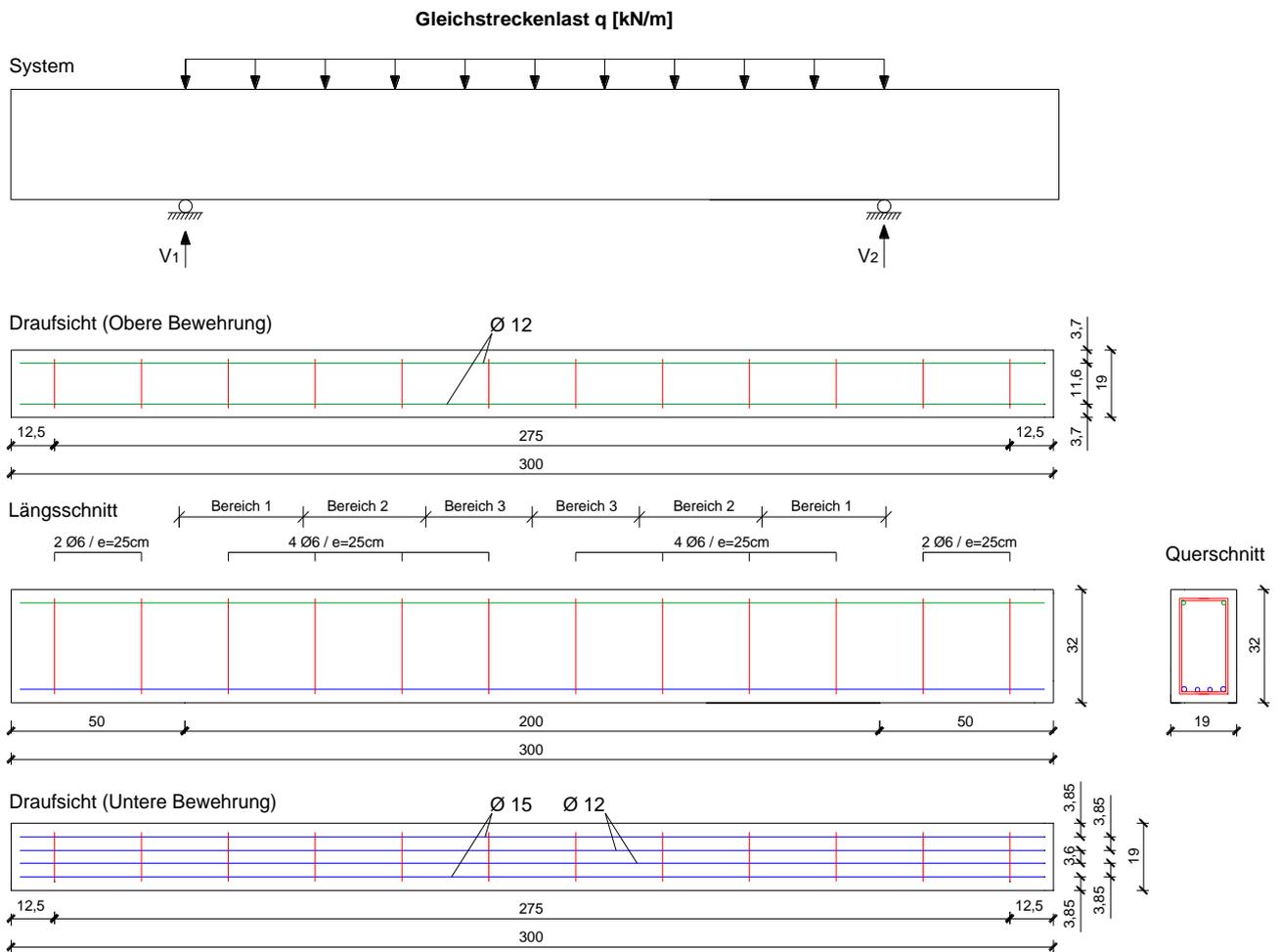
Schubriss – Körper AA1

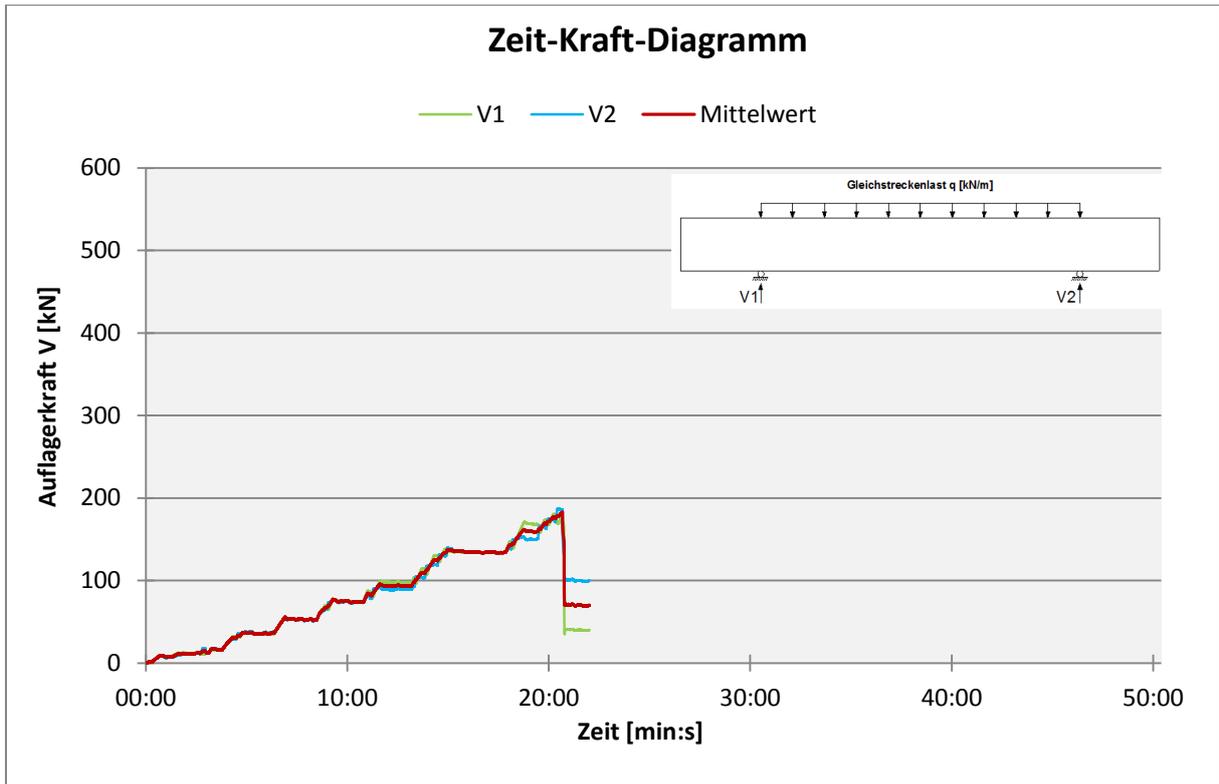


Betonversagen – Körper AA1

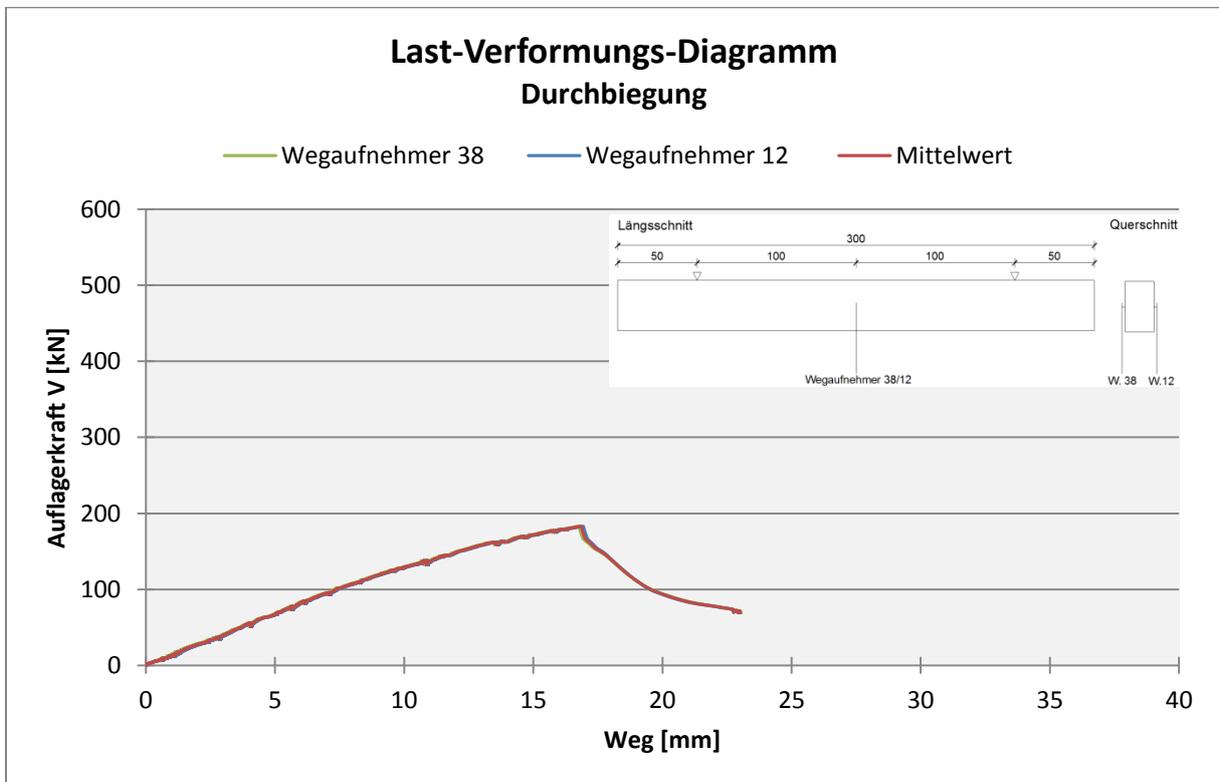
Körper AA2

Körper	$f_{c,cube}$	Biegezugbewehrung	statische Nutzhöhe	Querkraftbewehrung			Belastungsart	Bruchlast V_u	Querkraftbewehrung
				Bereich 1	Bereich 2	Bereich 3			
	N/mm ²	cm ²	cm	cm ² /m	cm ² /m	cm ² /m	kN/m		
AA2	34,2	2Ø15 2Ø12	28	4Ø6 e=25cm			Streckenlast	182,9	Bügel Ø6mm
		5,8		2,3					

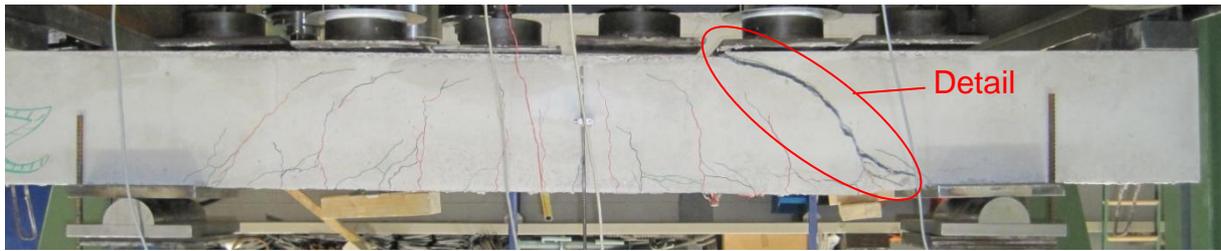




Zeit-Kraft-Diagramm – Körper AA2



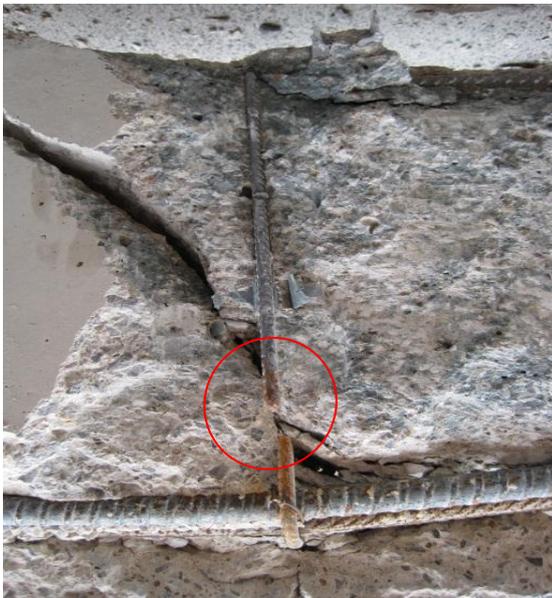
Messwerte der Durchbiegung in Feldmitte – Körper AA2



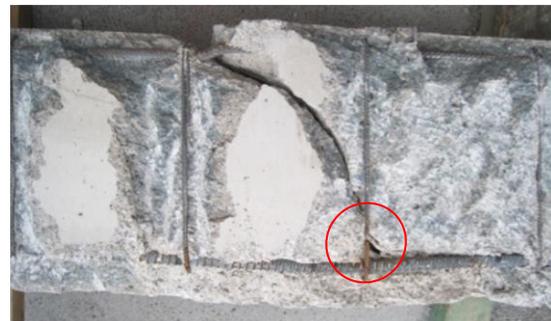
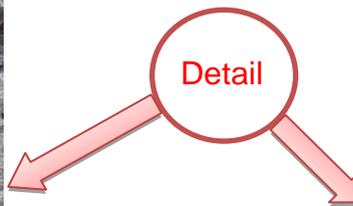
Rissbild – Körper AA2

Laststufe	40kN	60kN	80kN	100kN	140kN	200kN
Markierungsfarbe	Rot	Blau	Orange	Schwarz	Grün	Lila

Anzahl der Hauptrisse in Höhe der Zugbewehrung = 10



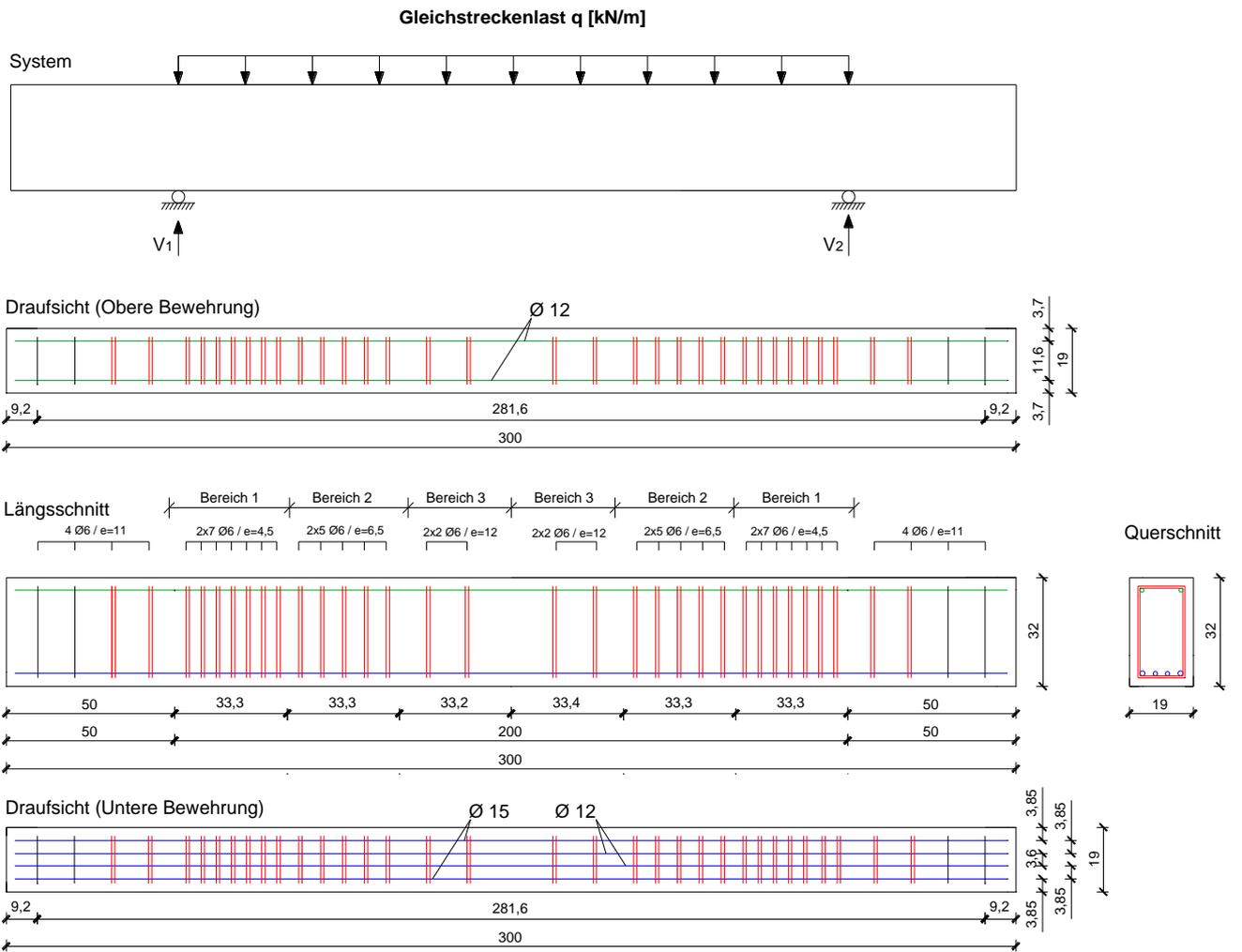
Zugversagen der Bügelbewehrung – Körper AA2

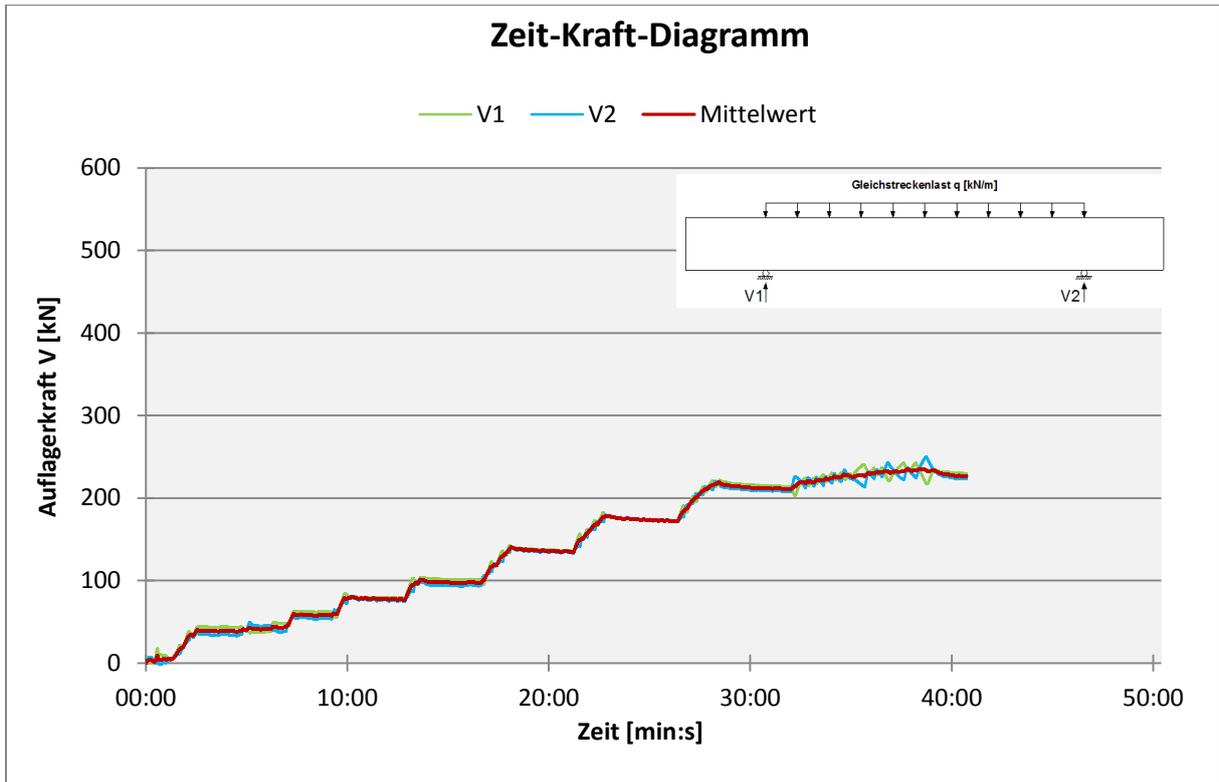


Freilegen der Bügel – Körper AA2

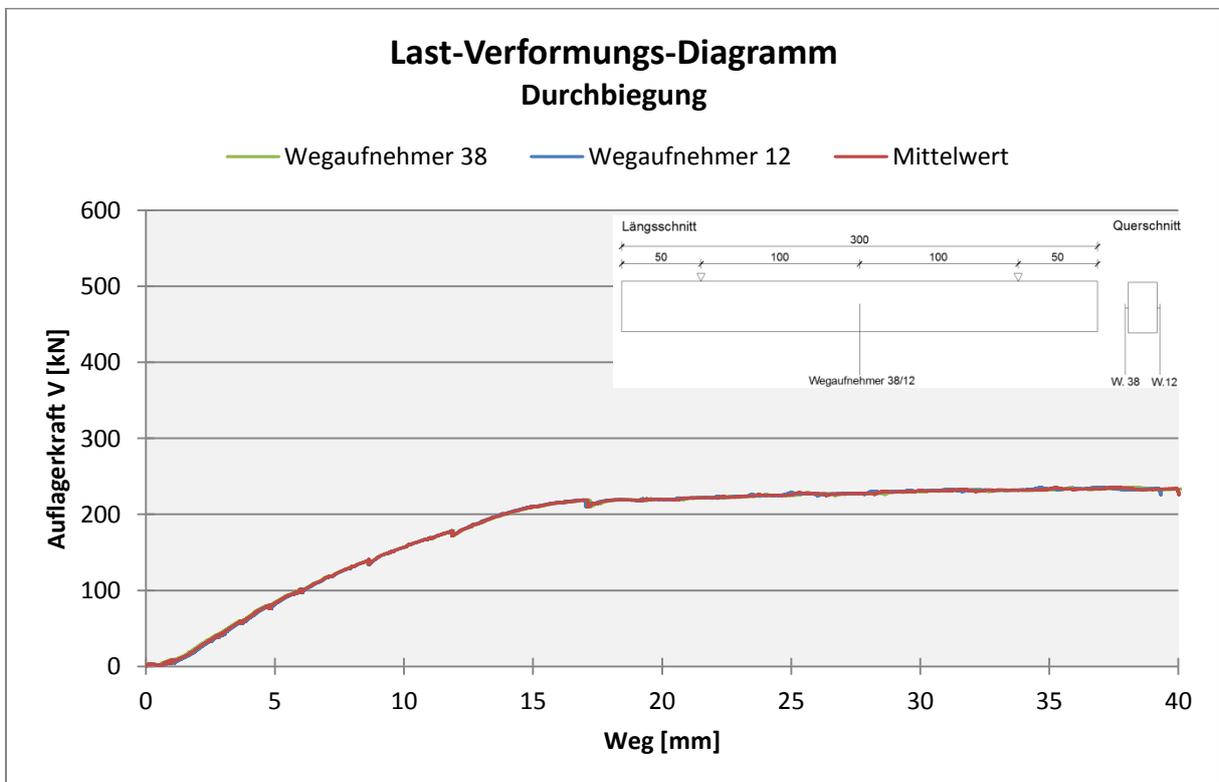
Körper AA3

Körper	$f_{c,cube}$	Biegezugbewehrung	statische Nutzhöhe	Querkraftbewehrung			Belastungsart	Bruchlast V_u	Querkraftbewehrung
				Bereich 1	Bereich 2	Bereich 3			
	N/mm ²	cm ²	cm	cm ² /m	cm ² /m	cm ² /m	kN/m		
AA3	34,2	2Ø15 2Ø12	28	14Ø6 e=4,5cm	10Ø6 e=6,5cm	4Ø6 e=12cm	Streckenlast	235,5	Bügel Ø6mm
		5,8		25,1	17,4	9,4			

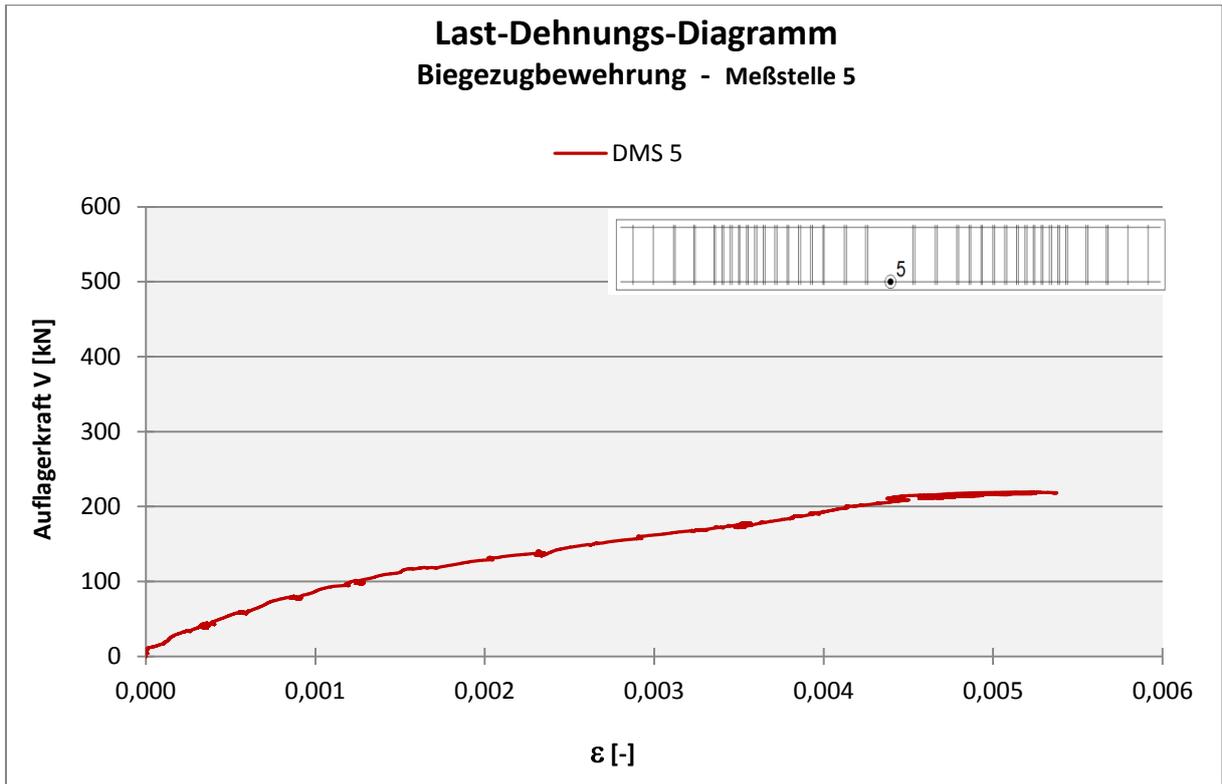




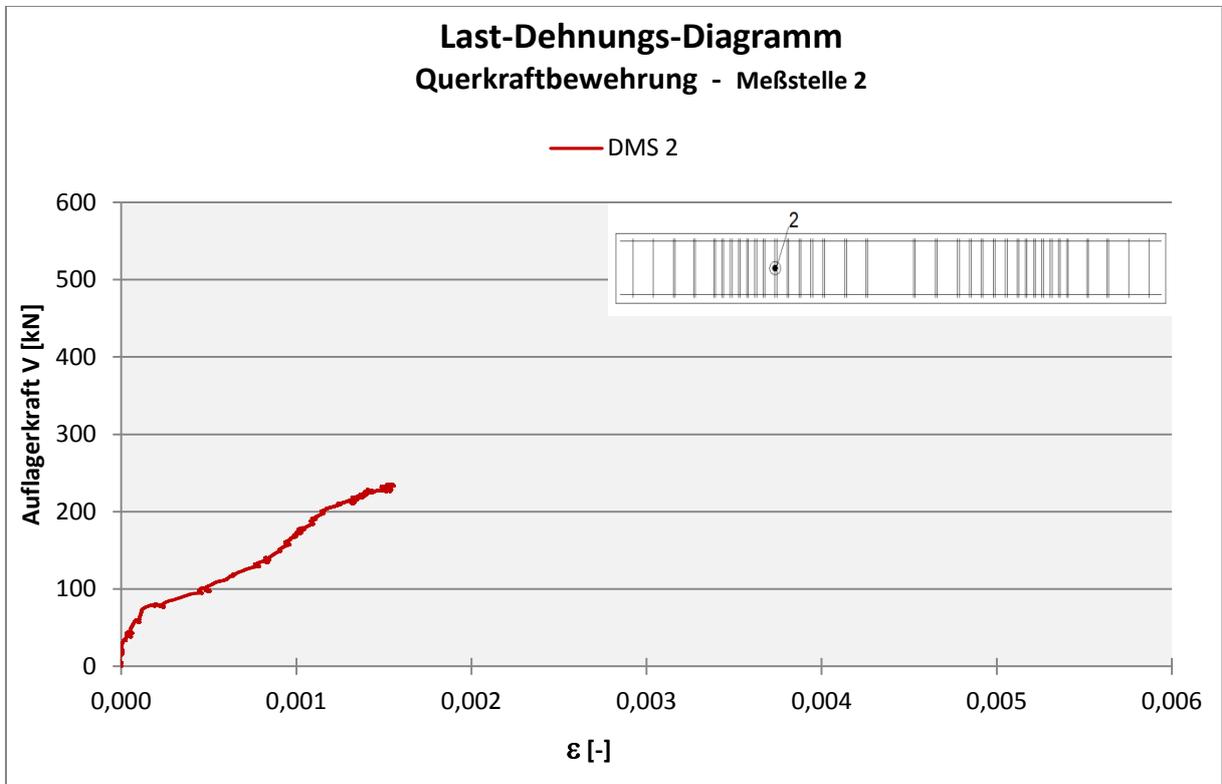
Zeit-Kraft-Diagramm – Körper AA3



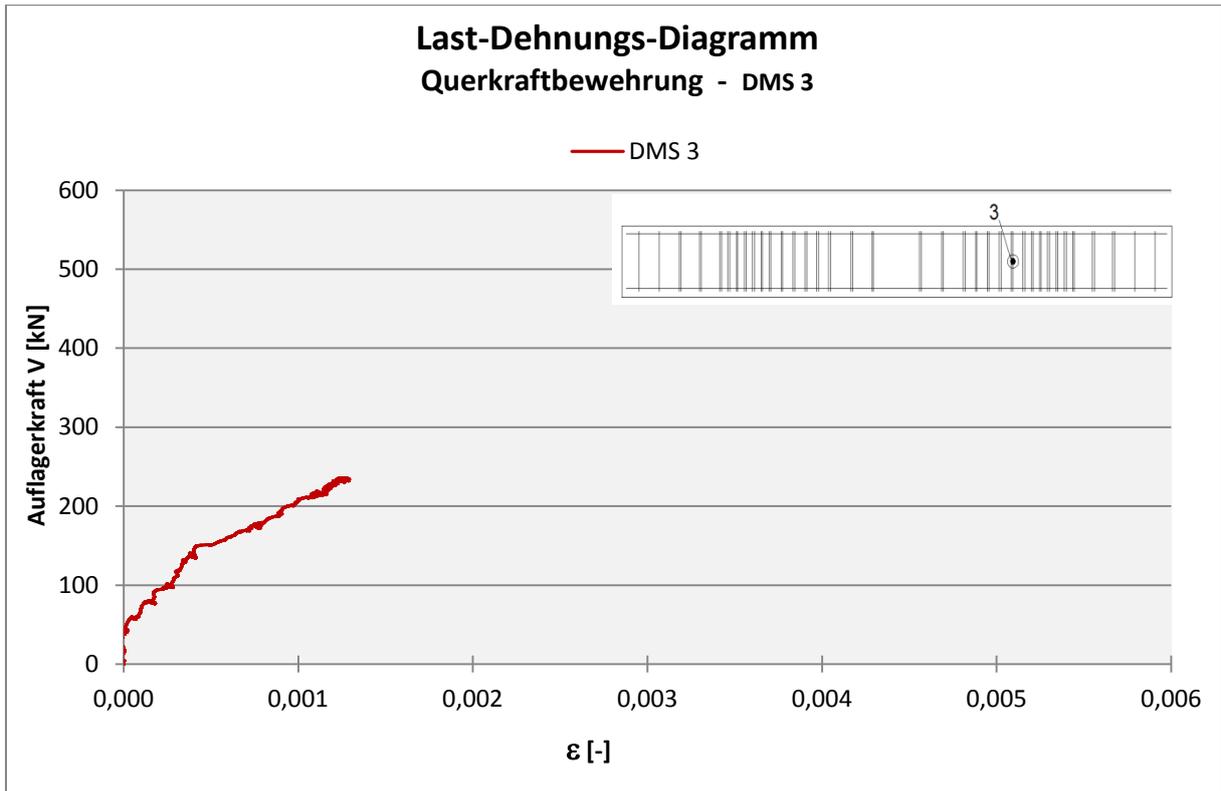
Messwerte der Durchbiegung in Feldmitte – Körper AA3



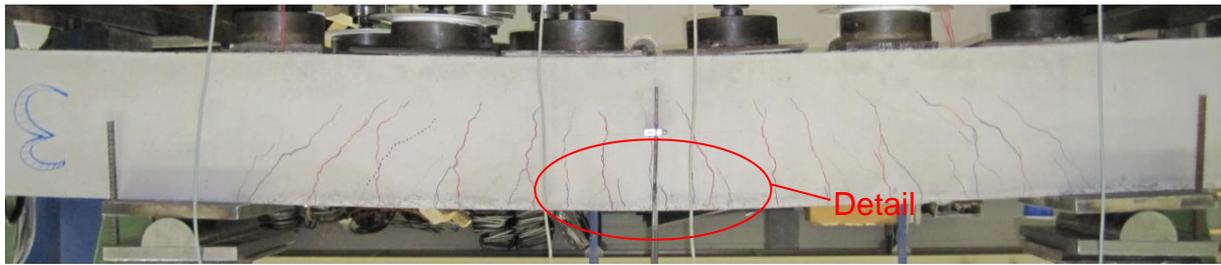
Dehnungsmessung Spannstahl / Meßstelle 5 – Körper AA3



Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 2 – Körper AA3



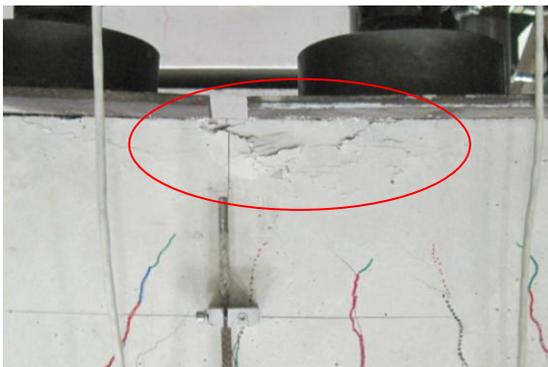
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 3 – Körper AA3



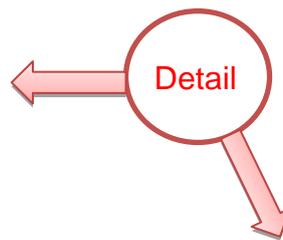
Rissbild – Körper AA3

Laststufe	40kN	60kN	80kN	100kN	140kN	200kN
Markierungsfarbe	Rot	Blau	Orange	Schwarz	Grün	Lila

Anzahl der Hauptrisse in Höhe der Zugbewehrung = 20



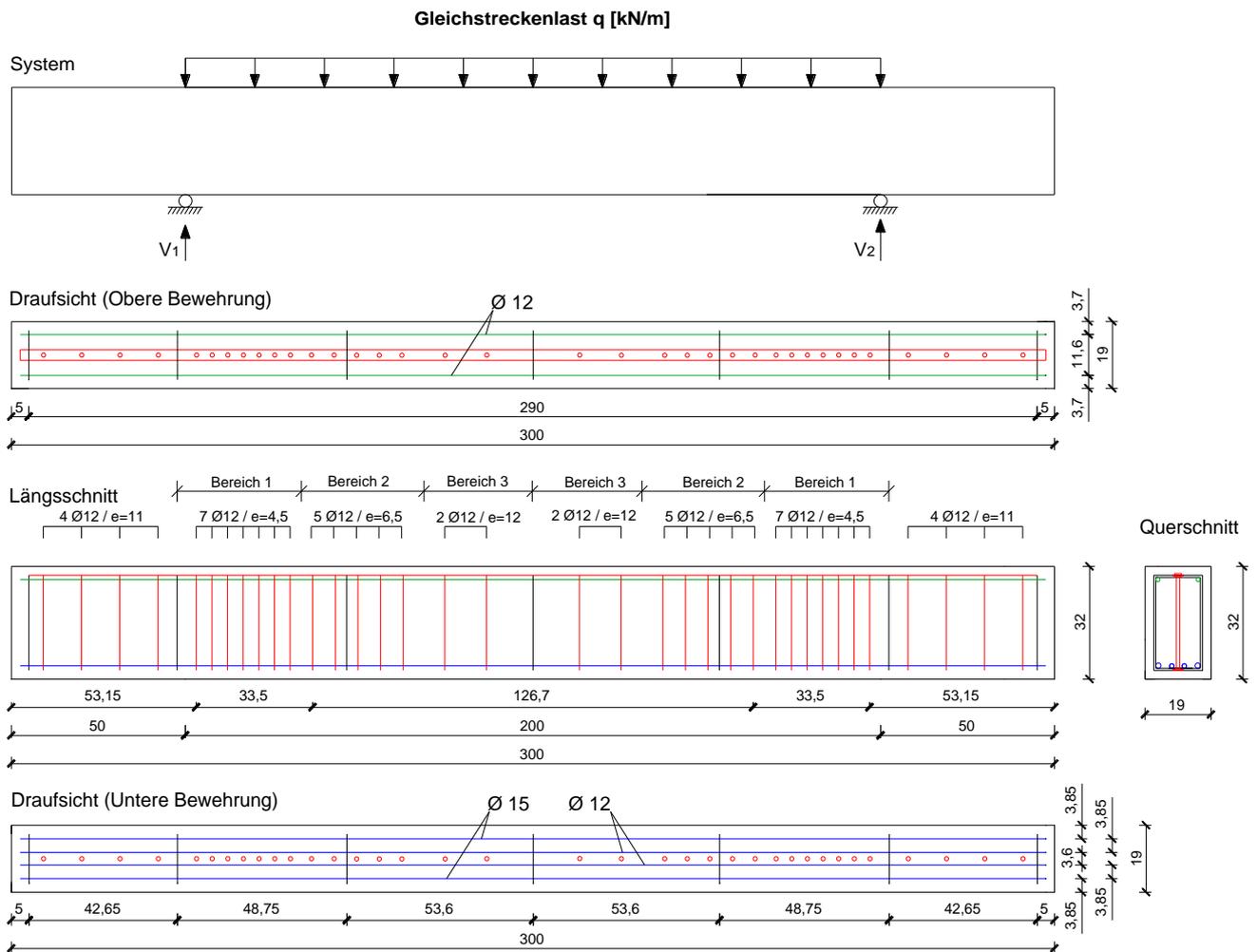
Betondruck-Versagen – Körper AA3

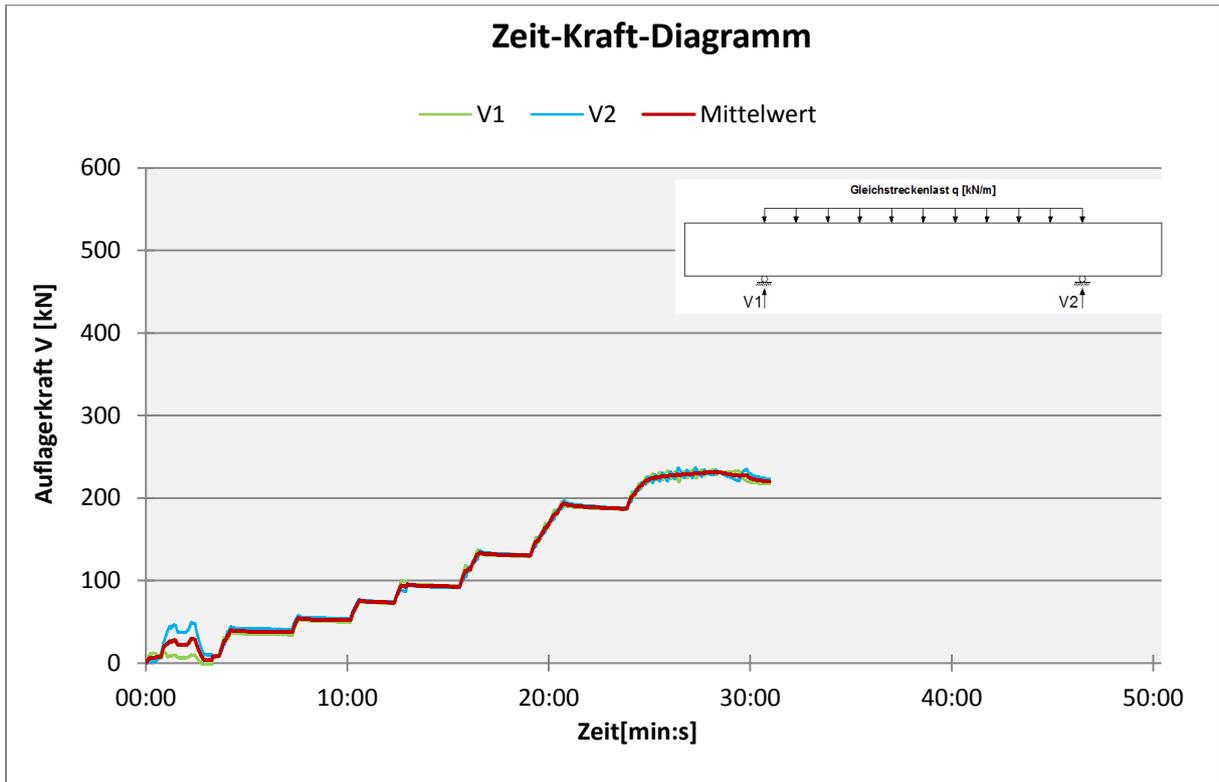


Betondruck-Versagen – Körper AA3

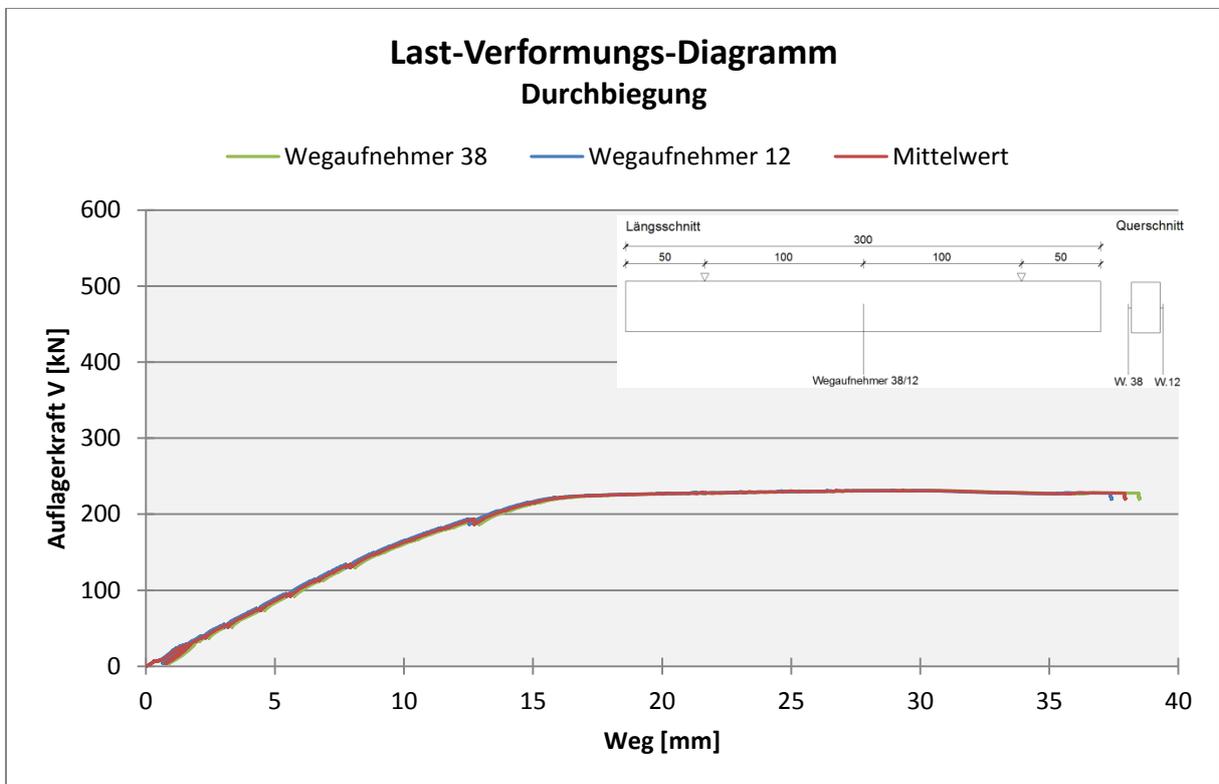
Körper AA4

Körper	$f_{c,cube}$	Biegezugbewehrung	statische Nutzhöhe	Querkraftbewehrung			Belastungsart	Bruchlast V_u	Querkraftbewehrung
				Bereich 1	Bereich 2	Bereich 3			
				cm ² /m	cm ² /m	cm ² /m			
AA4	35,3	2Ø15 2Ø12	28	7Ø12 e=4,5cm	5Ø12 e=6,5cm	2Ø12 e=12cm	Streckenlast	231,2	Ø12 HDB-Anker
		5,8		25,1	17,4	9,4			

