

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 20124 N

## Thema

Innovative Konstruktions- und Bemessungsregeln zur Optimierung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von freitragenden Wandplatten aus LAC

## Berichtszeitraum

01. Oktober 2018 bis 30. September 2020  
(Schlussbericht)

## Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Leichtbeton e.V.  
Sandkauler Weg 1, 56564 Neuwied

## Forschungseinrichtung(en)

1

Technische Universität Kaiserslautern (TUK)  
Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion  
Paul-Ehrlich-Straße 14  
67663 Kaiserslautern

2

Hochschule Koblenz (HS Koblenz)  
Fachgebiet Massivbau  
Konrad-Zuse-Straße 1  
56075 Koblenz

Gefördert durch:

KL, 22.03.2020

Ort, Datum



Matthias Pahn, Forschungseinrichtung 1 (TUK)

Kaiserslautern, 22.03.2021

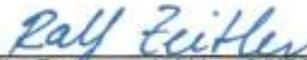
Ort, Datum



Nora Bies, Forschungseinrichtung 1 (TUK)

Koblenz, 24.03.2021

Ort, Datum



Ralf Zeitler, Forschungseinrichtung 2 (HS Koblenz)

Koblenz, 25.03.2021

Ort, Datum



Martina Schwetz, Forschungseinrichtung 2 (HS Koblenz)

## 1. Danksagung

Das IGF-Forschungsvorhaben 2014 N der Forschungsvereinigung Leichtbeton e.V. wurde durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert. Folgende Unternehmen und Institutionen waren im projektbegleitenden Ausschuss vertreten:

### **Unternehmen, Institution:**

Bauingenieurbüro Christoph Werf  
BORAPA Ingenieurgesellschaft mbH  
F. C. Nüdling Fertigteiletechnik GmbH + Co. KG  
Fensterle Beton- und Fertigteiletechnik GmbH  
Fibo ExClay Deutschland GmbH  
Fries Architekten  
Sahm-Ingenieure  
Thermodur Wandelemente GmbH & Co. KG  
Bundesverband Leichtbeton e. V.  
Technische Universität Darmstadt  
Universität der Bundeswehr München

### **Vertreten durch:**

Dipl.-Ing. Christoph Werf  
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell  
Dipl.-Ing. Thomas Zentgraf  
Dipl.-Ing. Frank Schulz  
Dipl.-Ing. Jörg Kleinschmidt  
Rainer Freisberg  
Dipl.-Ing. Kai-Uwe Sahm  
Dipl.-Ing. Christian Schudra  
Dipl.-Ing. Dieter Heller  
Prof. Dr. ir. Eddie Koenders  
Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel

Dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF), der Forschungsvereinigung Leichtbeton e. V. sowie der Beratergruppe danken wir an dieser Stelle herzlich für die fortwährende Unterstützung.

## 2. Verwendung der Zuwendung

Die Zuwendungen wurden, wie in den nachfolgenden Tabellen aufgelistet, von der TU Kaiserslautern (Forschungseinrichtung 1) und der HS Koblenz (Forschungseinrichtung 2) verwendet:

### Forschungseinrichtung 1: TU Kaiserslautern

Bez.	Zeitraum	Mann- monate	Summe Mann- monate	Kosten			
				2018	2019	2020	Summe
A	Personalausgaben						
A.1	Wiss.-tech. Personal (Wissenschaftliche Mitarbeiter)						
	01.10.2018- 31.01.2019	2	26	8.193,76 €	2.815,95 €	0,00 €	11.009,71 €
	01.10.2018- 31.01.2019	4		16.444,67 €	5.521,13 €	0,00 €	21.965,80 €
	01.02.2019- 31.03.2019	1		0,00 €	5.521,14 €	0,00 €	5.521,14 €
	01.01.2019- 31.07.2020	19		0,00 €	57.274,22 €	37.658,11 €	94.932,33 €
	<b>Summe</b>	<b>26</b>		-	<b>24.638,43 €</b>	<b>71.132,44 €</b>	<b>37.658,11 €</b>
A.2	Übriges Fachpersonal (Labormitarbeiter)						
	01.04.2019- 30.09.2020	15,3	15,3	0,00 €	26.020,49 €	27.272,25 €	53.292,74 €
	<b>Summe</b>	<b>15,3</b>	-	<b>0,00 €</b>	<b>26.020,49 €</b>	<b>27.272,25 €</b>	<b>53.292,74 €</b>
A.3	Hilfskräfte (Hilfswissenschaftler)						
	01.11.2018- 31.03.2019	0,513	2,67	452,32 €	678,48 €	0,00 €	1.130,80 €
	01.04.2019- 31.05.2019	0,3076		0,00 €	691,85 €	0,00 €	691,85 €
	01.04.2019- 30.09.2019	0,9228		0,00 €	2.085,06 €	0,00 €	2.085,06 €
	01.07.2019- 30.09.2019	0,3078		0,00 €	562,64 €	0,00 €	562,64 €
	01.04.2019- 30.09.2019	0,6156		0,00 €	1.396,70 €	0,00 €	1.396,70 €
<b>Summe</b>	<b>2,67</b>	-	<b>452,32 €</b>	<b>5.414,73 €</b>	<b>0,00 €</b>	<b>5.867,05 €</b>	
A.4	Pauschale für Personalausgaben						
	-	-	-	1.756,35 €	7.229,76 €	3.883,89 €	12.870,00 €
D	Pauschale für Sonstige Ausgaben						
	-	-	-	5.300,00 €	21.000,00 €	13.070,00 €	39.370,00 €
<b>Summe</b>		<b>43,9668</b>		<b>32.147,10 €</b>	<b>130.797,42 €</b>	<b>81.884,25 €</b>	<b>244.828,77 €</b>

## Forschungseinrichtung 2: HS Koblenz

Einzelansätze	Zuwendung laut aktuellem Einzel- finanzierungsplan	Im Bewilligungszeitraum verursachte Ausgaben		
		laut letzter Zwischenabrechnung	laut beiliegender Belegliste	kumuliert
	€	€	€	€
A.1 Bruttoentgelte für wiss.-techn. Personal	120.350,00	83.839,83	52.262,28	136.102,11
A.2 Bruttoentgelte für übriges Fachpersonal	48.410,00	8.938,05	27.698,85	36.636,90
A.3 Bruttoentgelte für Hilfskräfte	7.650,00	5.531,46	930,22	6.461,68
A.4 Pauschale für Personal- ausgaben (7 %)	12.330,00	12.330,00	0,00	12.330,00
B. Ausgaben für Gerätebeschaffung				
C. Ausgaben für Leistungen Dritter				
D. Pauschale für Sonstige Ausgaben (20 %)	37.740,00	34.440,00	3.300,00	37.740,00
Gesamtbetrag	226.480,00	145.079,34	84.191,35	229.270,69
Einnahmen		154.500,00	60.660,00	215.160,00
Mehrausgabe (+) bzw. Bestand (-)				14.110,69

### **3. Ergebnisse**

Zur Dokumentation der Projektergebnisse wurde dieser ausführliche Schlussbericht erstellt. Durch ihn wird sichergestellt, dass die im Rahmen dieses Projektes gewonnenen Erkenntnisse auch für zukünftige Forschungsprojekte als Grundlage zur Verfügung stehen.

### **4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleiteten Arbeiten**

Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

### **5. Nutzen der erzielten Ergebnisse**

#### **5.1. Wissenschaftlich-technischer Nutzen der erzielten Ergebnisse**

- Berücksichtigung materialspezifischer Besonderheiten von LAC bei der Planung, Umsetzung und Auswertung experimenteller Untersuchungen zum Tragverhalten LAC bewehrter Bauteile aus LAC.
- Entwicklung eines Versuchsaufbaus für die Untersuchung der Tragfähigkeit von Bauteilen aus LAC unter kombinierter Biege-, Querkraft- und Torsionsbeanspruchung (Interaktion).
- Die Forderung geschlossener Bügelkörbe nach DIN 4213 kann aufgrund der vorliegenden Ergebnisse des Vorhabens nicht begründet werden.
- Die nach DIN EN 1520 geforderten Schubleitern stellen eine gut umsetzbare Alternative dar und führen zu einer optimierten Querkrafttragfähigkeit.
- Unter bestimmten Voraussetzungen können nicht verschweißte Einzelstäbe mit Endhaken eingesetzt werden.
- Erkenntnisse zur Verankerung von Bewehrung in LAC können zur Weiterentwicklung von Bewehrungskonstruktionen und zum Einsatz alternativer Bewehrungsmaterialien führen, da Betonstahl nur gering ausgenutzt werden kann.

#### **5.2. Wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse**

- Erkenntnisse über das Tragverhalten, insbesondere der Querkrafttragfähigkeit, bewehrter Bauteile aus LAC mit unterschiedlichen konstruktiven Durchbildungen.
- Verschiedene Konstruktionen der Querkraftbewehrung bieten Tragwerksplanern die Möglichkeit, zwischen Tragfähigkeit und wirtschaftlichen Gesichtspunkten bei der konstruktiven Durchbildung individuell für ein Bauteil zu entscheiden.

#### **5.3. Innovativer Beitrag der erzielten Ergebnisse**

- Entwicklung und experimentelle Untersuchung von innovativen konstruktiven Durchbildungen

#### **5.4. Industrielle Anwendungsmöglichkeiten der erzielten Ergebnisse**

- Unter der Voraussetzung einer Überarbeitung der DIN 4213 können neue, innovative konstruktive Durchbildungen hergestellt werden.
- Der Einbau von Querkraftbewehrung im Herstellungsprozess wird erleichtert.
- Das aufwändige Verdichten mittels Handrüttlern für Wandelemente ist nicht mehr erforderlich.
- Bauteile mit Querkraftbewehrung können einwandfrei im praxisüblichen Walzverfahren verdichtet werden.
- Auf eine Umstellung der üblichen Produktionsabläufe in Fertigteilwerken kann verzichtet werden.

## **6. Veröffentlichungen**

### **6.1. Bisherige Veröffentlichungen im Rahmen des Forschungsvorhabens**

- Schwetz, Martina; Pahn, Matthias; Zeitler, Ralf; Bies, Nora (2020): Tragfähigkeit von freitragenden Wandplatten aus LAC. Hauswerksporiger Leichtbeton. In: FBF Betondienst GmbH (Hg.): Tagungsband 64. Betontage. Concrete Solutions. Neu-Ulm, S. 41.
- Schwetz, Martina; Zeitler, Ralf; Pahn, Matthias (2020): Untersuchungen zur Verankerung von Bewehrungsstäben mit Endhaken in LAC. In: BWI - BetonWerk International (5), S. 12–18.

### **6.2. Geplante Veröffentlichungen**

- Schwetz, Martina; Pahn, Matthias; Zeitler, Ralf (2021): Querkrafttragfähigkeit von Wandelementen aus LAC. In: FBF Betondienst GmbH (Hg.): Tagungsband 65. Betontage. Concrete Solutions. 2021

### **6.3. Studentische Arbeiten**

- Hilger, David (2019): Experimentelle Untersuchungen zu den Material- und Festigkeitseigenschaften von haufwerksporigem Leichtbeton. Bachelorarbeit. Koblenz.
- Naumann, Nicolas (2021): Experimentelle Untersuchung der Tragfähigkeit von Wandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton (LAC) unter kombinierter Biege-, Querkraft- und Torsionsbeanspruchung. Bachelorarbeit. Kaiserslautern.
- Kutscheid, Laurenz (2021): Bemessung von freitragenden Fassadenelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton (LAC) und Vergleich mit experimentellen Daten. Bachelorarbeit. Kaiserslautern.