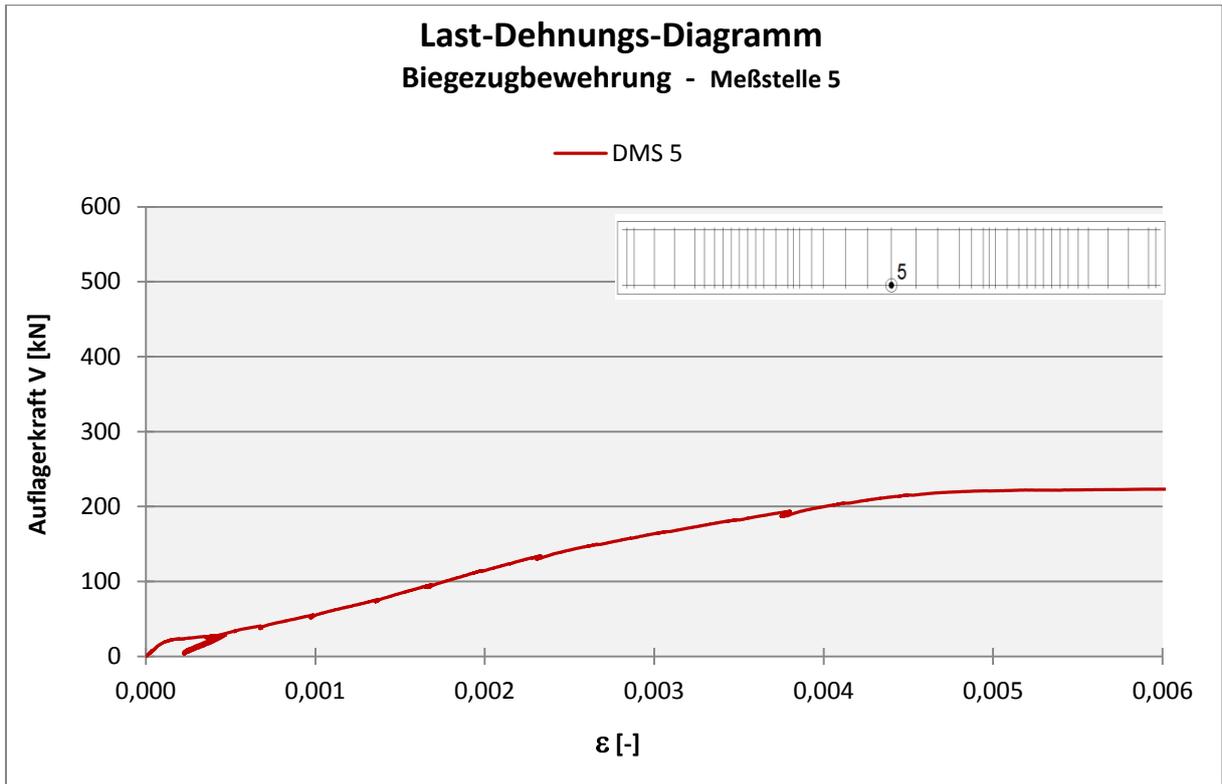




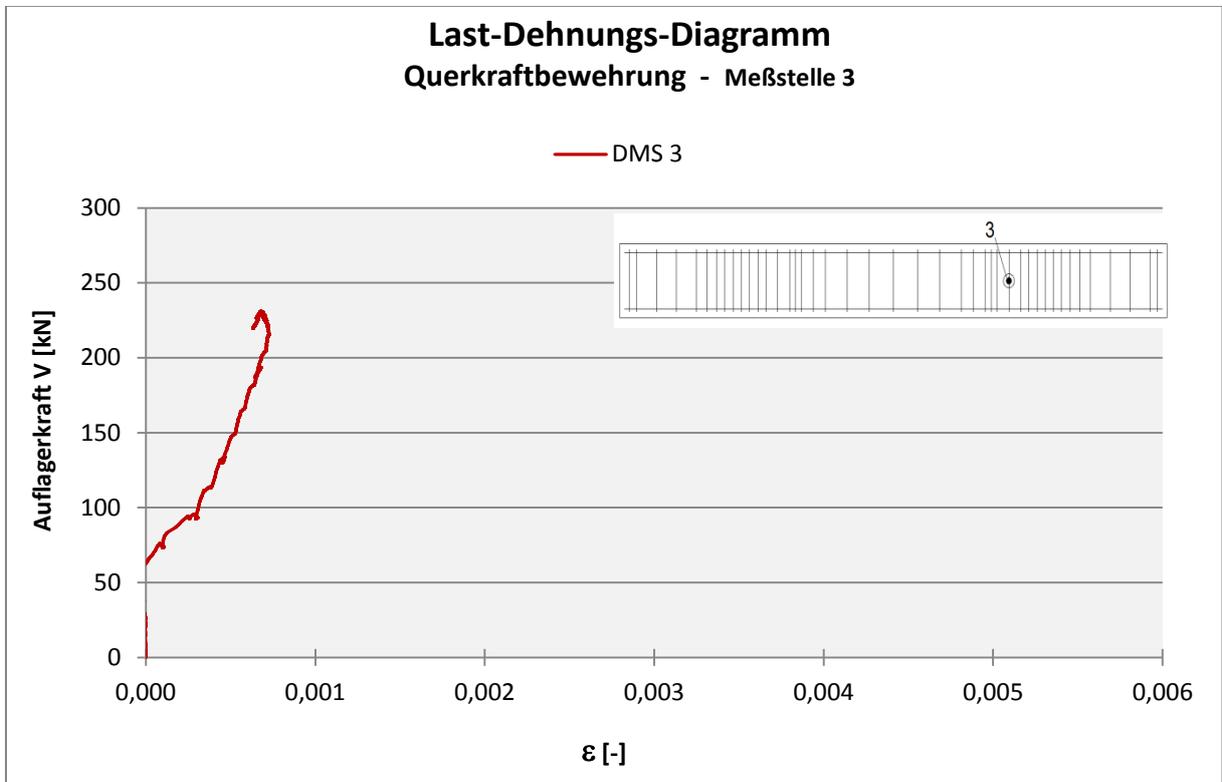
Zeit-Kraf-Diagramm – Körper AA4



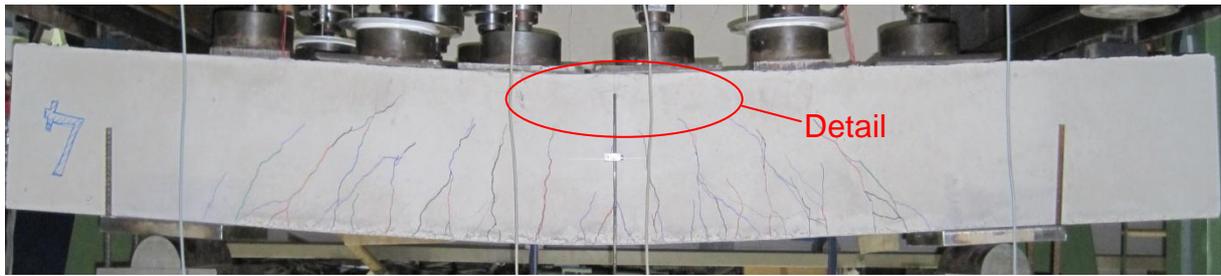
Messwerte der Durchbiegung in Feldmitte – Körper AA4



Dehnungsmessung Spannstahl / Meßstelle 5 – Körper AA4



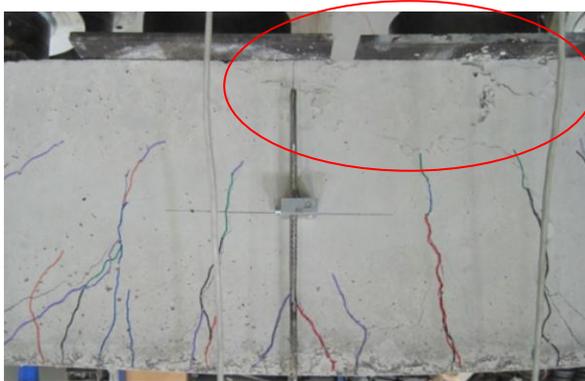
Dehnungsmessung HDB / Meßstelle 3 – Körper AA4



Rissbild – Körper AA4

Laststufe	40kN	60kN	80kN	100kN	140kN	200kN
Markierungsfarbe	Rot	Blau	Orange	Schwarz	Grün	Lila

Anzahl der Hauptrisse in Höhe der Zugbewehrung = 19



Betondruck-Versagen – Körper AA4

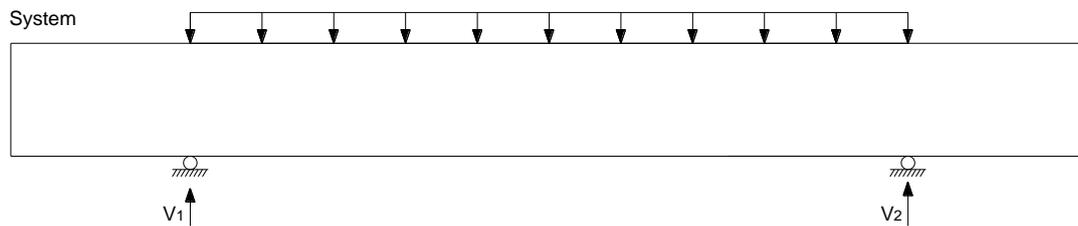


Betondruck-Versagen – Körper AA4

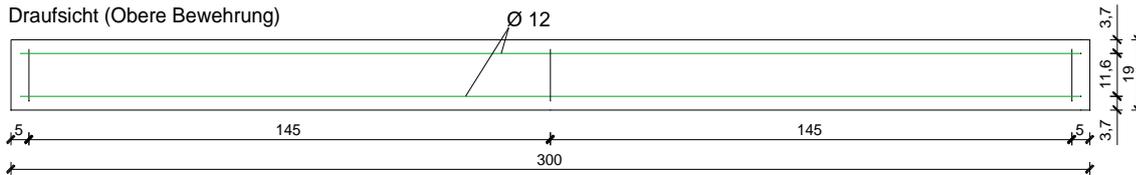
Körper AA5

Körper	$f_{c,cube}$	Biegezugbewehrung	statische Nutzhöhe	Querkraftbewehrung			Belastungsart	Bruchlast V_u	Querkraftbewehrung
				Bereich 1	Bereich 2	Bereich 3			
	N/mm ²	cm ²	cm	cm ² /m	cm ² /m	cm ² /m	kN/m		
AA5	35,3	2Ø15 2Ø12	28	14Ø6 e=4,5cm	10Ø6 e=6,5cm	4Ø6 e=12cm	Streckenlast	250,9	L-Blech, t=5mm, 2 Bügel
		5,8		25,1	17,4	9,4			

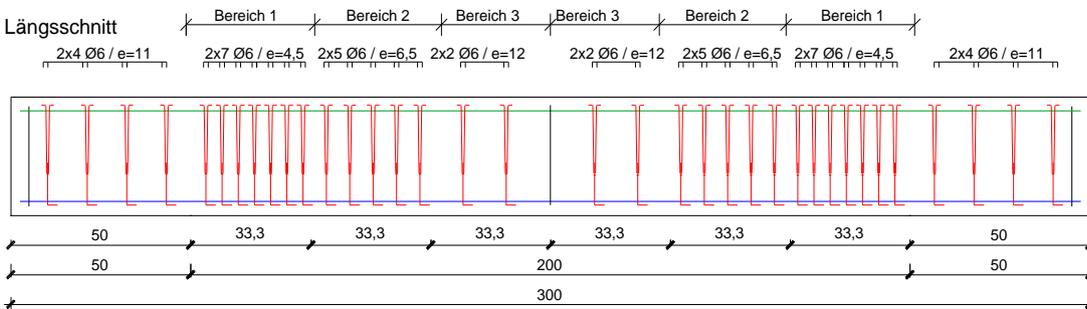
Gleichstreckenlast q [kN/m]



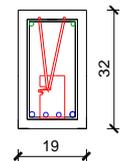
Draufsicht (Obere Bewehrung)



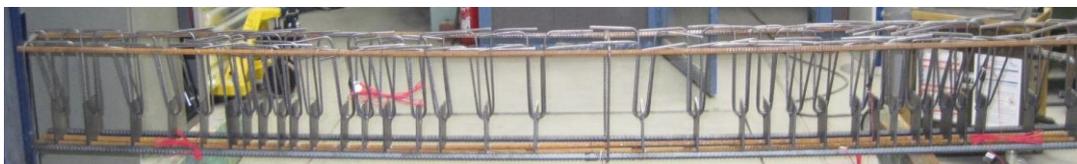
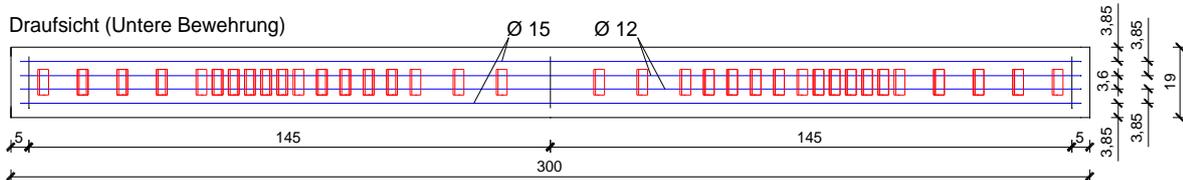
Längsschnitt

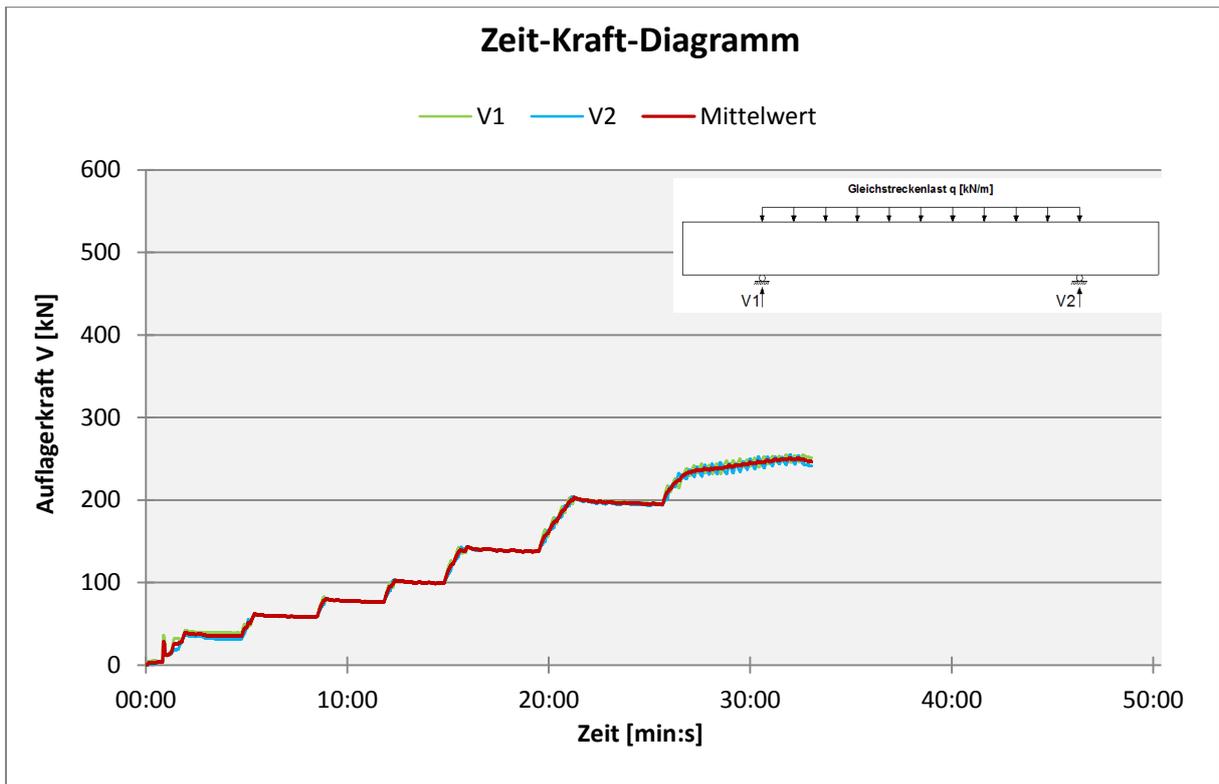


Querschnitt

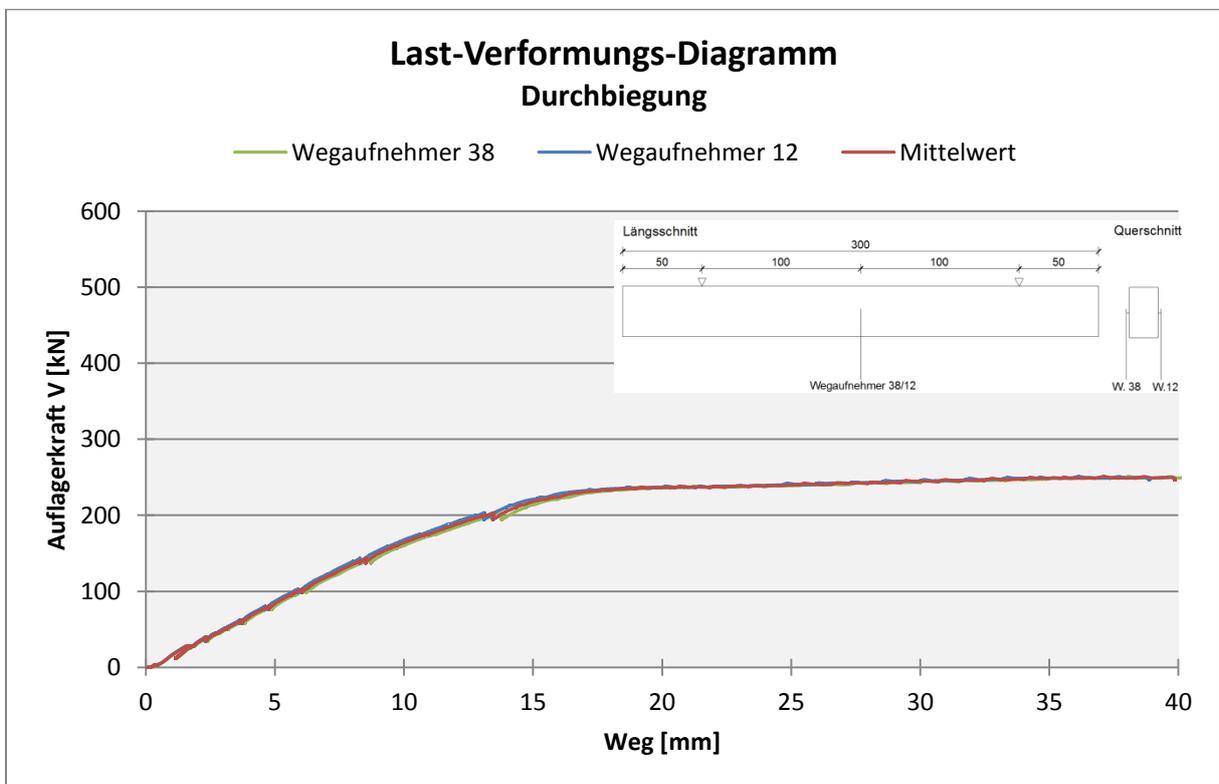


Draufsicht (Untere Bewehrung)

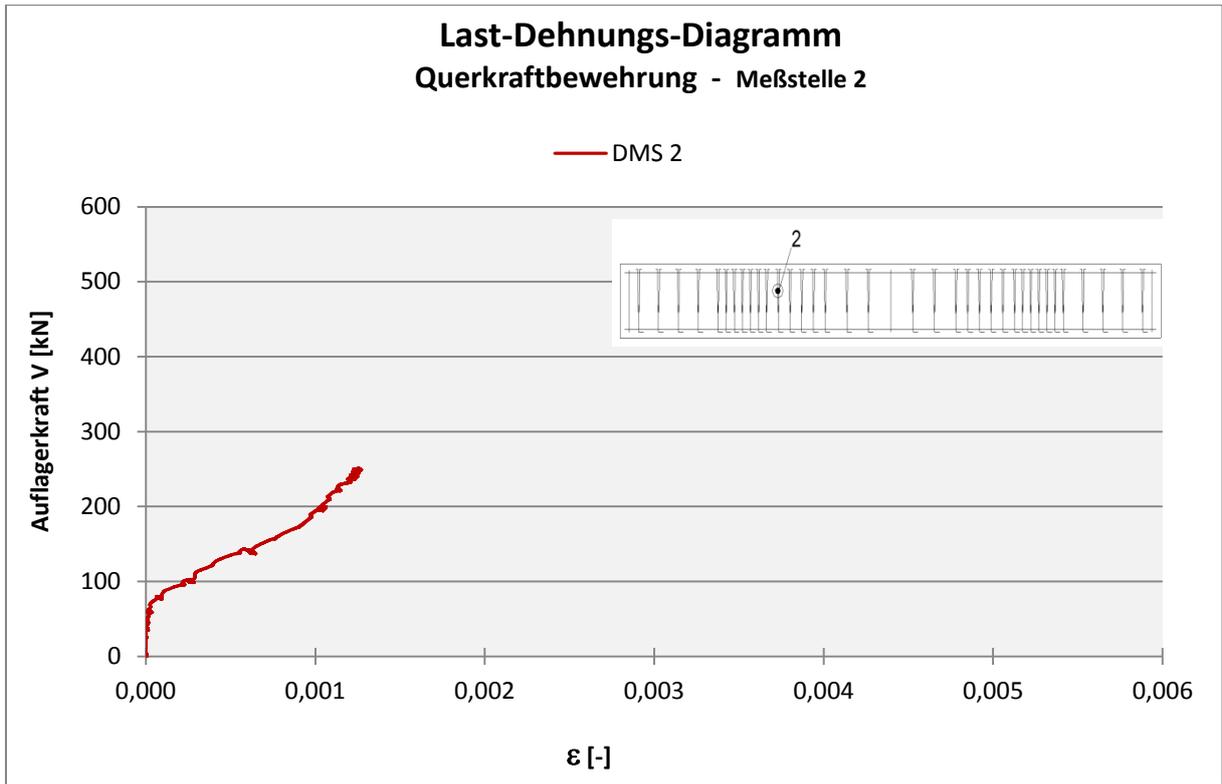




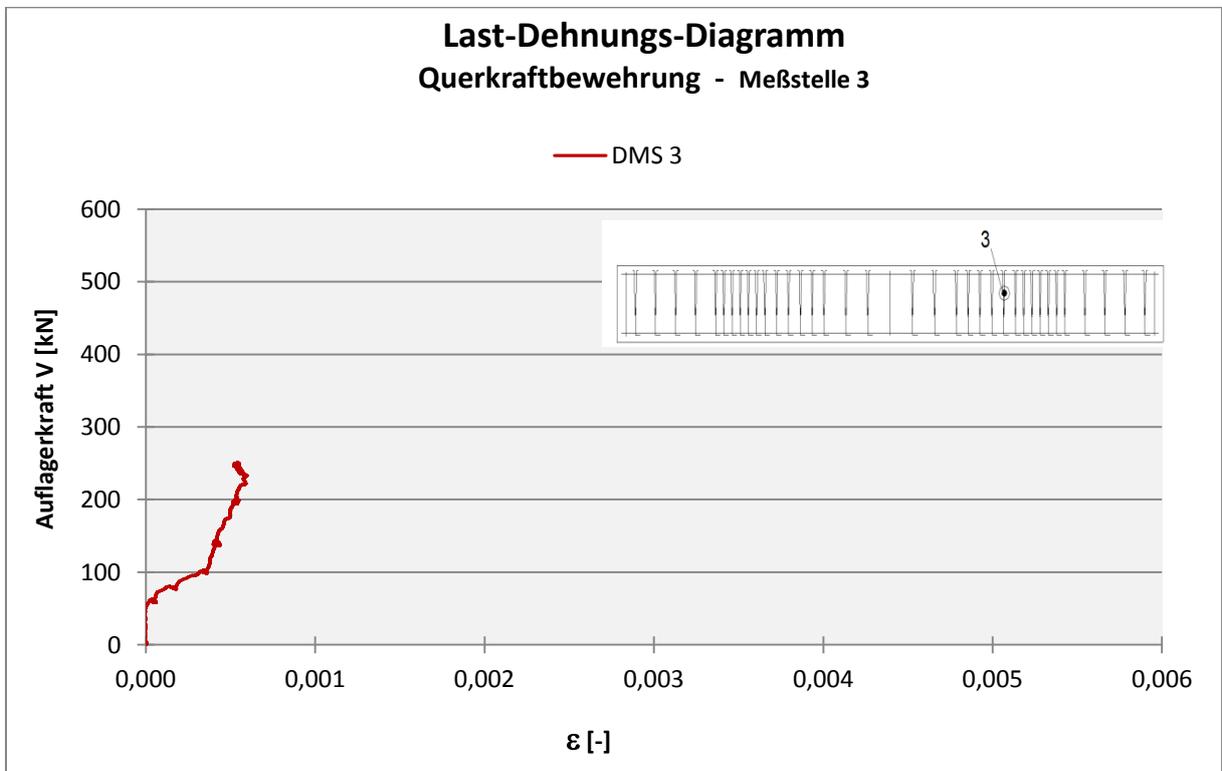
Zeit-Kraft-Diagramm – Körper AA5



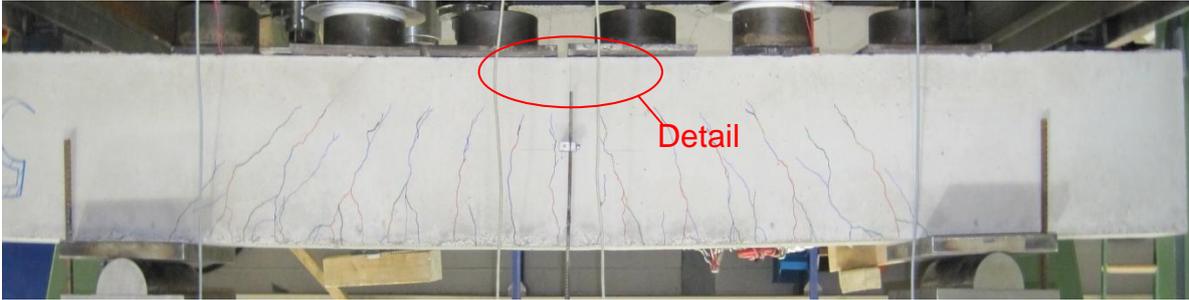
Messwerte der Durchbiegung in Feldmitte – Körper AA5



Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 2 – Körper AA5



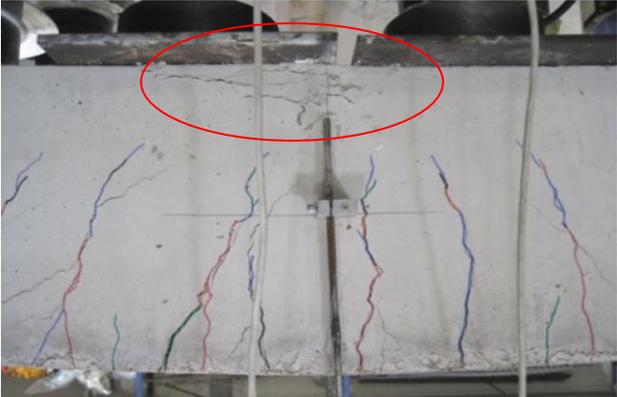
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 3 – Körper AA5



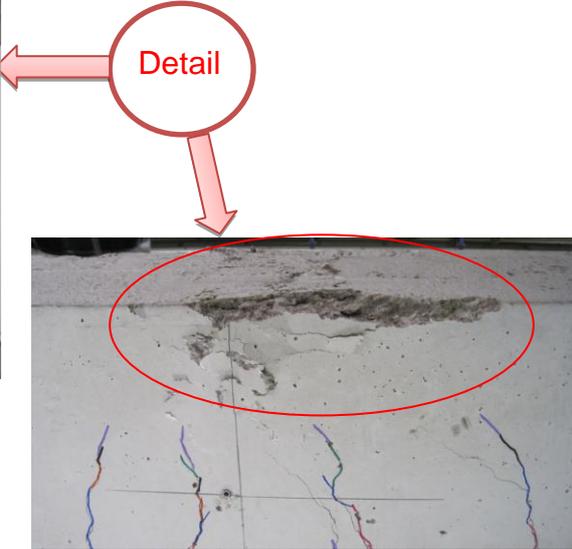
Rissbild – Körper AA5

Laststufe	40kN	60kN	80kN	100kN	140kN	200kN
Markierungsfarbe	Rot	Blau	Orange	Schwarz	Grün	Lila

Anzahl der Hauptrisse in Höhe der Zugbewehrung = 18



Betondruck-Versagen – Körper AA5

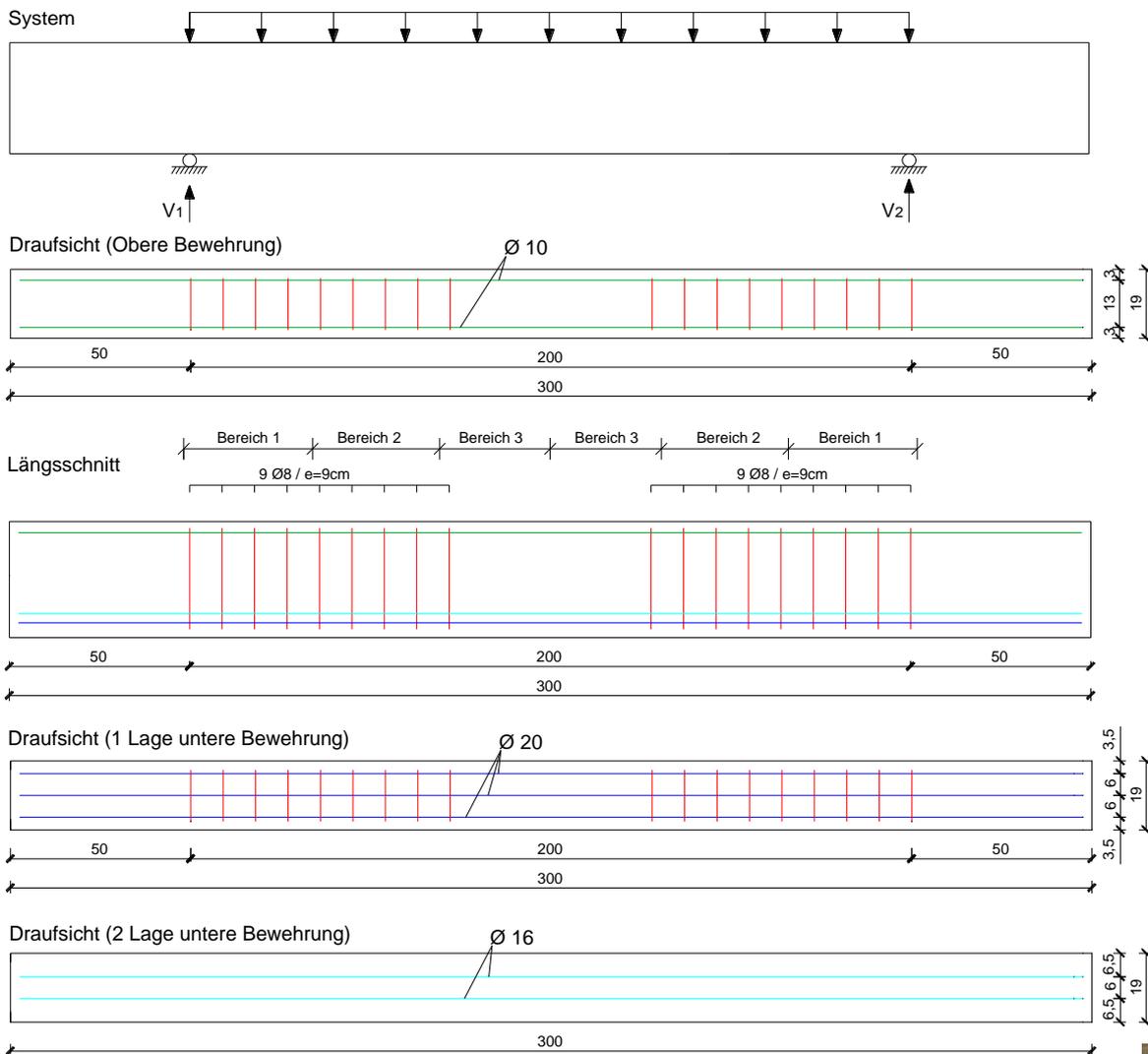


Betondruck-Versagen – Körper AA5

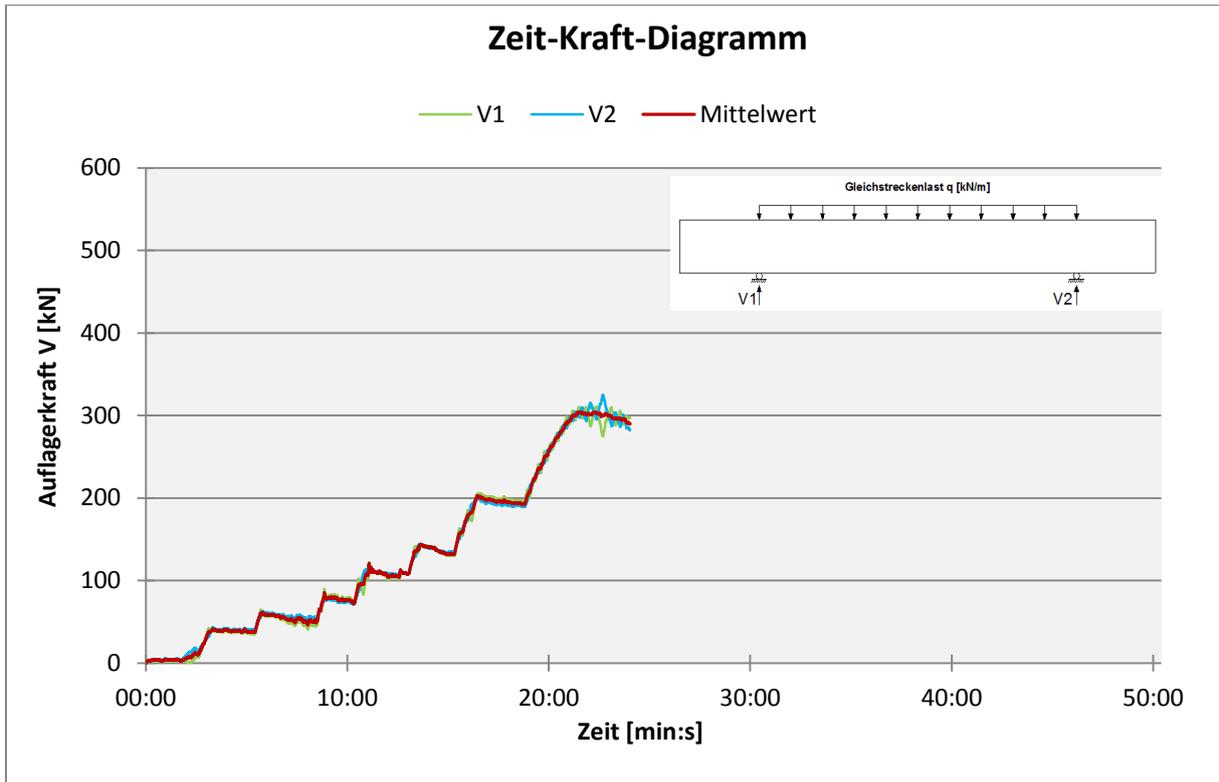
Körper AA6

Körper	$f_{c,cube}$	Biegezugbewehrung	statische Nutzhöhe	Querkraftbewehrung			Belastungsart	Bruchlast V_u	Querkraftbewehrung
				Bereich 1	Bereich 2	Bereich 3			
	N/mm ²	cm ²	cm	cm ² /m	cm ² /m	cm ² /m		kN/m	
AA6	35,3	3Ø20 2Ø16	27	9Ø8 e=9cm	9Ø8 e=9cm	-	Streckenlast	300,3	Bügel Ø8mm
		12,3		11,2	11,2	-			

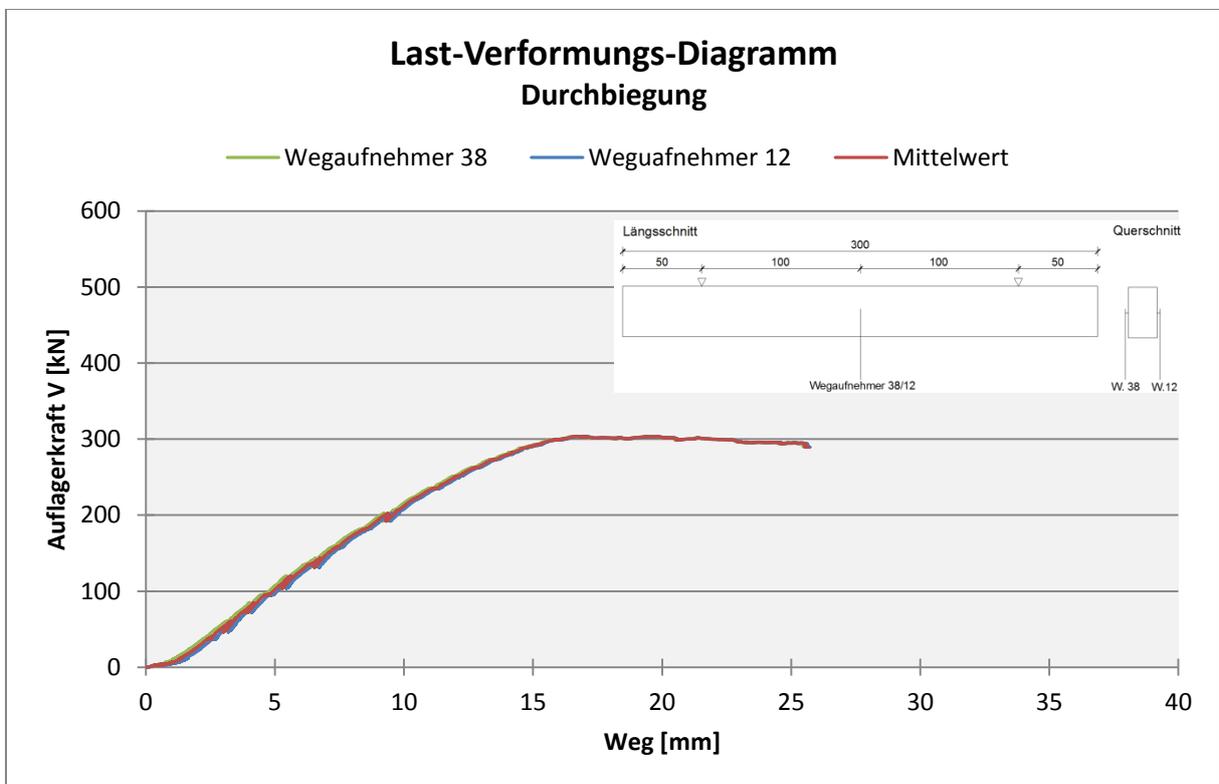
Gleichstreckenlast q [kN/m]



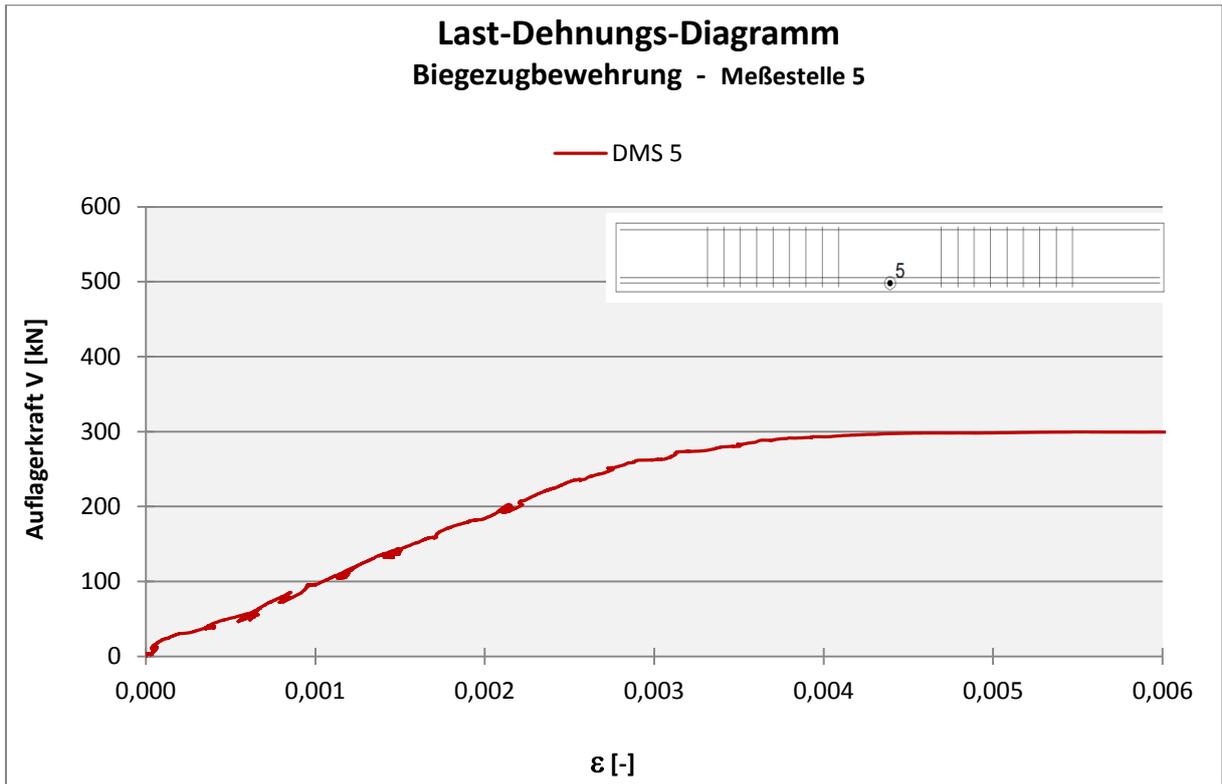
A21



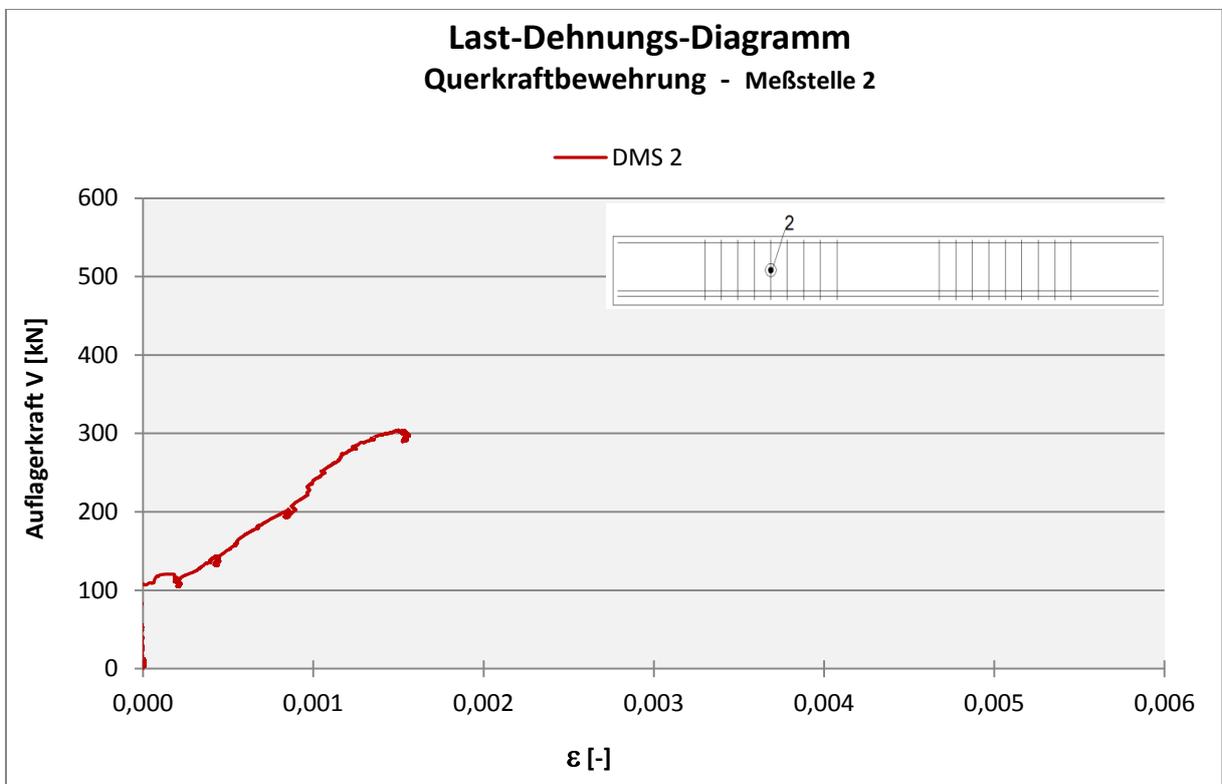
Zeit-Kraft-Diagramm – Körper AA6



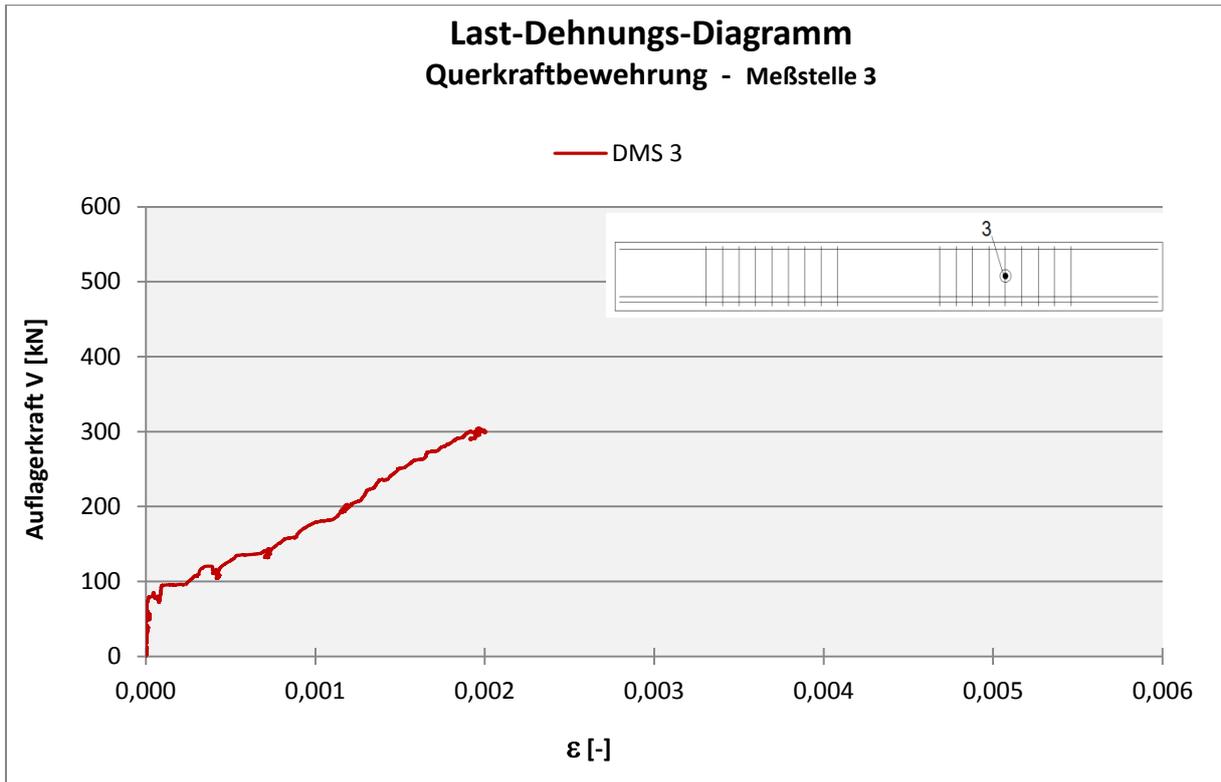
Messwerte der Durchbiegung in Feldmitte – Körper AA6



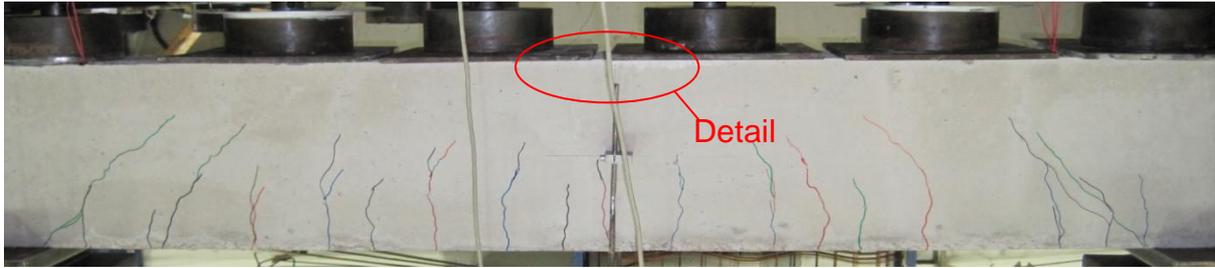
Dehnungsmessung Spannstahl / Meßstelle 5 – Körper AA6



Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 2 – Körper AA6



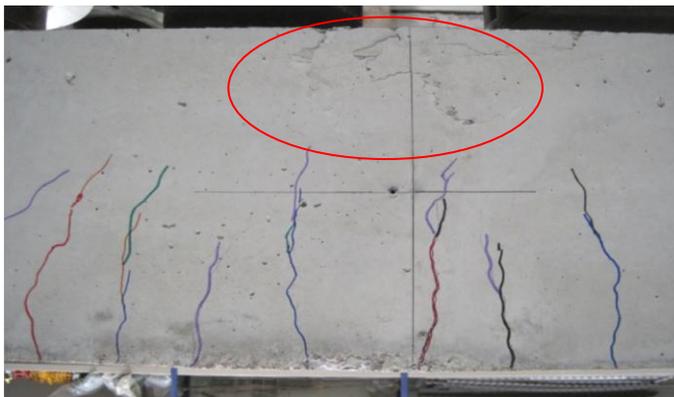
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 3 – Körper AA6



Rissbild – Körper AA6

Laststufe	40kN	60kN	80kN	100kN	140kN	200kN
Markierungsfarbe	Rot	Blau	Orange	Schwarz	Grün	Lila