## 7. Ergebnistransferplan

### 7.1. Spezifische Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Während der Laufzeit des Forschungsvorhabens wurden die durchgeführten Arbeiten und erzielten Forschungsergebnisse in einem aktiven Dialog mit interessierten Unternehmen aus der Wirtschaft (KMU) vorgestellt und diskutiert. Auf der Homepage der TU Kaiserslautern (Forschungseinrichtung 1) und der Hochschule Koblenz (Forschungseinrichtung 2) wird das Forschungsvorhaben dauerhaft in einem Kurzbeitrag vorgestellt. Die Forschungsergebnisse in Form des Schlussberichts können interessierten Unternehmen (KMU) auf Anfrage zum Download zur Verfügung gestellt werden.

Maßnahme	Ziel	Ort/ Rahmen	Datum/ Zeitraum
Kontaktaufnahme zu interessierten Unternehmen	Wissenschaftstransfer und Interessenabstimmung	Aktiver Dialog und gezielter Austausch mit Mitgliedern des PA und weiteren interessierten Unternehmen	Seit Beantragung
Projekthomepage	Öffentliche Information	Auszüge zu Forschungsaktivität; öffentlich zugänglich	seit 11/2018
Die Projekthomepage mit Darstellung des Forschungsvorhabens und der Projektbeteiligten wurde am 01.11.2018 veröffentlicht. Auf der Homepage der TU Kaiserslautern wurde anlässlich des Kick-off-Meetings am 22.11.2018 eine Mitteilung veröffentlicht.			
Projektbegleitender Ausschuss (PA)	Abstimmung von Grundsatzentscheidungen, kontinuierliche Diskussion der Forschungsergebnisse	Halbjährliche Sitzungen mit allen Teilnehmern	seit 10/2018
Es fanden drei Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses statt. <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sitzung: 22.01.2019</li> <li>2. Sitzung: 05.02.2020</li> <li>3. Sitzung: 13.09.2020</li> </ol>			
Vorträge und Veröffentlichungen	Wissenstransfer in die Wirtschaft, Information Fachwelt	Vorstellung von Zwischenergebnissen auf Fachtagungen, Veröffentlichungen über den Bundesverband Leichtbeton	seit 10/2018
Integration in die Lehre	Heranführen von Studierenden an wissenschaftliches Arbeiten	Einbeziehung in Vorlesungsveranstaltungen, Vergabe von Abschluss- und Projektarbeiten	seit 10/2018
Zu den Themen dieses Projektes wurden mehrere Abschlussarbeiten durchgeführt.			
Normungsarbeit	Anpassung und Weiterentwicklung der Normen (national und international)	Normenausschuss NA 005-06-10 AA und NA 005-07-09 AA (DIN 4213 und DIN EN 1520)	seit 10/2018

## 7.2. Spezifische Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Die erzielten Ergebnisse werden auch über das Projektende hinaus dazu verwendet in internationalen und nationalen Gremien langfristig als Datenbasis für die Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Wandelementen aus LAC dienen. Zusätzlich können die Ergebnisse auch bei zukünftigen Forschungsprojekten miteinbezogen und hierdurch ganzheitlich erweitert werden.

Eine Übersicht des Ergebnistransfers in die Wirtschaft ist im Folgenden zusammengefasst:

Maßnahme	Ziel	Ort/ Rahmen	Datum/ Zeitraum
Projekthomepage	Veröffentlichung der Ergebnisse	Bereitstellung des Schlussberichts	ab 08/2020
Veröffentlichungen	Wissenstransfer in die Wirtschaft	nationale und internationale Fachzeitschriften (z.B. Beton- und Stahlbetonbau, Bauingenieur, DAfStb-Hefte)	ab 01/2020
Tagungsbeitrag	Vorstellung der Ergebnisse	Fachtagungen	ab 01/2020
Normungsarbeit	Anpassung und Weiterentwicklung der Normen	Normenausschüsse NA 005-06-10 AA und NA 005-07-09 AA	ab 08/2020

## 7.3. Realisierbarkeit des Transferkonzepts

Das vorgeschlagene Konzept für den Transfer der Ergebnisse ist ohne abzusehende Schwierigkeiten in allen Punkten realisierbar.

Schlussbericht zum AiF Forschungsvorhaben 20124 N

# **Innovative Konstruktions- und Bemessungsregeln zur Optimierung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von freitragenden Wandplatten aus LAC**

**HS Koblenz:**

Ralf Zeitler

Martina Schwetz

**TU Kaiserslautern:**

Matthias Pahn

Nora Bies

Stand 31.03.2021

## Inhalt

<b>1</b>	<b>VORWORT UND EINLEITUNG</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>STAND DER TECHNIK</b>	<b>6</b>
2.1	Haufwerksporiger Leichtbeton	6
2.2	Grundlagen der Bemessung	7
2.2.1	Freitragende Wandbauteile aus LAC nach DIN 4213	7
2.2.2	Freitragende Wandbauteile aus LAC nach DIN EN 1520	8
2.3	Querkraftbemessung nach DIN EN 1520 und DIN 4213	8
2.3.1	Bauteile ohne Querkraftbewehrung	8
2.3.2	Bauteile mit Querkraftbewehrung	9
2.4	Wandbauteile aus LAC von Thermodur Wandelemente GmbH & Co. KG	9
2.5	Voruntersuchungen: Tastversuche an Wandelementen aus LAC in 2015	11
2.6	Konstruktive Durchbildung und Problemstellung	12
2.7	Fazit	13
<b>3</b>	<b>EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR VERANKERUNG</b>	<b>14</b>
3.1	Versuchsaufbau	14
3.2	Versuchsprogramm	15
3.3	Geometrie der Versuchskörper	17
3.4	Herstellung und Verdichtung	17
3.5	Messtechnik	18
3.6	Versuchsdurchführung	19
3.7	Werkstoffeigenschaften	19
3.7.1	Haufwerksporiger Leichtbeton	19
3.7.2	Betonstahl	20
3.8	Versuchsergebnisse	20
<b>4</b>	<b>EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES QUERKRAFTTRAGVERHALTENS VON WANDELEMENTEN AUS LAC</b>	<b>23</b>
4.1	Versuchsaufbau	23
4.2	Versuchsprogramm	24
4.3	Geometrie der Versuchskörper	25
4.4	Herstellung und Verdichtung	28
4.5	Messtechnik	28
4.5.1	Wegaufnehmer (WA)	29
4.5.2	Dehnungsmessung am Bewehrungsstab (DMS)	30
4.6	Versuchsdurchführung	30
4.7	Werkstoffeigenschaften	30
4.7.1	Haufwerksporiger Leichtbeton	30
4.7.2	Betonstahl B500	31

4.8	Versuchsergebnisse	31
4.8.1	Bauteile ohne Querkraftbewehrung	32
4.8.2	Bauteile mit Querkraftbewehrung	34
4.9	Interpretation der Versuchsergebnisse	44
4.9.1	Bauteile ohne Querkraftbewehrung	44
4.9.2	Bauteile mit Querkraftbewehrung	45
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES TRAGVERHALTENS UNTER KOMBINIERTER BIEGE-, QUERKRAFT- UND TORSIONSBEANSPRUCHUNG VON WANDELEMENTEN AUS LAC</b>	<b>49</b>
5.1	Allgemeines Versuchskonzept	49
5.1.1	Einwirkungen aus der realen Einbausituation	49
5.1.2	Konstruktive Durchbildung	49
5.1.3	Beton und Dämmkerne	49
5.2	Probekörper	49
5.3	Herstellung der Probekörper	52
5.3.1	Dehnmessstreifen (DMS)	52
5.3.2	Herstellung der Probekörper	53
5.4	Versuchsaufbau	56
5.5	Messkonzept	58
5.6	Versuchsdurchführung	59
5.7	Versuchsbegleitende Materialprüfung	60
5.8	Versuchsergebnisse	61
5.8.1	Erreichte Traglast und Verformung in Feldmitte	61
5.8.2	Rissbilder	62
5.8.3	Horizontale Verformung am oberen und unteren Bauteilrand in Feldmitte	63
5.8.4	Neigung im Drittelspunkt	66
5.8.5	Verformungen in der Bauteileben	67
5.8.6	DMS	70
5.8.7	Zeitlicher Verlauf	73
5.8.8	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	79
5.9	Interpretation der Versuchsergebnisse	79
5.9.1	Schnittgrößenermittlung in Abhängigkeit der Prüflast F	79
5.9.2	Gegenüberstellung von berechneten Traglasten und Versuchsergebnissen	80
<b>6</b>	<b>AUSBLICK UND OFFENE FRAGEN</b>	<b>86</b>
<b>7</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>87</b>
<b>8</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>89</b>
<b>9</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>93</b>

## **1 Vorwort und Einleitung**

Vorgefertigte Wandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton (LAC - Lightweight Aggregate Concrete) werden seit Jahrzehnten erfolgreich als tragende und nicht tragende Fassadenelemente eingesetzt. Durch ihre wärmedämmenden Eigenschaften und die gleichzeitig steigenden bauphysikalischen Anforderungen der Energieeinsparverordnung gewinnen sie weiter an Bedeutung. Unzureichende Erkenntnisse zum Tragverhalten freitragender Wandbauteile aus LAC führen zu normativen Einschränkungen, die den Herstellungsprozess und die konstruktive Durchbildung der Fertigteile erschweren.

Für die Herstellung von LAC kommen künstliche Zuschläge wie beispielsweise Blähglas oder Blähton und natürlich vorkommender Bimsstein zum Einsatz. Bims ist ein poröses Vulkangestein, das durch Aufschäumen zähflüssiger Lava durch Wasserdampf und Kohlendioxid bei einer gasreichen vulkanischen Eruption entsteht. In Deutschland lagern infolge der Eruption des Laacher See Vulkans riesige Mengen an Bims im Neuwieder Becken. Die daraus resultierende Relevanz des Rohstoffs Bims für die Region belegen nicht nur die Anzahl an Unternehmen, sondern auch der Sitz des Bundesverband Leichtbeton e.V. in Neuwied.

Der Einsatz von LAC in der Fertigteilindustrie begründet sich in der isolierenden Wirkung der feinen Luftporen im Bims und der Hohlräume im offenen Gefüge des LAC. Zudem weist LAC eine hervorragende CO<sub>2</sub>-Bilanz über den gesamten Lebenszyklus und eine gute Recyclingfähigkeit auf. Aufgrund dieser Vorteile bietet sich LAC als Fassadenbaustoff an.