Anzahl Hauptrisse in Höhe der Zugbewehrung = 19



Betondruck-Versagen – Körper AA6

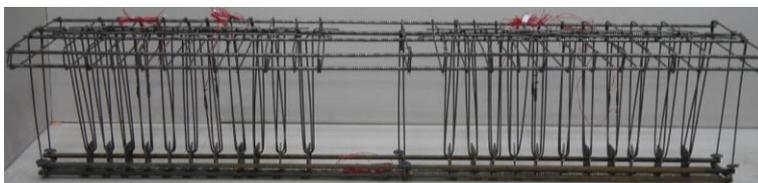
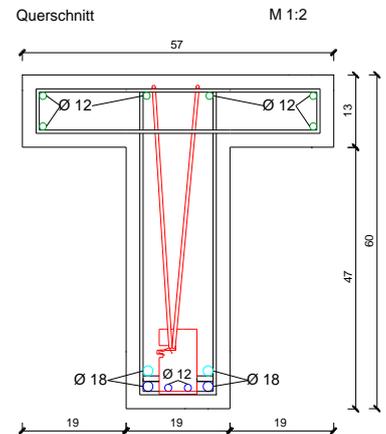
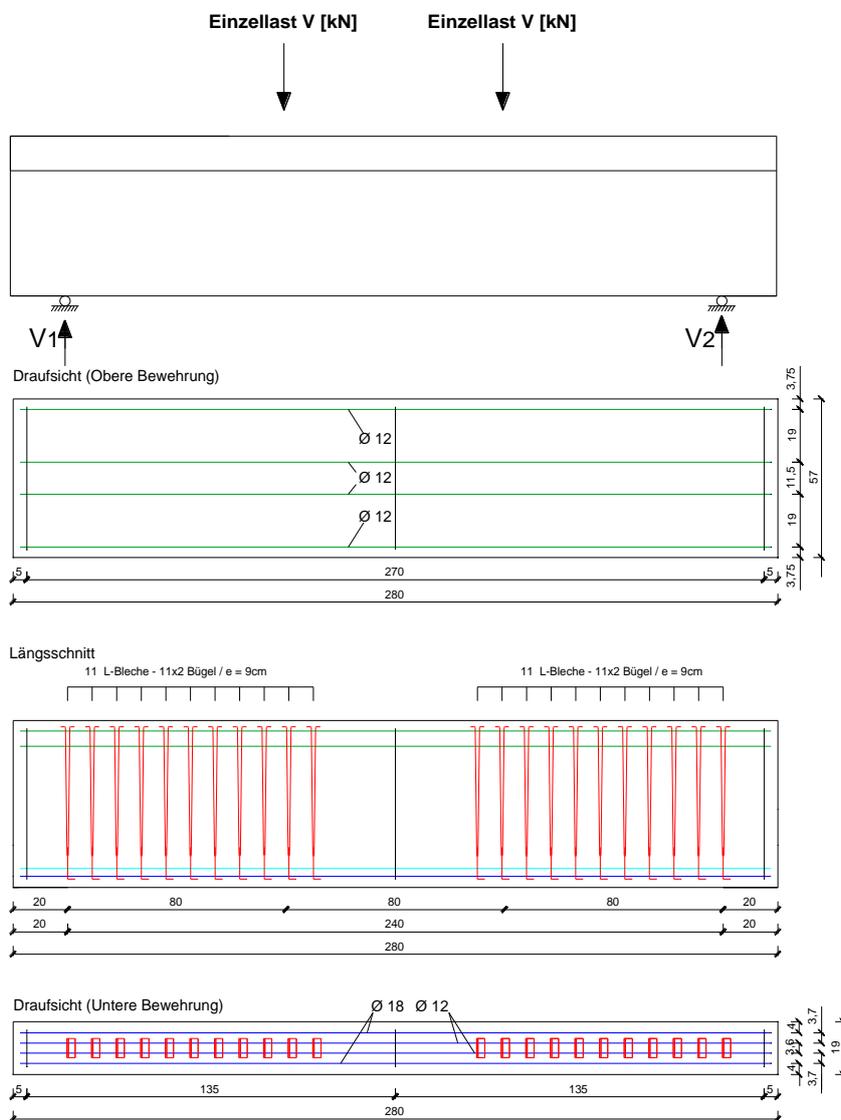


Betondruck-Versagen – Körper AA6

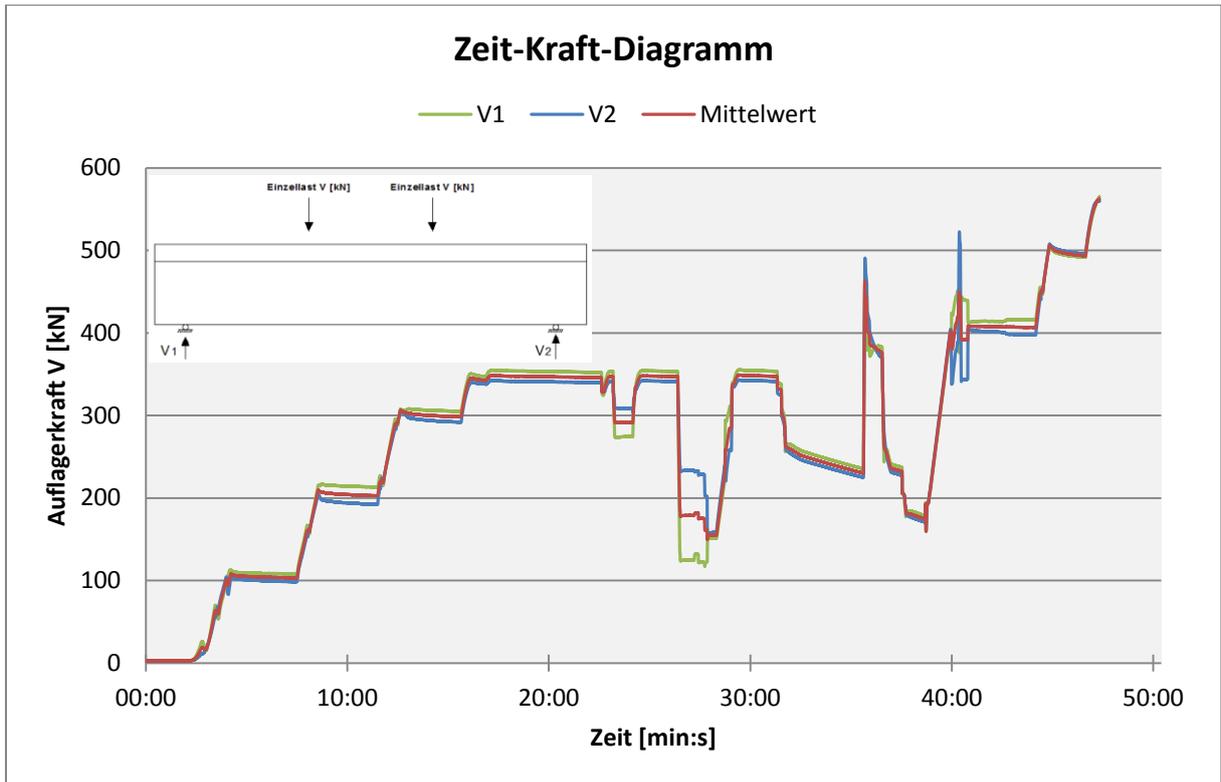
2. Versuchsreihe B

Körper BA1

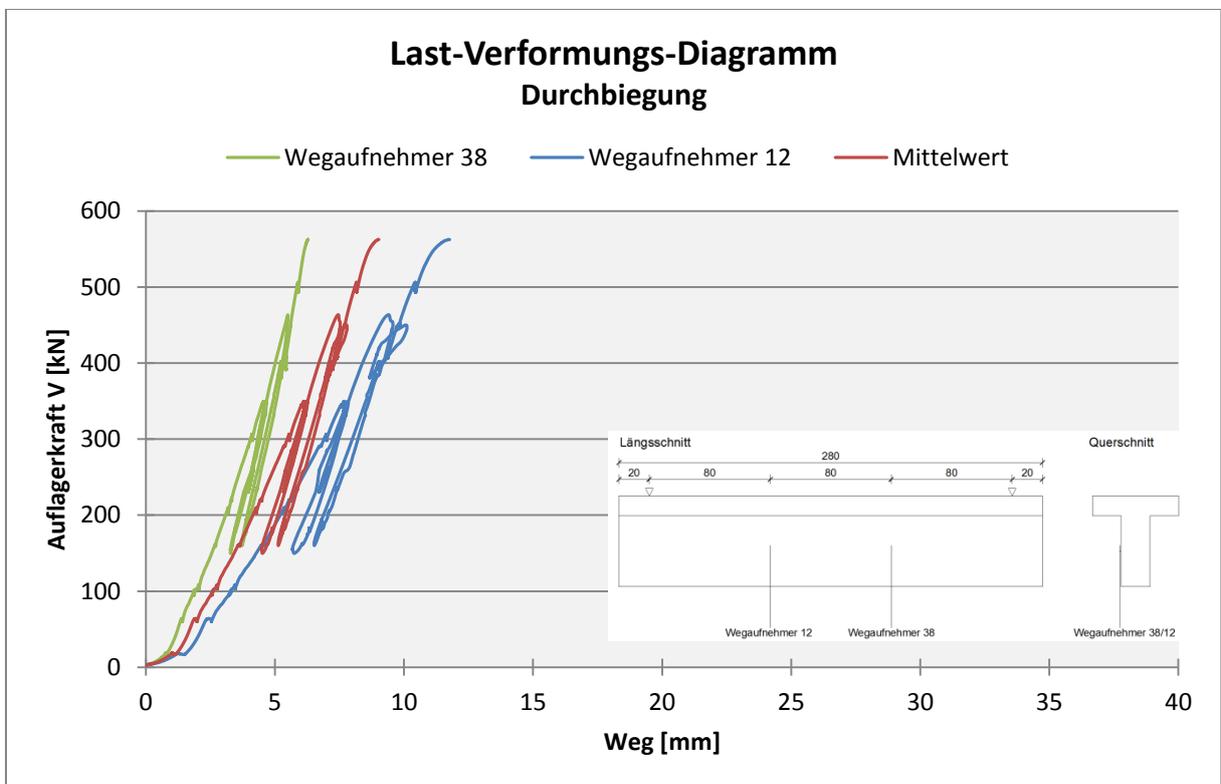
Körper	$f_{c,cube}$	Biegezugbewehrung	Statische Nutzhöhe	Querkraftbewehrung	Belastungsart	Bruchlast V_u	Querkraftbewehrung
	N/mm ²	cm ²	cm	cm ² /m		kN	
BA1	32,4	4Ø18 4Ø12	54	22Ø6 e=9cm	Einzellast	559,4	L-Blech, t=5mm, 2 Bügel
		12,4		12,56			



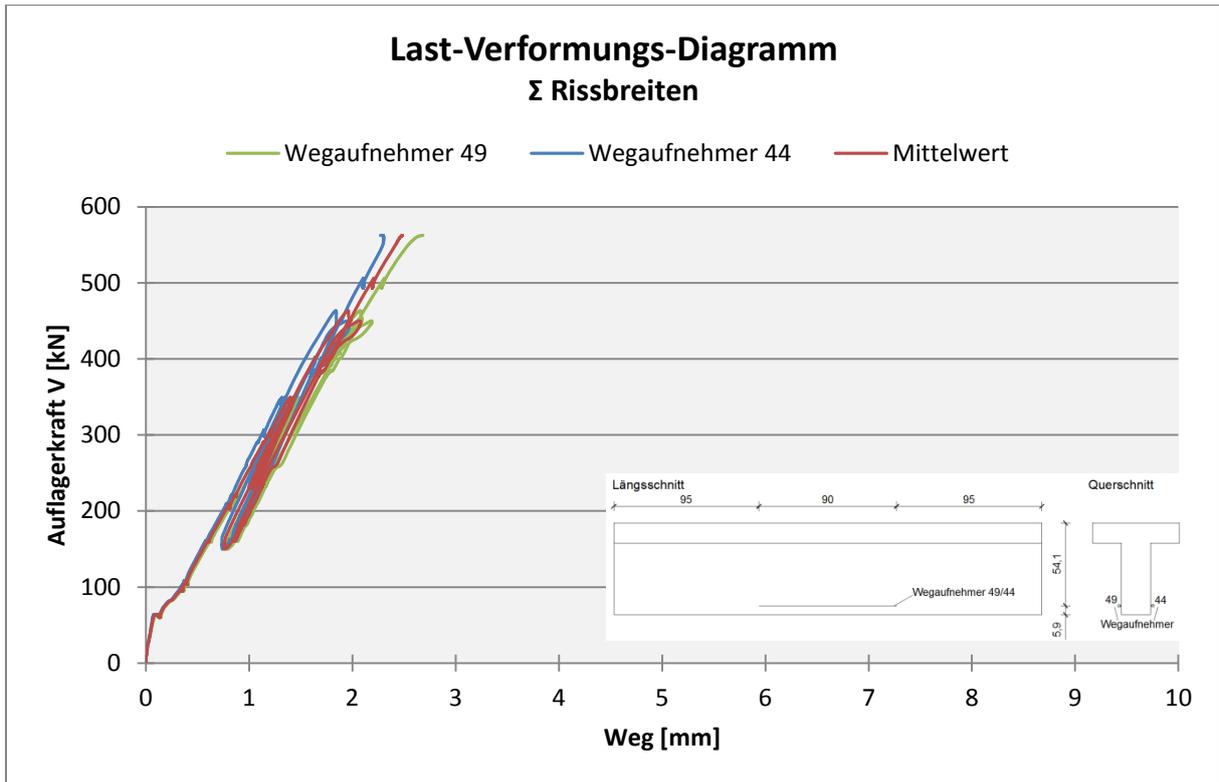
A26



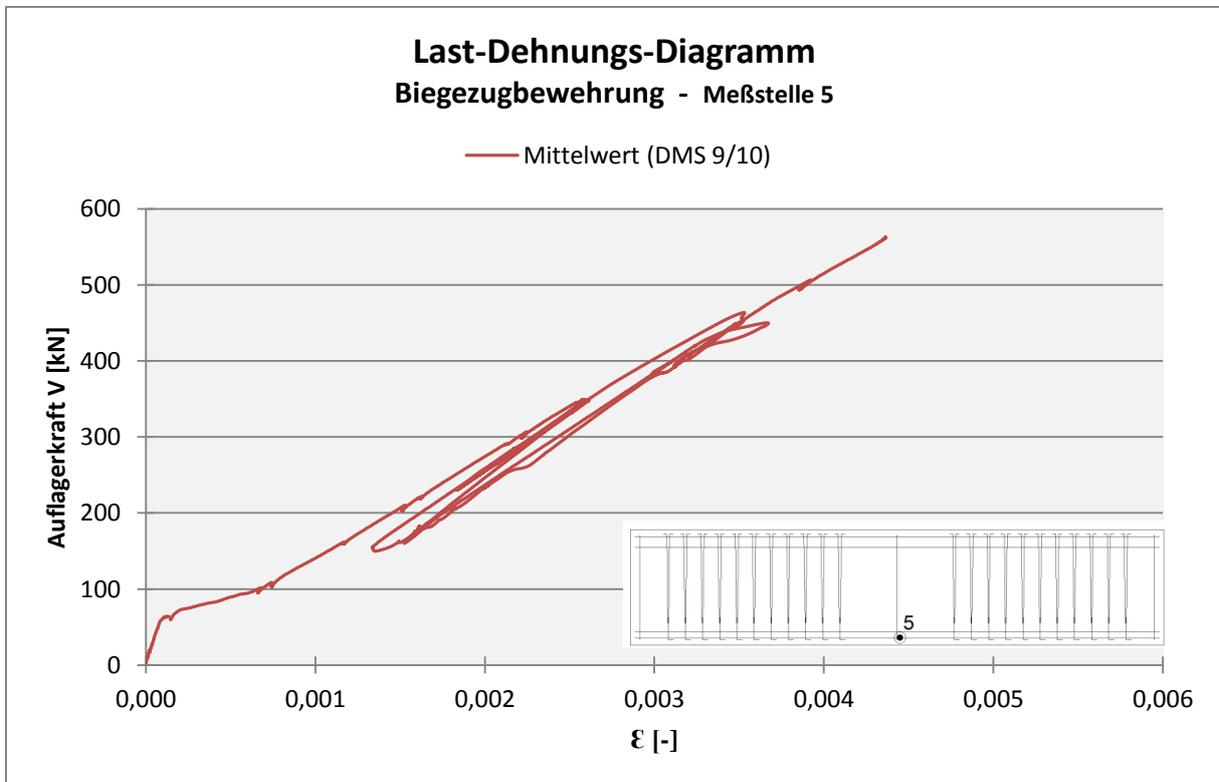
Zeit-Kraft-Diagramm – Körper BA1



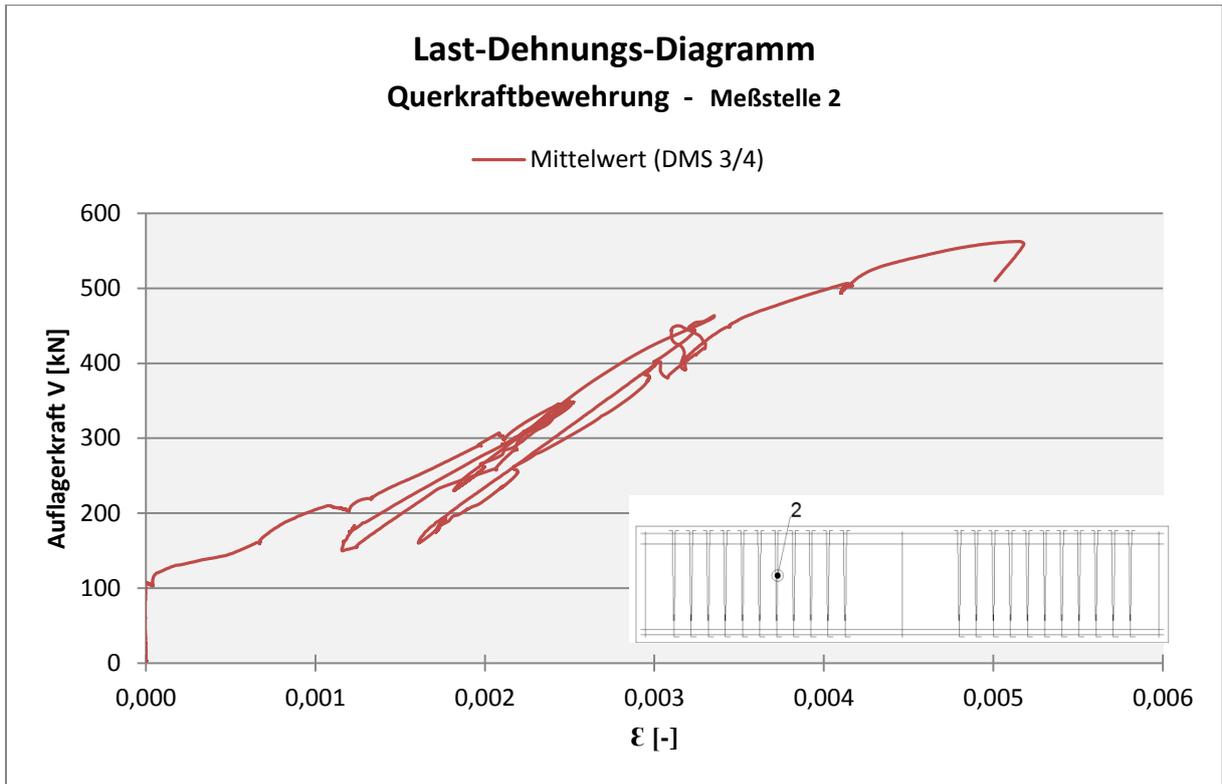
Messwerte der Durchbiegung im Drittelpunkt – Körper BA1



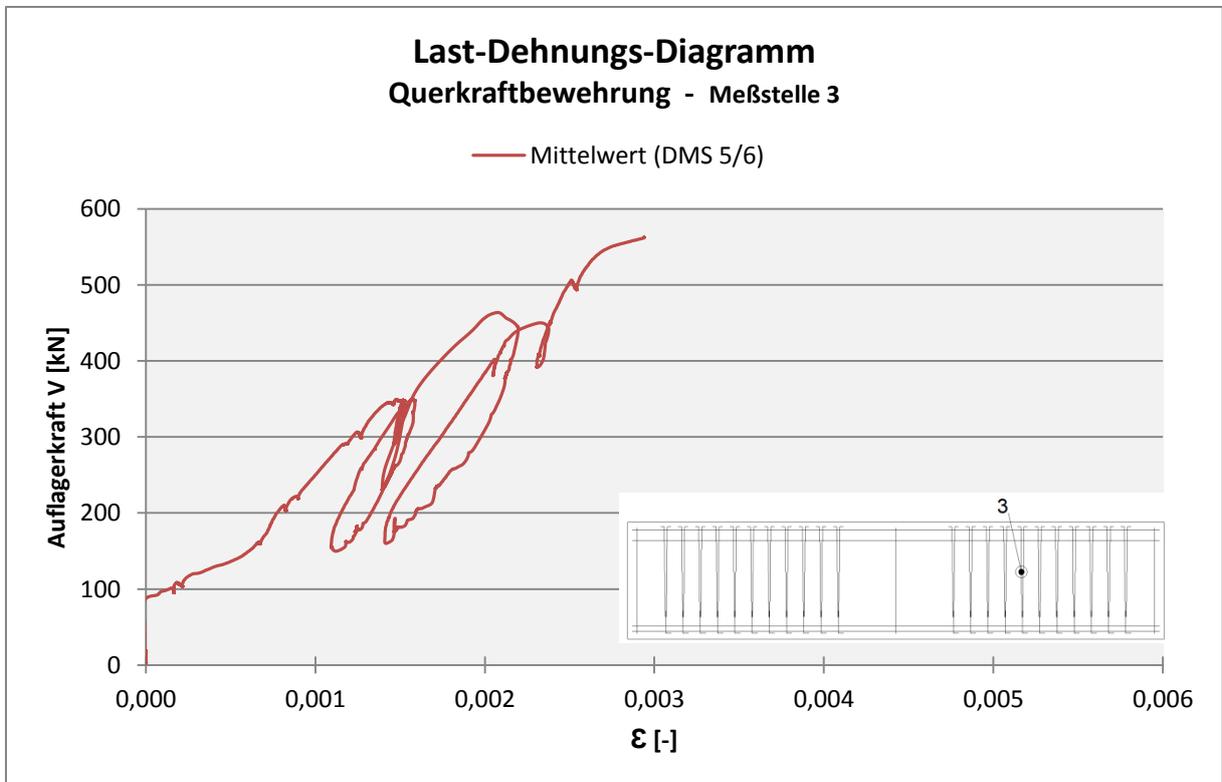
Messwerte der Σ der Rissbreiten in Höhe der Zugbewehrung – Körper BA1



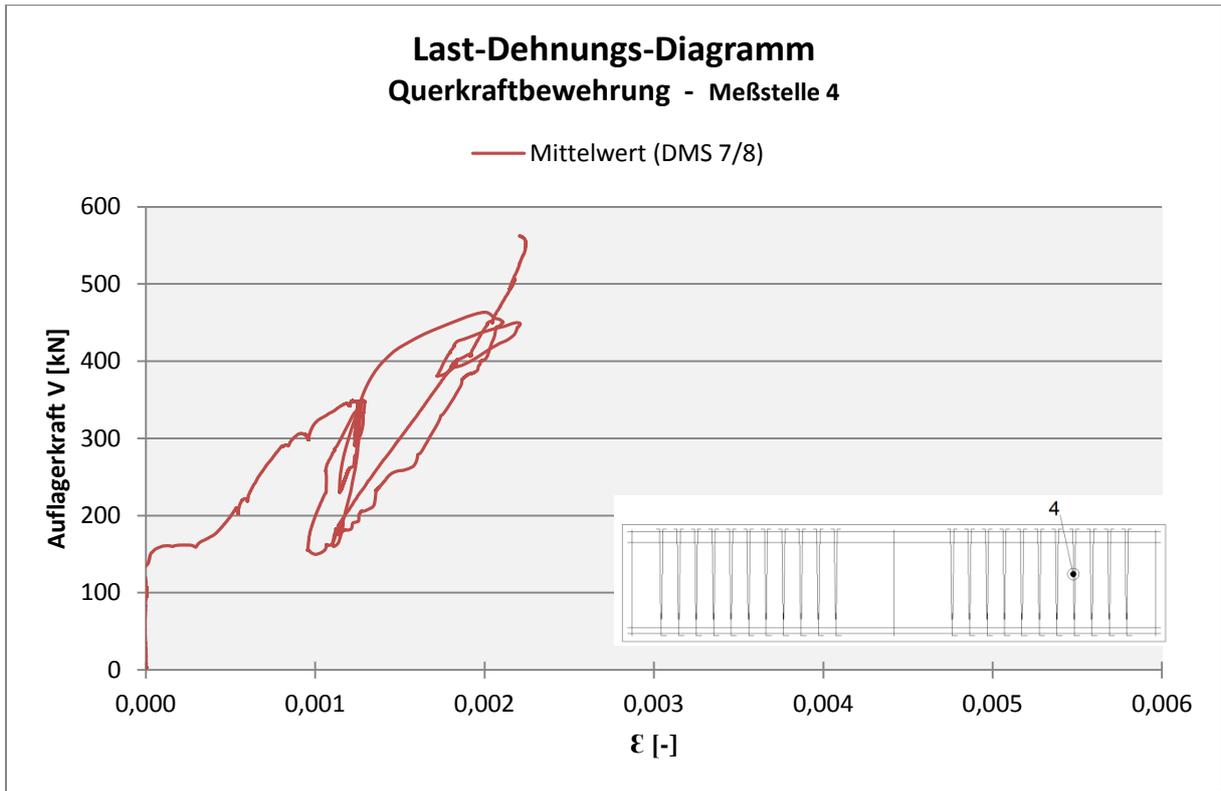
Dehnungsmessung Spannstahl / Meßstelle 5 – Körper BA1



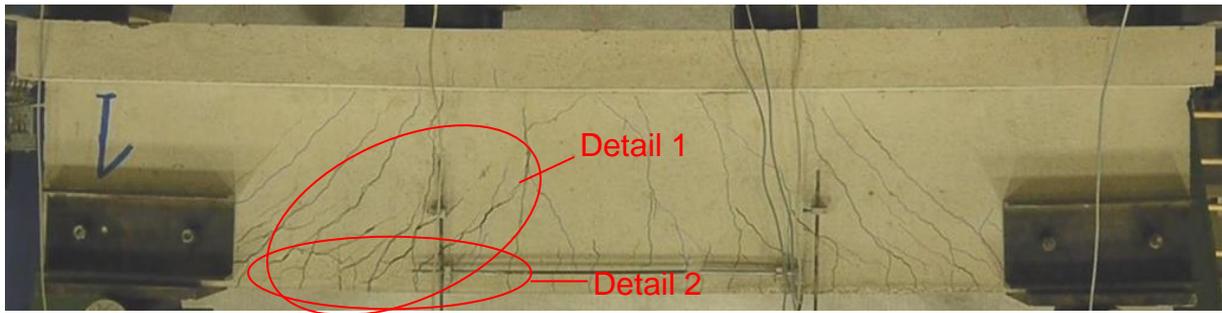
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 2 – Körper BA1



Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 3 – Körper BA1



Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 4 – Körper BA1



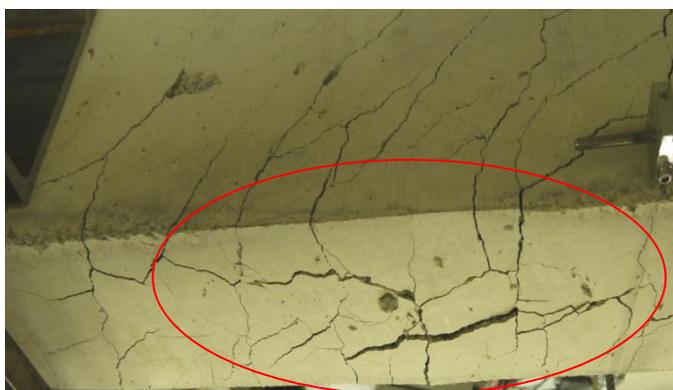
Rissbild – Körper BA1

Laststufe	100kN	200kN	300kN	400kN	500kN
Markierungsfarbe	Grün	Blau	Schwarz	Lila	Orange

Anzahl der Hauptrisse in Höhe der Zugbewehrung = 16



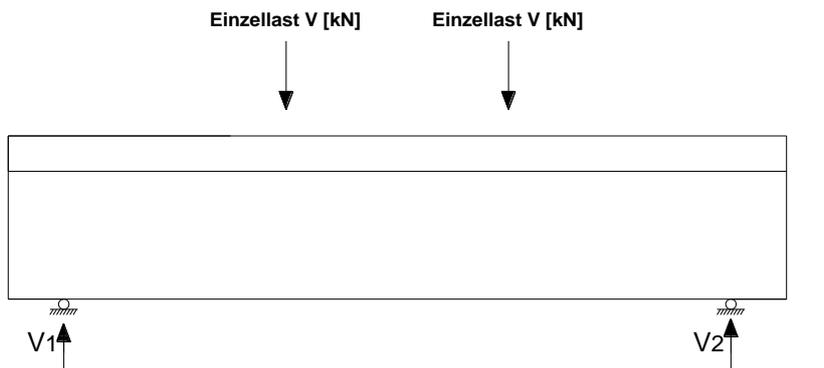
Schrägriss (Fließen der Bügel (L-Blech)) – Körper BA1



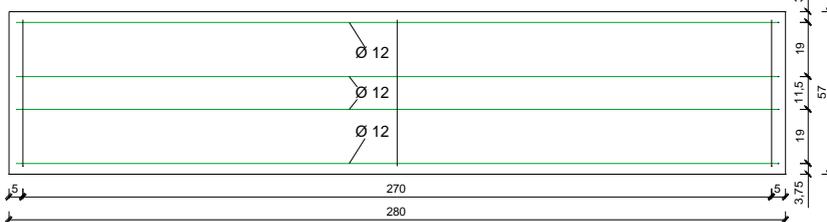
Überschreitung der Betonzugfestigkeit im Steg – Körper BA1

Prüfkörper BA3

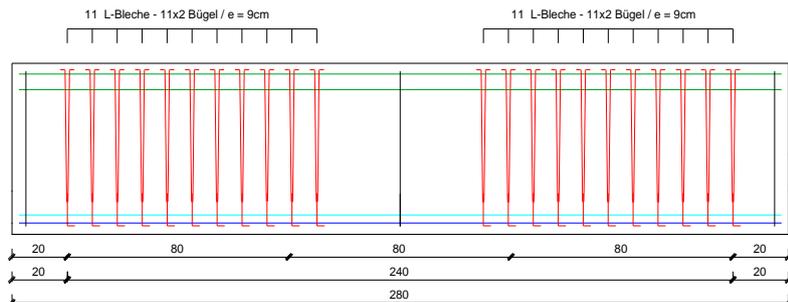
Körper	$f_{c, cube}$	Biegezugbewehrung	statische Nutzhöhe	Querkraftbewehrung	Belastungsart	Bruchlast V_u	Querkraftbewehrung
	N/mm ²	cm ²					
BA3	35,3	4Ø18 4Ø12	54	22Ø6 e=9cm	Einzellast	552,8	L-Blech, t=3mm, 2 Bügel
		12,4		12,56			



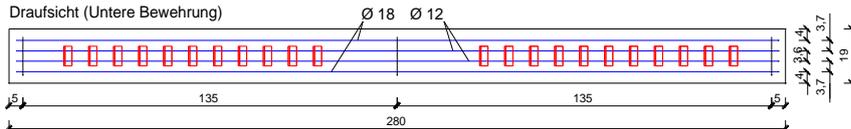
Draufsicht (Obere Bewehrung)



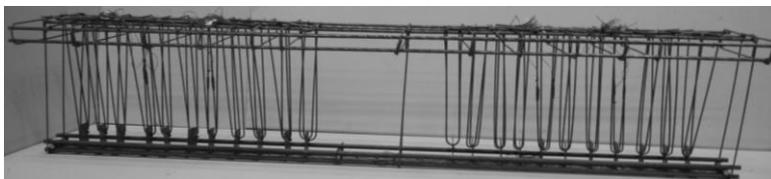
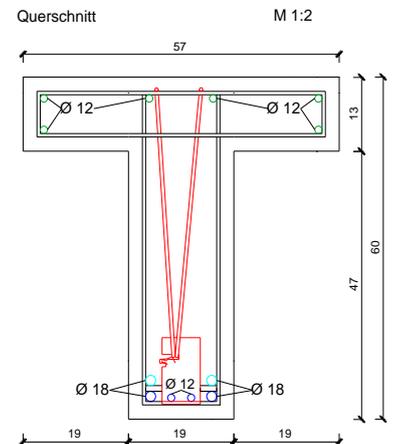
Längsschnitt

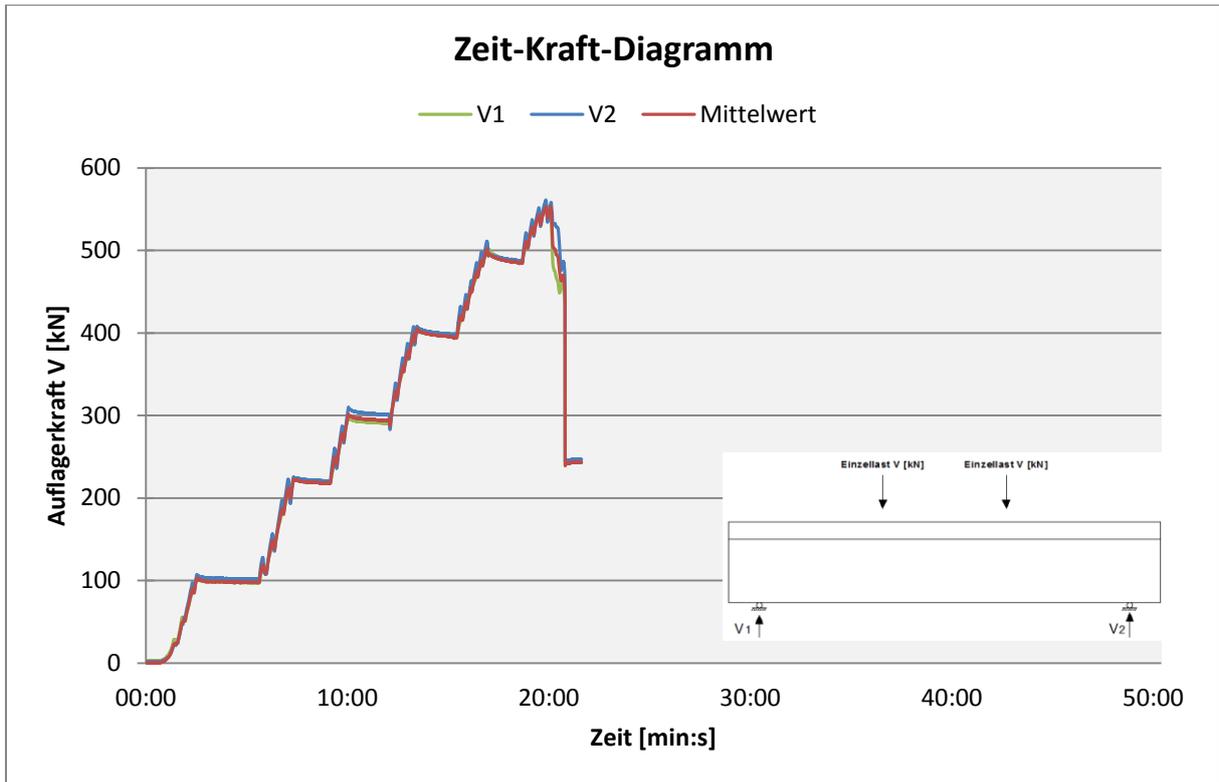


Draufsicht (Untere Bewehrung)

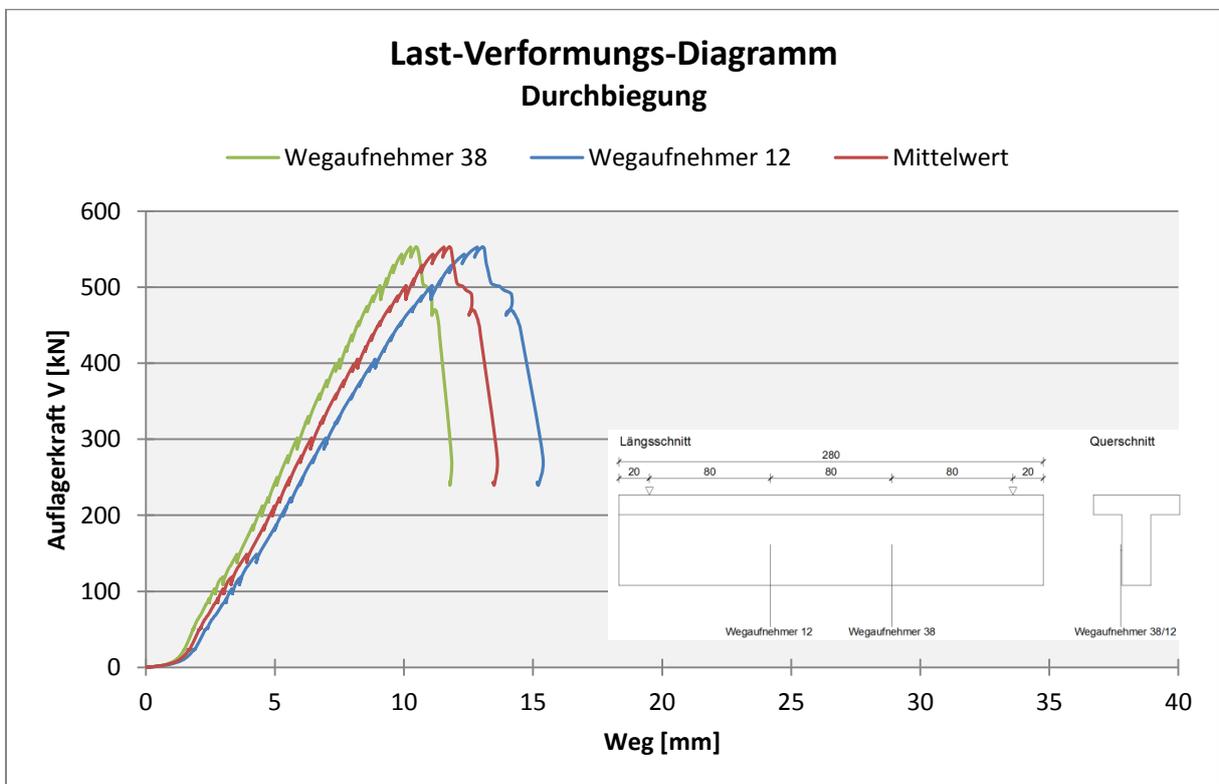


Querschnitt

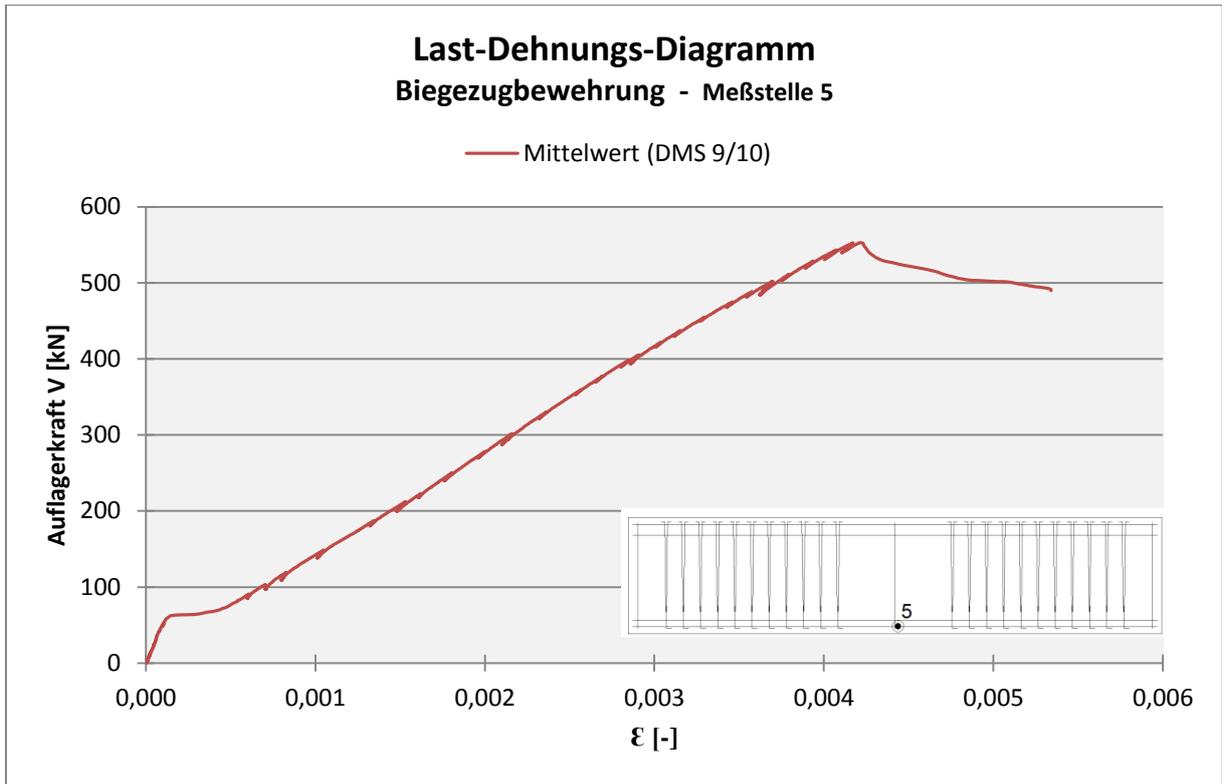




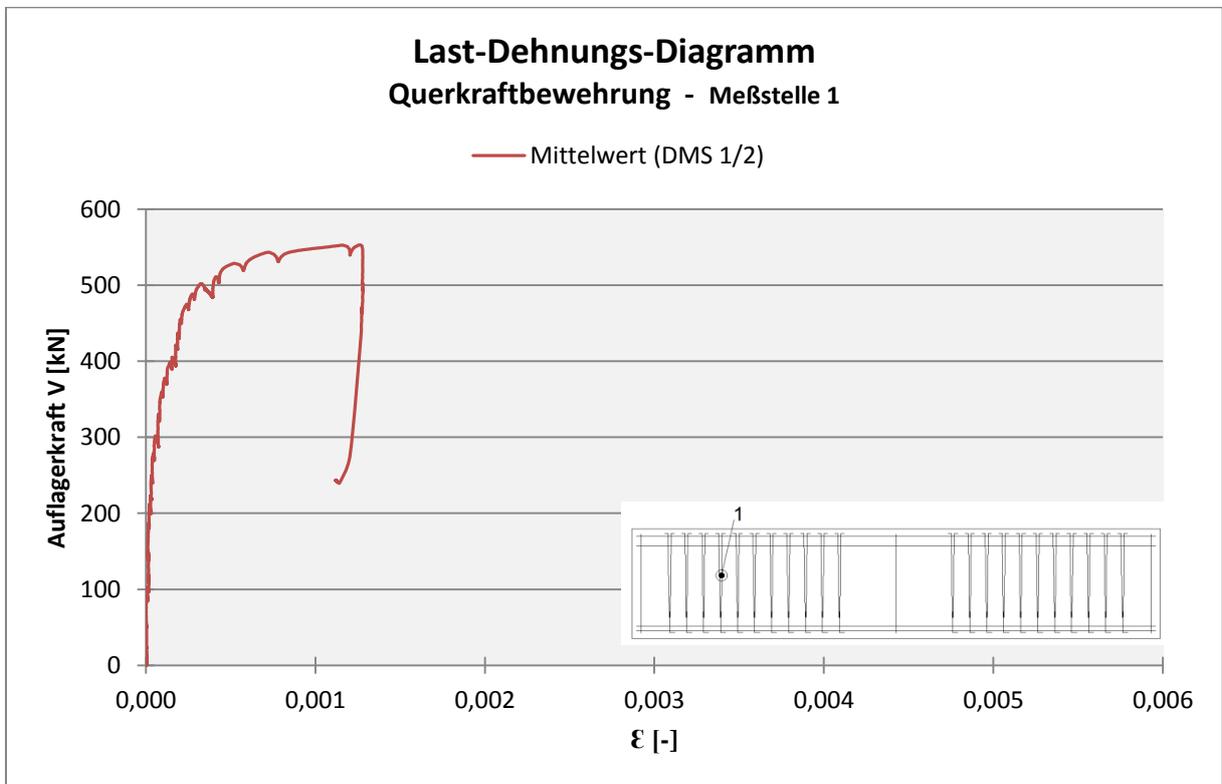
Zeit-Kraft-Diagramm – Körper BA3



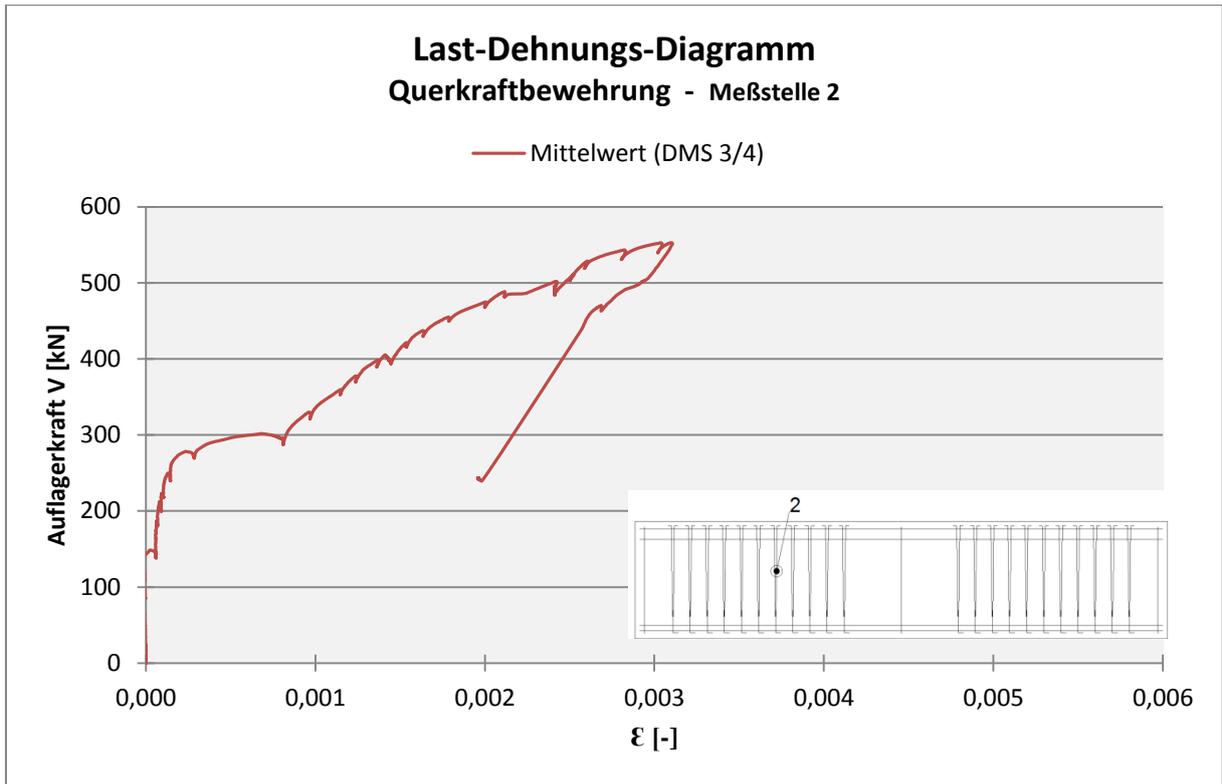
Messwerte der Durchbiegung im Drittelspunkt – Körper BA3



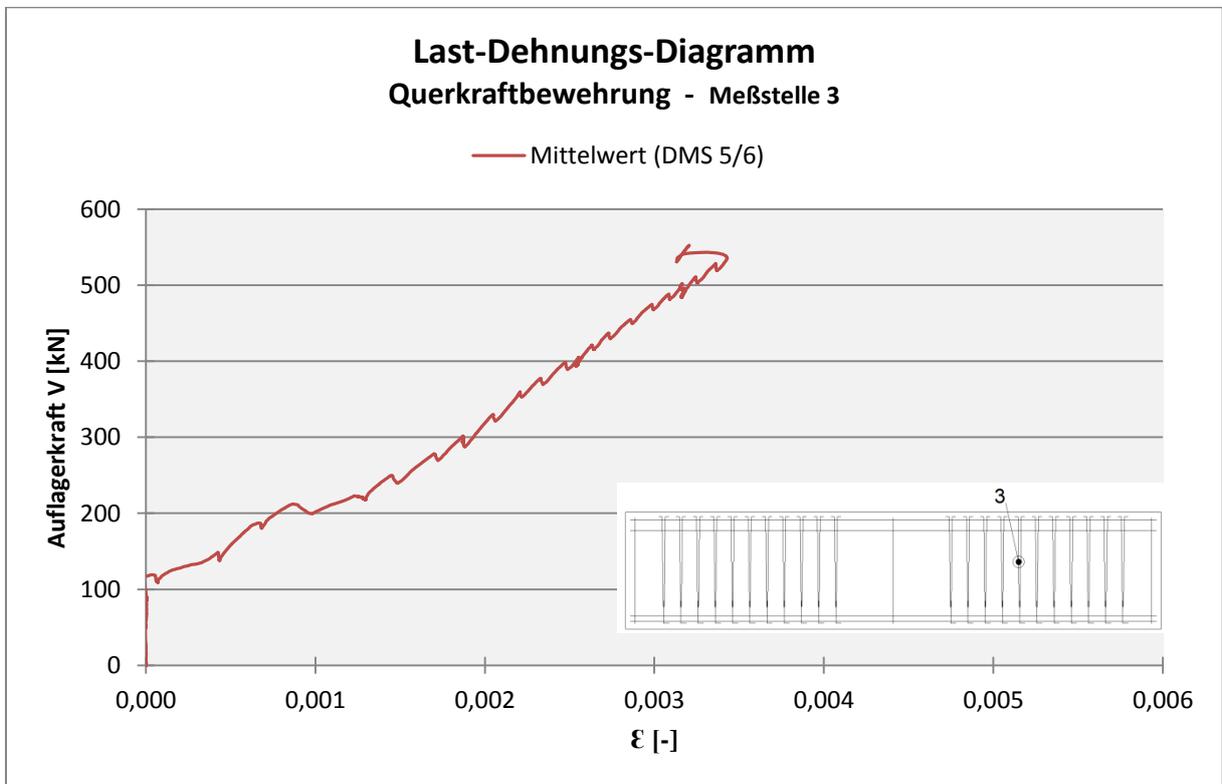
Dehnungsmessung Spannstahl / Meßstelle 5 – Körper BA3