Fassadenplatten aus LAC, die primär zur Ausfachung von Stahlbetonskelettbauten im Gewerbebau dienen, können jedoch in Deutschland aufgrund der aktuell geltenden Normungen nicht wirtschaftlich hergestellt werden, da zur Aufnahme von Schubkräften geschlossene Bewehrungskörbe gefordert werden. Darüber hinaus darf das bewährte Walzverfahren für freitragende Bauteile in Deutschland nicht angewendet werden, was eine aufwändige Verdichtung von Hand erfordert. Während auf europäischer Ebene Schubleitern zum Einsatz kommen und die Verdichtung im Walzverfahren für freitragende Elemente aus LAC zugelassen ist, erfahren deutsche Firmen durch die normativen Einschränkungen einen erheblichen Wettbewerbsnachteil.

Das Ziel dieses Projekts war es, neue Erkenntnisse über das Tragverhalten freitragender Wandbauteile aus LAC zu gewinnen und daraus umsetzbare Konstruktions- und Bemessungsempfehlungen abzuleiten.

## 2 Stand der Technik

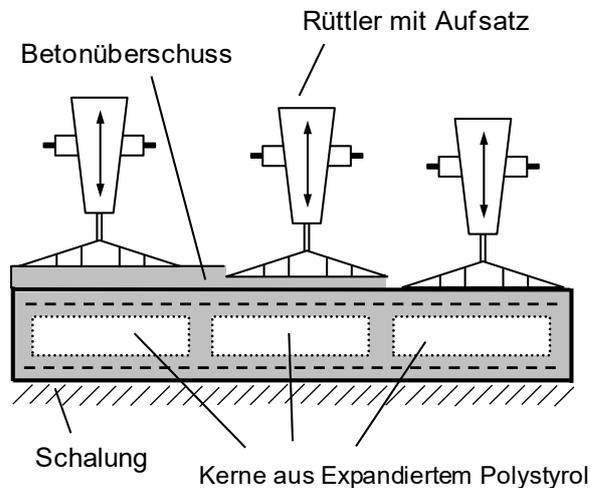
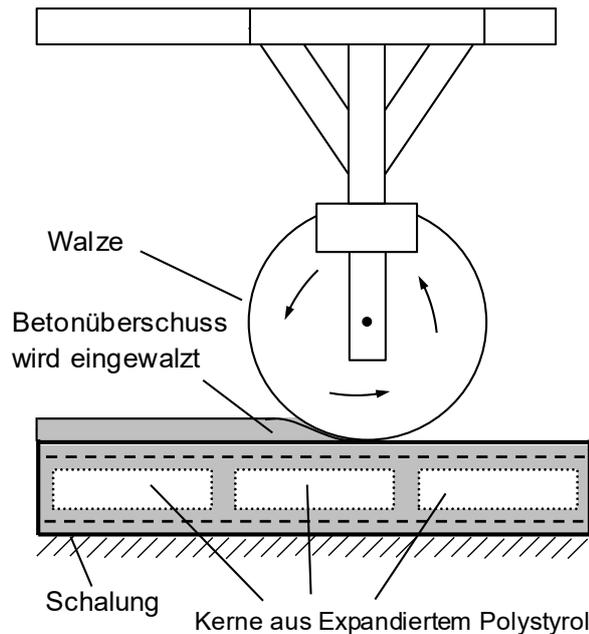
### 2.1 Haufwerksporiger Leichtbeton

Während bei gefügedichten Leichtbetonen nur die schwere Gesteinskörnung durch leichte Zuschläge ersetzt und das Gefüge mit Sanden und Zementleim geschlossen wird, ist für den haufwerksporigen Leichtbeton ein offenes Gefüge charakteristisch. Die sogenannten Haufwerksporen entstehen durch gezieltes Auslassen oder Reduzieren einzelner Korngruppen, sodass keine Feinkornanteile die Hohlräume füllen. Zusätzlich wird der Zementleimgehalt so weit reduziert, dass dieser gerade ausreicht, um die Gesteinskörner an ihren Berührungsstellen punktweise zu verkitten. So verbleiben auch nach dem Verdichten gezielt Hohlräume im Gefüge des Leichtbetons. Bei haufwerksporigem Leichtbeton kommen sowohl natürliche, leichte Gesteinskörnungen (z. B.: gebrochene Schaumlava, Bims) zum Einsatz, als auch industriell gefertigte Gesteinskörnungen (z. B.: Blähton, Blähschiefer). Das Gefüge eines haufwerksporigen Leichtbetons ist exemplarisch in Abbildung 2-1 dargestellt.



**Abbildung 2-1: Gefüge haufwerksporiger Leichtbeton**

Durch den niedrigen w/z-Wert und den geringen Anteil an Zementleim erhält LAC eine vergleichsweise steife Frischbetonkonsistenz. Ein Verdichten mit Innenrüttlern ist aufgrund der fehlenden Fließfähigkeit des Betons nicht möglich. Bauteile aus LAC werden daher in Fertigteilwerken mit einer speziellen Verdichtungstechnik hergestellt. Dabei kommt vorwiegend das Walzverfahren zum Einsatz. In diesem Herstellungsverfahren wird der Beton schichtweise in Stahlschalungen gefüllt und zunächst mit einem Außenrüttler verdichtet. Die oberen Schichten werden überhöht eingefüllt und mit einer Verdichtungswalze in die Schalung hinein gewalzt (Abbildung 2-2). Alternativ dazu besteht für Sonderfälle die Möglichkeit der Verdichtung von Hand, wobei mit einem Handrüttler und einem Spezialaufsatz verdichtet wird (Abbildung 2-3).



**Abbildung 2-2: Verdichtung von Bauteilen aus LAC mit Walze**    **Abbildung 2-3: Verdichtung von Bauteilen aus LAC von Hand**

Bei der Herstellung von Wandelementen aus LAC ist eine gezielte Verdichtung auf ein definiertes Maß erforderlich, um zwischen Festigkeit (hohes Verdichtungsmaß) und geringer Rohdichte (geringes Verdichtungsmaß und gute Wärmedämmeigenschaften) den richtigen Kompromiss zu finden [1]. Um eine möglichst gute Wärmedämmeigenschaft zu erzielen, wird die Rohdichte so gering wie möglich gehalten. Im Allgemeinen resultiert aus einer verminderten Rohdichte durch gezielt verbleibende Poren und Hohlräume im Betongefüge eine Verringerung der Druckfestigkeit und des E-Moduls des Leichtbetons [2].

## 2.2 Grundlagen der Bemessung

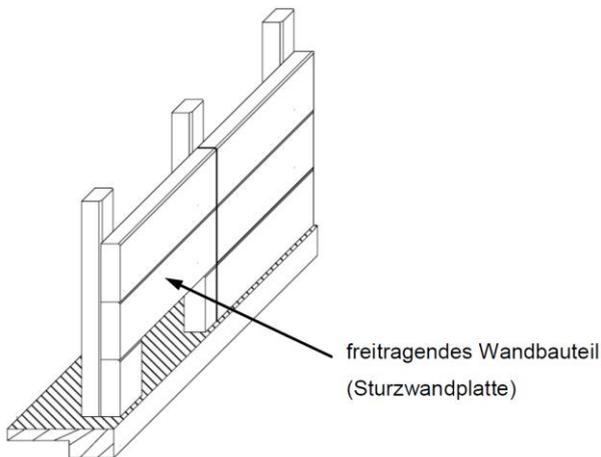
Die aktuell gültigen Normen für Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton bauen auf dem Teilsicherheitskonzept entsprechend des Eurocodes auf. Dabei sind Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungs- und Widerstandsseite definiert. Auf der Einwirkungsseite gelten DIN EN 1991-1-1:2010-12 sowie der Nationale Anhang für Deutschland DIN EN 1991-1-1/NA:2010-12 [3, 4].

Auf der Widerstandsseite gelten die europäische Produktnorm DIN EN 1520:2011-06 „Vorgefertigte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton und mit statisch anrechenbarer oder nicht anrechenbarer Bewehrung“ [3], die deutsche Anwendungsnorm DIN 4213:2015-10 „Anwendung von vorgefertigten Bauteilen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit statisch anrechenbarer oder nicht anrechenbarer Bewehrung in Bauwerken“ [4] und die technischen Regeln DIBt:2005-03 [5]. Die Bemessung von Bauteilen aus LAC kann nach DIN EN 1520:2011-06 auf rechnerischem Wege (Anhang A) oder anhand von Prüfungen (Anhang B) erfolgen. Die entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerte sind in Anhang C geregelt, wobei zusätzlich die nationalen Regelungen aus DIN 4213:2015-10 berücksichtigt werden müssen. In Deutschland ist die Bemessung anhand von Prüfungen nur in Verbindung mit einem besonderen Nachweis der Verwendbarkeit, z. B. einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung, anerkannt [4].

### 2.2.1 Freitragende Wandbauteile aus LAC nach DIN 4213

Nach DIN 4213 wird mit dem Begriff Sturzwandplatte ein „freitragendes, liegend angeordnetes Wandbauteil (bezeichnet), das neben seinem Eigengewicht durch gegebenenfalls darüber liegende Wandbauteile und geringfügige weitere Lasten z.B. aus Dächern, sowie neben der unmittelbar auf das Wandbauteil einwirkenden Windlasten gegebenenfalls auch durch die Windlast angeschlossener Bauteile, z.B. Fensterbänder belastet

wird“ [4]. In Abbildung 2-4 ist ein Tragsystem aus lastabtragenden und ausfachenden LAC-Bauteilen dargestellt. Das oberhalb einer Öffnung angeordnete freitragende Bauteil wird nach DIN 4213 als Sturzwandplatte bezeichnet.



**Abbildung 2-4: Wandelemente aus LAC, Stapelbauweise (nach Bild A.5 aus [4])**

Maßgebend für die Bemessung von Sturzwandplatten ist DIN EN 1520, A.8.2.2.4 [4]. Außerdem gilt für freitragende Wandplatten aus LAC nach DIN 4213 [4]:

- Auszuführen ist ein geschlossener umlaufender Bewehrungskorb, Abs. 7.7 (3)
- Wände mit gewaltem Querschnitt dürfen nicht als Sturzwandplatten verwendet werden, Abs. 7.7 (6)
- Die Auflagerkonstruktion ist so zu bemessen, dass sie mindestens ein Torsionsmoment von  $T_{Ed} = V_{Ed} \cdot L/300$  aus dem Träger aufnehmen kann, wobei  $V_{Ed}$  der Bemessungswert der vertikalen Auflagerkraft ist, Abs. 7.7 (5)
- Konventionelle Verdichtung von Hand mit Rüttler und Spezialaufsatz, da das Walzverfahren nach DIN 4213 nicht zulässig ist [4]

### **2.2.2 Freitragende Wandbauteile aus LAC nach DIN EN 1520**

Auf europäischer Ebene gelten nach DIN EN 1520 folgende Anforderungen an Sturzwandplatten [3]:

- Sturzwandplatten dürfen mit Hohlräumen im Kern hergestellt werden, Abs. 5.2.4
- Schubleiter zur Aufnahme der Vertikalkomponenten der Querkraft nach A.5, Abs. A.8.2.2.4 (3)
- Verdichtung mit Verdichtungswalze zulässig

### **2.3 Querkraftbemessung nach DIN EN 1520 und DIN 4213**

Das Bemessungskonzept für Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton basiert im Wesentlichen auf den Grundlagen im EC 2.