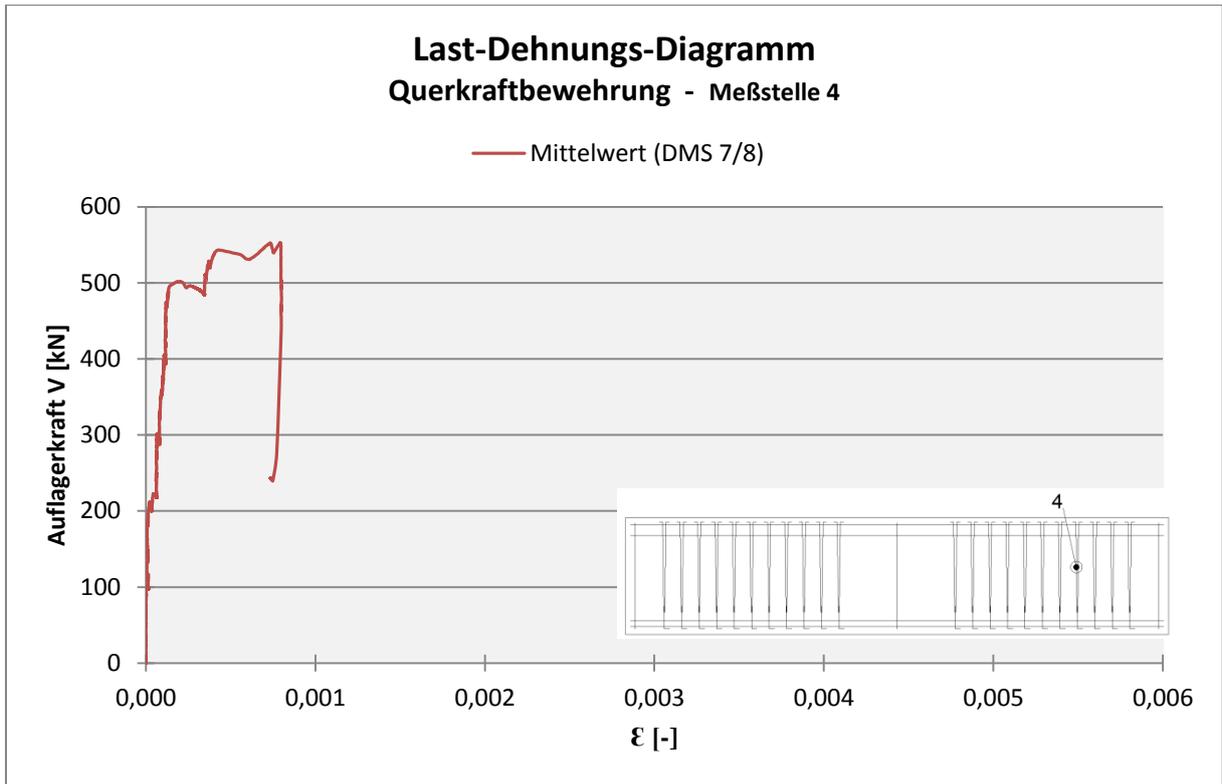
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 1 – Körper BA3



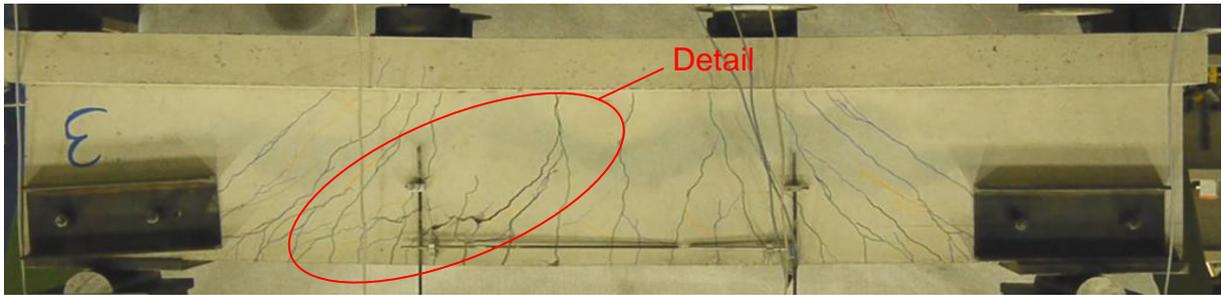
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 2 – Körper BA3



Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 3 – Körper BA3



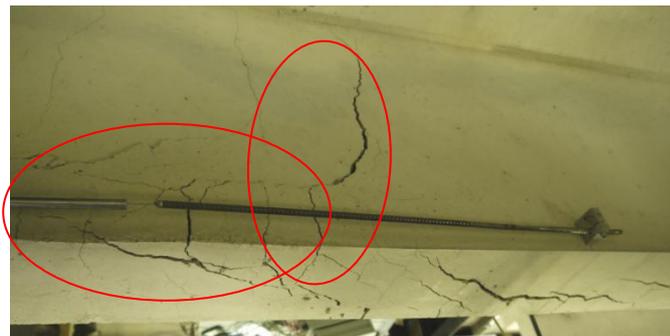
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 4 – Körper BA3



Rissbild Körper BA3

Laststufe	100kN	200kN	300kN	400kN	500kN
Markierungsfarbe	Grün	Blau	Schwarz	Lila	Orange

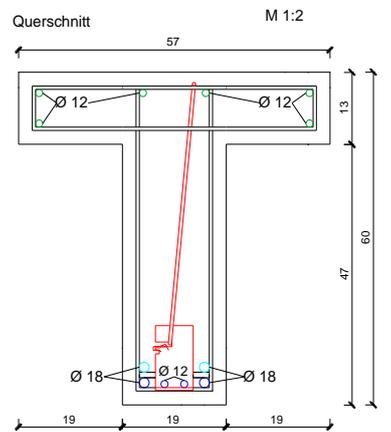
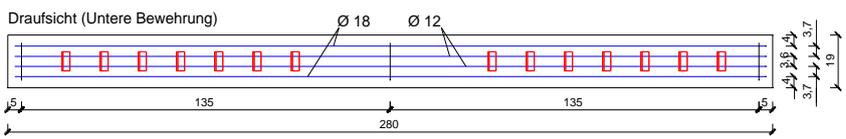
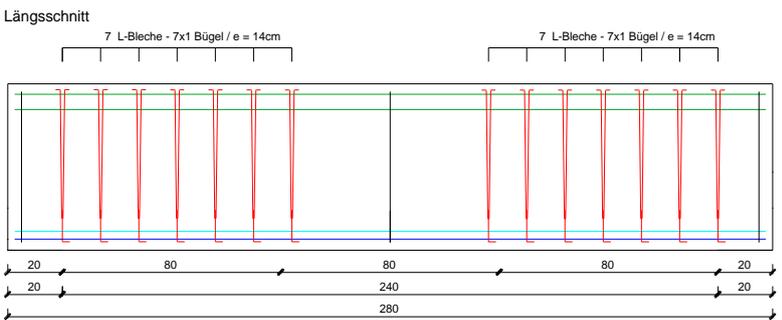
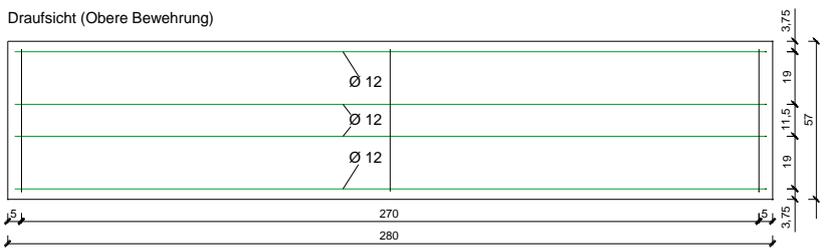
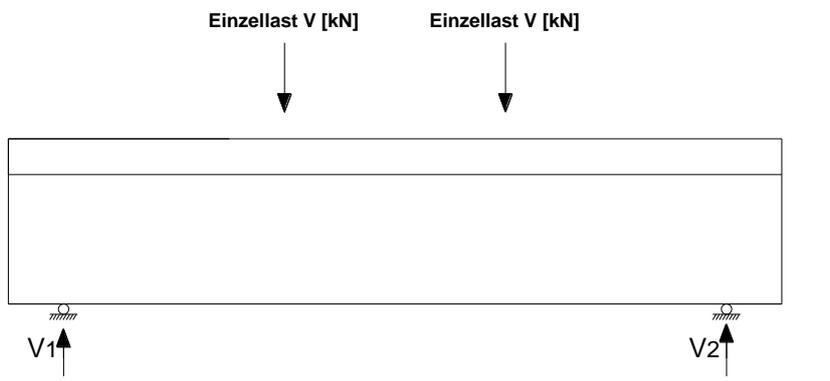
Anzahl der Hauptrisse in Höhe der Zugbewehrung = 17

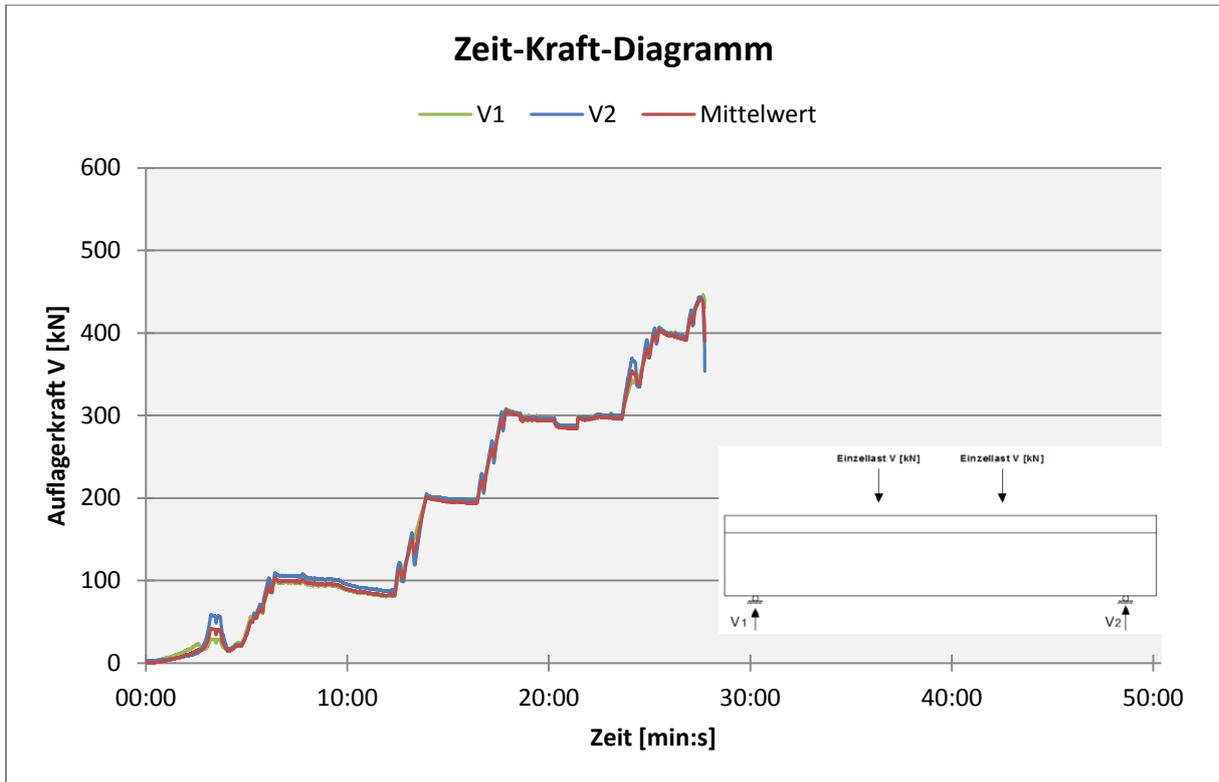


Schrägriß und Überschreitung der Betonzugfestigkeit im Steg – Körper BA3

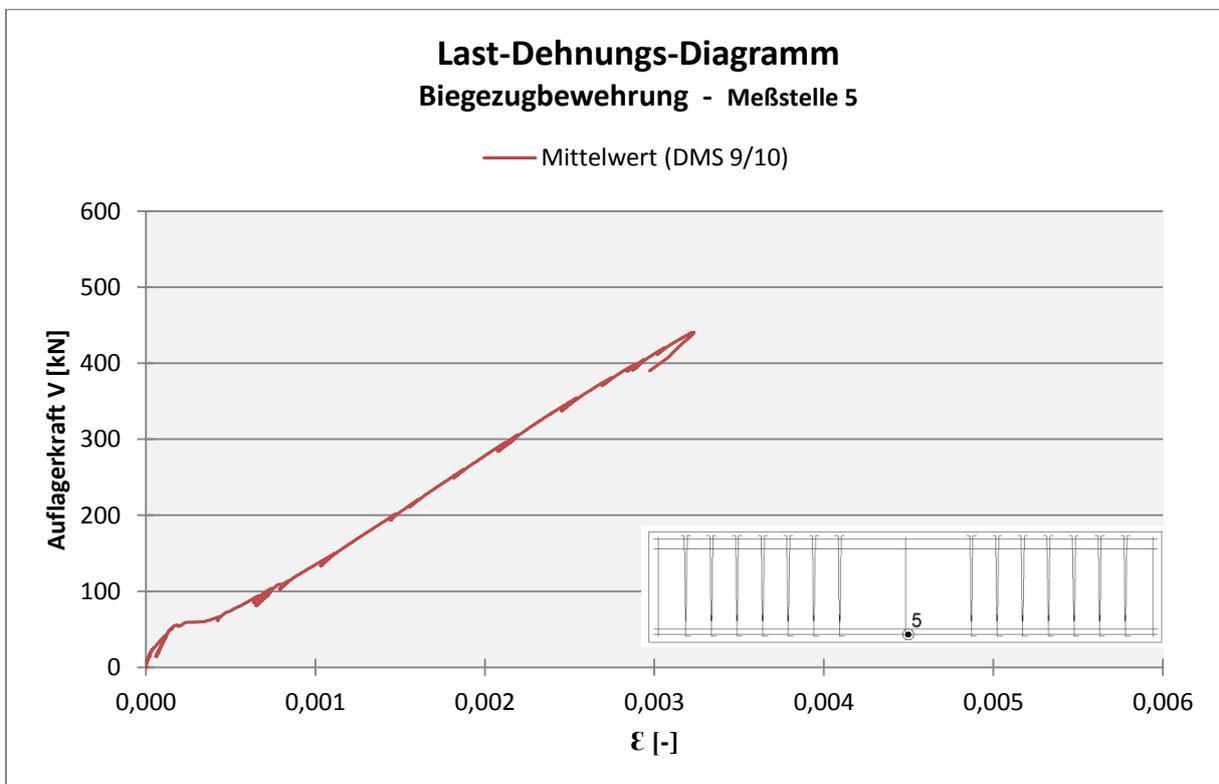
Prüfkörper BA4

Körper	$f_{c,cube}$	Biegezugbewehrung	statische Nutzhöhe	Querkraftbewehrung	Belastungsart	Bruchlast V_u	Querkraftbewehrung
	N/mm ²	cm ²		cm ² /m		kN	
BA4	35,6	4Ø18 4Ø12	54	7Ø6 e=14cm	Einzellast	440,2	L-Blech, t=3mm, 1 Bügel
		12,4		4,07			

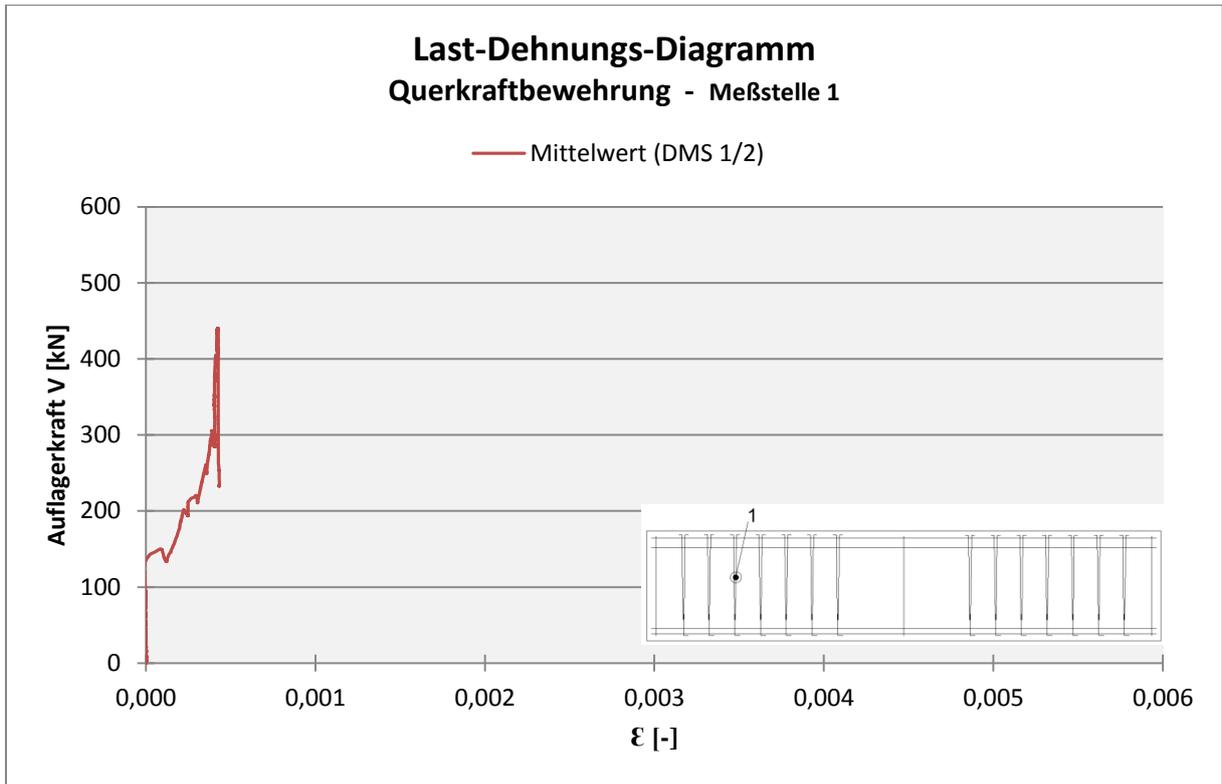




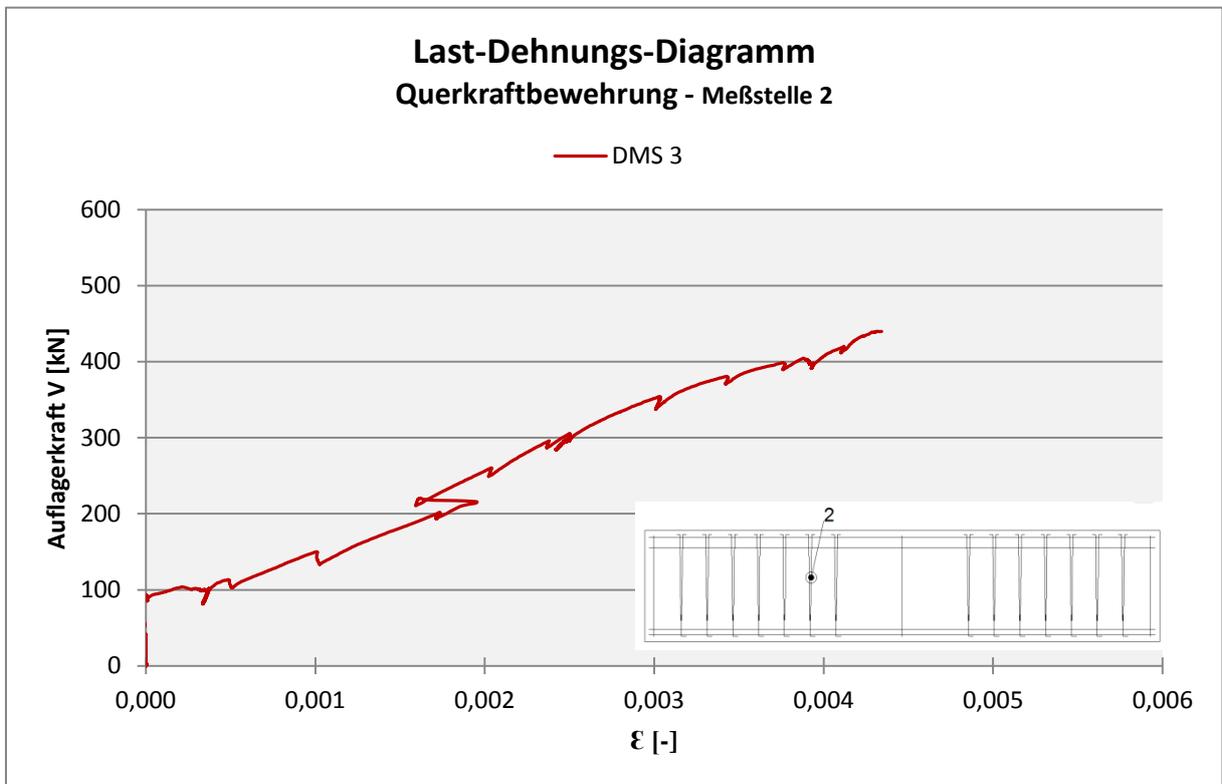
Zeit-Kraft-Diagramm – Körper BA4



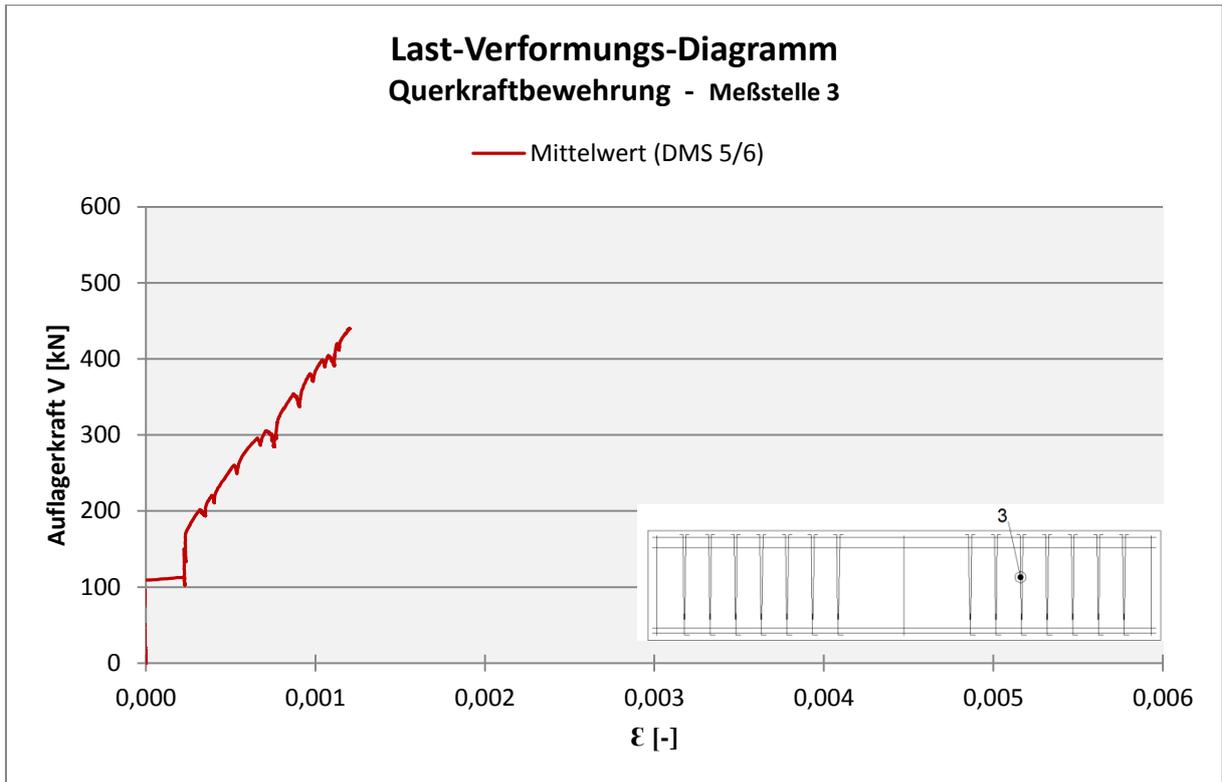
Dehnungsmessung Spannstahl / Meßstelle 5 – Körper BA4



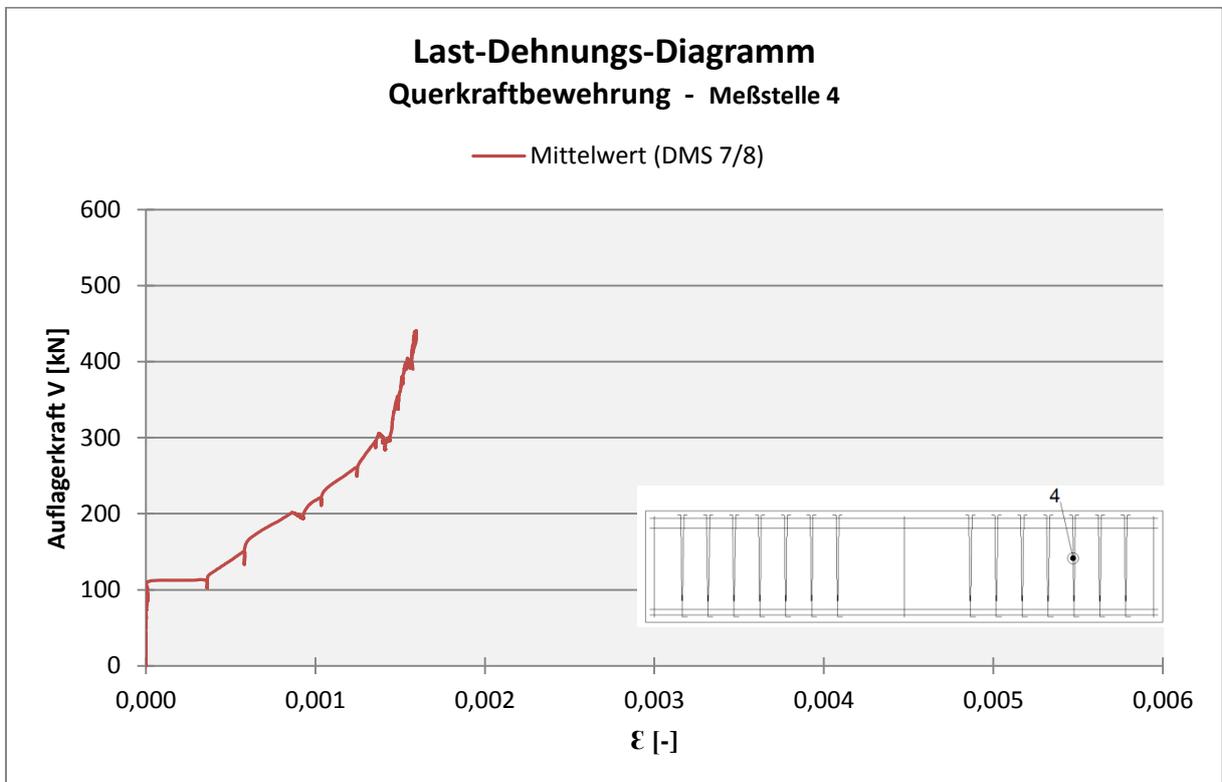
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 1 – Körper BA4



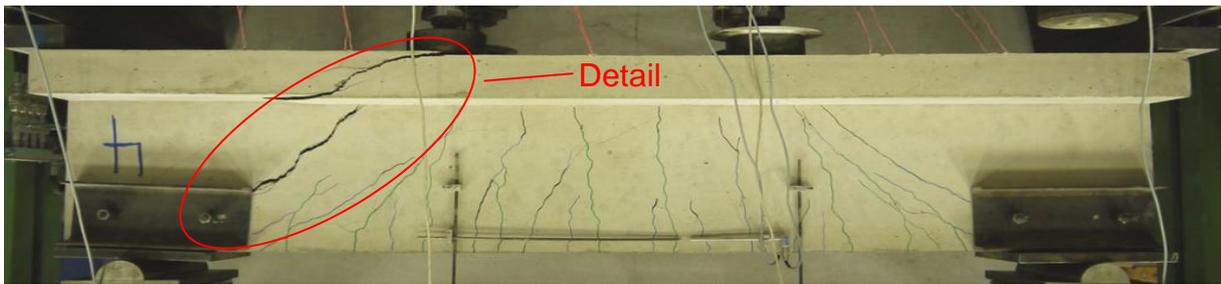
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 2 – Körper BA4



Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 3 – Körper BA4



Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 4 – Körper BA4



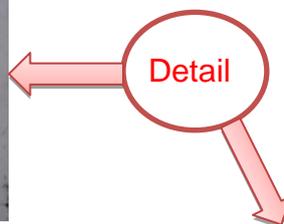
Rissbild - Körper BA4

Laststufe	100kN	200kN	300kN	400kN	500kN
Markierungsfarbe	Grün	Blau	Schwarz	Lila	Orange

Anzahl der Hauptrisse in Höhe der Zugbewehrung = 15



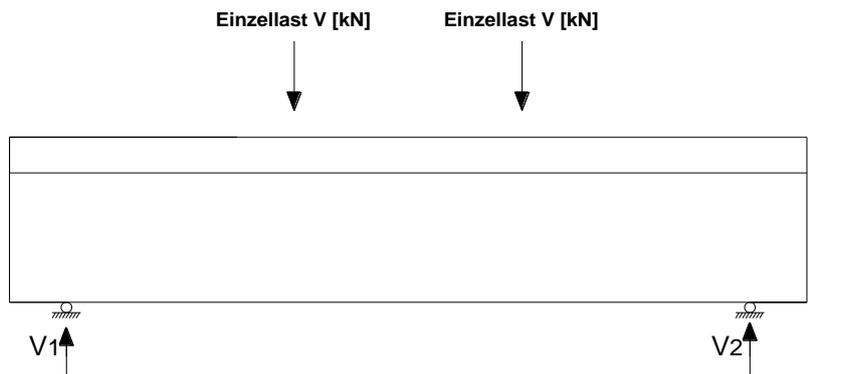
Schrägriß in der Druckzone – Körper BA4



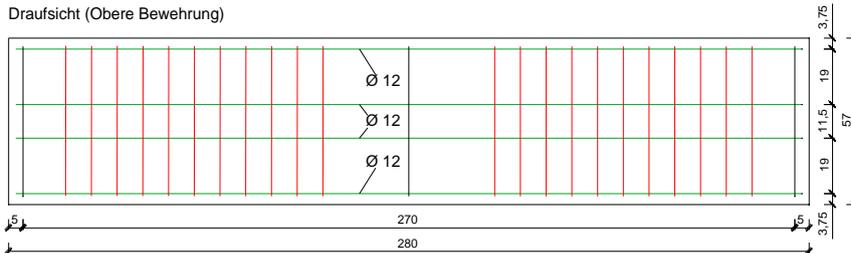
Zugbruch der Bügel (L-Blech) – Körper BA4

Prüfkörper BA5

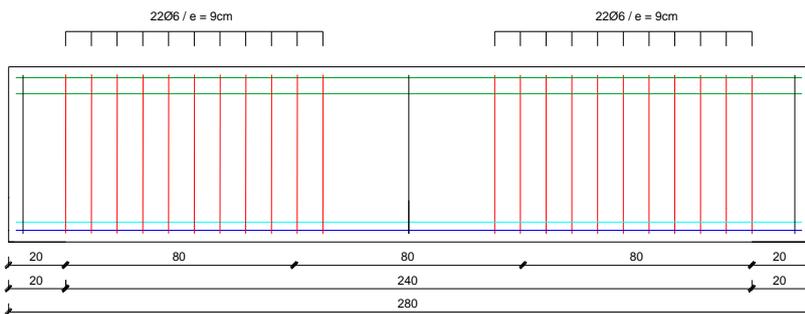
Körper	$f_{c,cube}$	Biegezugbewehrung	Statische Nutzhöhe	Querkraftbewehrung	Belastungsart	Bruchlast V_u	Querkraftbewehrung
	N/mm ²	cm ²					
BA5	36,6	4Ø18 4Ø12	54	22Ø6 e=9cm	Einzellast	482,7	Bügel Ø6mm
		12,4		12,56			



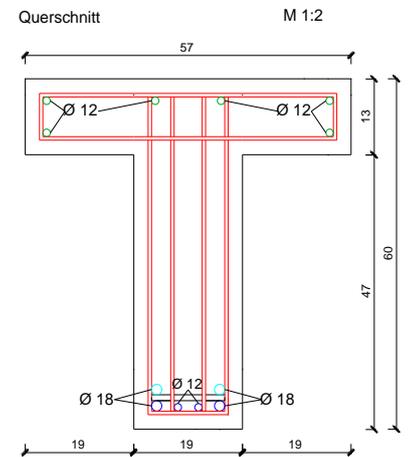
Draufsicht (Obere Bewehrung)



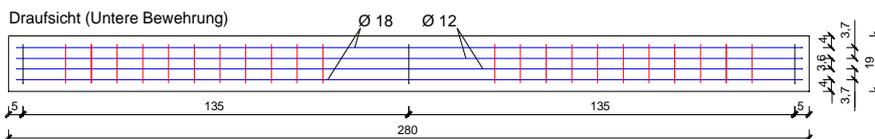
Längsschnitt

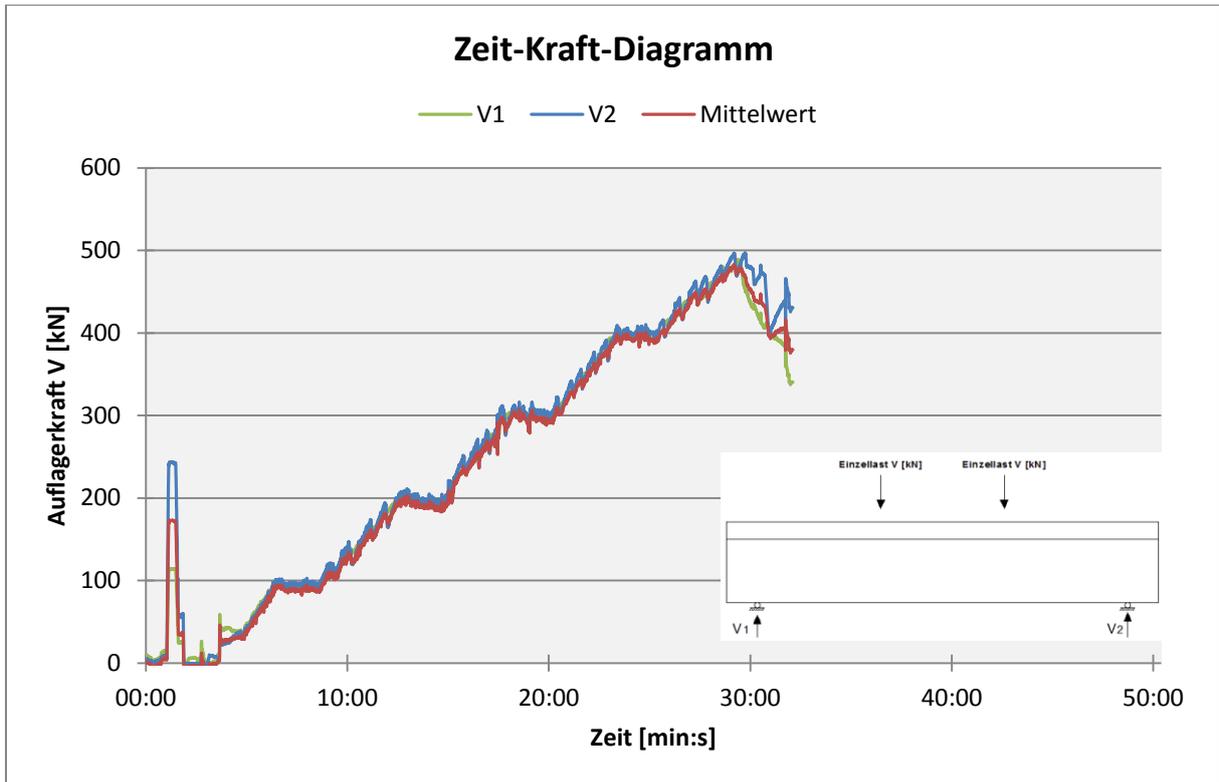


Querschnitt

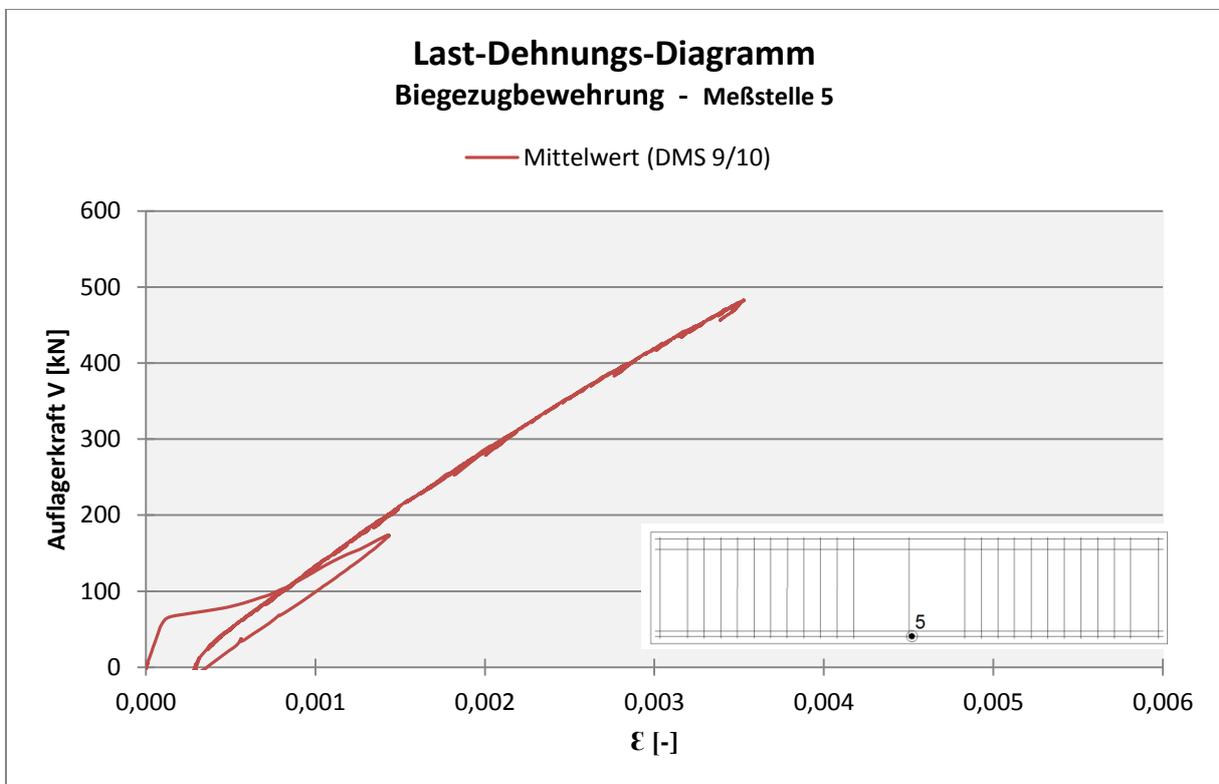


Draufsicht (Untere Bewehrung)

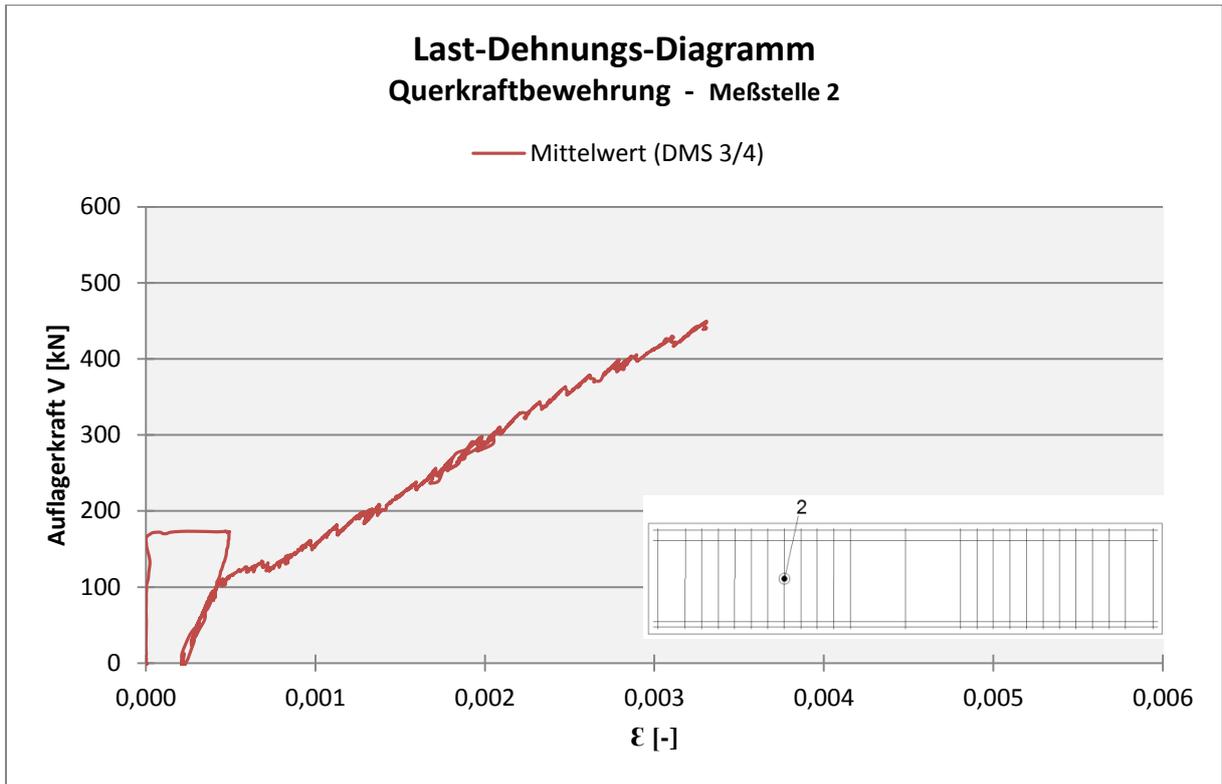




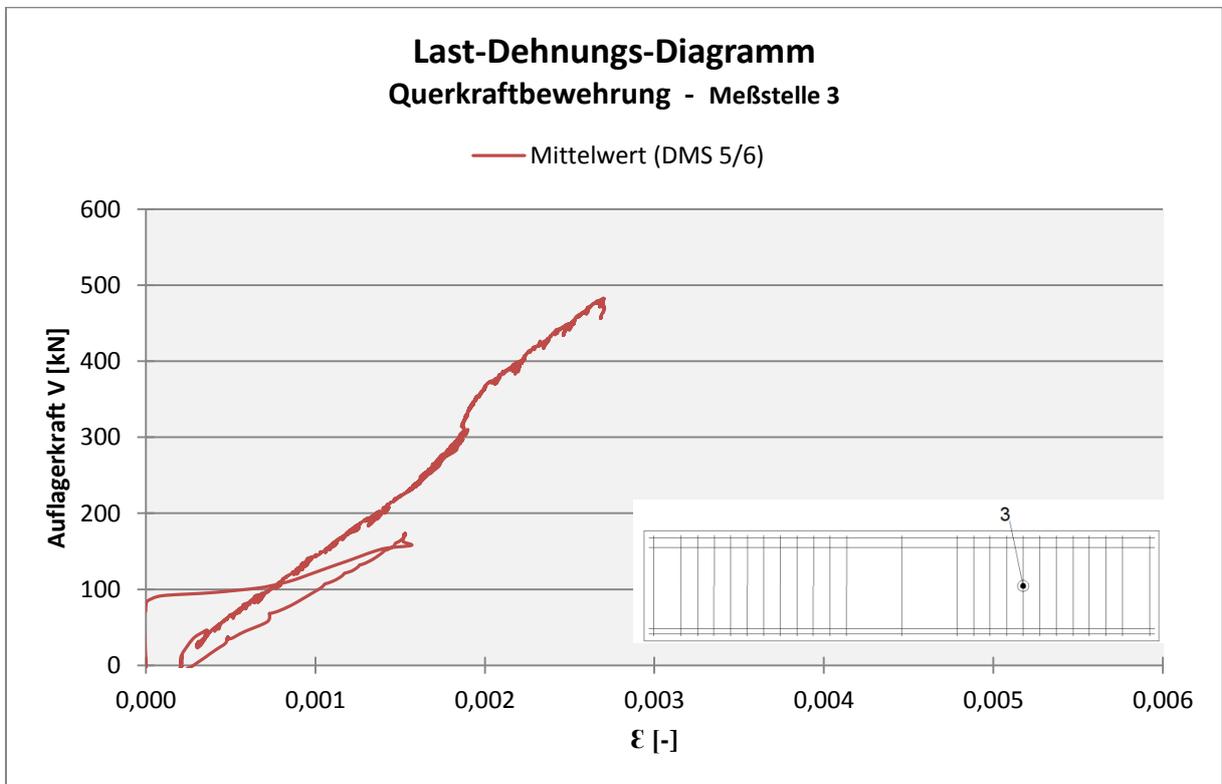
Zeit-Kraft-Diagramm – Körper BA5



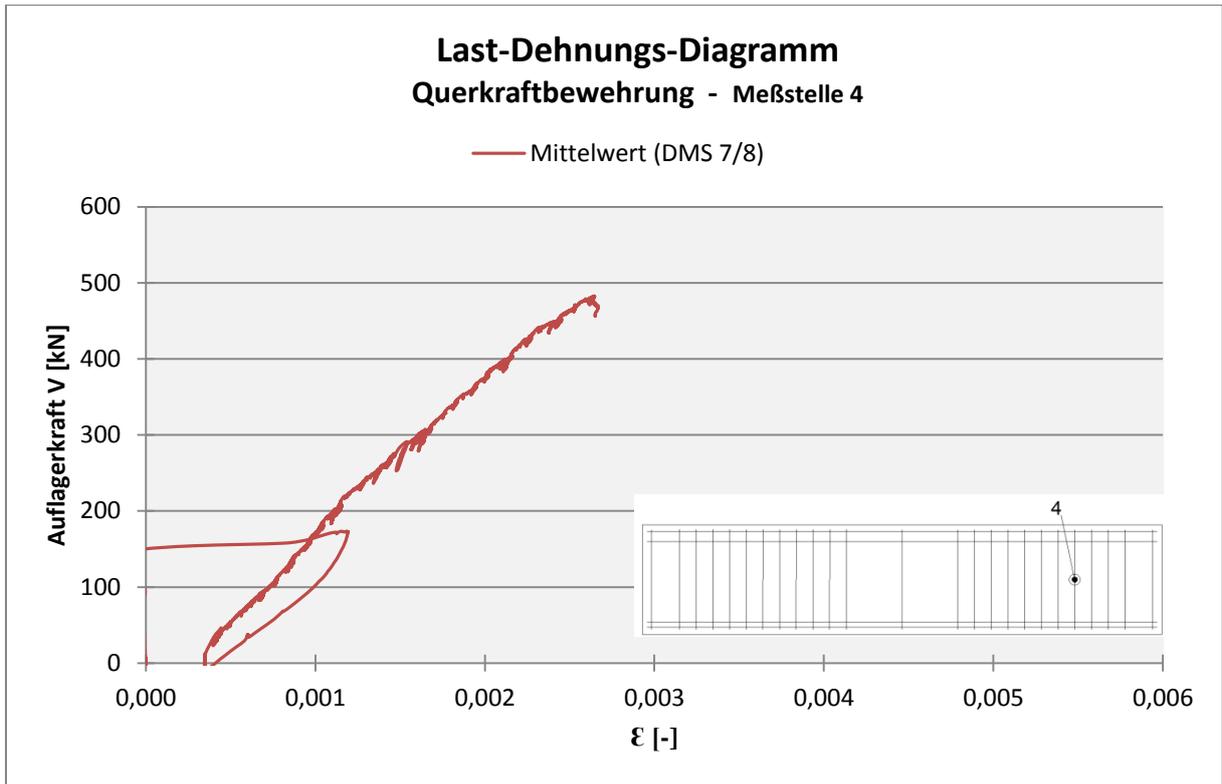
Dehnungsmessung Spannstahl / Meßstelle 5 – Körper BA5



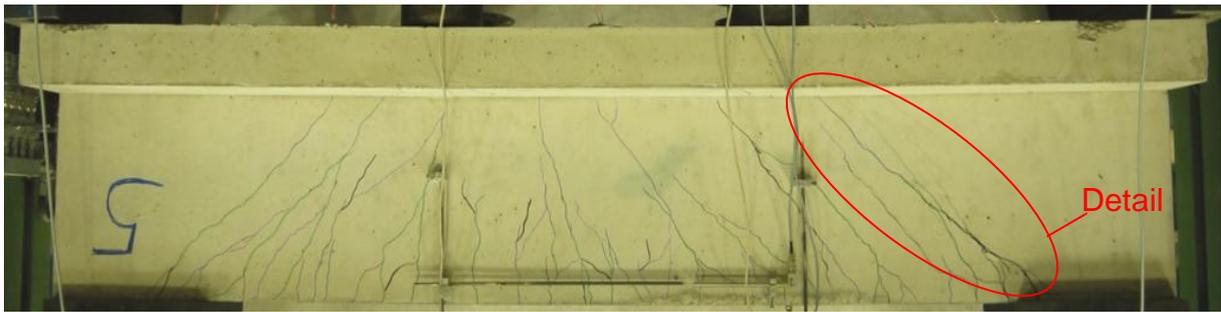
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 2 – Körper BA5



Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 3 – Körper BA5



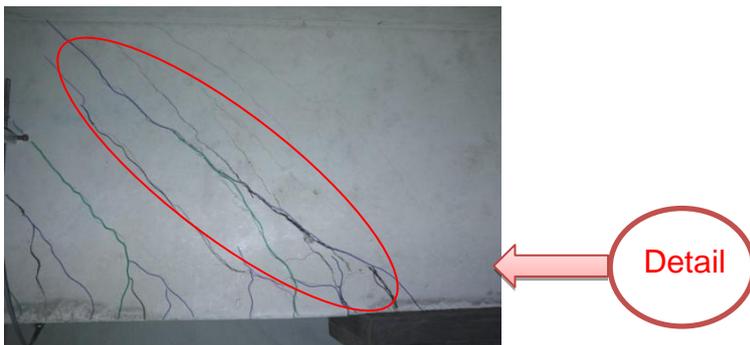
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 4 – Körper BA5



Rissbild – Körper BA5

Laststufe	100kN	200kN	300kN	400kN	500kN
Markierungsfarbe	Grün	Blau	Schwarz	Lila	Orange

Anzahl der Hauptrisse in Höhe der Zugbewehrung = 16

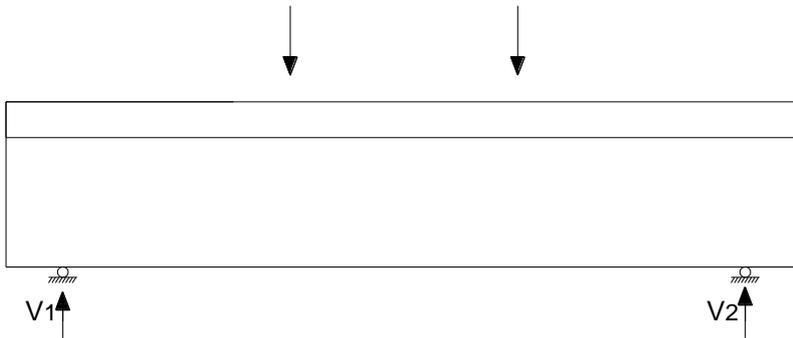


Schrägriss – Körper BA5

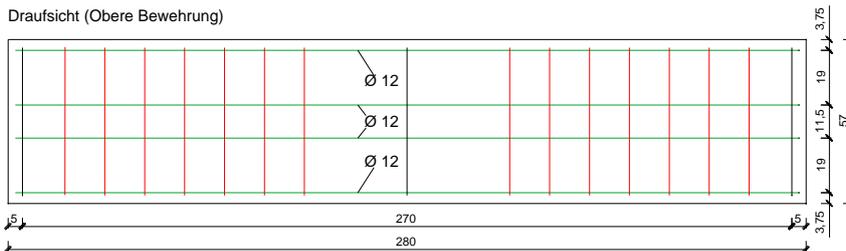
Prüfkörper BA6

Körper	$f_{c, cube}$	Biegezugbewehrung	statische Nutzhöhe	Querkraftbewehrung	Belastungsart	Bruchlast V_u	Querkraftbewehrung
	N/mm ²	cm ²					
BA6	36,3	4Ø18 4Ø12	54	7Ø6 e=14cm	Einzellast	419,6	1 Bügel ø6mm
		12,4		4,07			

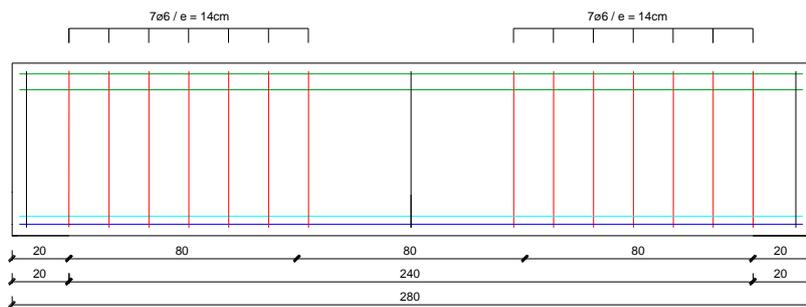
Einzellast V [kN] Einzellast V [kN]



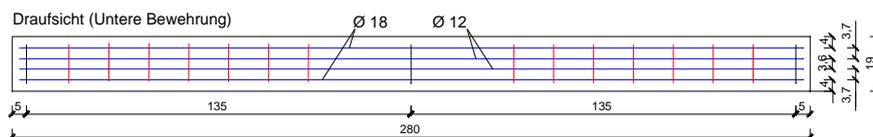
Draufsicht (Obere Bewehrung)



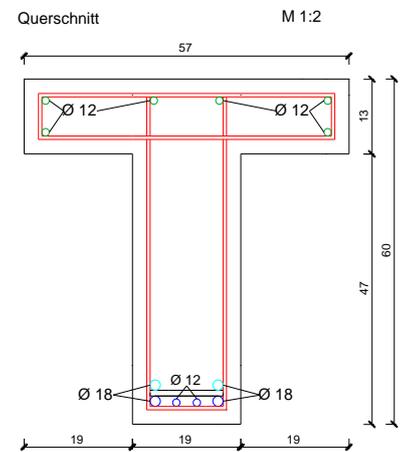
Längsschnitt

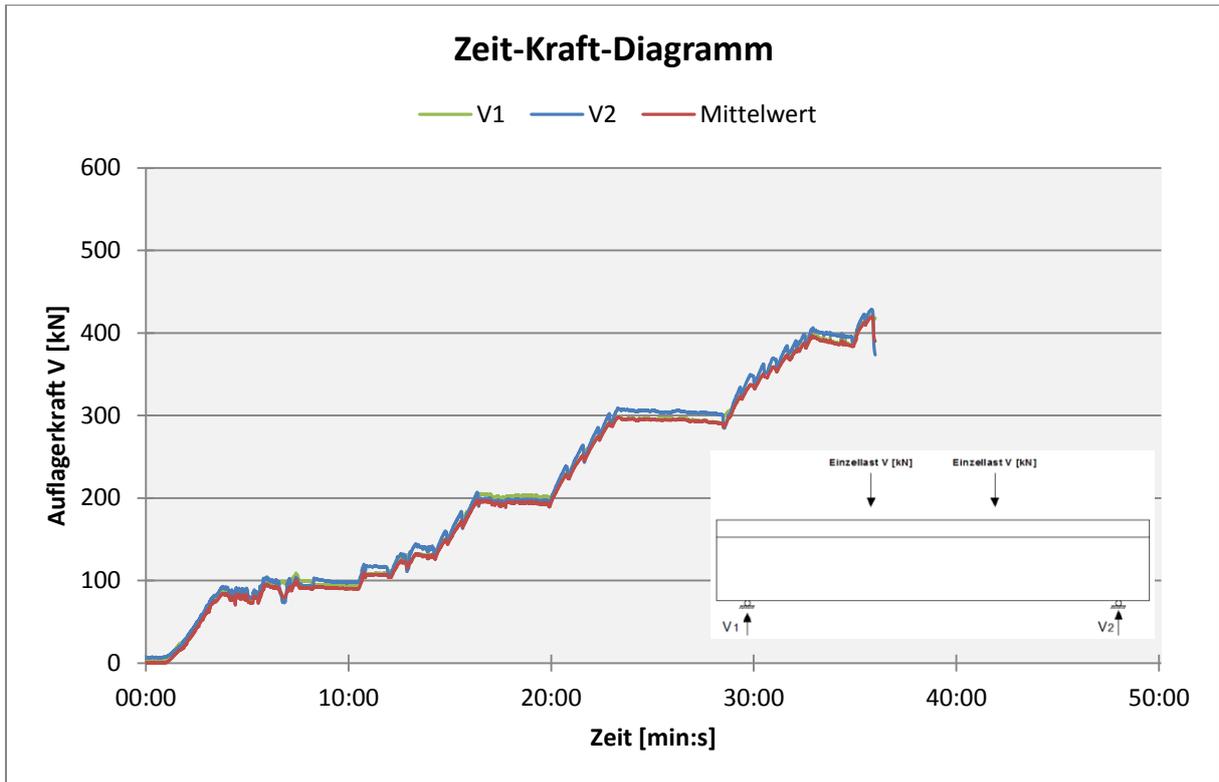


Draufsicht (Untere Bewehrung)

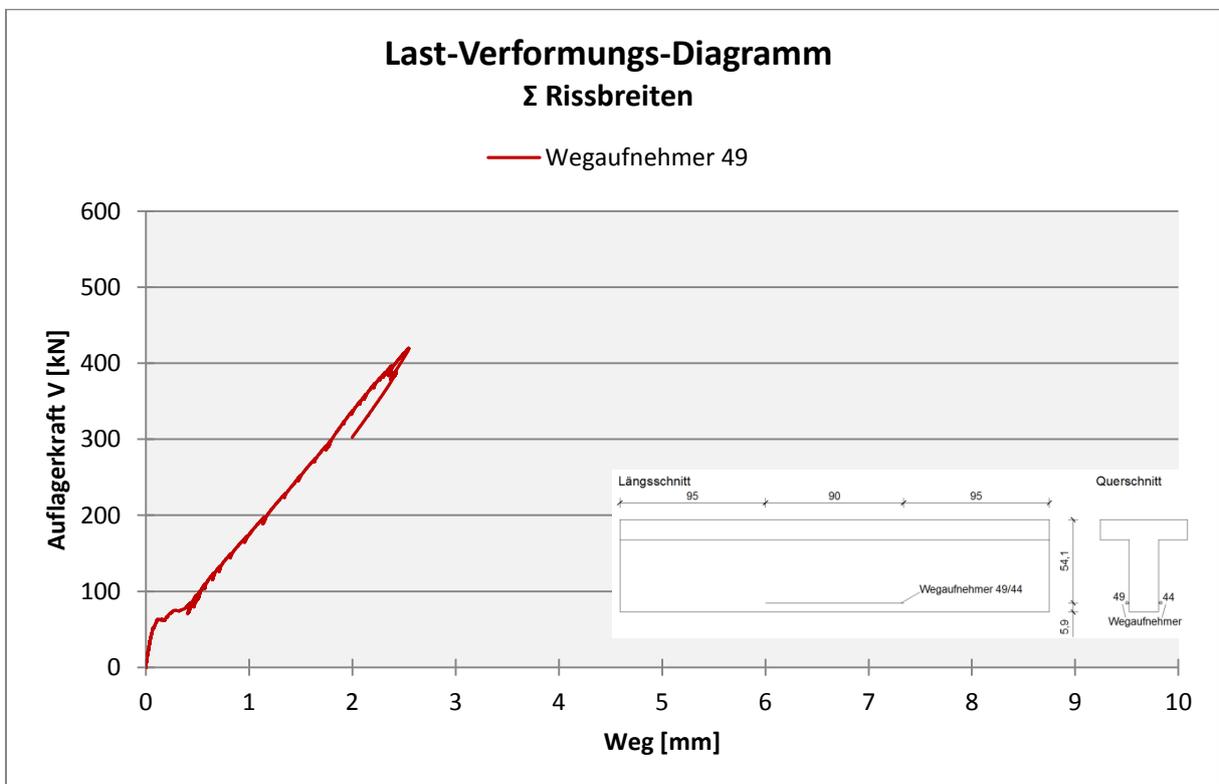


Querschnitt

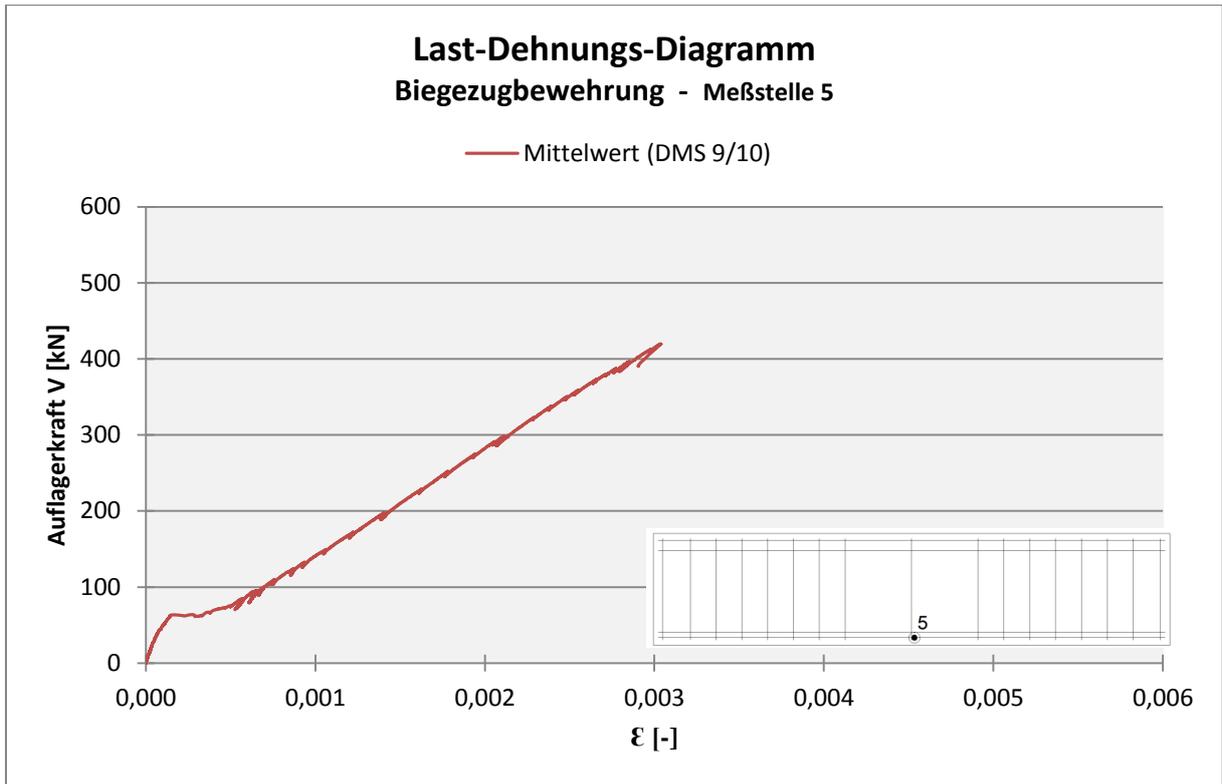




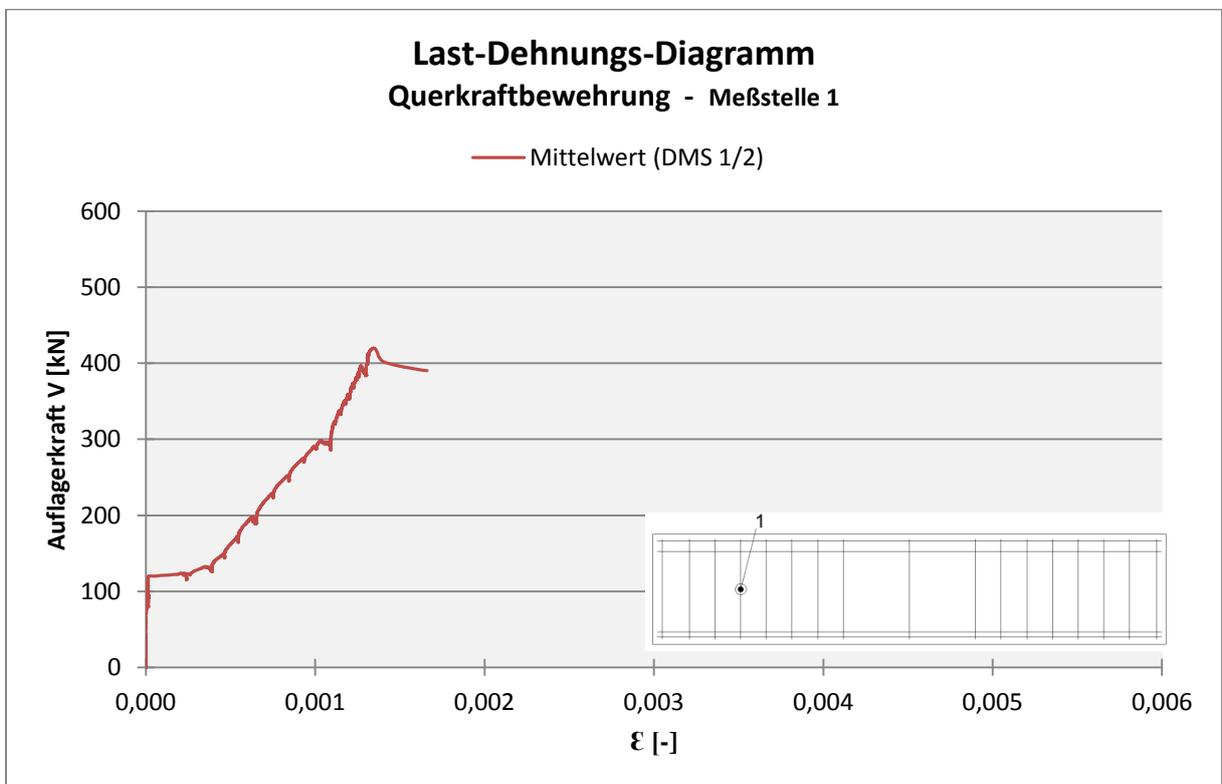
Zeit-Kraft-Diagramm – Körper BA6



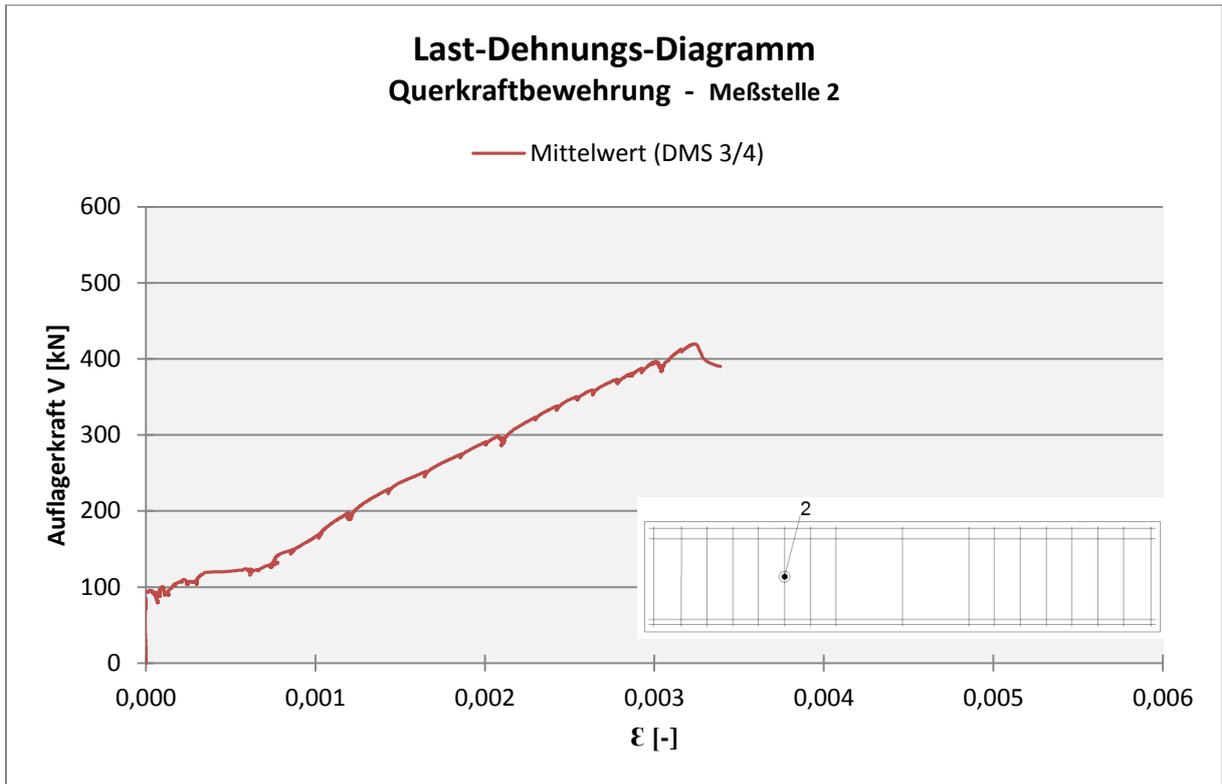
Messwerte der Σ der Rissbreiten in Höhe der Biegezugbewehrung – Körper BA6



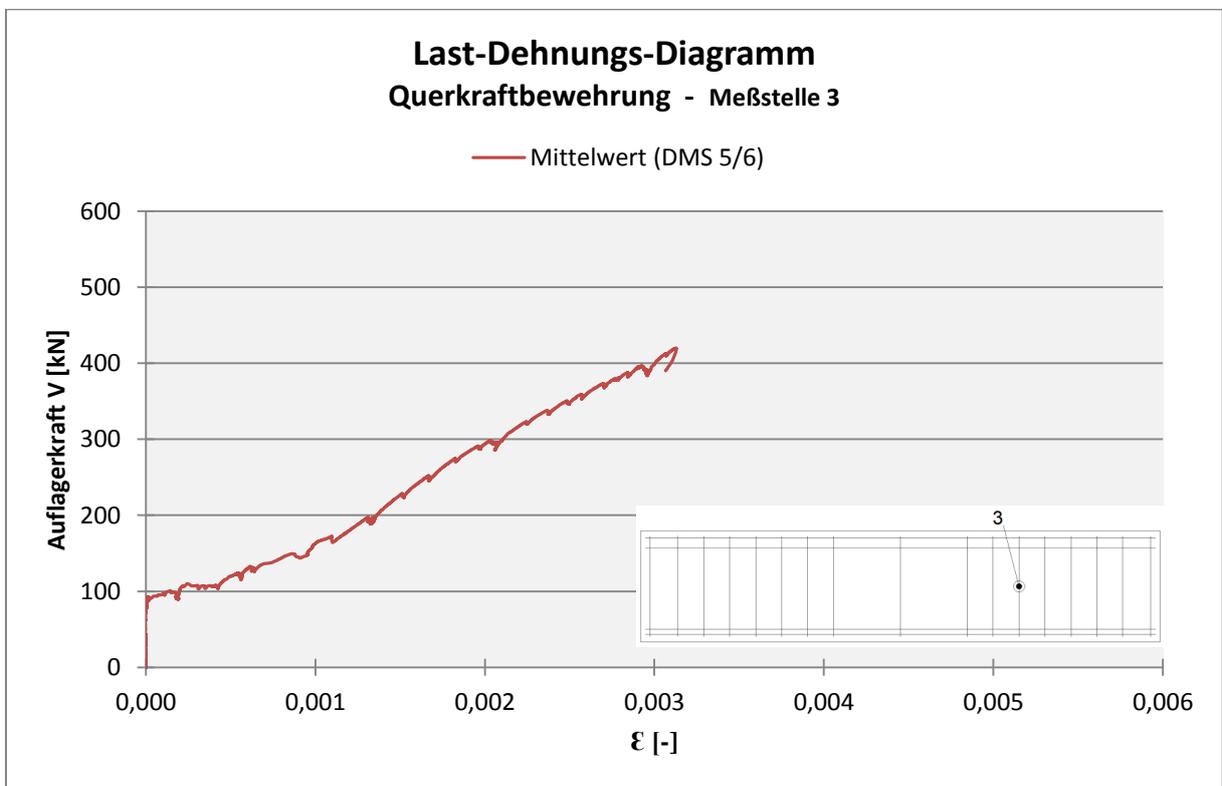
Dehnungsmessung Spannstahl / Meßstelle 5 – Körper BA6



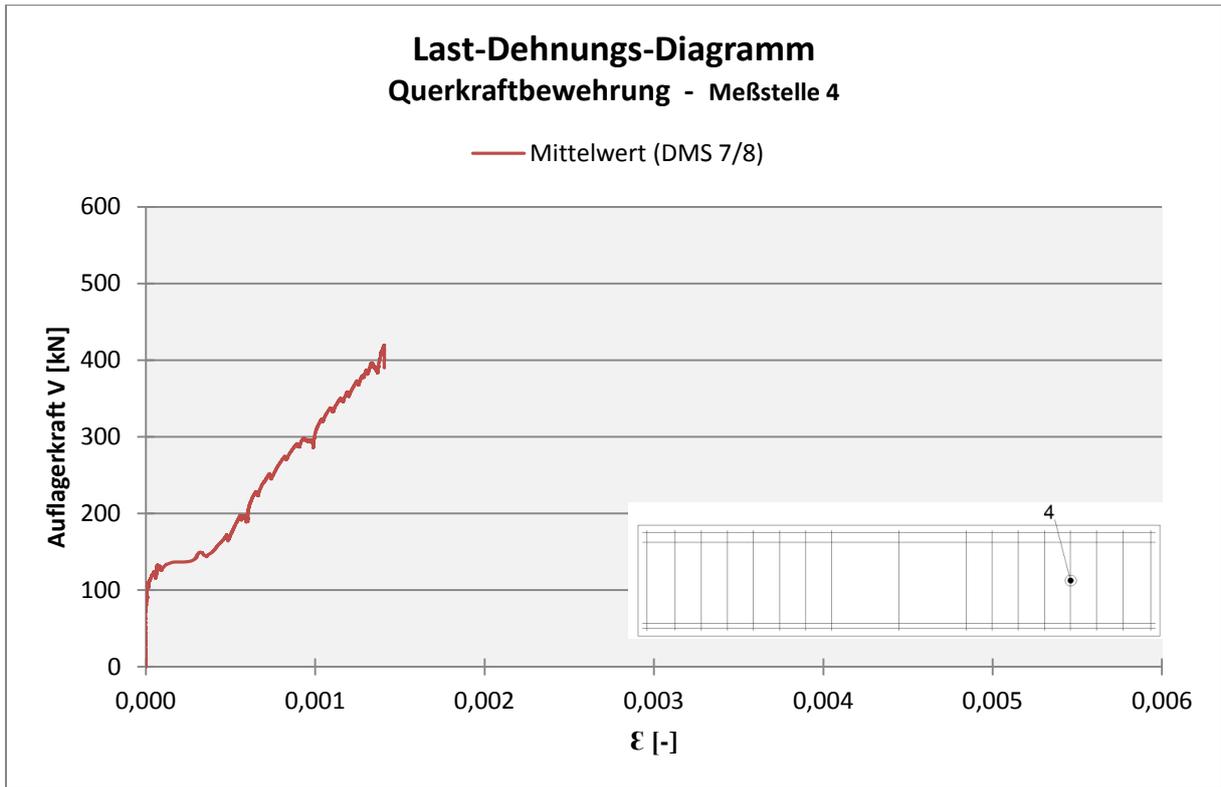
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 1 – Körper BA6



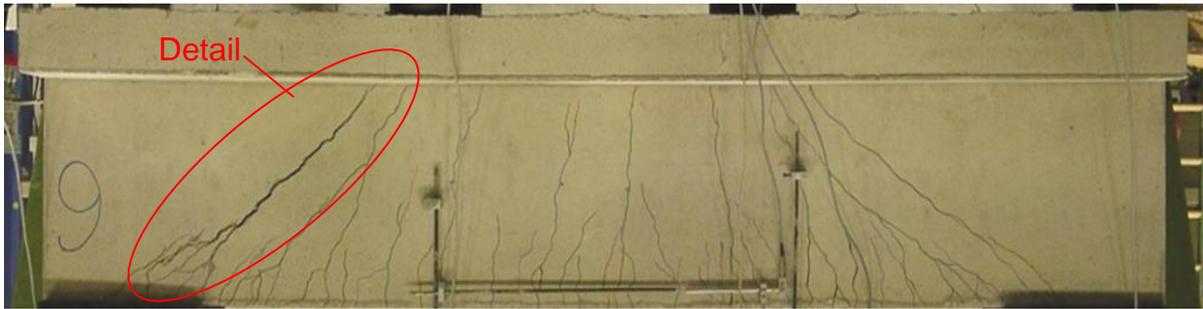
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 2 – Körper BA6



Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 3 – Körper BA6



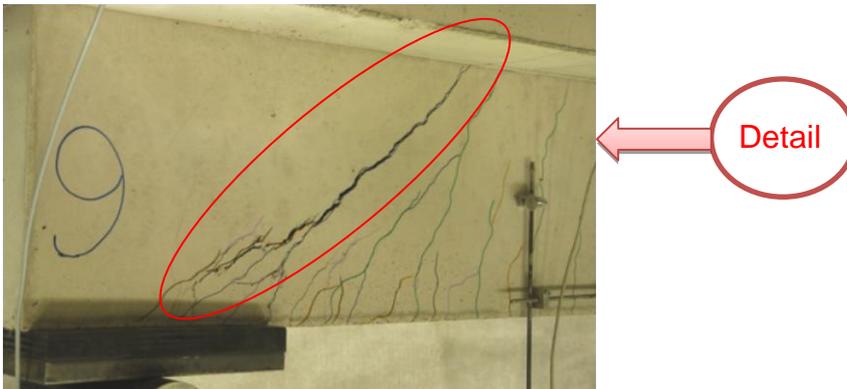
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 4 – Körper BA6



Rissbild – Körper BA6

Laststufe	100kN	200kN	300kN	400kN	500kN
Markierungsfarbe	Grün	Blau	Schwarz	Lila	Orange

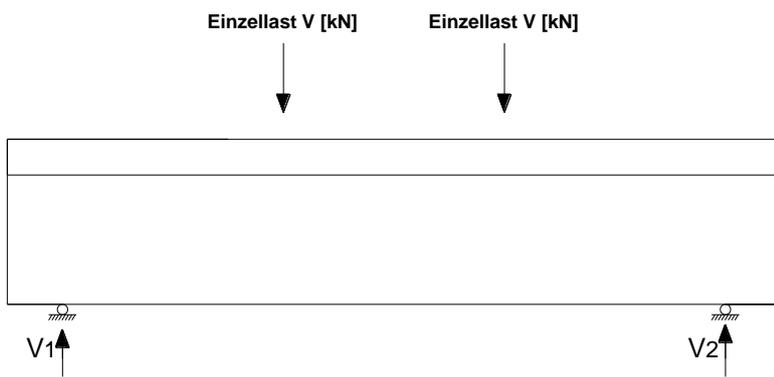
Anzahl der Hauptrisse in Höhe der Zugbewehrung = 14



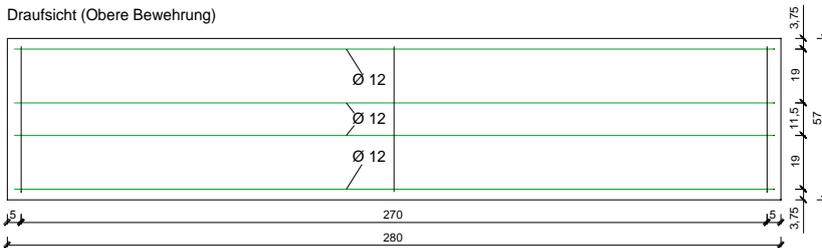
Schrägriss – Körper BA6

Prüfkörper BB1

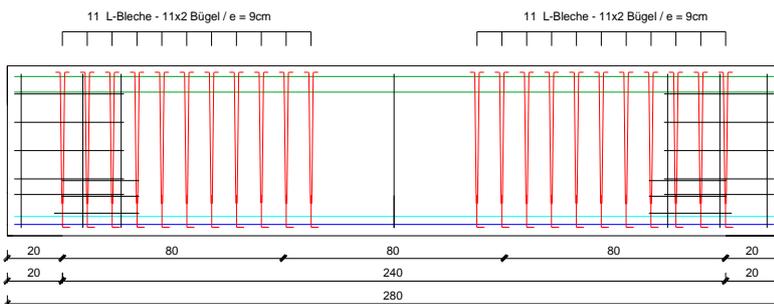
Körper	$f_{c, cube}$	Biegezugbewehrung	statische Nutzhöhe	Querkraftbewehrung	Belastungsart	Bruchlast V_u	Querkraftbewehrung
	N/mm ²						
BB1	26,9	4Ø18	54	22Ø6	Einzellast	568,3	L-Blech, t=5mm, 2 Bügel
		4Ø12		12,56			



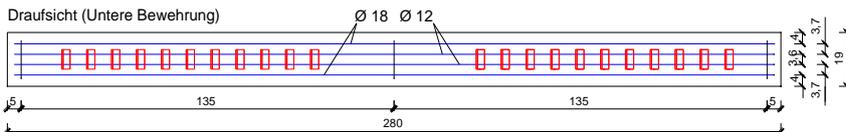
Draufsicht (Obere Bewehrung)



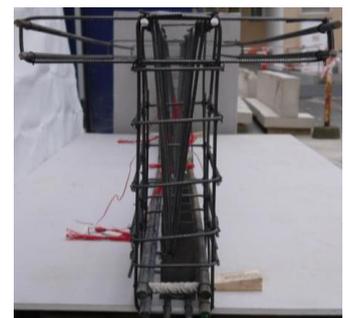
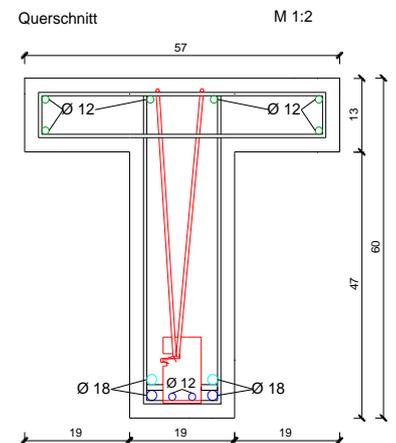
Längsschnitt

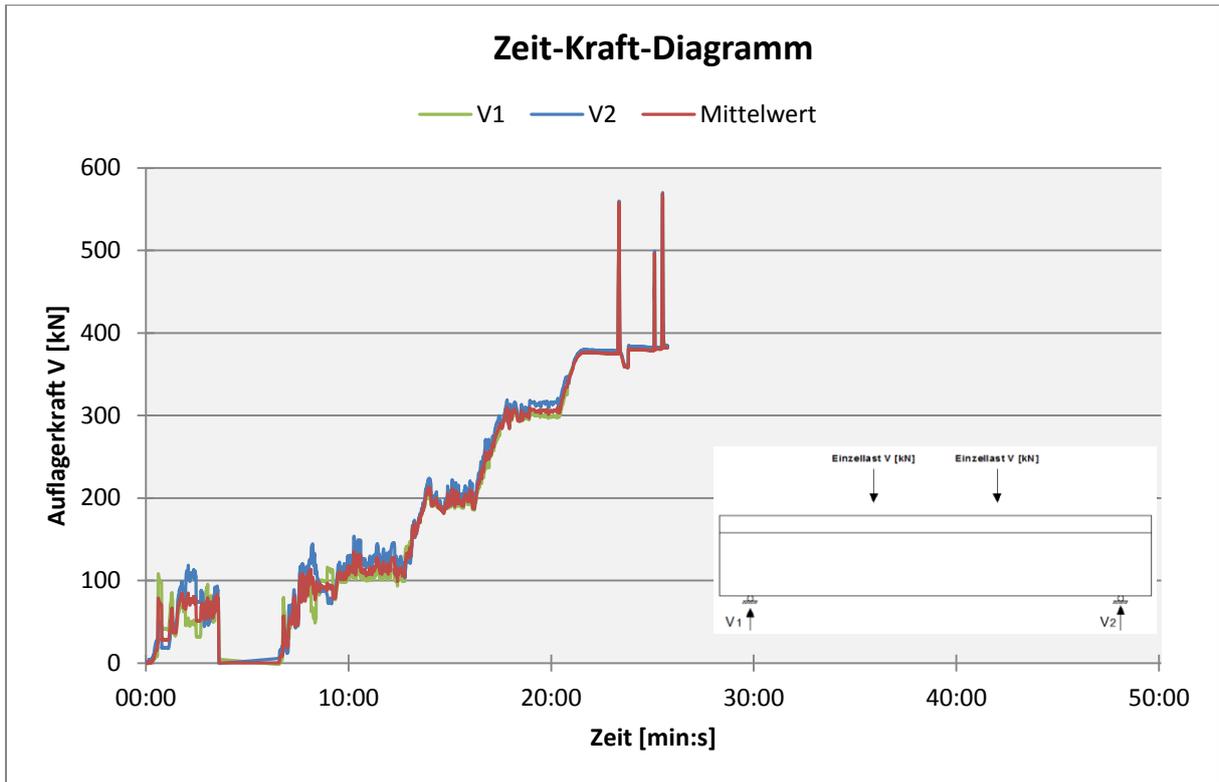


Draufsicht (Untere Bewehrung)

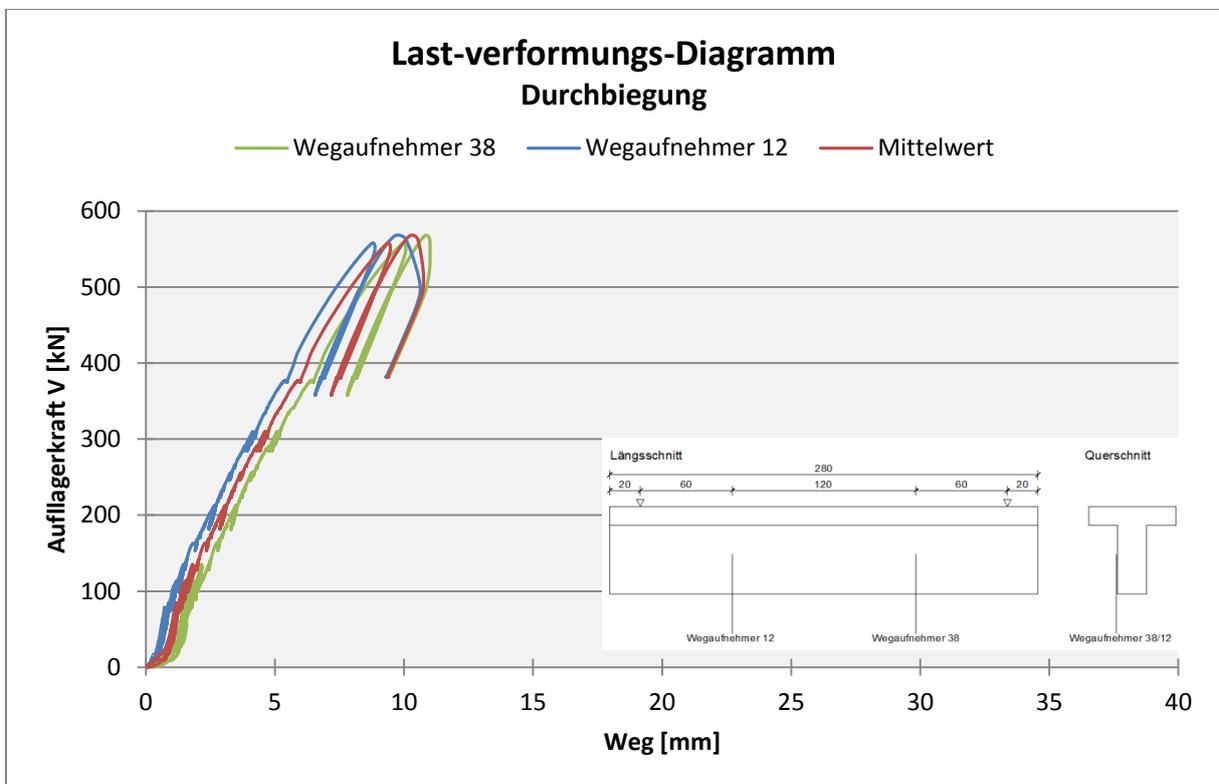


Querschnitt

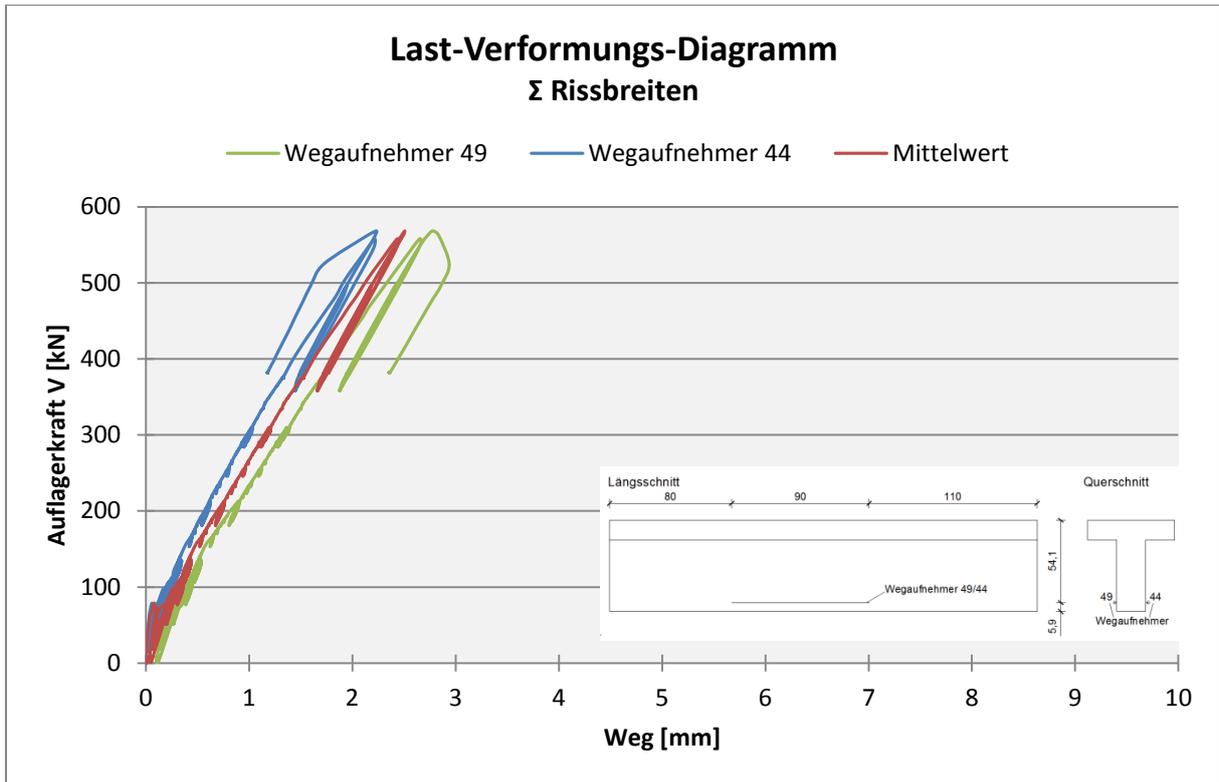




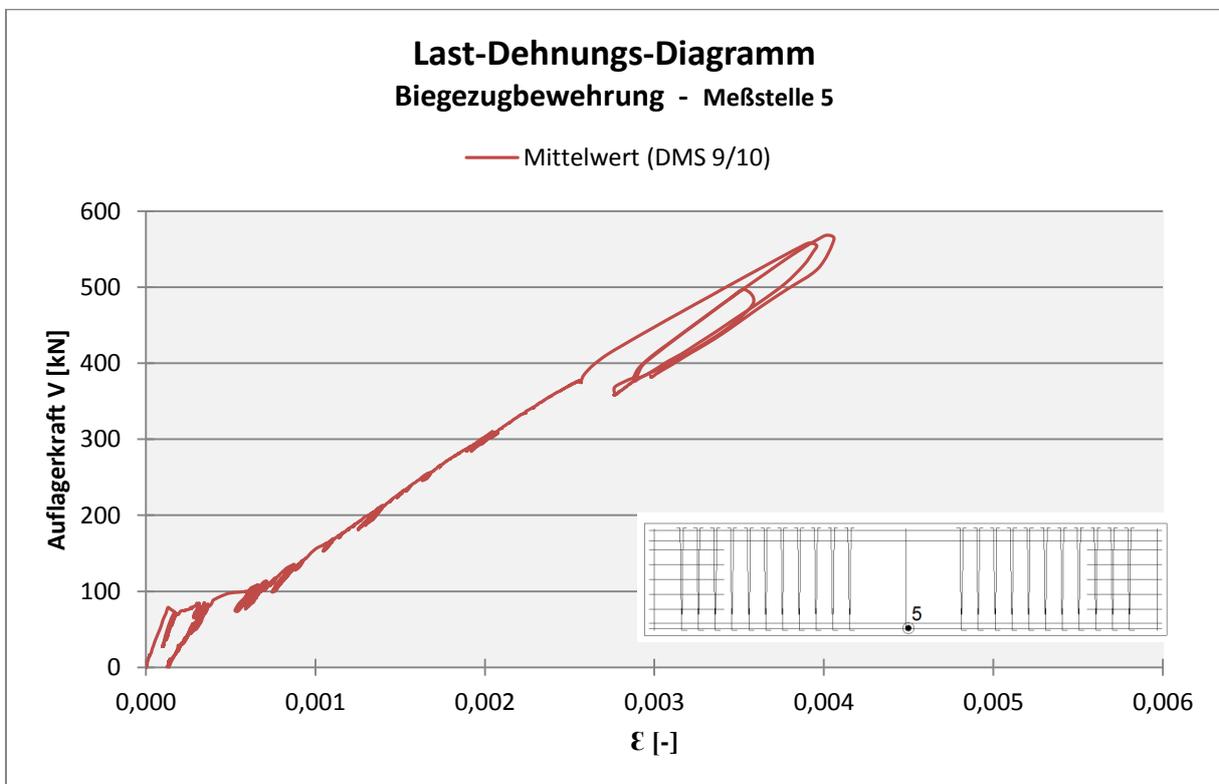
Zeit-Kraft-Diagramm – Körper BB1



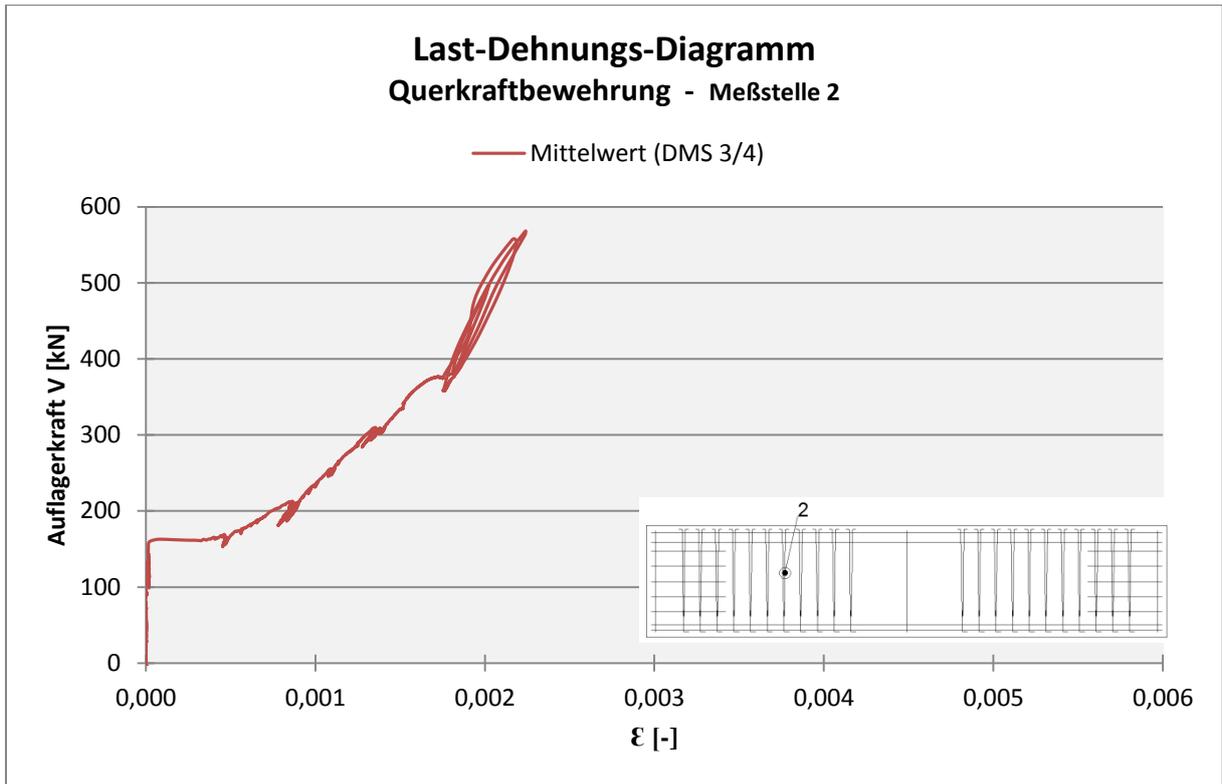
Messwerte der Durchbiegung im Viertelpunkt – Körper BB1