#### **2.3.1 Bauteile ohne Querkraftbewehrung**

Für den Querkraftnachweis für Bauteile aus LAC ohne Querkraftbewehrung gelten die folgenden Bedingungen.

$$\begin{aligned} V_{Ed} &\leq V_{Rd1} \\ V_{Ed} &< V_{Rd2} \end{aligned}$$

Der Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft  $V_{Rd1}$  für Bauteile ohne Querkraftbewehrung darf nach Gleichung (2-1) nach [3] wie folgt bestimmt werden.

$$V_{Rd1} = C_{Rd} \cdot k \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d \quad (2-1)$$

Dabei wird die Querkrafttragfähigkeit auf einen Mindestwert nach Gl. (2-2) festgelegt.

$$V_{Rd1} = v_{\min} \cdot b_w \cdot d \quad (2-2)$$

Alternativ darf der Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft  $V_{Rd1}$  mit Gleichung (2-3) aus [3] bestimmt werden. Diese Variante der Bemessung ist nach [4] in Deutschland jedoch nicht zugelassen.

$$V_{Rd1} = \tau_{Rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_1) \cdot b_w \cdot d \quad (2-3)$$

Der Bemessungswert der bis zum Versagen der gedachten Druckstreben aufnehmbaren Querkraft  $V_{Rd2}$  darf nach Gleichung (2-4) bestimmt werden.

$$V_{Rd2} = 0,5 \cdot \eta_1 \cdot b_w \cdot z \cdot v \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (2-4)$$

### 2.3.2 Bauteile mit Querkraftbewehrung

Für den Querkraftnachweis für Bauteile aus LAC mit Querkraftbewehrung gelten die folgenden Bedingungen.

$$V_{Ed} \leq V_{Rd2}$$

$$V_{Ed} < V_{Rd3}$$

Der Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft  $V_{Rd3}$  für Bauteile mit Querkraftbewehrung darf nach Gleichung (2-5) nach [3] unter Berücksichtigung von [4] wie folgt bestimmt werden.

$$V_{Rd3} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta \quad (2-5)$$

Für Balken mit lotrecht angeordneter Querkraftbewehrung darf alternativ der Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft  $V_{Rd3}$  mit Gleichung (2-6) aus [3] bestimmt werden. Dabei wird ein Traganteil der Querkraftbewehrung auf den Betontraganteil für Bauteile ohne Querkraftbewehrung  $V_{Rd1}$  nach Gleichung (2-3) addiert. Diese Variante der Bemessung ist nach DIN 4213 in Deutschland nicht zugelassen [4].

$$V_{Rd3} = V_{Rd1} + V_{wd} \quad (2-6)$$

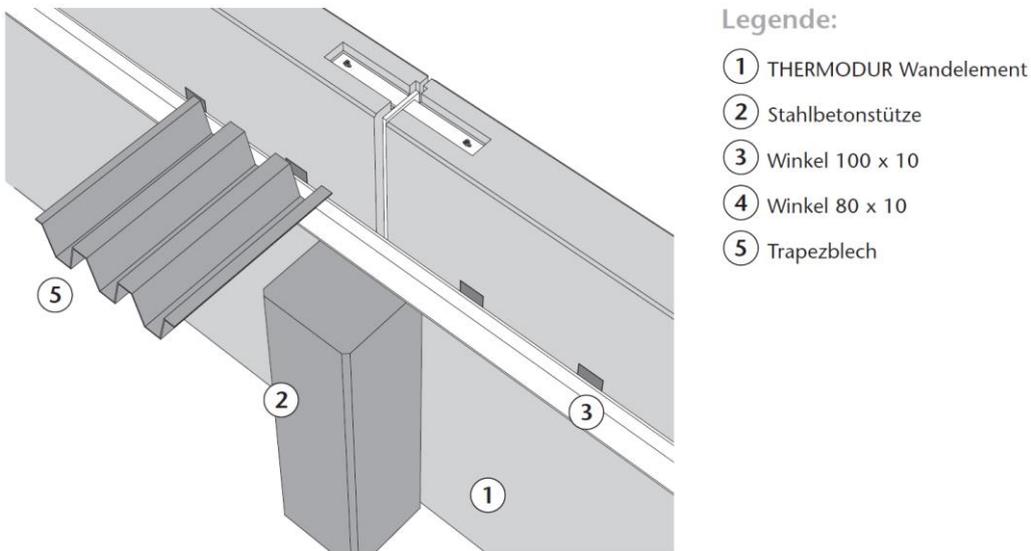
Dabei gilt  $V_{wd}$  als Beitrag der Querkraftbewehrung zum Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft. Dieser wird nach Gleichung (2-7) bestimmt.

$$V_{wd} = 0,8 \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \quad (2-7)$$

## 2.4 Wandbauteile aus LAC von Thermodur Wandelemente GmbH & Co. KG

Die Firma Thermodur Wandelemente GmbH & Co. KG, Neuwied, produziert und vertreibt Wandelemente zur (großflächigen) Ausfachung von Fassaden. Die Elemente werden dabei an einer tragenden Konstruktion aus Stahl, Stahlbeton oder Holz befestigt. Die Abmessungen ergeben sich aus der Geometrie der tragenden Unterkonstruktion und sind werkseitig auf eine max. Länge von 11 m, eine max. Breite von 3 m und Tiefen zw. 0,15 – 0,40 m begrenzt.

Fassadenelemente, die den oberen Abschluss einer Wand bilden und an das Dach anschließen, werden zum Abtrag vertikaler Lasten aus dem Eigengewicht der Dachkonstruktion (meist aus Trapezblechen), sowie veränderlicher Dachlasten genutzt. Der Anschluss des Trapezbleches an das Wandelement erfolgt über Winkel 100 x 10 mm oder 80 x 10 mm, siehe Abbildung 2-5 [6].