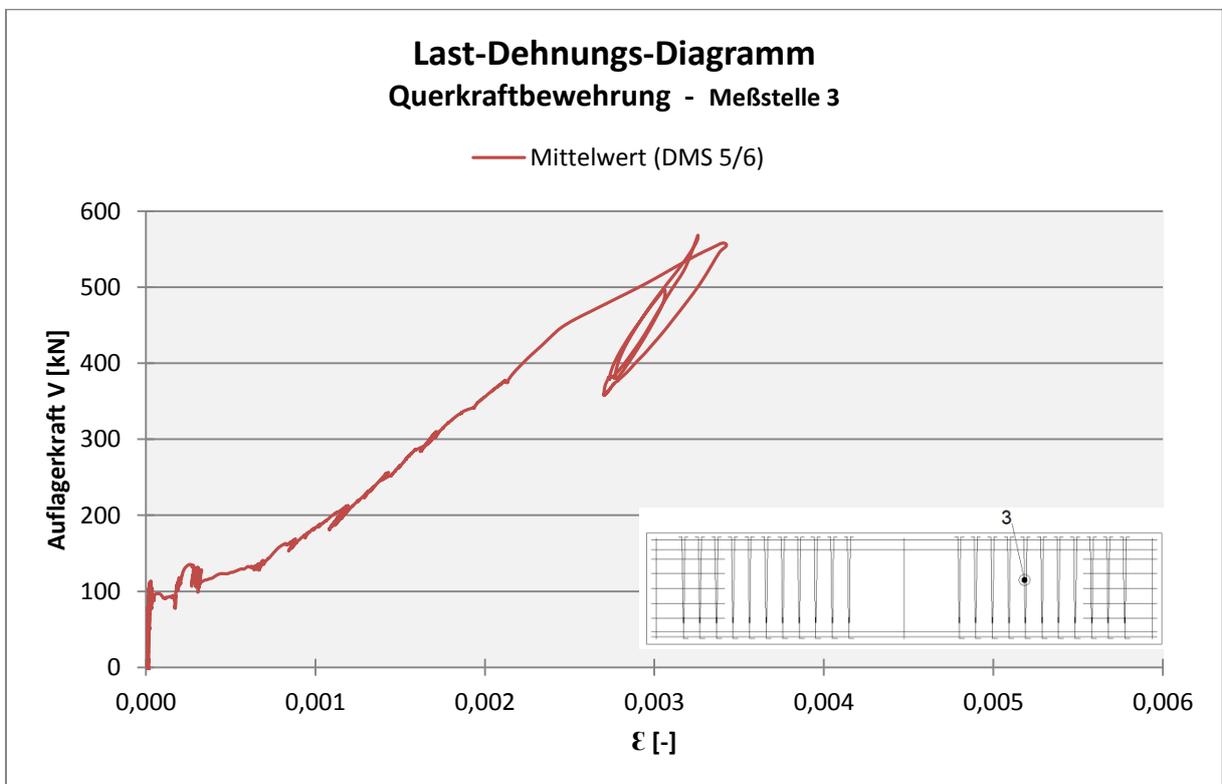
Messwerte der Σ der Rissbreiten in Höhe der Biegezugbewehrung – Körper BB1



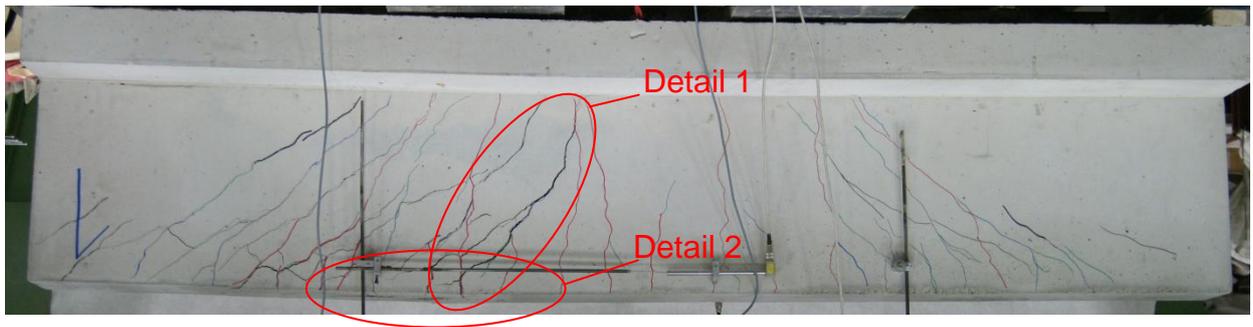
Dehnungsmessung Spannstahl / Meßstelle 5 – Körper BB1



Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 2 – Körper BB1



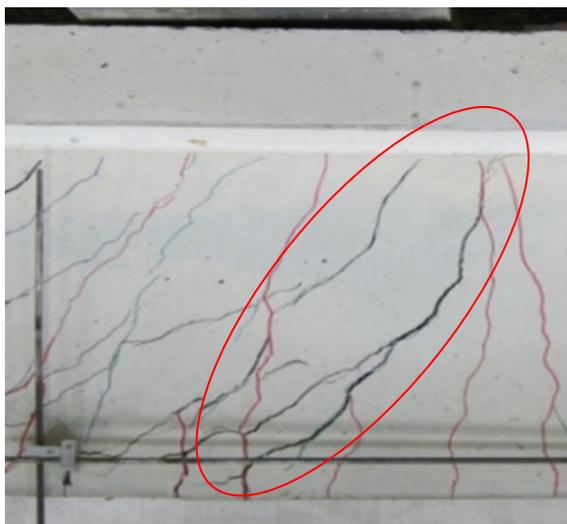
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 3 – Körper BB1



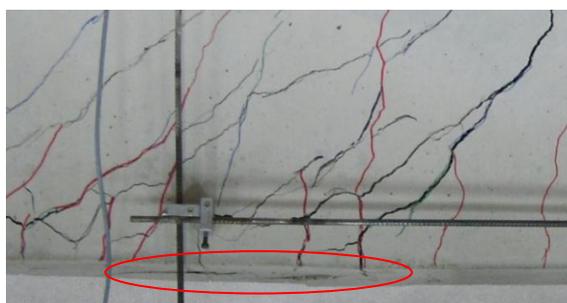
Rissbild – Körper BB1

Laststufe	100kN	200kN	300kN	400kN
Markierungsfarbe	Rot	Blau	Grün	Schwarz

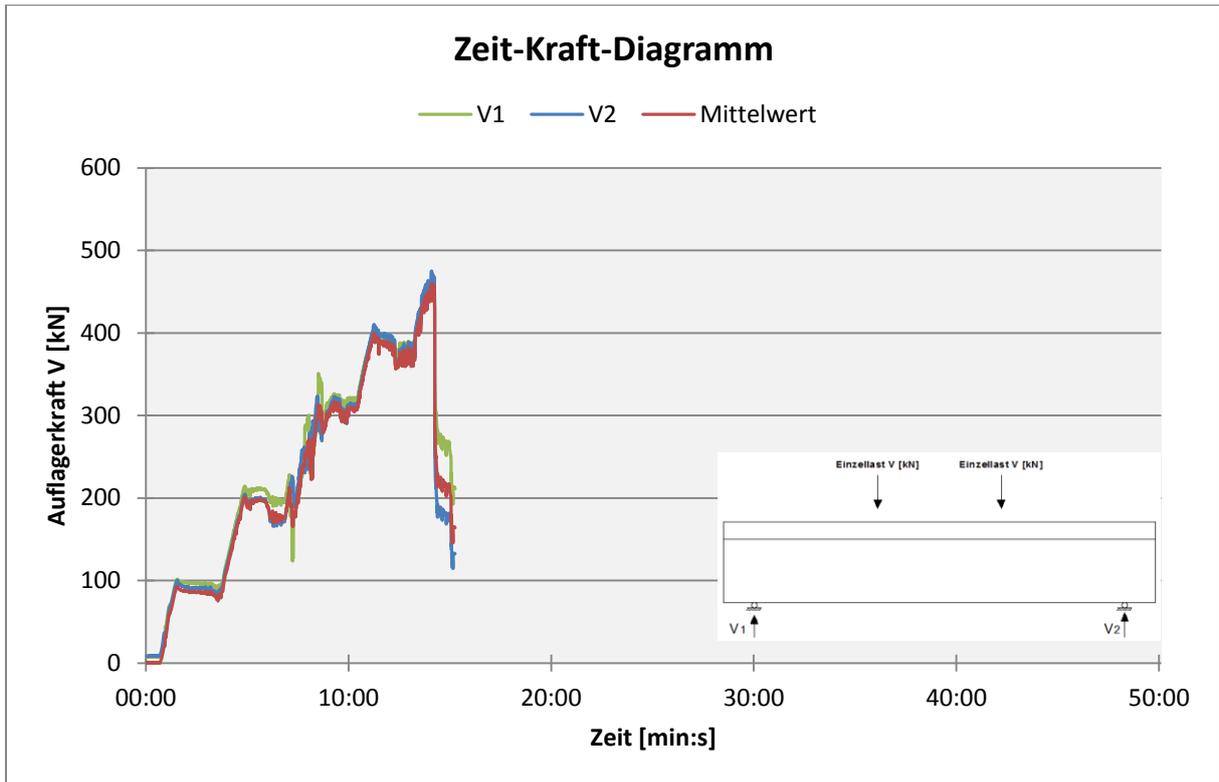
Anzahl der Hauptrisse in Höhe der Zugbewehrung = 17



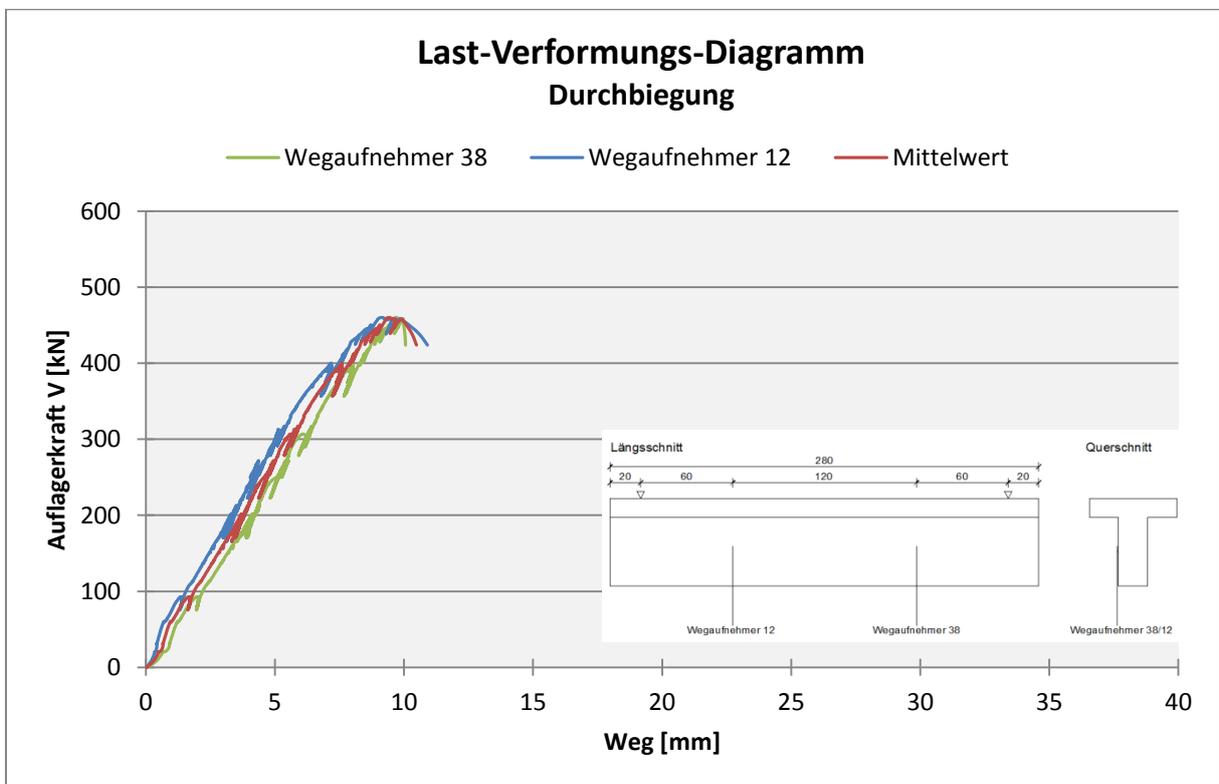
Fließen der Bügel (L-Blech) – Körper BB1



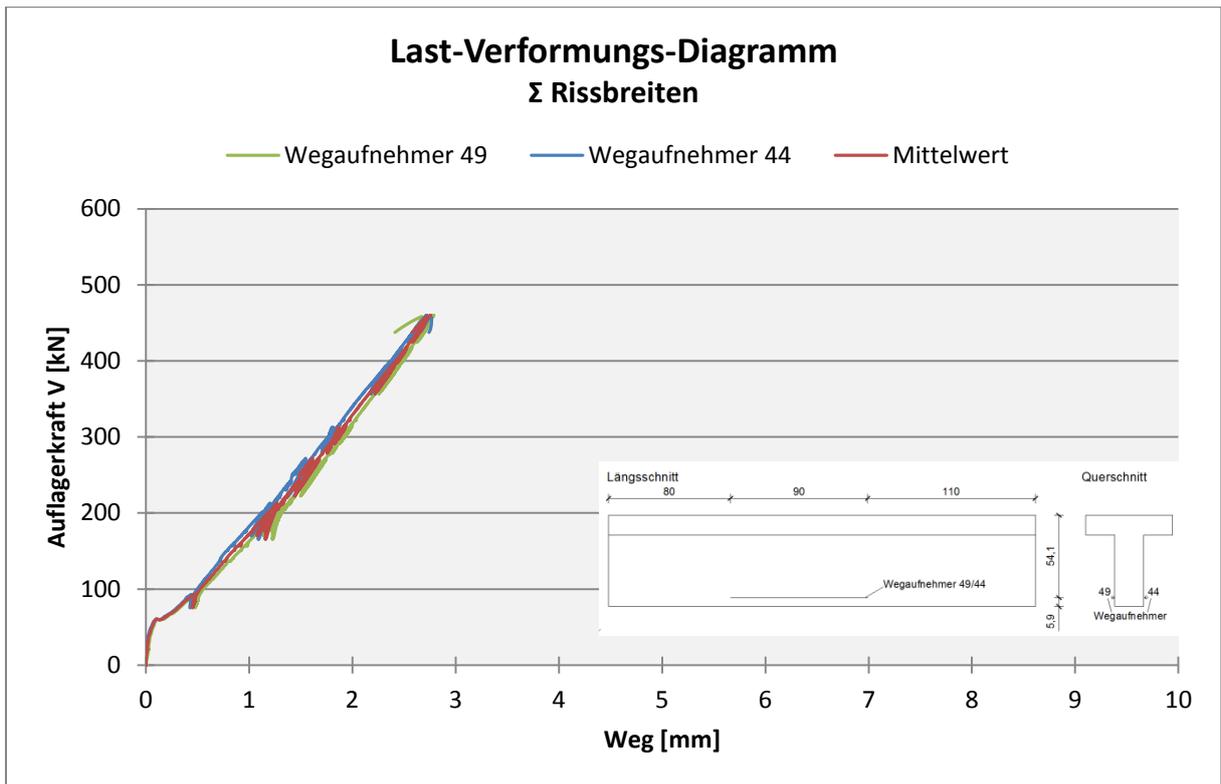
Überschreitung der Betonzugfestigkeit im Steg – Körper BB1



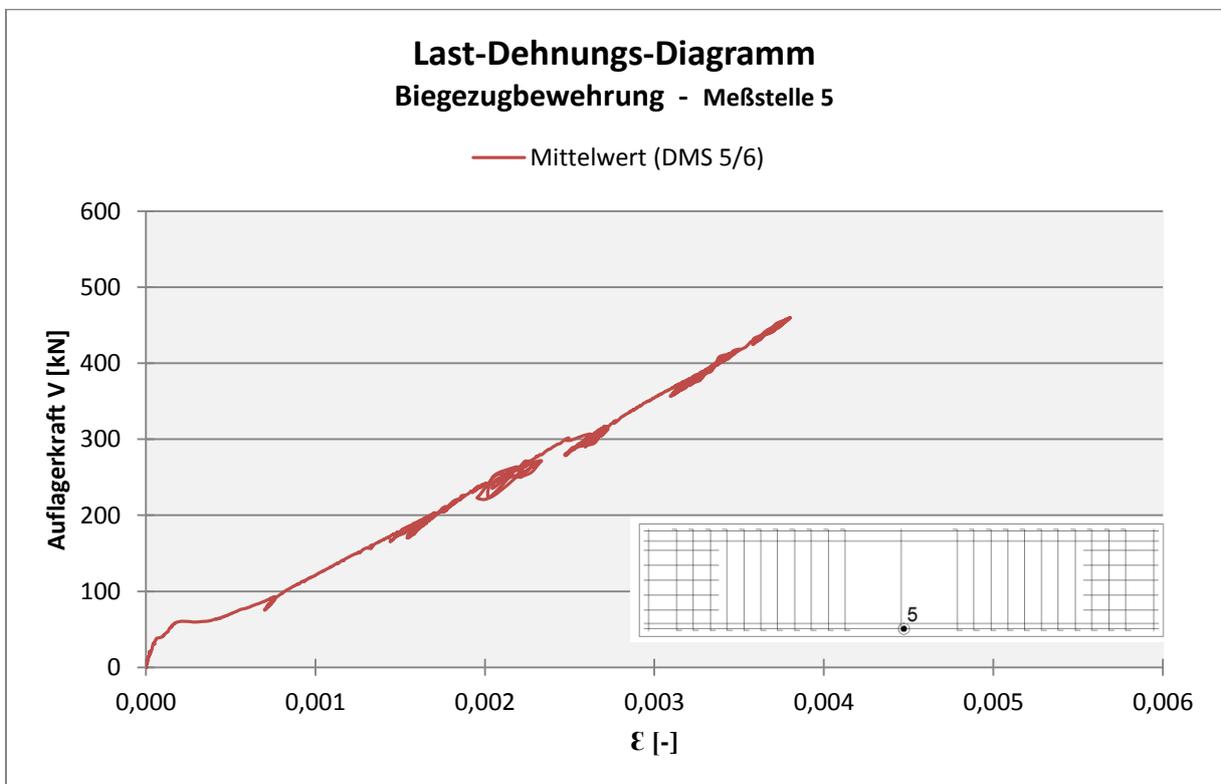
Zeit-Kraft-Diagramm – Körper BB2



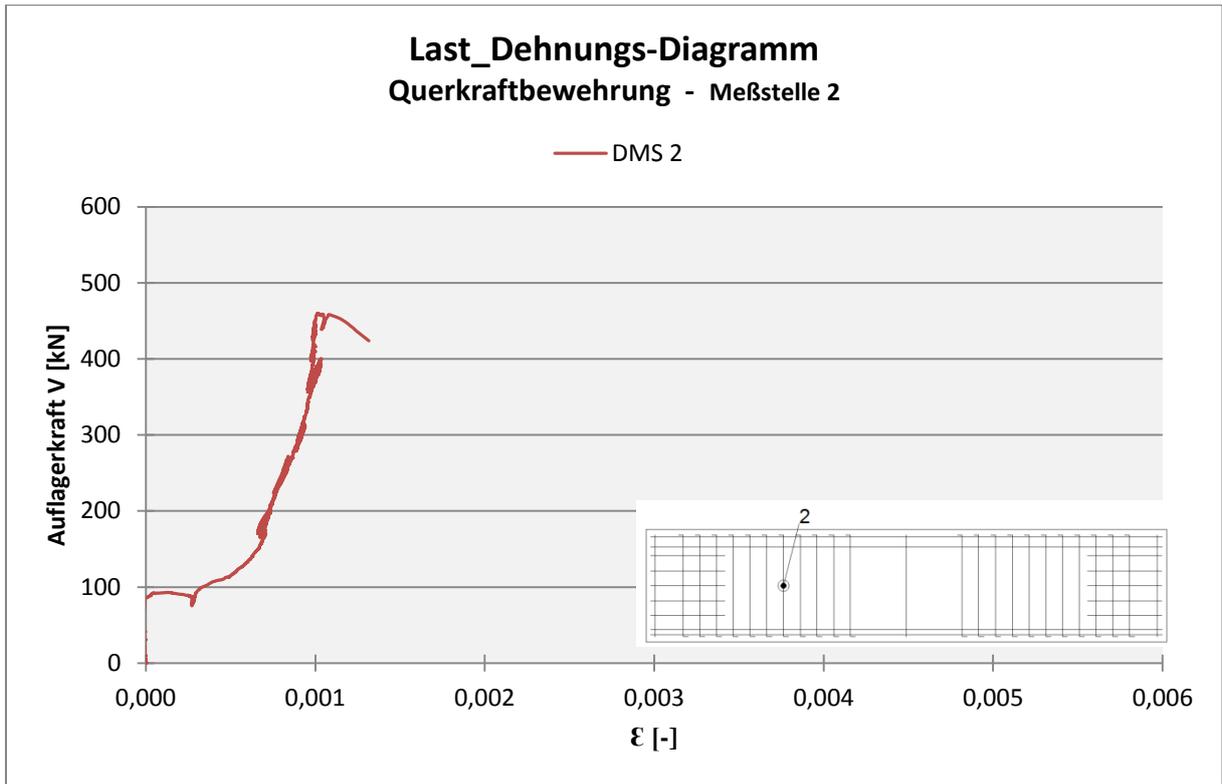
Messwerte der Durchbiegung im Viertelpunkt – Körper BB2



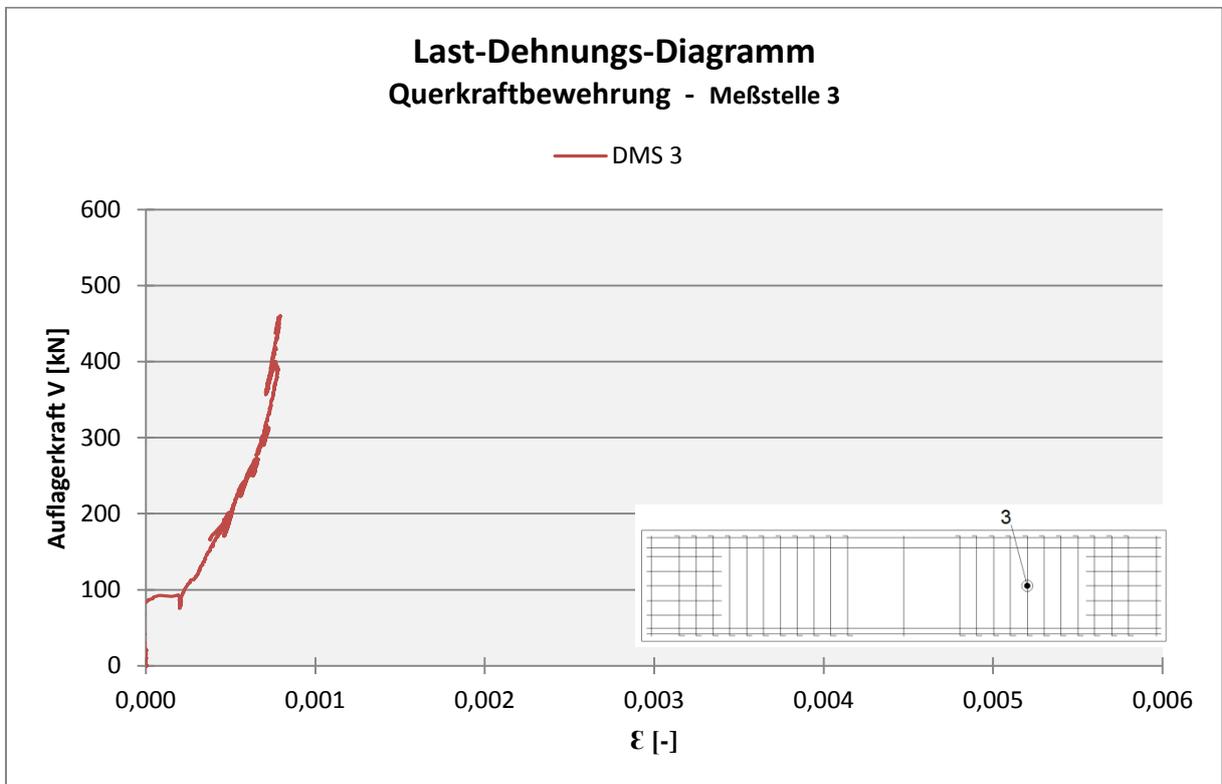
Messwerte der Σ der Rissbreiten in Höhe der Biegezugbewehrung – Körper BB2



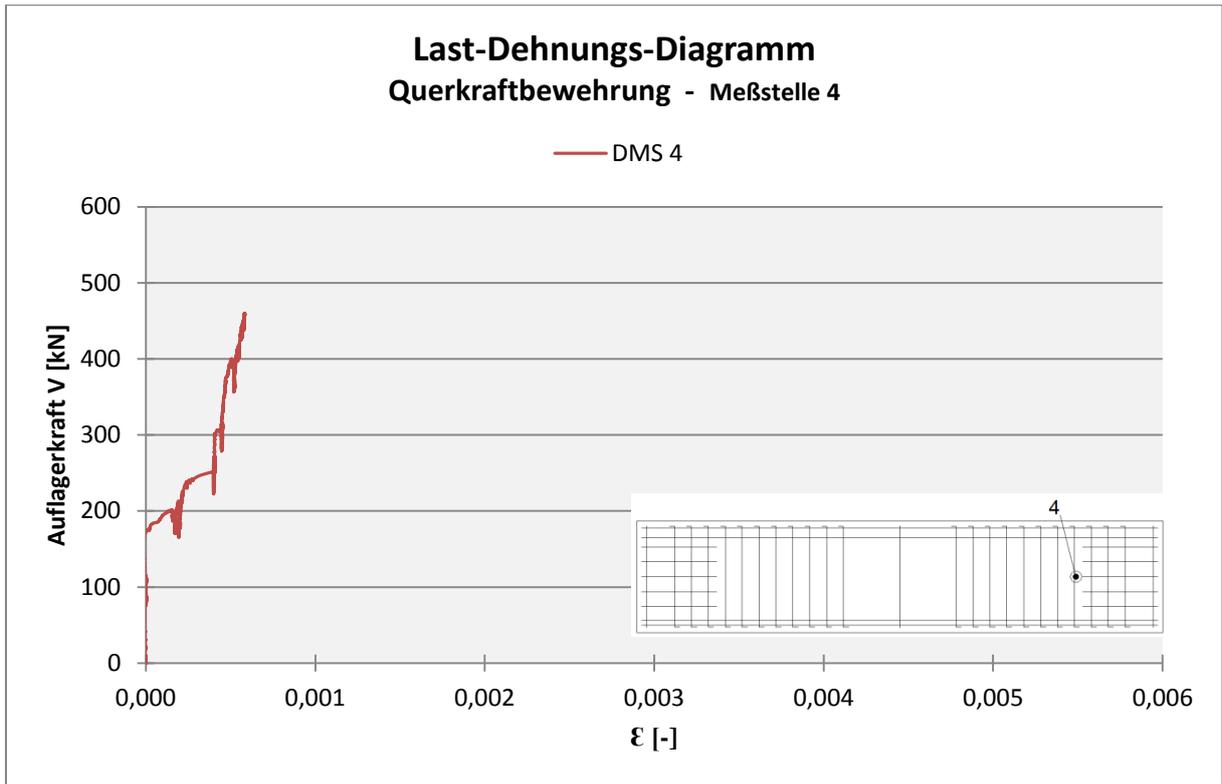
Dehnungsmessung Spannstahl / Meßstelle 5 – Körper BB2



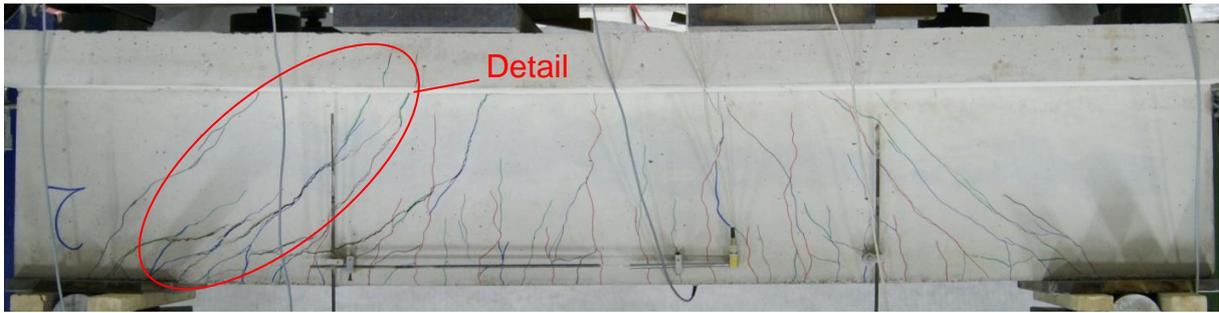
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 2 – Körper BB2



Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 3 – Körper BB2



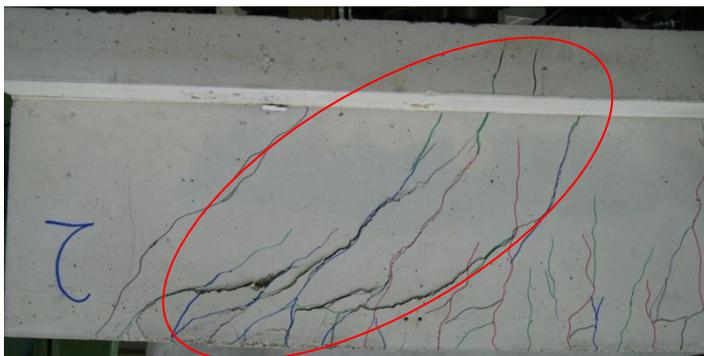
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 4 – Körper BB2



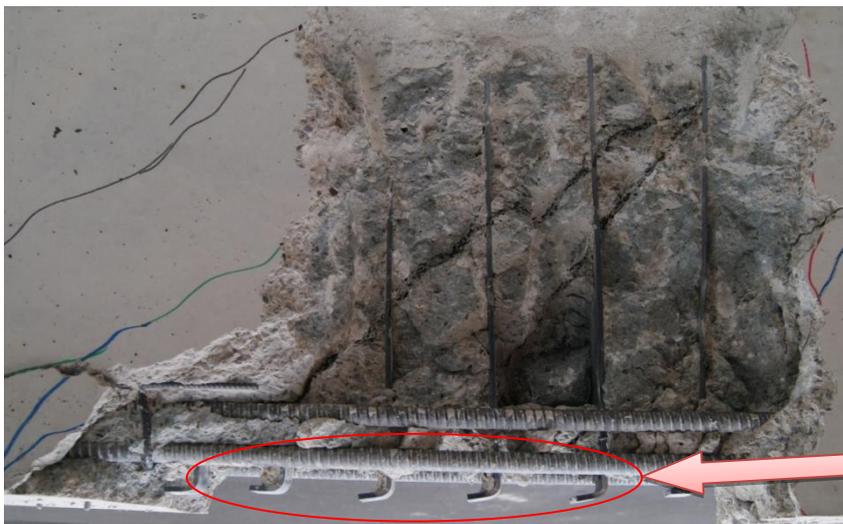
Rissbild – Körper BB2

Laststufe	100kN	200kN	300kN	400kN
Markierungsfarbe	Rot	Blau	Grün	Schwarz

Anzahl der Hauptrisse in Höhe der Zugbewehrung = 18



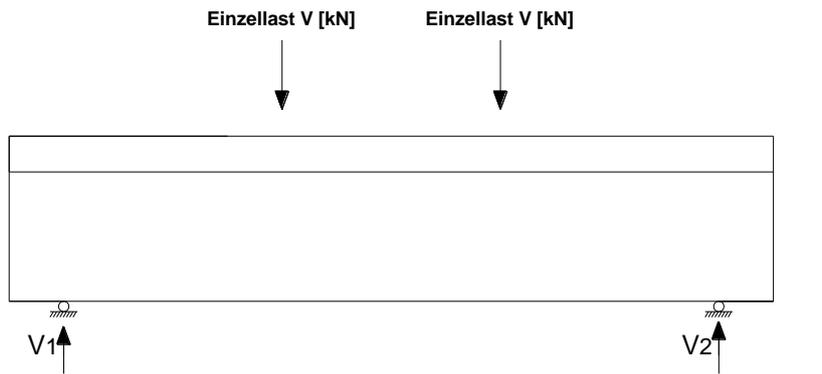
Schrägriss im Zug- und Druckgurt – Körper BB2



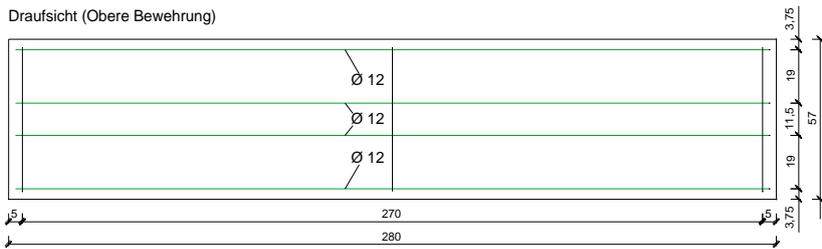
Aufbiegen des Schenkels der Z-Bleche

Prüfkörper BB3

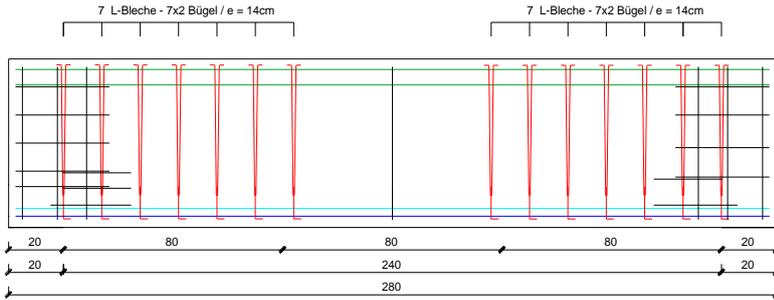
Körper	$f_{c,cube}$	Biegezugbewehrung	statische Nutzhöhe	Querkraftbewehrung	Belastungsart	Bruchlast V_u	Querkraftbewehrung
	N/mm ²	cm ²		cm		cm ² /m	
BB3	31,8	4Ø18 4Ø12	54	14Ø6 e=14cm	Einzellast	505	L-Blech, t=5mm, 2 Bügel
		12,4		8,07			



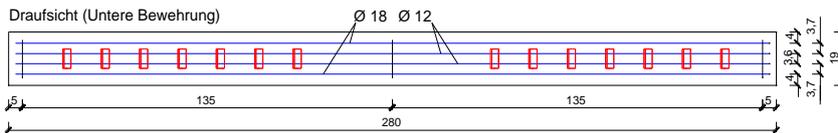
Draufsicht (Obere Bewehrung)



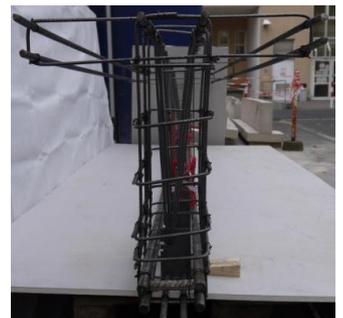
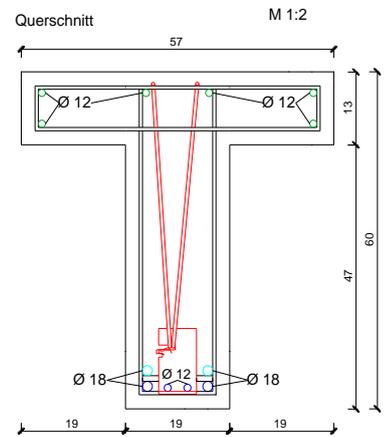
Längsschnitt

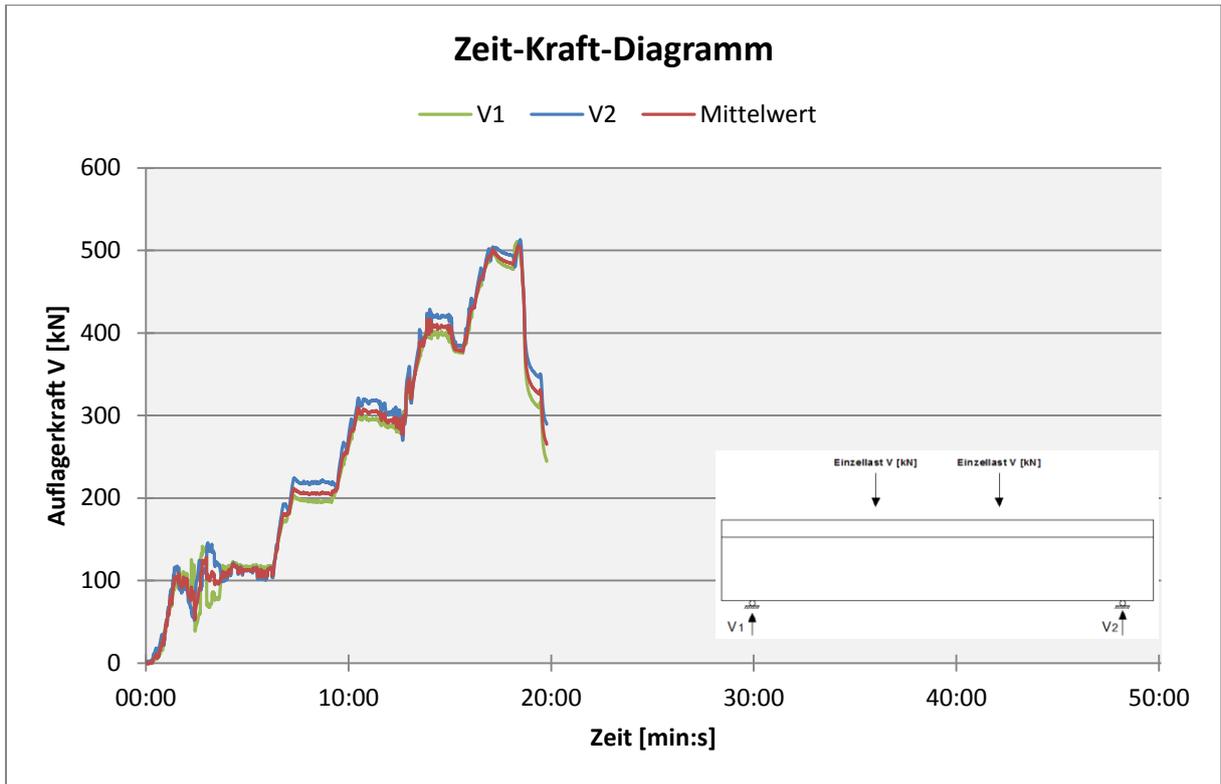


Draufsicht (Untere Bewehrung)

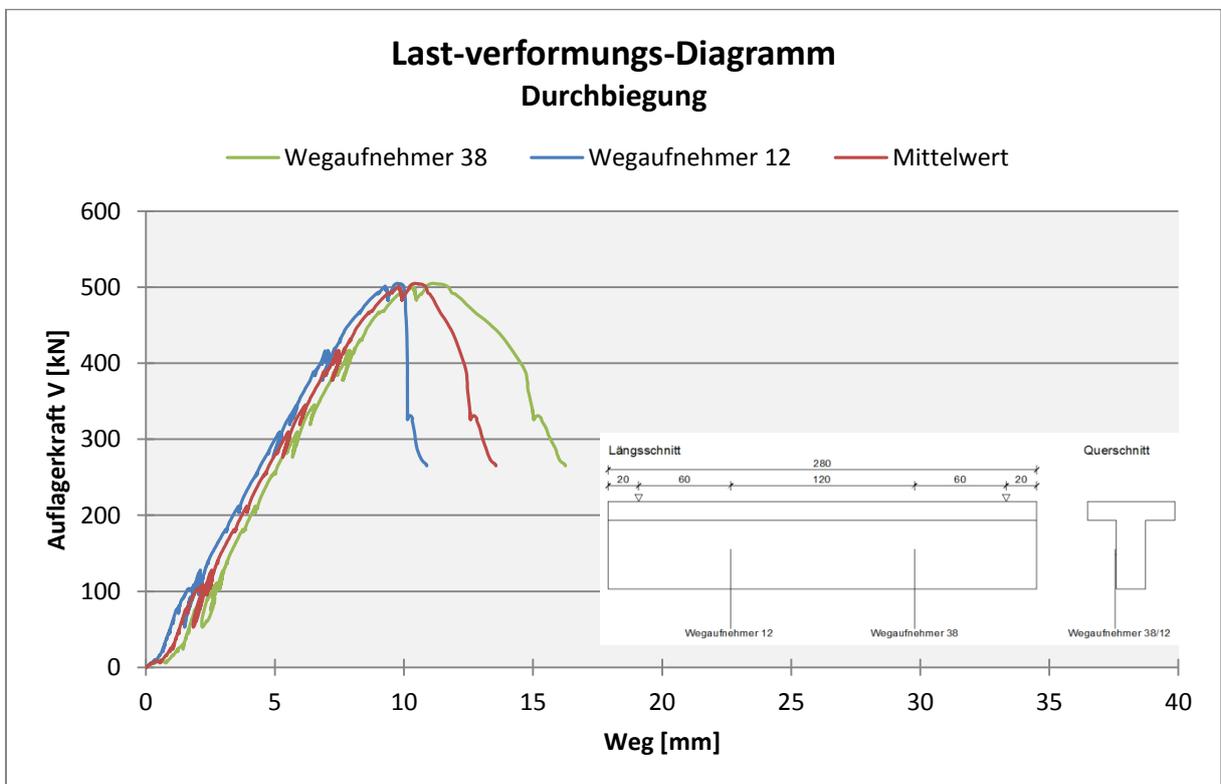


Querschnitt

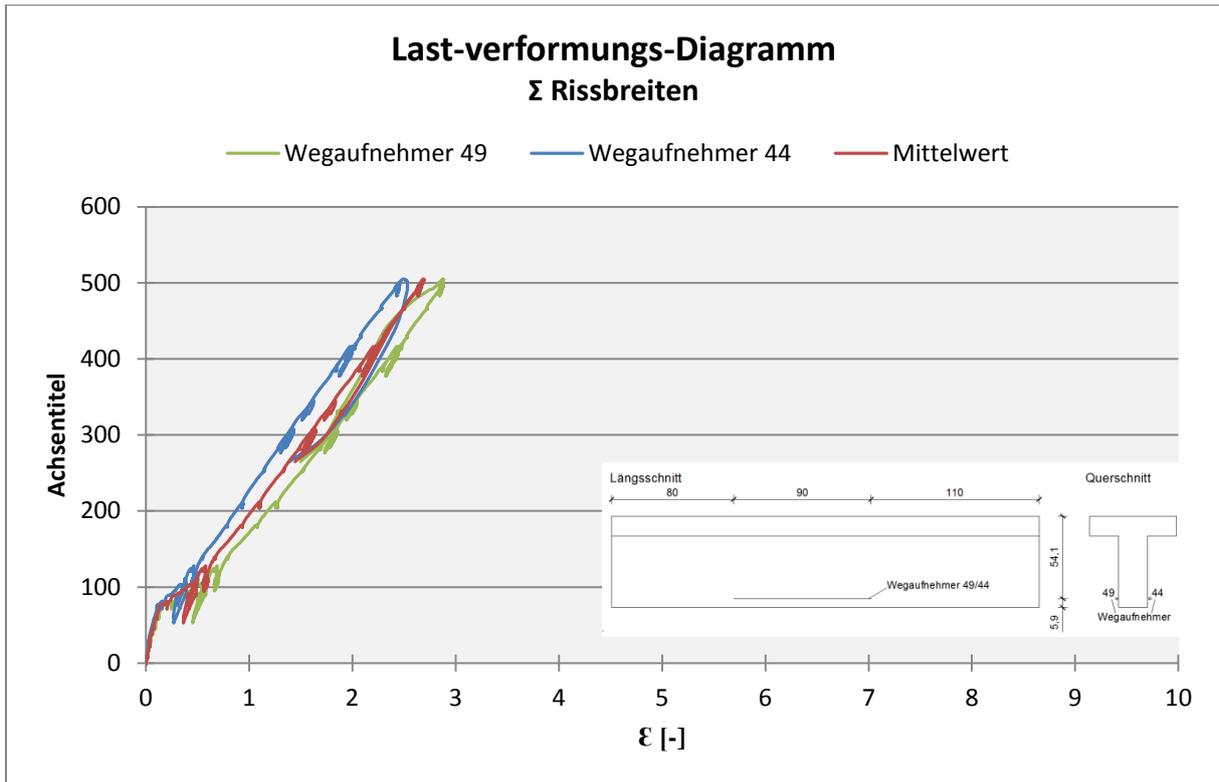




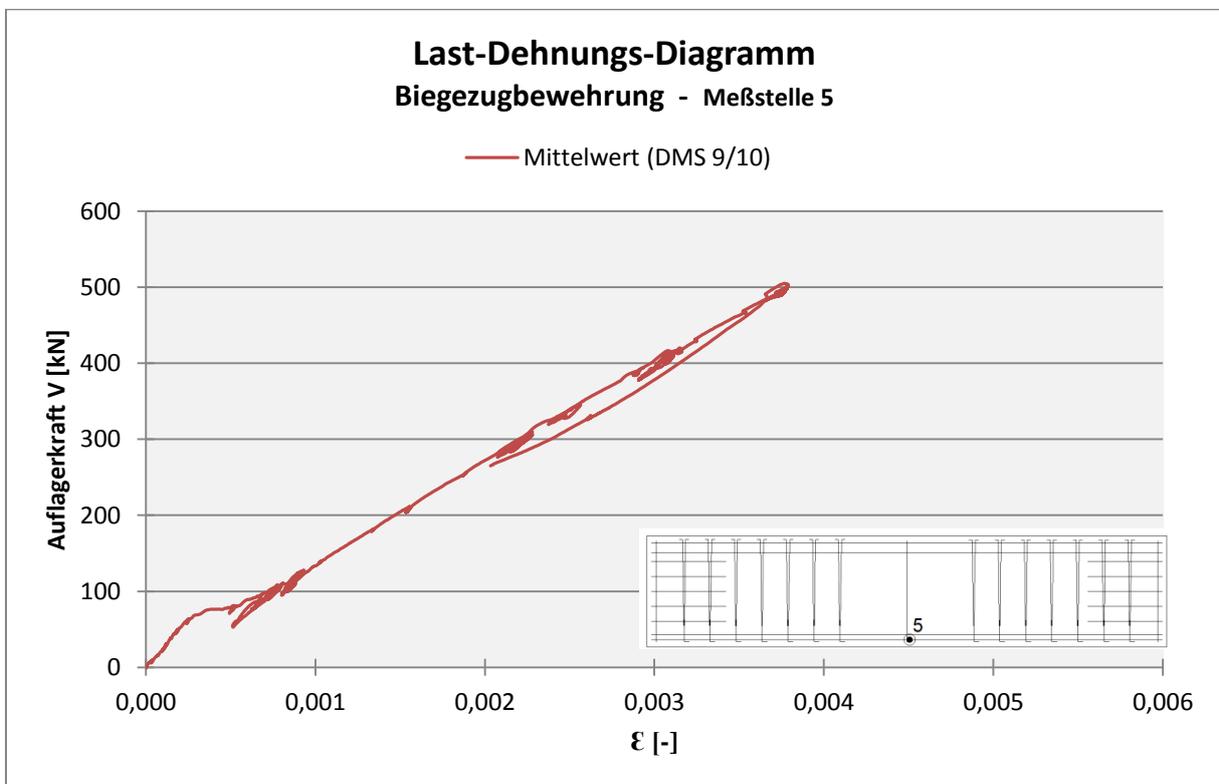
Zeit-Kraft-Diagramm – Körper BB3



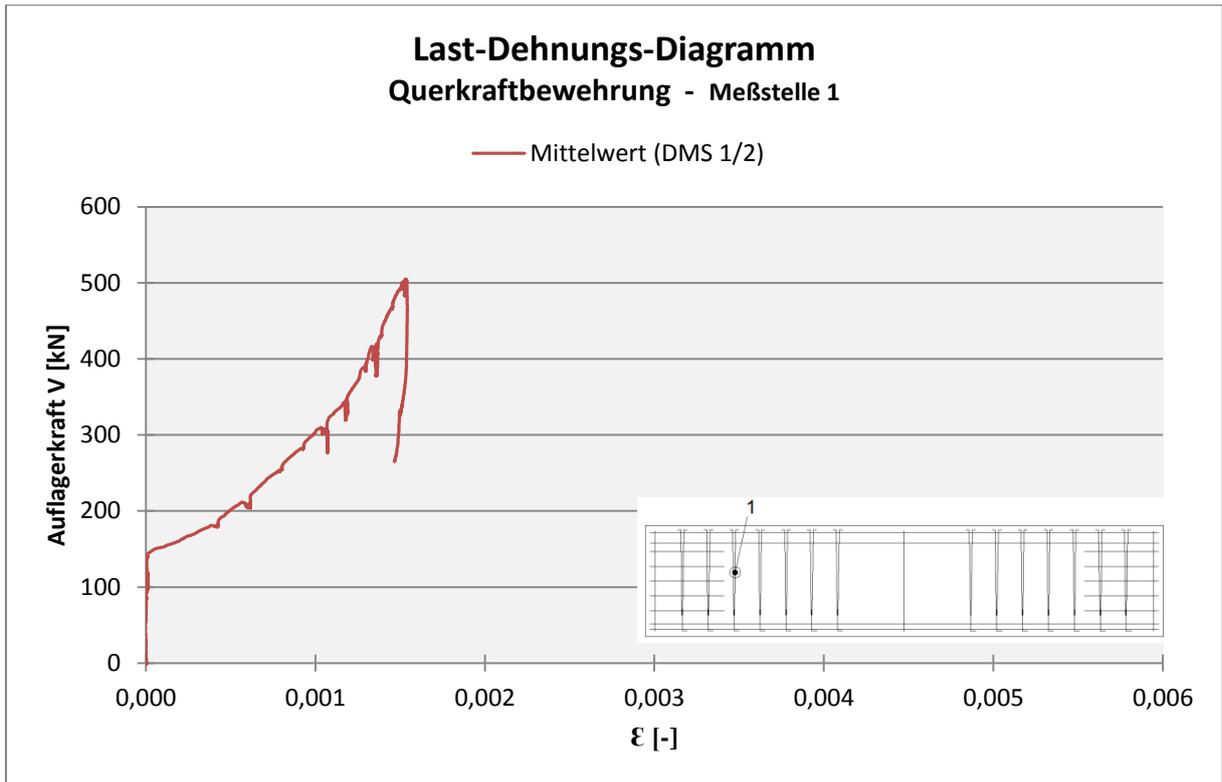
Messwerte der Durchbiegung im Viertelpunkt – Körper BB3



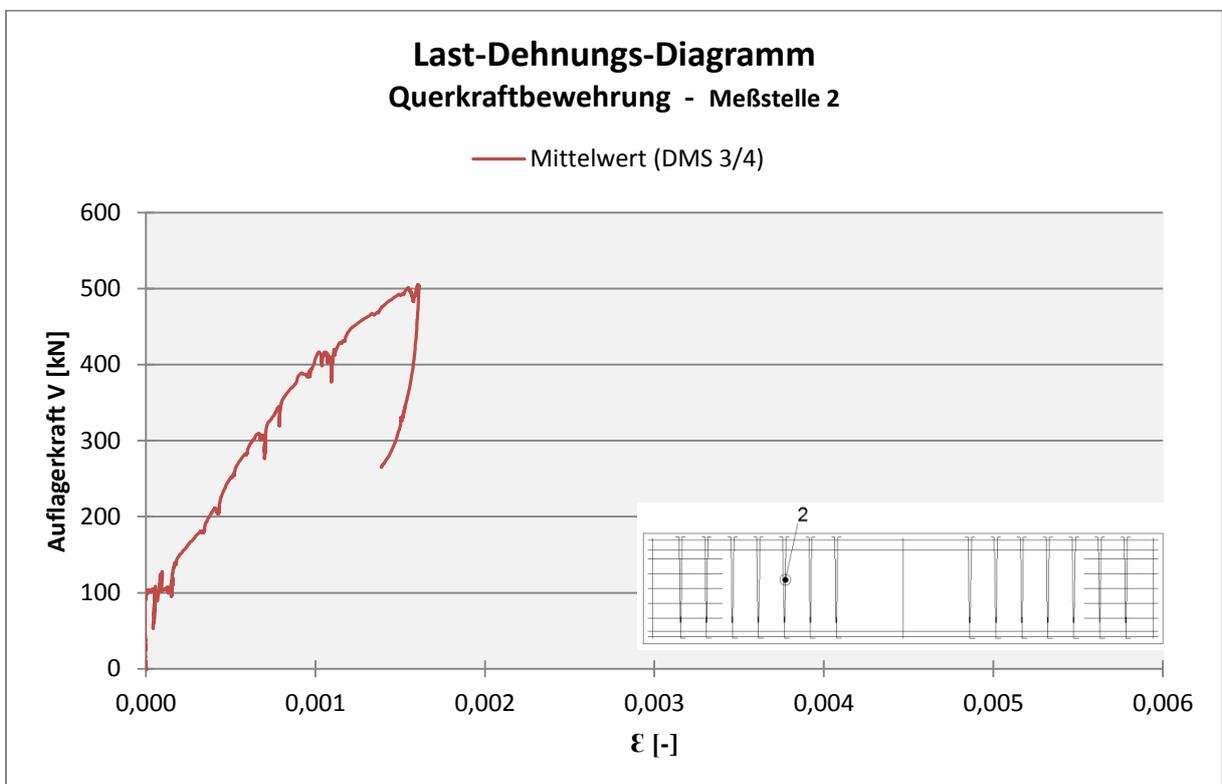
Messwerte der Σ der Rissbreiten in Höhe der Biegezugbewehrung – Körper BB3



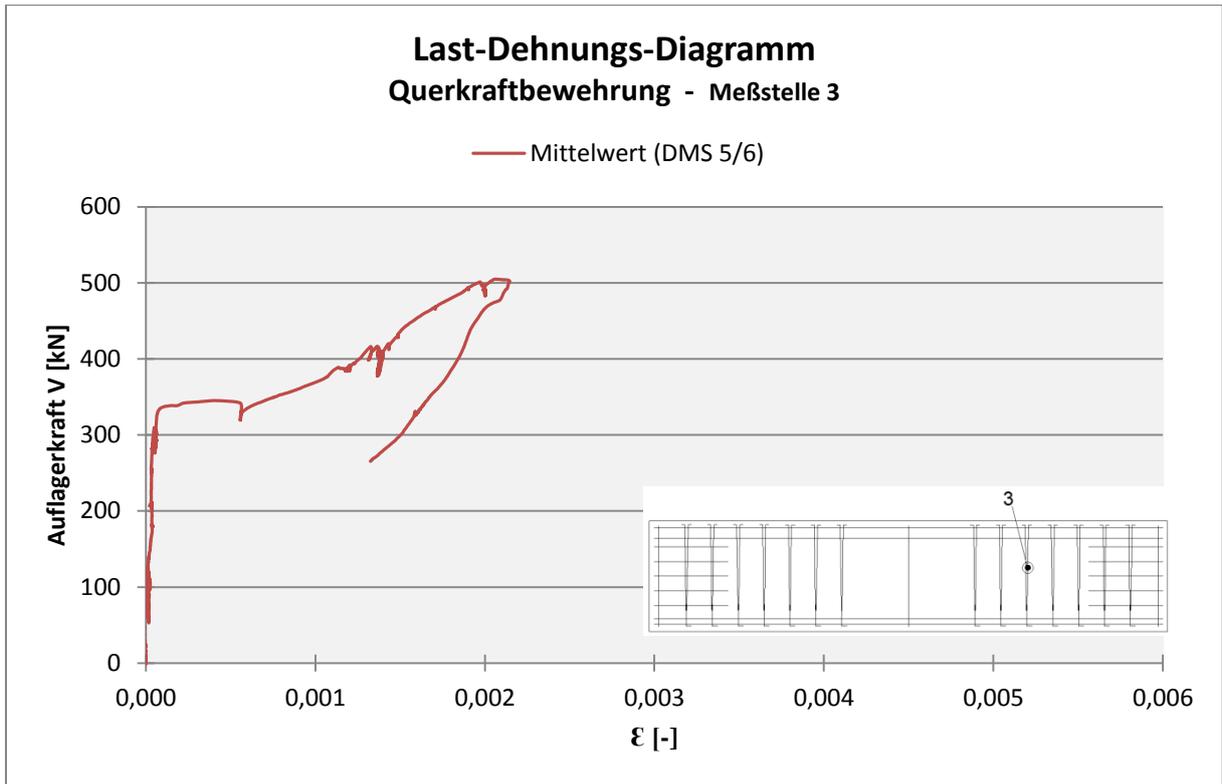
Dehnungsmessung Spannstahl / Meßstelle 5 – Körper BB3



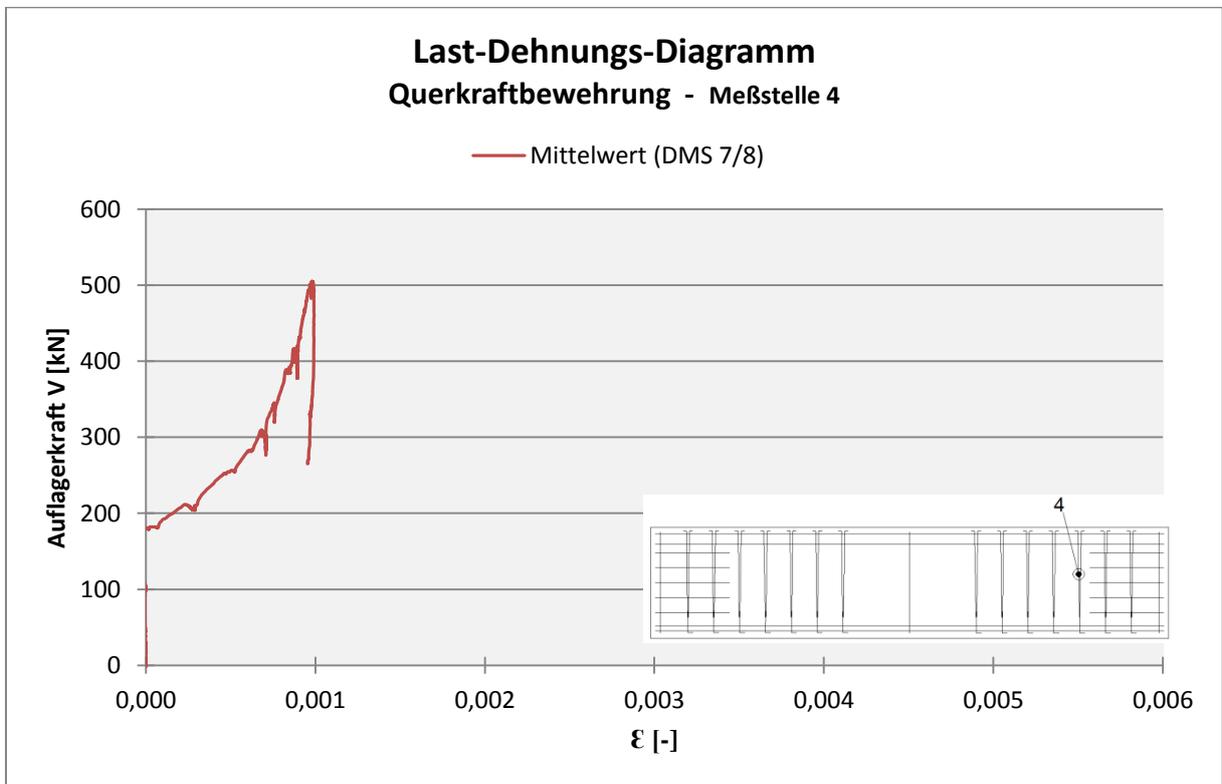
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 1 – Körper BB3



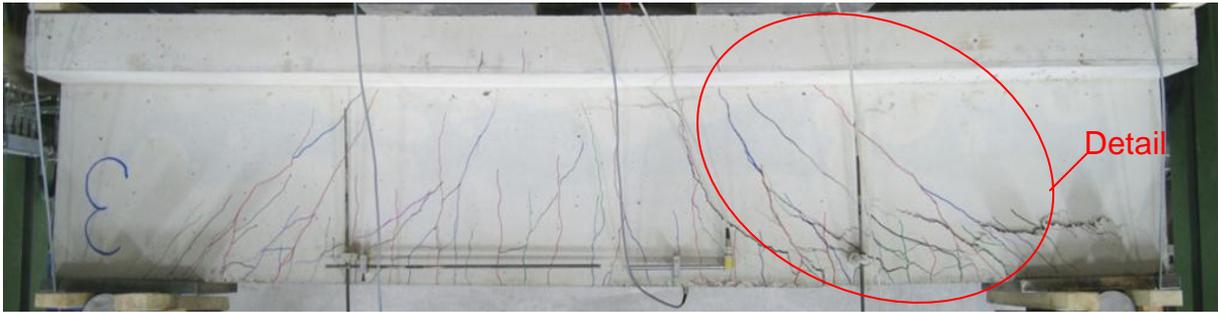
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 2 – Körper BB3



Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 3 – Körper BB3



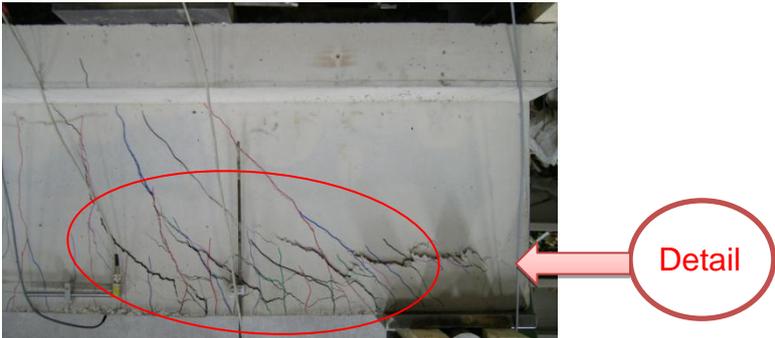
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 4 – Körper BB3



Rissbild – Körper BB3

Laststufe	100kN	200kN	300kN	400kN
Markierungsfarbe	Rot	Blau	Grün	Schwarz

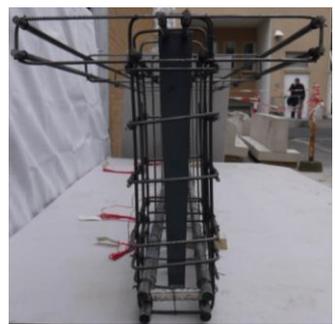
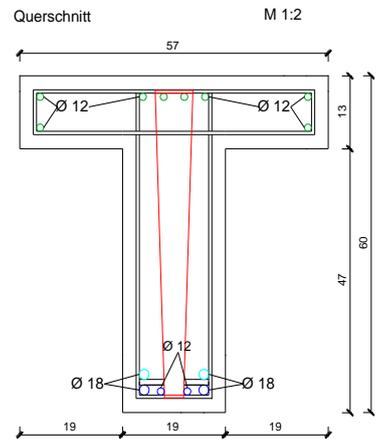
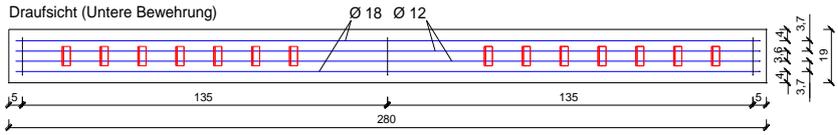
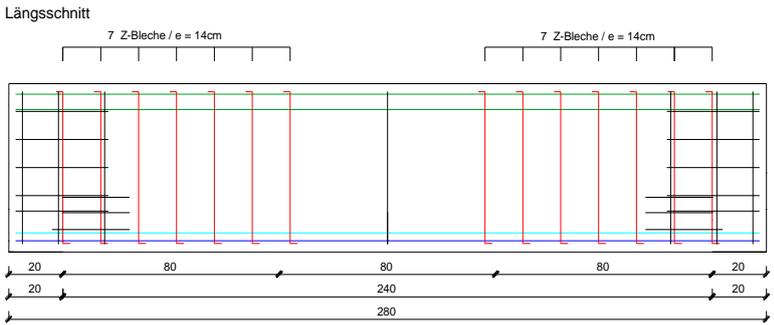
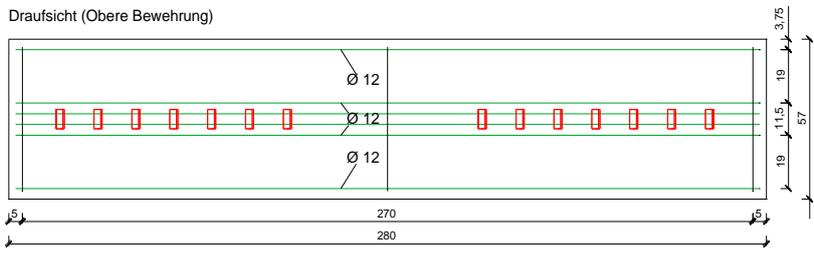
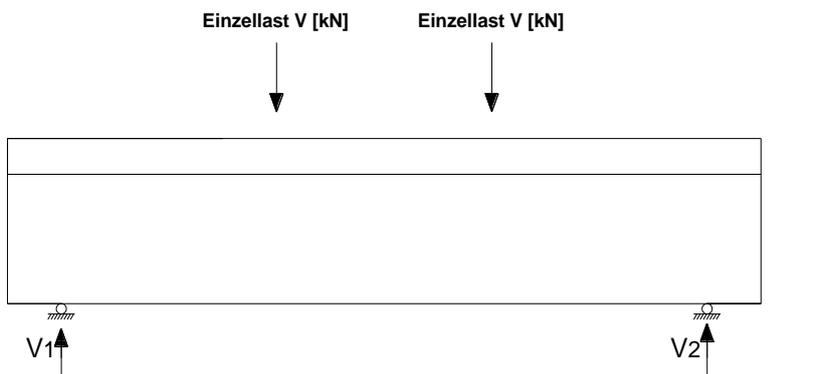
Anzahl der Hauptrisse in Höhe der Zugbewehrung = 13

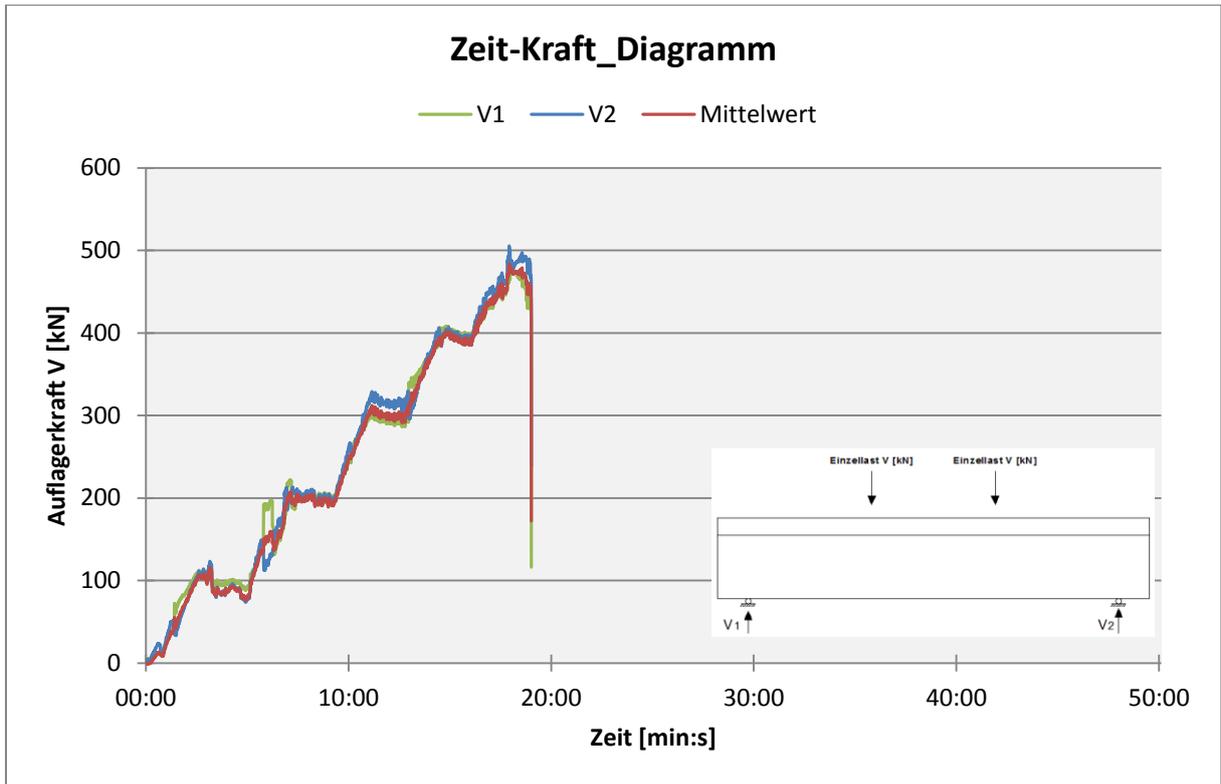


Überschreitung der Betonzugfestigkeit im Steg – Körper BB3

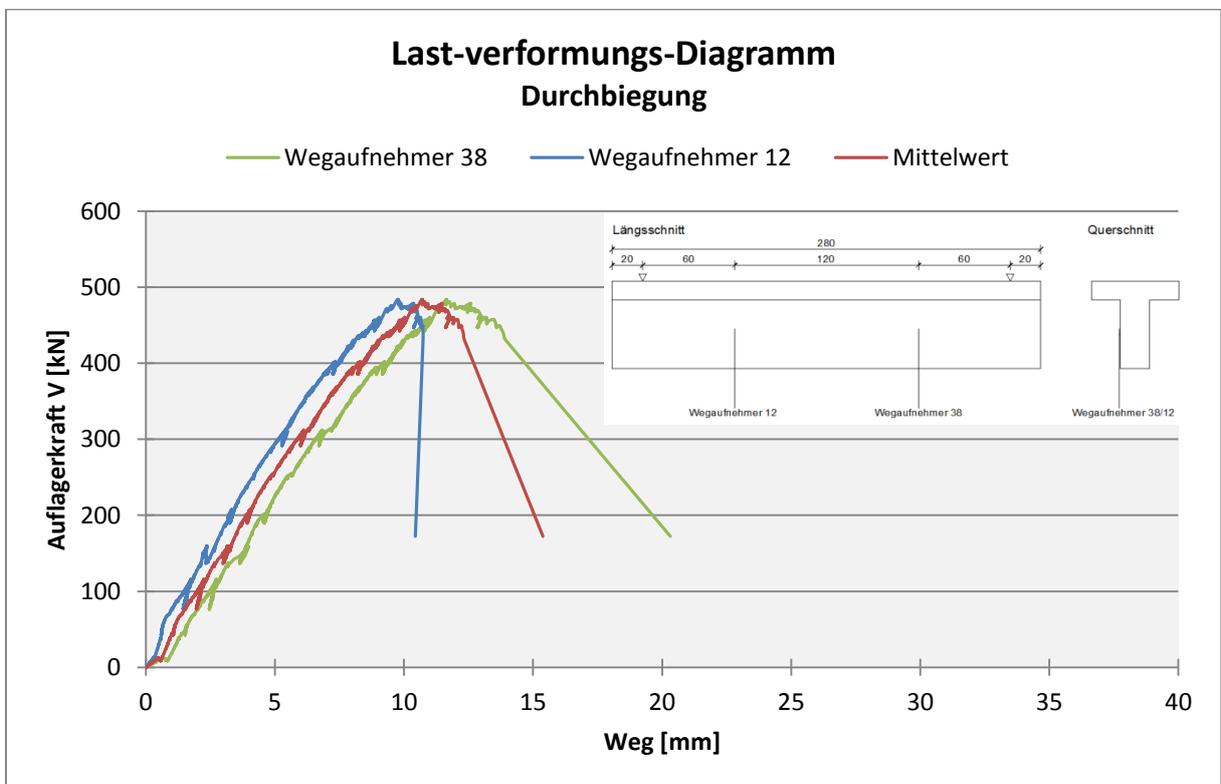
Prüfkörper BB4

Körper	$f_{c,cube}$	Biegezugbewehrung	statische Nutzhöhe	Querkraftbewehrung	Belastungsart	Bruchlast V_u	Querkraftbewehrung
	N/mm ²	cm ²					
BB4	31,8	4Ø18 4Ø12	54	7 Z e=14cm	Einzellast	484	Z-Blech, t=5mm
		12,4		12,5			

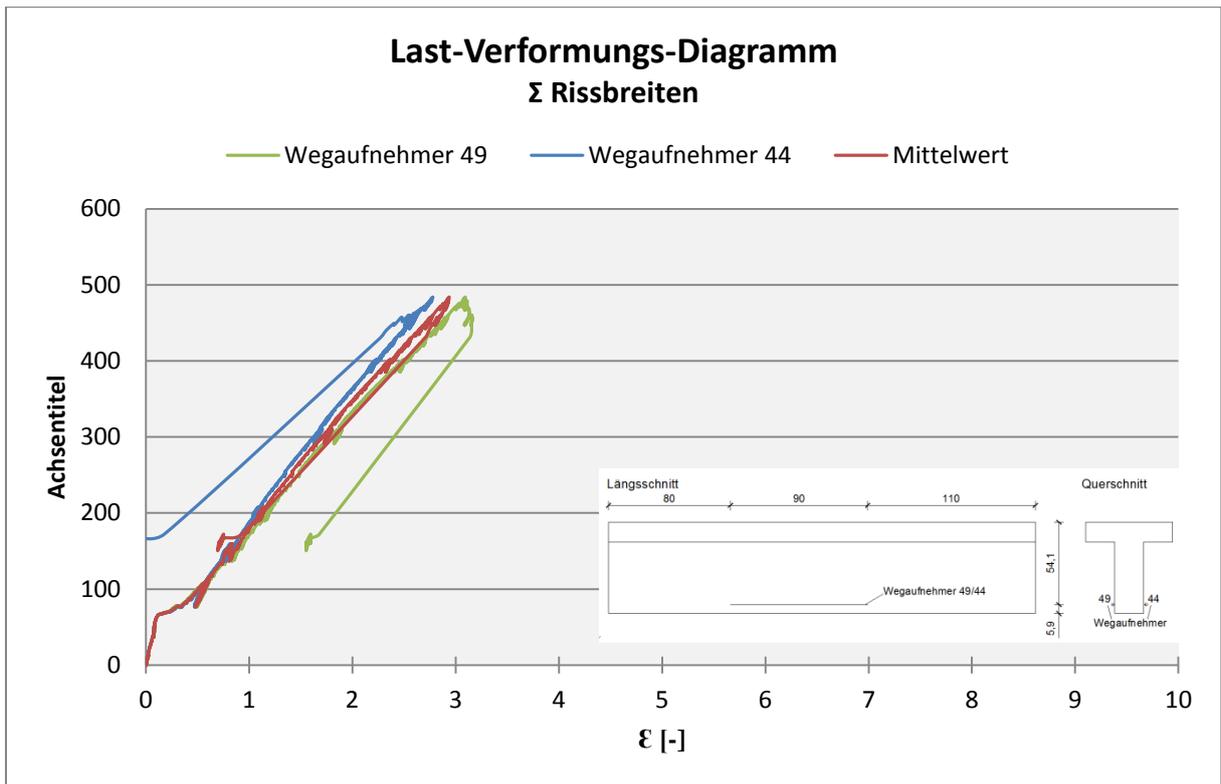




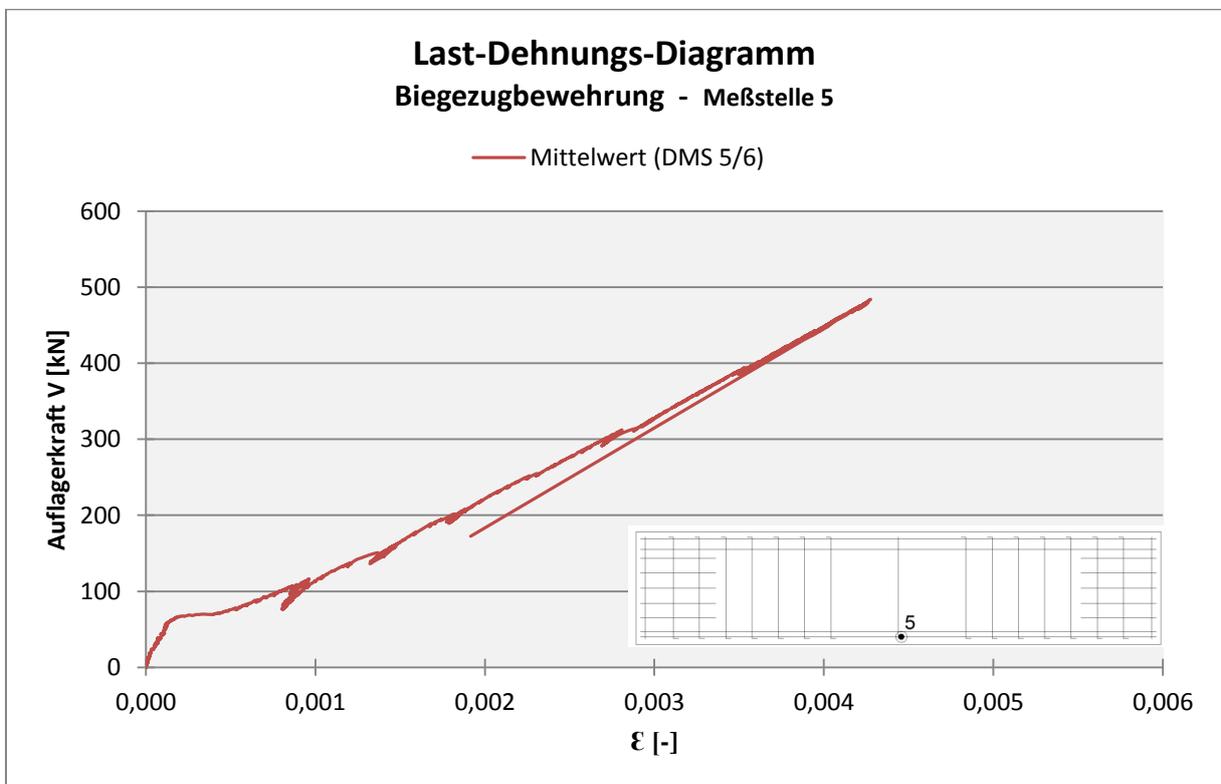
Zeit-Kraft-Diagramm – Körper BB4



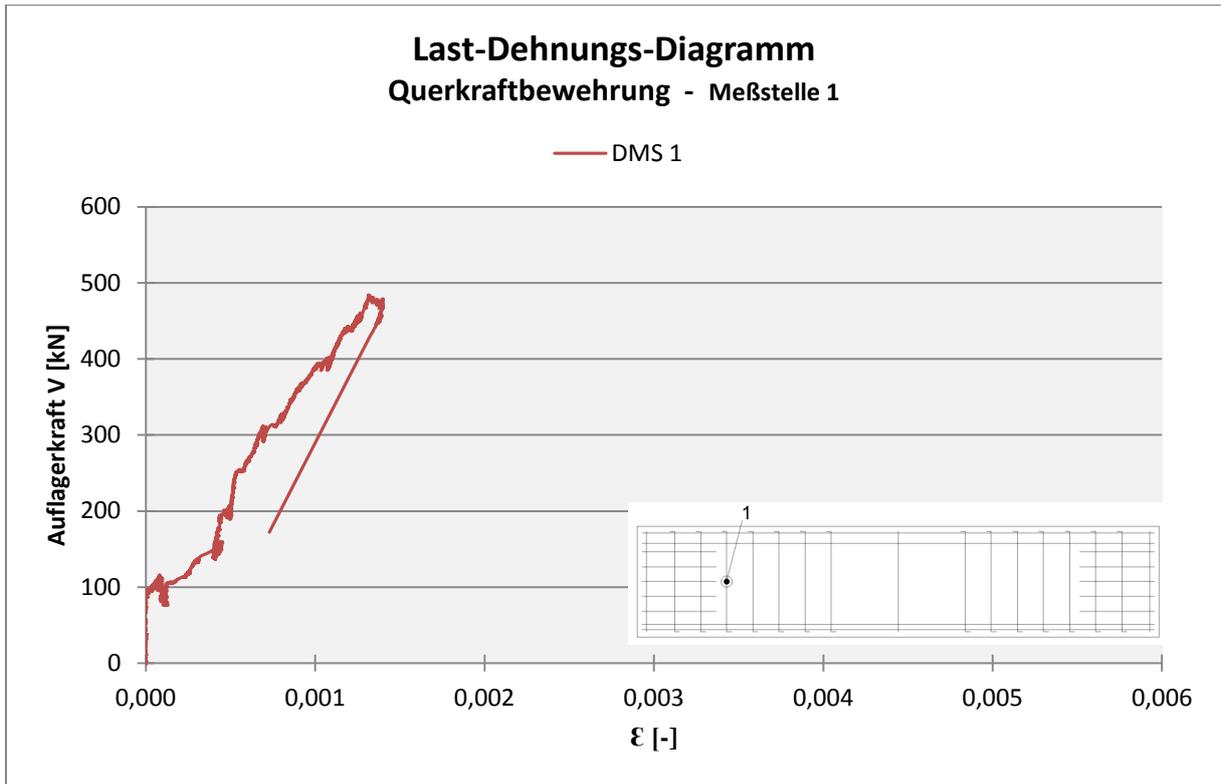
Messwerte der Durchbiegung im Viertelpunkt – Körper BB4



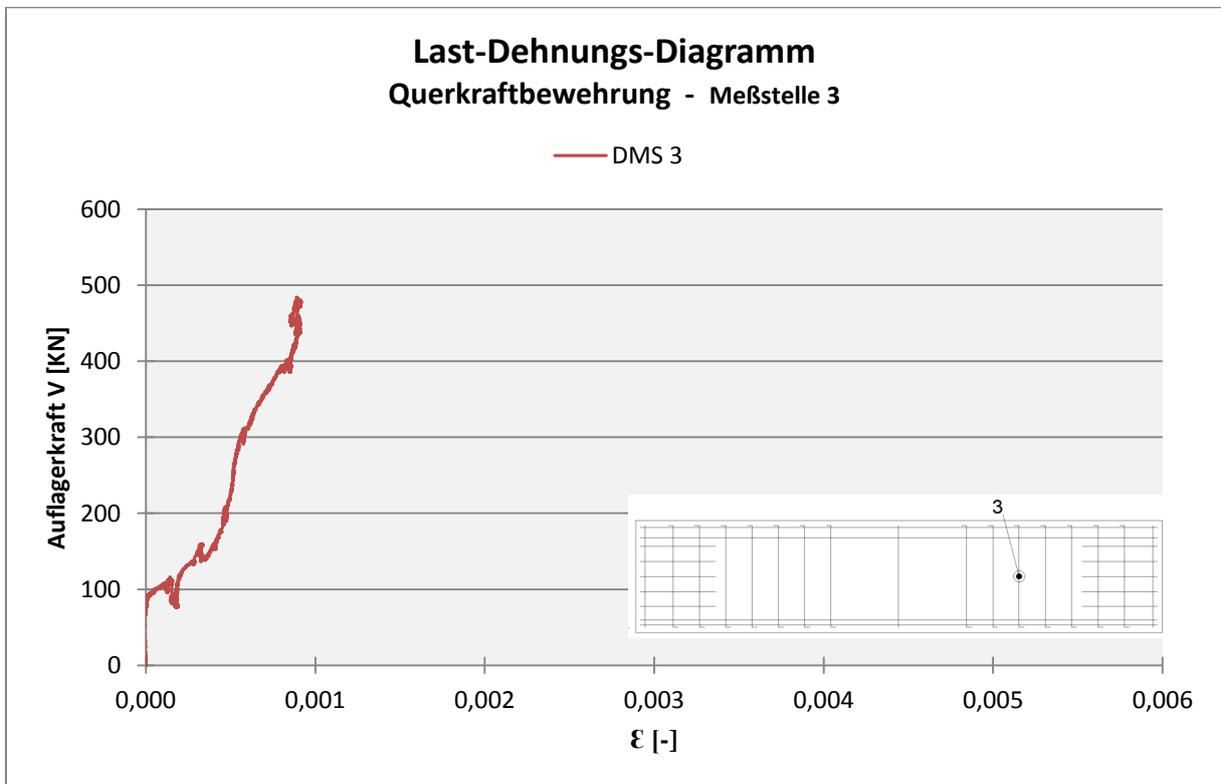
Messwerte der Σ der Rissbreiten in Höhe der Biegezugbewehrung – Körper BB4



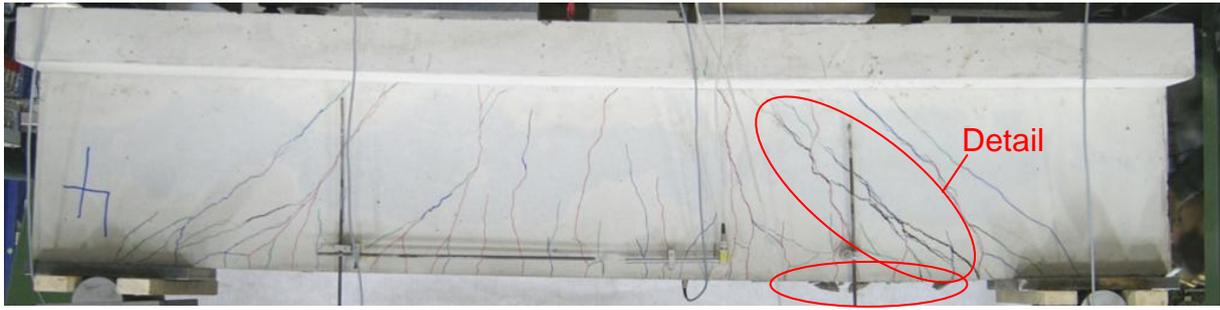
Dehnungsmessung Spannstahl / Meßstelle 5 – Körper BB4



Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 1 – Körper BB4



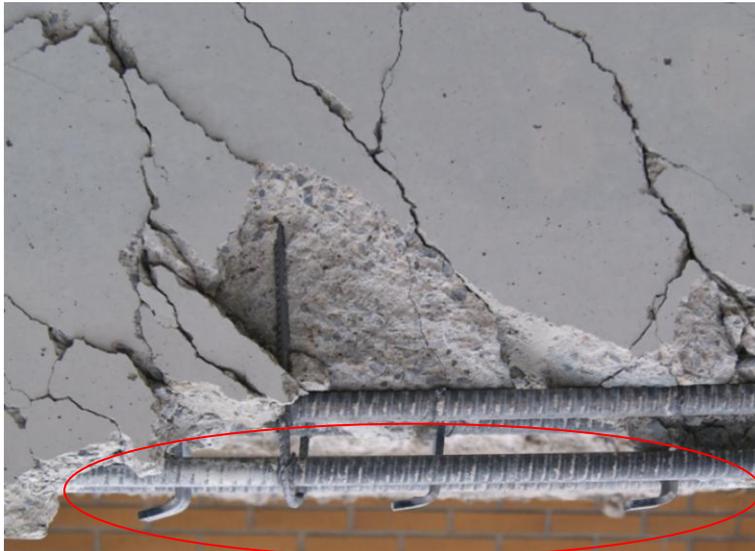
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 3 – Körper BB4



Rissbild – Körper BB4

Laststufe	100kN	200kN	300kN	400kN
Markierungsfarbe	Rot	Blau	Grün	Schwarz

Anzahl der Hauptrisse in Höhe der Zugbewehrung = 14

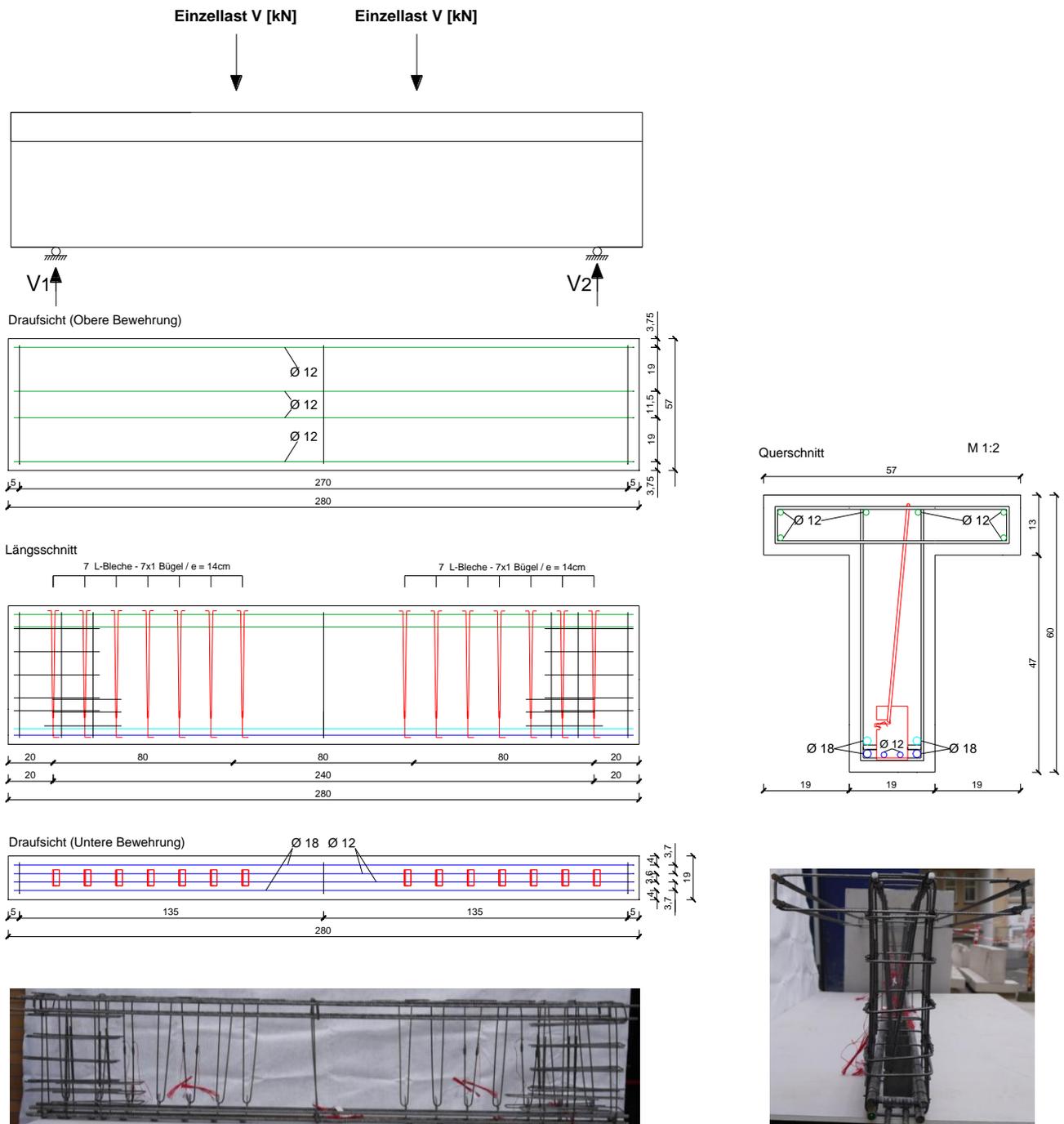


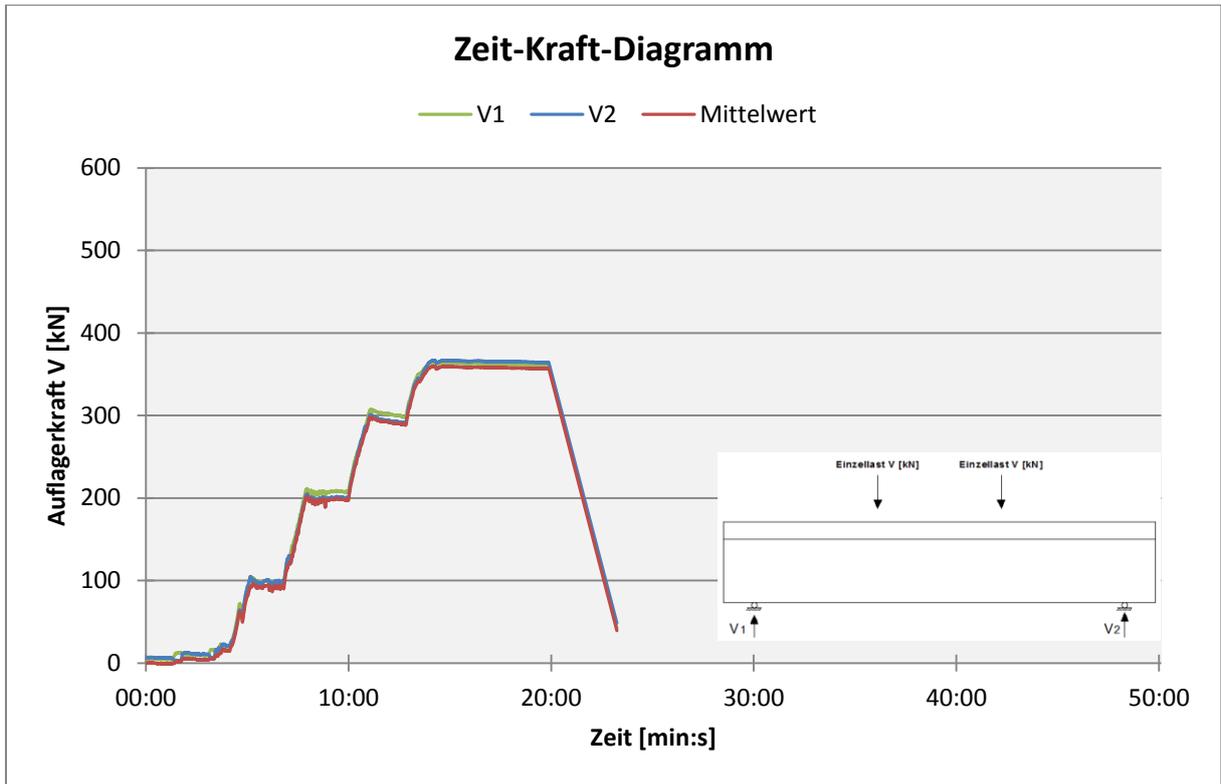
Verformung der Kantung des Z-Blechs – Körper BB4

Prüfkörper BB5

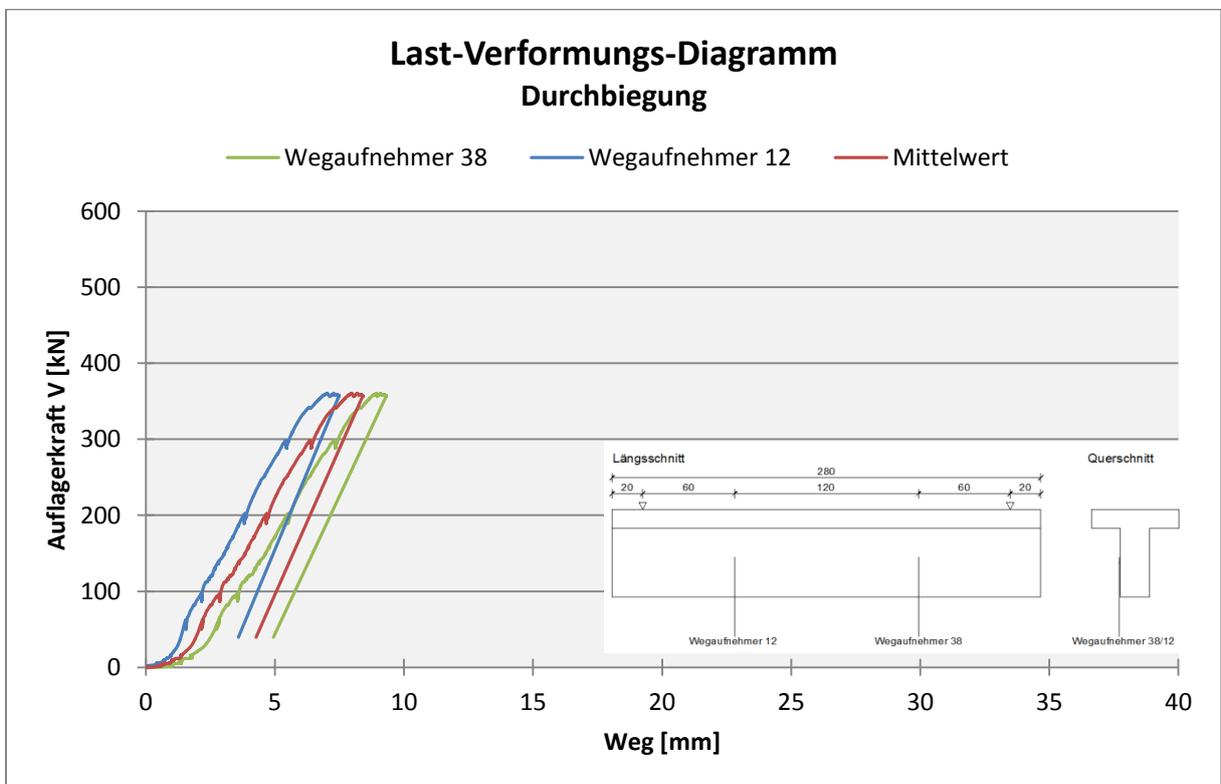
Körper	$f_{c,cube}$	Biegezugbewehrung	statische Nutzhöhe	Querkraftbewehrung	Belastungsart	Bruchlast V_u	Querkraftbewehrung
	N/mm ²	cm ²					
BB5	24,1	4Ø18 4Ø12	54	7Ø6 e=14cm	Einzellast	359,7 ¹	L-Blech, t=5mm, 1 Bügel
		12,4		4,07			

¹ Der Versuch musste vorzeitig abgebrochen werden. Die Bruchlast wurde mit Sicherheit nicht erreicht.

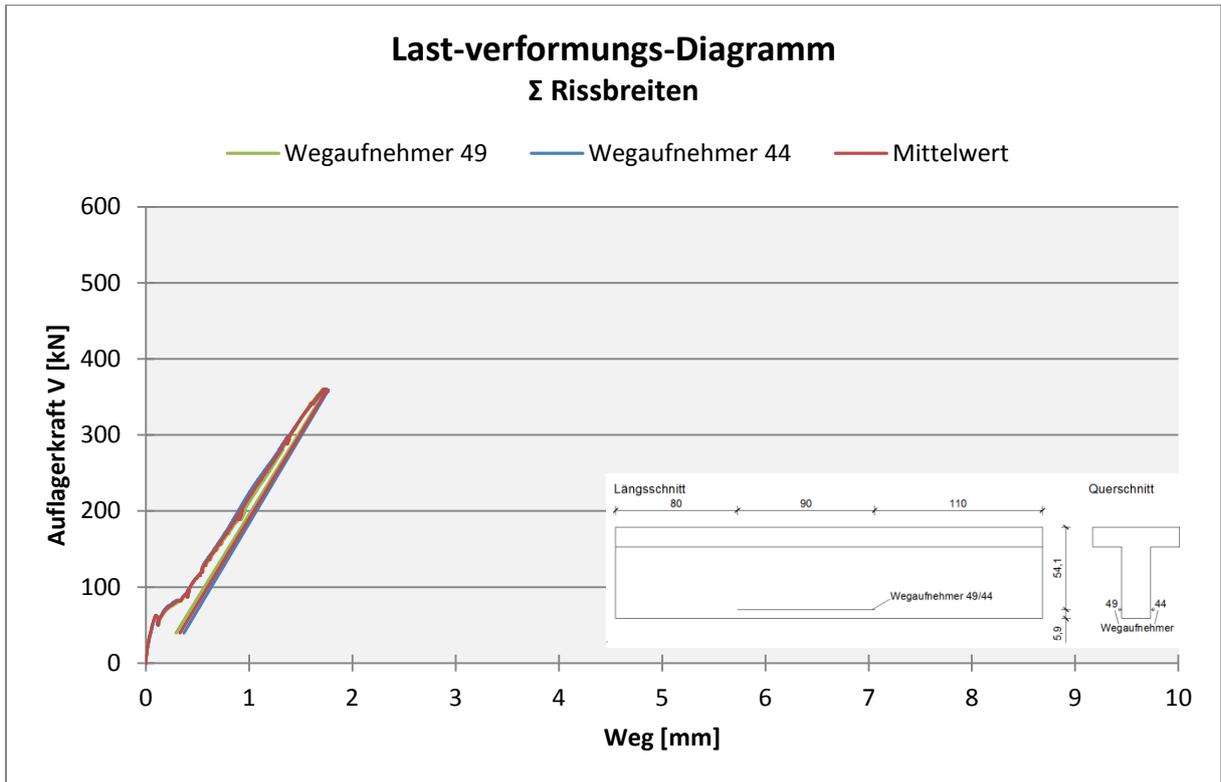




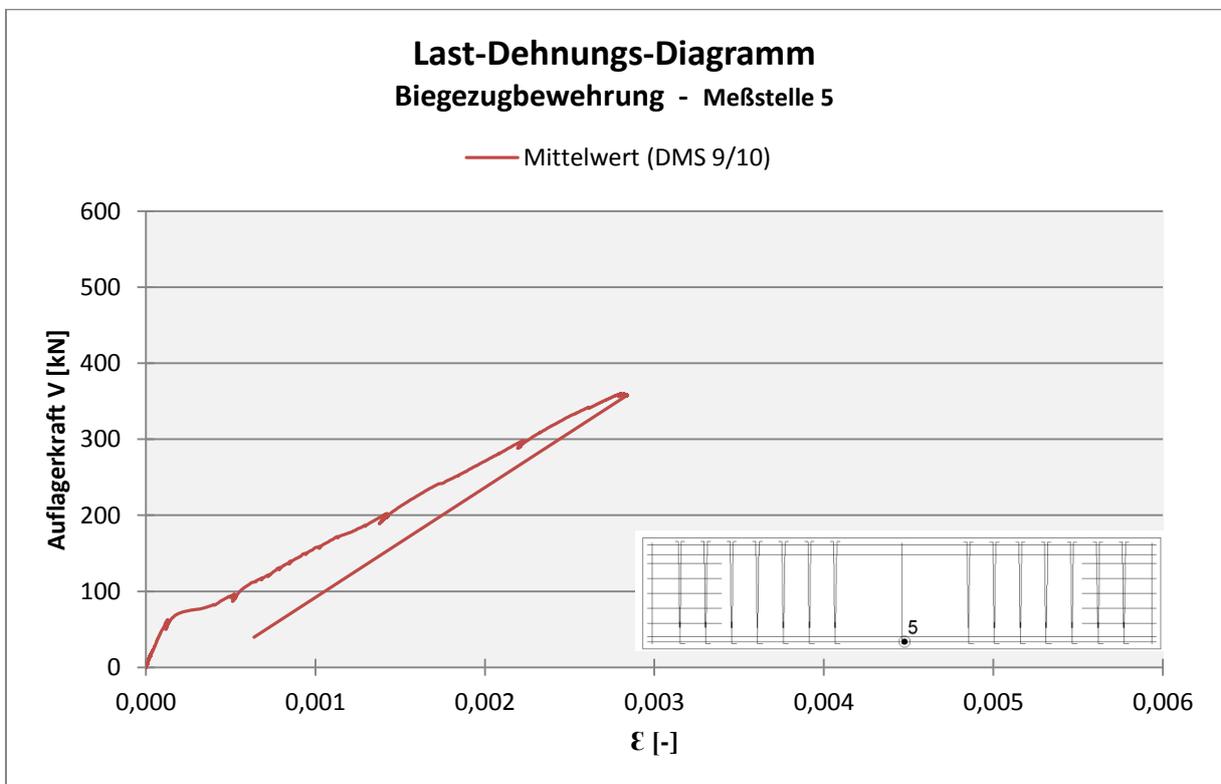
Zeit-Kraft-Diagramm – Körper BB5



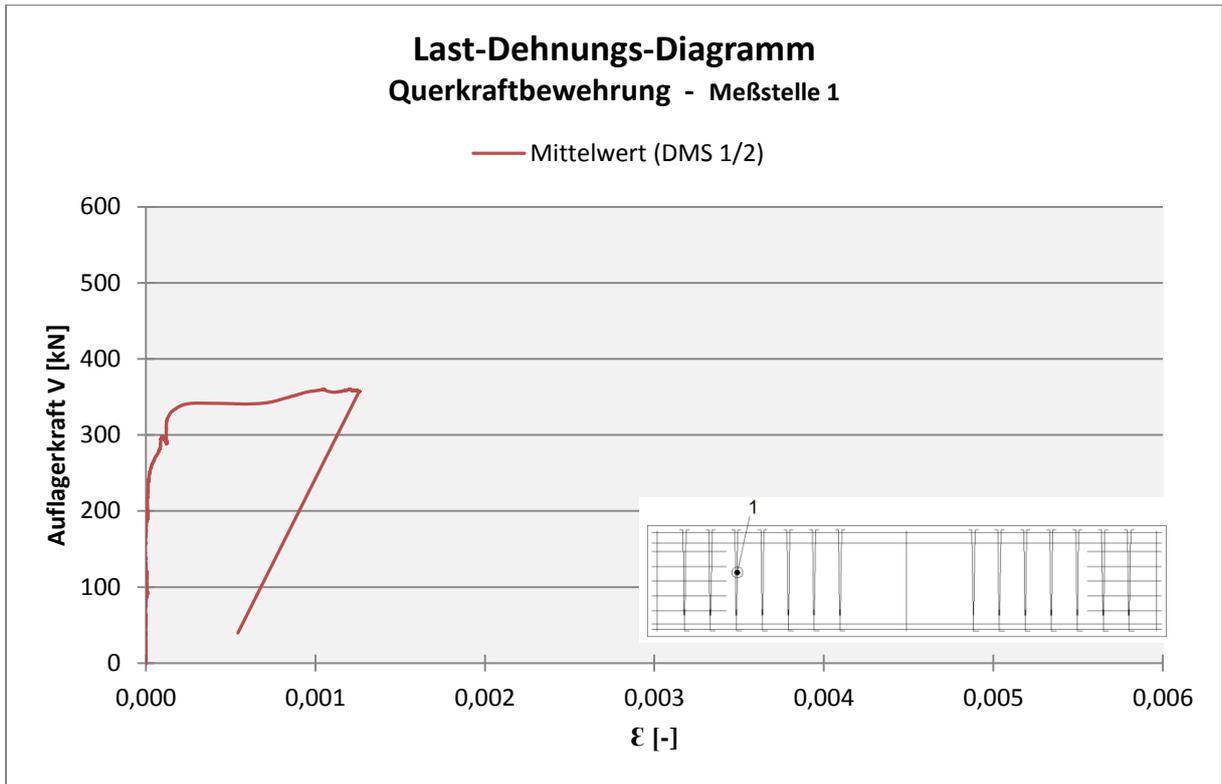
Messwerte der Durchbiegung im Viertelpunkt – Körper BB5



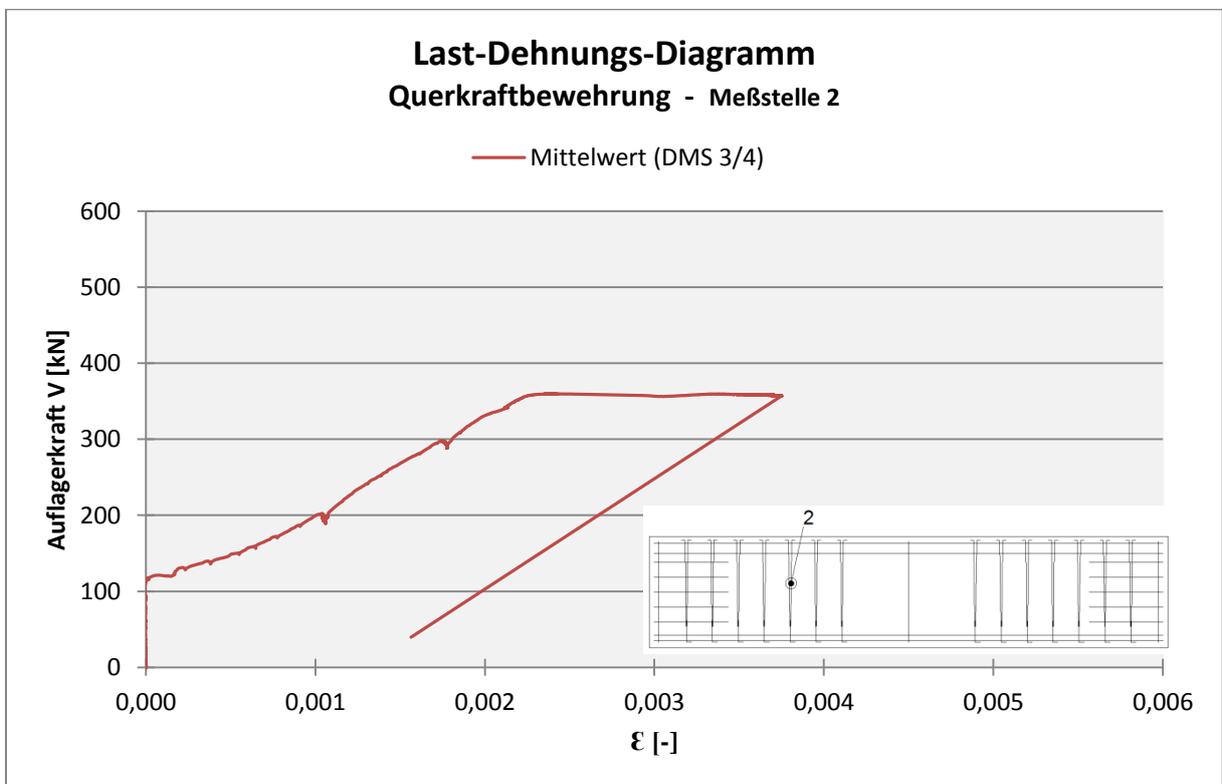
Messwerte der Σ der Rissbreiten in Höhe der Biegezugbewehrung – Körper BB5



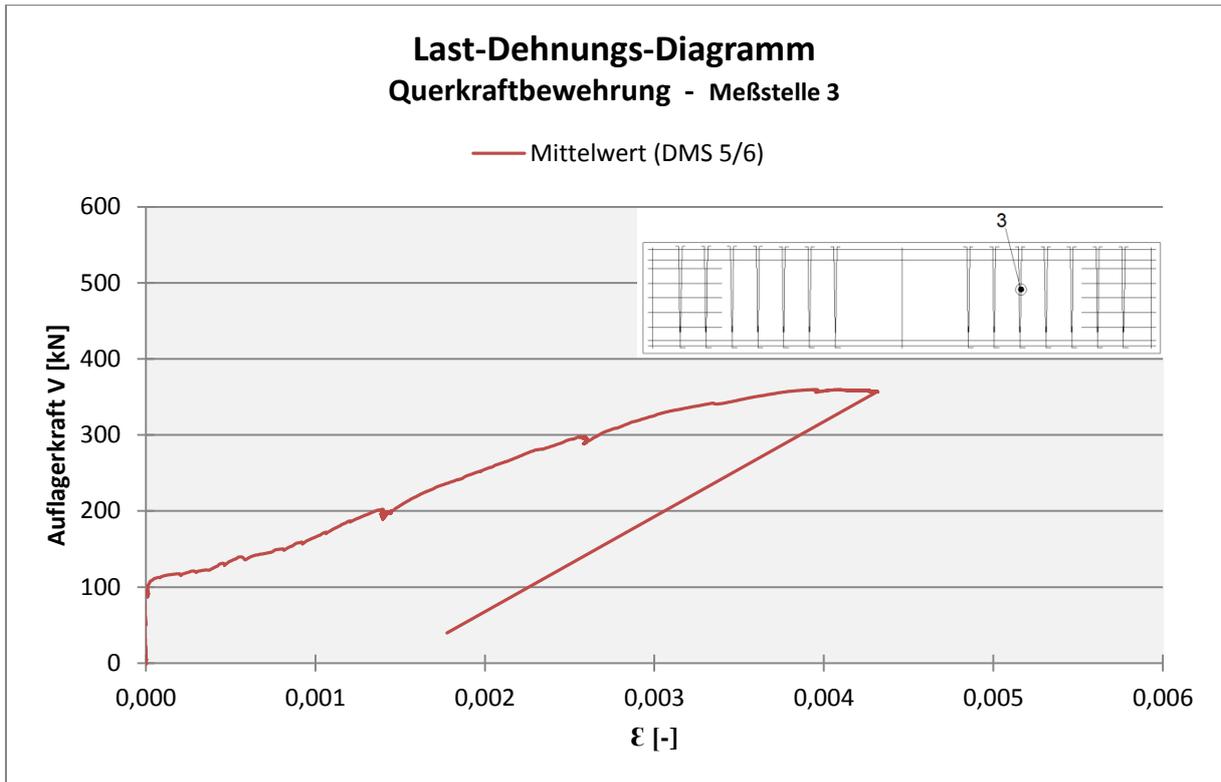
Dehnungsmessung Spannstahl / Meßstelle 5 – Körper BB5



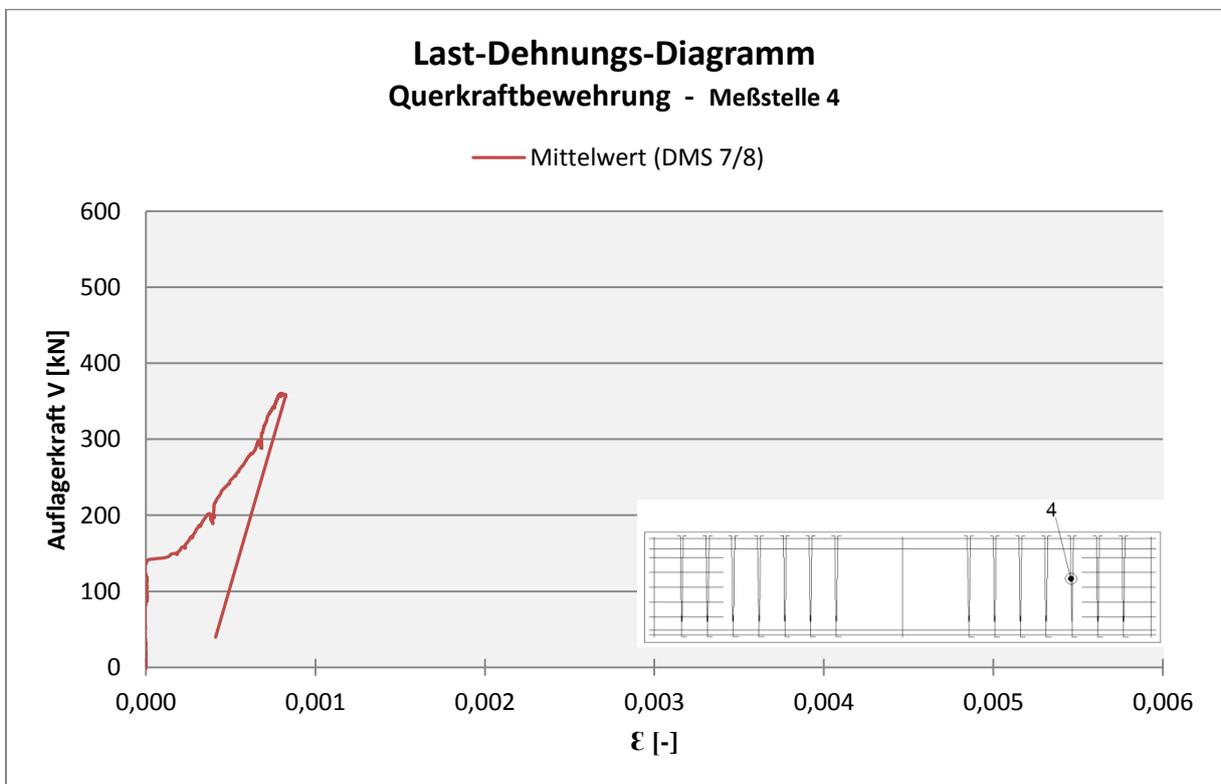
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 1 – Körper BB5



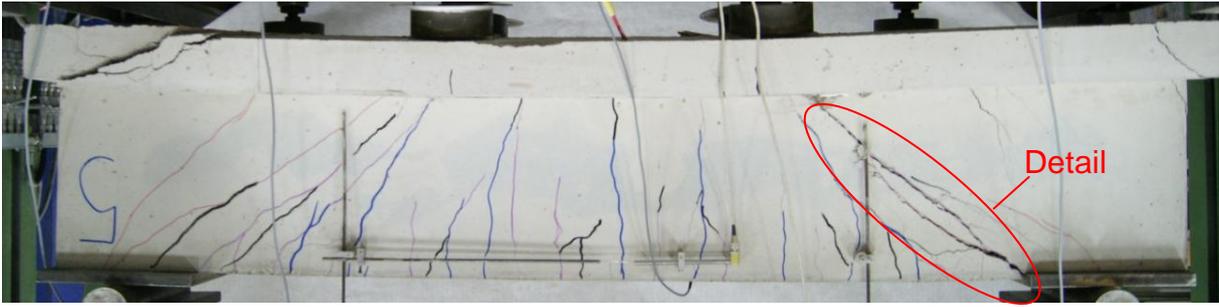
Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 2 – Körper BB5



Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 3 – Körper BB5



Dehnungsmessung Bügel / Meßstelle 4 – Körper BB5



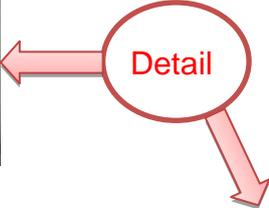
Rissbild – Körper BB5

Laststufe	100kN	200kN	300kN	400kN
Markierungsfarbe	Blau	Lila	Schwarz	Rot

Anzahl der Hauptrisse in Höhe der Zugbewehrung = 15



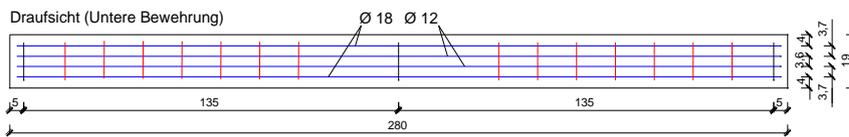
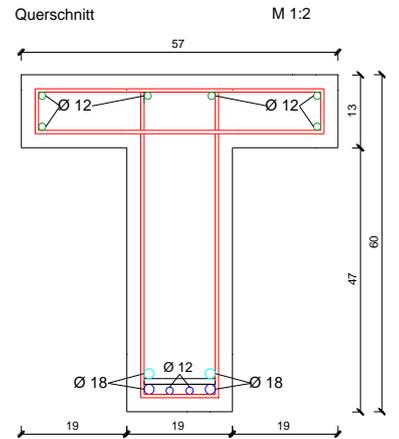
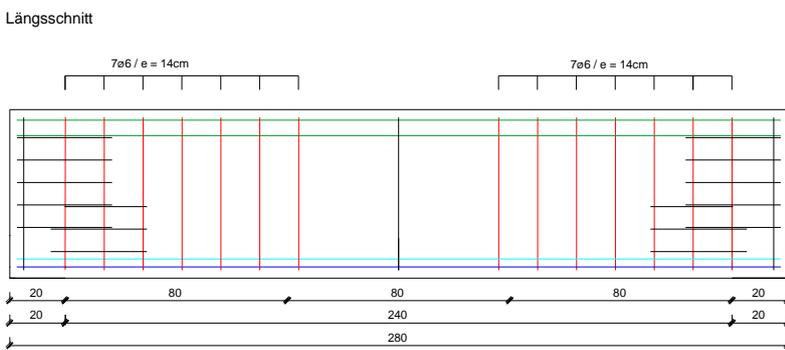
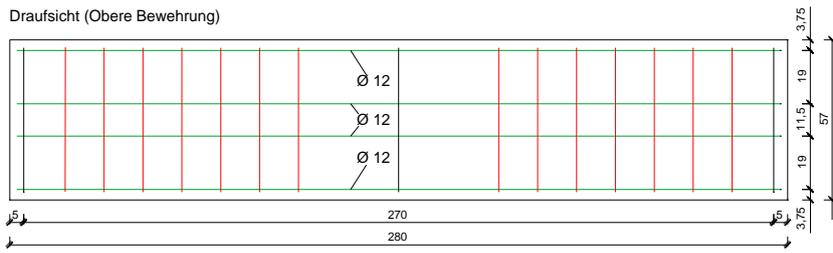
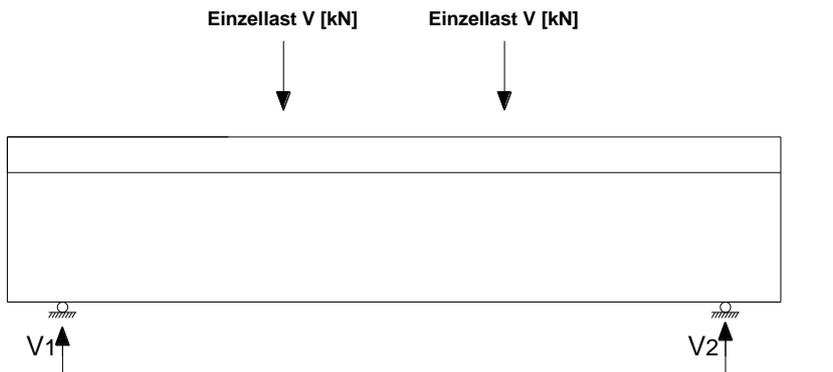
Der Schrägriss weitet sich auf – Körper BB5

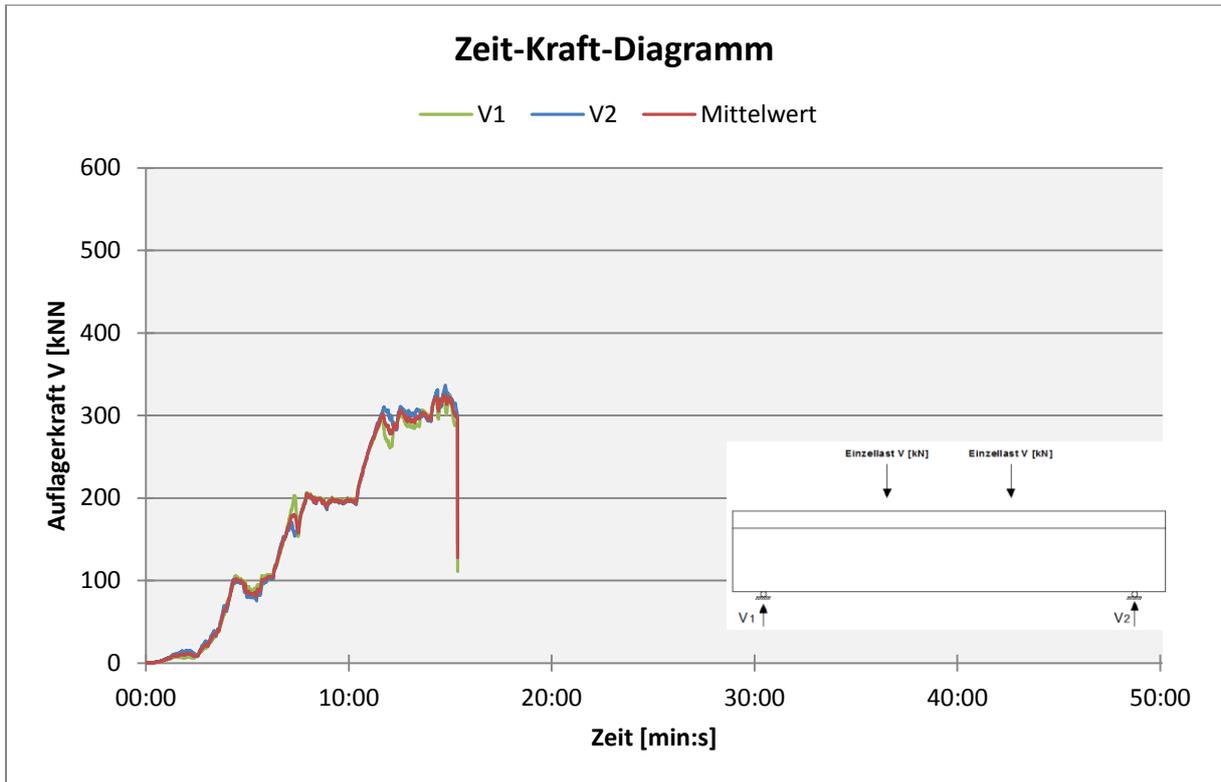


Zugversagen der Bügelbewehrung – Körper BB5

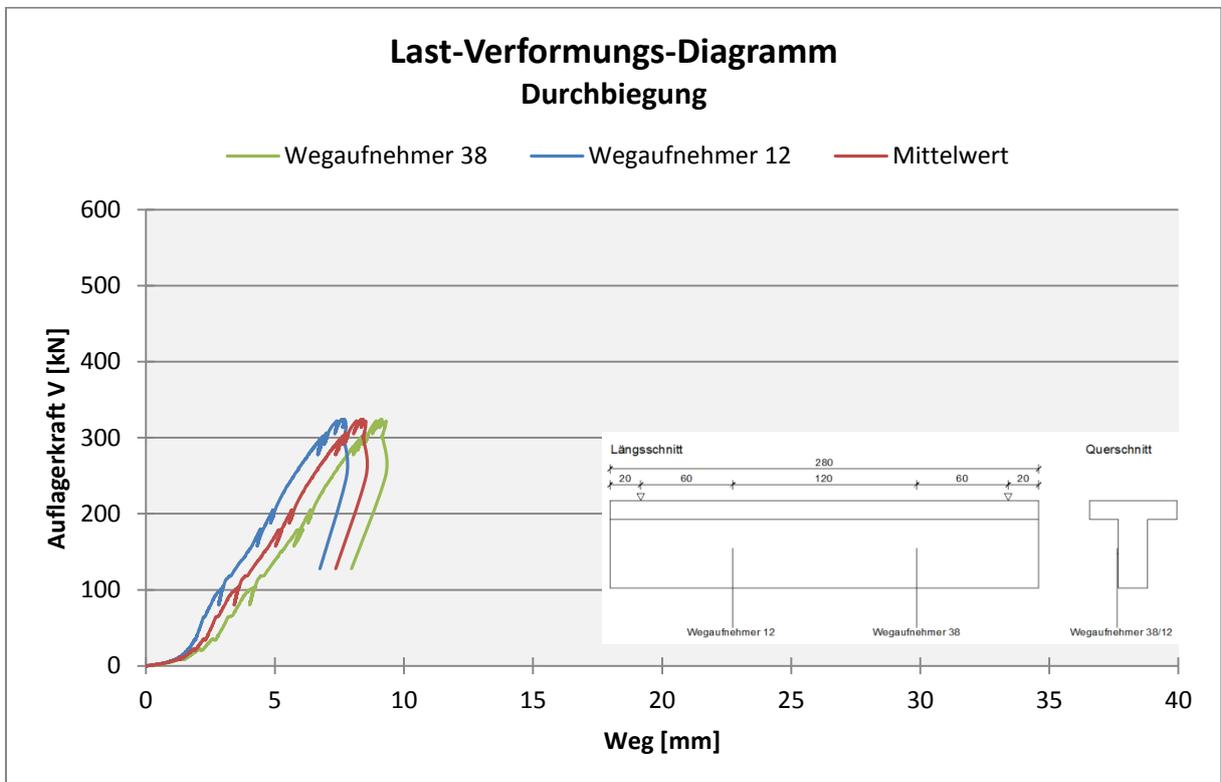
Prüfkörper BB6

Körper	$f_{c,cube}$	Biegezugbewehrung	statische Nutzhöhe	Querkraftbewehrung	Belastungsart	Bruchlast V_u	Querkraftbewehrung
	N/mm ²	cm ²	cm	cm ² /m		kN	
BB6	24,1	4Ø18 4Ø12	54	7Ø6 e=14cm	Einzellast	323,9	Bügel Ø6mm
		12,4		4,07			

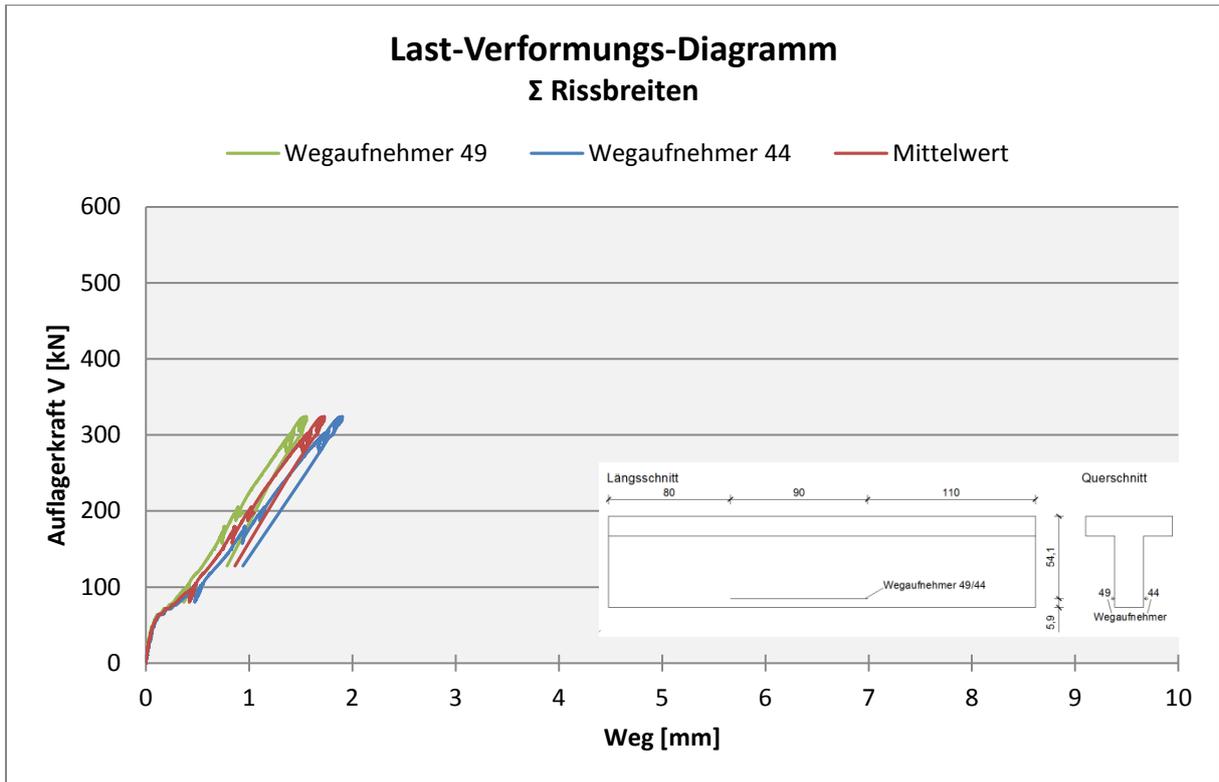




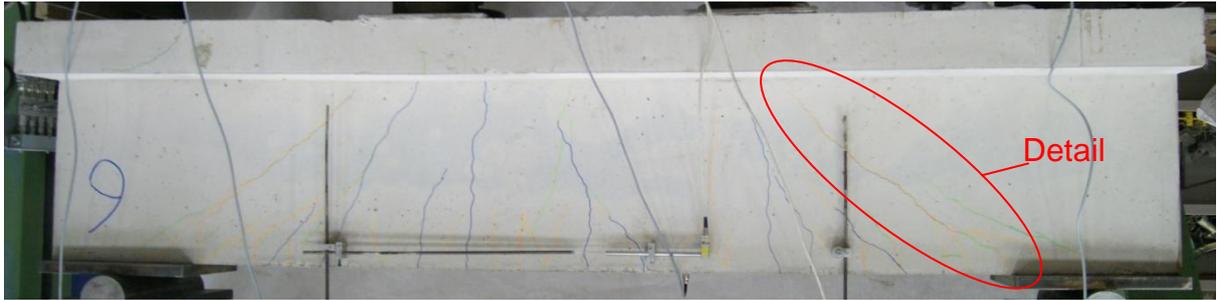
Zeit-Kraft-Diagramm Körper – BB6



Messwerte der Durchbiegung im Viertelpunkt – Körper BB6



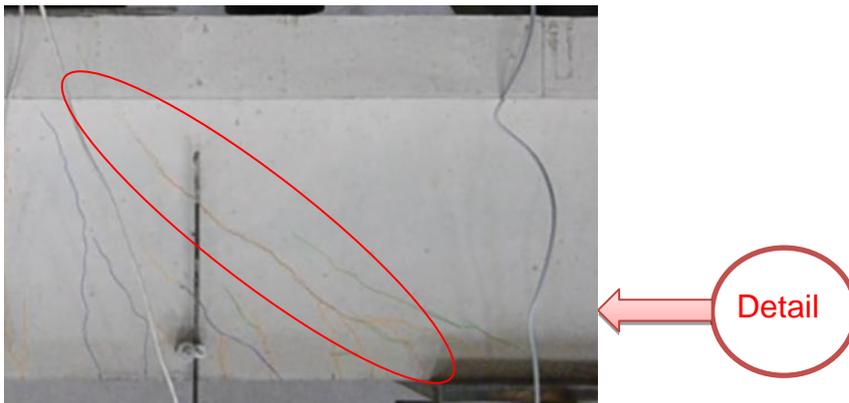
Messwerte der Σ der Rissbreiten in Höhe der Biegezugbewehrung – Körper BB6



Rissbild – Körper BB6

Laststufe	100kN	200kN	300kN	400kN
Markierungsfarbe	Blau	Gelb	Grün	rot

Anzahl der Hauptrisse in Höhe der Zugbewehrung = 12



Schrägriss – Körper BB6

3. Stahlkennwerte

Körper	Typ	Material	Bügel des L-Blechs BSt 500			
			Streckgrenze f_y	Zugfestigkeit f_u	Streckgrenze f_y	Zugfestigkeit f_u
			[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
AA2; AA3	Bügel ø6	BSt 500	572	610	-	-
AA4	HDB-Anker	BSt 500G	486	801	-	-
AA5	L5-Blech	S235JR	346	433	575	621
AA6	Bügel ø8	BSt 500	501	615	-	-
BA1; BB1; BB3; BB5	L5-Blech	S235JR	346	433	545	617
BA3;BA4	L3-Blech	S235JR	340	416	545	617
BA5 ¹⁾ ; BA6; BB6	Bügel ø6	BSt 500	575	632	-	-
BA5 ²⁾	Bügel ø6	BSt 500	566	625	-	-
BB2; BB4	Z5-Blech	S235JR	289	443	-	-

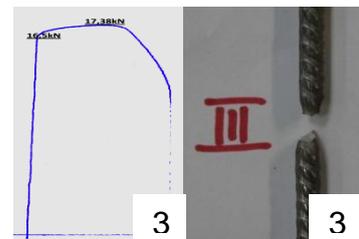
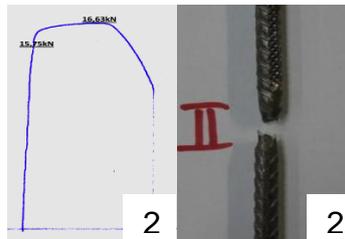
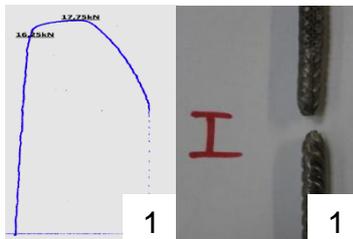
Zusammenstellung der Stahlkennwerte

1) Körper BA5 – äußerer Bügel

2) Körper BA5 – innerer Bügel

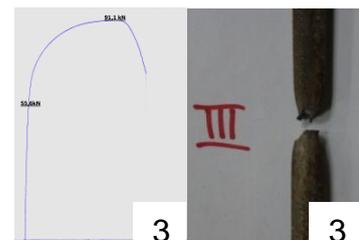
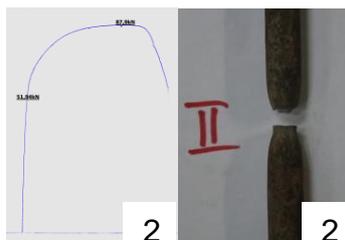
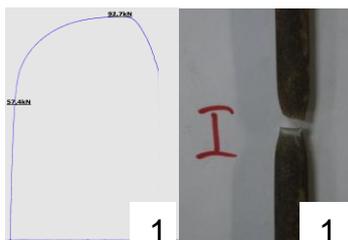
Bügel Ø6:
(Körper AA2;AA3)

Streckgrenze $f_{y,mittel} = 572 \text{ N/mm}^2$
Zugfestigkeit $f_{u,mittel} = 610 \text{ N/mm}^2$

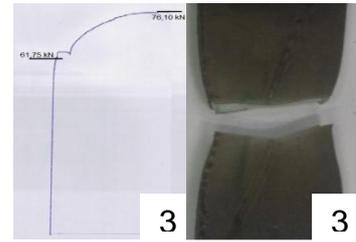
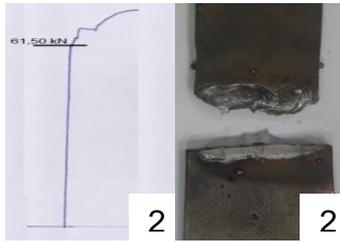
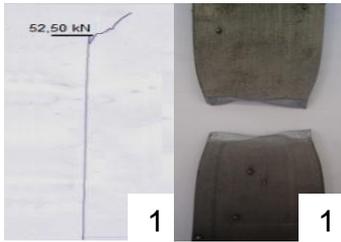


HDB-Anker Ø12:
(Körper AA4)

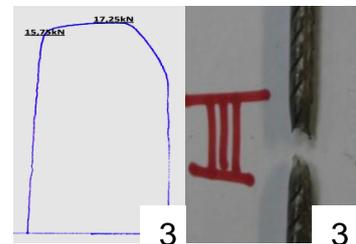
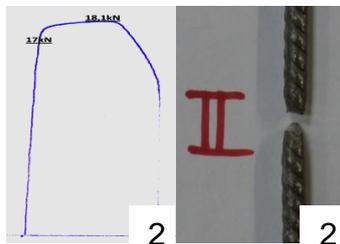
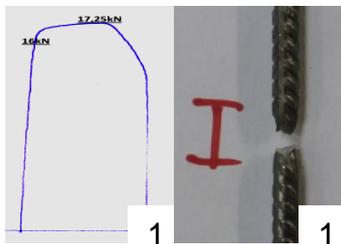
Streckgrenze $f_{y,mittel} = 486 \text{ N/mm}^2$
Zugfestigkeit $f_{u,mittel} = 801 \text{ N/mm}^2$



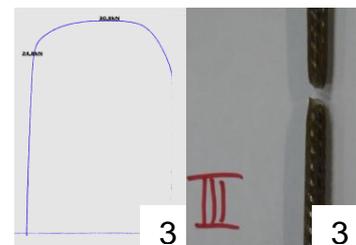
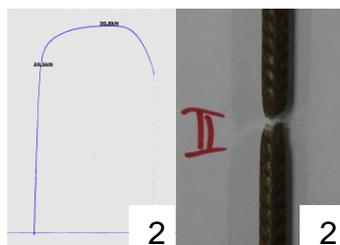
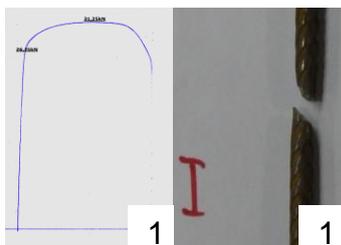
L5-Blech: Streckgrenze $f_{y,mittel} = 346 \text{ N/mm}^2$
 (Körper AA5; BA1; BB1; BB3; BB5) Zugfestigkeit $f_{u,mittel} = 433 \text{ N/mm}^2$



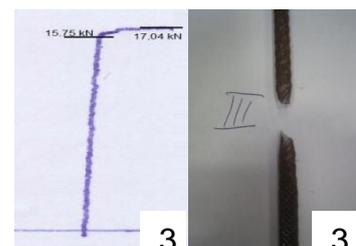
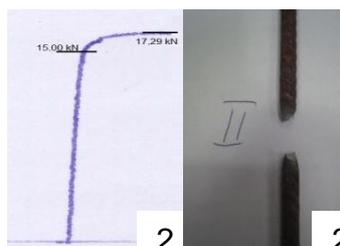
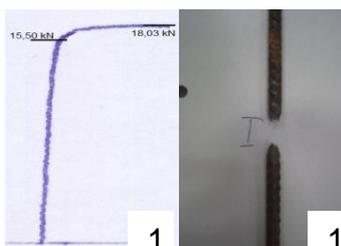
Bügel Ø6: Streckgrenze $f_{y,mittel} = 575 \text{ N/mm}^2$
 (Körper AA5) Zugfestigkeit $f_{u,mittel} = 621 \text{ N/mm}^2$



Bügel Ø8: Streckgrenze $f_{y,mittel} = 501 \text{ N/mm}^2$
 (Körper AA6) Zugfestigkeit $f_{u,mittel} = 615 \text{ N/mm}^2$

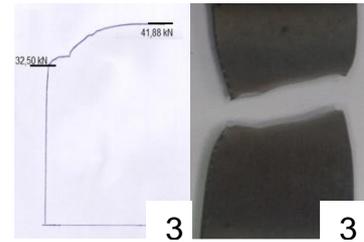
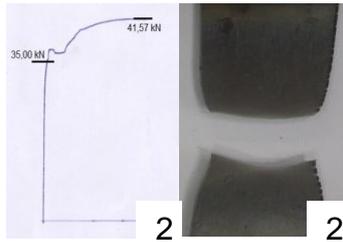
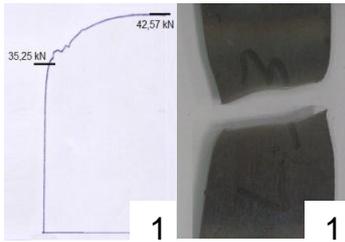


Bügel Ø6: Streckgrenze $f_{y,mittel} = 545 \text{ N/mm}^2$
 (Körper BA1; BA3; BA4; BB1; BB3; BB5) Zugfestigkeit $f_{u,mittel} = 617 \text{ N/mm}^2$



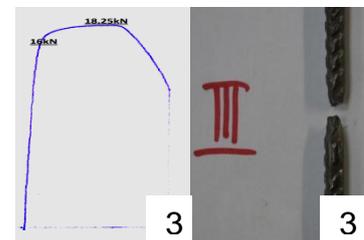
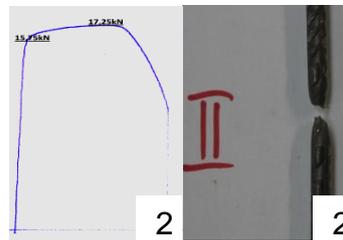
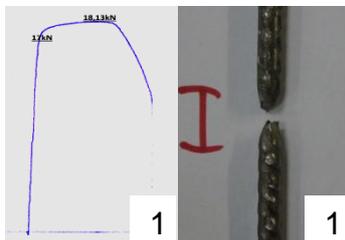
L3-Blech:
(Körper BA3;BA4)

Streckgrenze $f_{y,mittel} = 340 \text{ N/mm}^2$
Zugfestigkeit $f_{u,mittel} = 416 \text{ N/mm}^2$



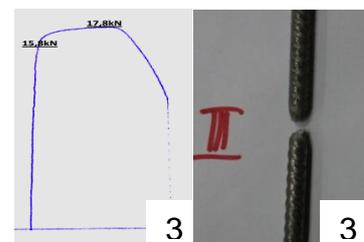
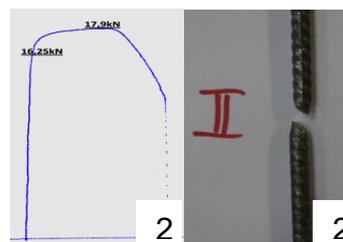
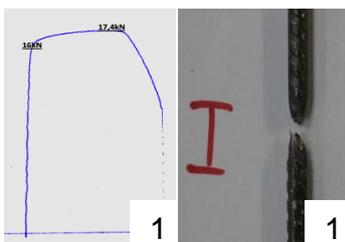
Bügel Ø6:
(Körper BA5 – äußerer Bügel;
BA6; BB6)

Streckgrenze $f_{y,mittel} = 575 \text{ N/mm}^2$
Zugfestigkeit $f_{u,mittel} = 632 \text{ N/mm}^2$



Bügel Ø6:
(Prüfkörper BA5 – innerer Bügel)

Streckgrenze $f_{y,mittel} = 566 \text{ N/mm}^2$
Zugfestigkeit $f_{u,mittel} = 625 \text{ N/mm}^2$



Z5-Blech:
(Körper BB2; BB4)

Streckgrenze $f_{y,mittel} = 289 \text{ N/mm}^2$
Zugfestigkeit $f_{u,mittel} = 443 \text{ N/mm}^2$