**Abbildung 2-5: Ausbildung einer Verbindung zw. Trapezblech und Wandelement mit Winkel [6]**

Aus den zusätzlichen über Winkel exzentrisch angeschlossenen Dachlasten ergibt sich die Notwendigkeit zusätzlicher Bewehrung am oberen und unteren Rand der bewehrten Wandelemente. In Abbildung 2-6 ist exemplarisch ein Schnitt eines Bewehrungsplans einer Sturzwandplatte dargestellt.



**Tabelle 2-1: Zusammenfassung der Ergebnisse des Projektes 15014Sn/04511**

Bez.	Bewehrung	Styroporkörper	Betoncharge	Betondruckfestigkeit aus Bohrkerne [N/mm <sup>2</sup> ]	Versagenslast [kN]
I	Matten R188A	Ohne	1	5,69   6,04   6,31	191
II		Mit	2	-	202
III	Stabstahl Ø 6	Ohne	2	3,81   6,63   -	105
IV	Stabstahl Ø 6 + 2 Ø 12 extern	mit	1	-	151

Bei den Probekörpern wurde die Art der Bewehrung (Matten R188A oder Stabstahl Ø 6) und die Anordnung von Styroporkörpern (mit oder ohne) variiert. Um die Biegetragfähigkeit der Probekörper mit Stabstahlbewehrung derjenigen der Mattenbewehrten Probekörper I und II anzugleichen und ein vorzeitiges Biegeversagen des Probekörpers zu vermeiden, wurde der Probekörper IV zusätzlich mit 2 Ø 12 extern unterspannt.

Zur Bestimmung der Betondruckfestigkeit nach DIN EN 12518 wurden jeweils drei Bohrkerne mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Höhe von 10 cm entnommen aus: Prüfkörpern I und III nach Versuchsende, sowie aus einem weiteren Probekörper der Charge 1 und einem weiteren Probekörper der Charge 2. Die ermittelten Druckfestigkeiten aus den Bohrkerne der Probekörper I und III sind in Tabelle 2-1 dargestellt. Die Druckfestigkeit von jeweils drei Bohrkerne aus einem zusätzlichen Probekörper betrug 5,08 | 5,10 | 4,41 für Charge 1 und 3,14 | 3,33 | 4,58 für Charge 2.

Zur Messung von Verformungen und der Neigung der Probekörper wurden lineare Wegaufnehmer und ein Neigungsmesser verwendet. Probekörper III versagte vorzeitig auf Biegung. Die Prüfung von Probekörper I wurde vorzeitig abgebrochen, da es zum Betonversagen im Bereich der Lasteinleitungsplatte kam. Bei der Durchführung des Versuchs am Probekörper II verdrehte sich die Lasteinleitungsplatte so stark, dass diese zwischenzeitlich verstärkt werden musste.

## 2.6 Konstruktive Durchbildung und Problemstellung

Haufwerksporige Leichtbetone mit leichten Zuschlägen werden wegen ihrer guten Wärmedämmeigenschaften und des geringen Eigengewichts in großem Umfang für Mauersteine und vorgefertigte Dach-, Decken- und Wandelemente mit tragender oder nichttragender Funktion eingesetzt [9, 10]. In dieser Arbeit werden vorgefertigte, tragende Wandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton untersucht. Wandbauteile aus LAC werden im Industrie- und Gewerbebau überwiegend als vorgefertigte Fassadenelemente bei Stahlbetonskelettbauten eingesetzt und in der Stapelbauweise angeordnet. Sie geben ihr Eigengewicht und ggfs. das Gewicht der darüber liegenden Wandelemente und geringfügige weitere Lasten (Dachlasten ggfs. mit Exzentrizität und Windlasten) durch Druckkontakt nach unten bis zur Gründung weiter. Punktuelle Anker Elemente an Stahl- oder Stahlbetonstützen sorgen für die horizontale Lagesicherung. Im Bereich großer Öffnungen durch Fensterbänder oder Tore müssen die Lasten über freitragende Wandelemente abgetragen werden. Freitragende Wandelemente werden auch in Form von Frostschürzen zur Abtragung von Lasten zwischen Einzelfundamenten eingesetzt. In Abbildung 2-4 ist die Anordnung von vorgefertigten Wandelementen aus LAC in der Stapelbauweise schematisch dargestellt.

Wände aus haufwerksporigem Leichtbeton werden üblicherweise liegend im Walzverfahren hergestellt (Abbildung 2-2). Für freitragende Wandelemente ist in Deutschland die Herstellung im Walzverfahren laut DIN 4213 ausgeschlossen. Daher müssen diese Elemente in deutschen Fertigteilwerken von Hand verdichtet werden (Abbildung 2-3). Auf europäischer Ebene sind dagegen keine Einschränkungen zum Herstellungsverfahren angegeben [3].

Zur konstruktiven Durchbildung von freitragenden Wandelementen schreibt die europäische Produktnorm [3] vor, dass zur Abtragung von Vertikallasten eine lotrechte Querkraftbewehrung in Form von Schubleitern eingebaut werden muss. Dabei ist die Querkraftbewehrung lotrecht angeordnet und mit der Längsbewehrung verschweißt. In der zusätzlich gültigen deutschen Anwendungsnorm [4] ist dagegen vorgeschrieben, dass die Querkraftbewehrung von freitragenden Wandelementen ausschließlich mit geschlossenen, umlaufenden Bewehrungskörben in Form von Bügeln ausgeführt werden darf. Untersuchungen an Balken und Wandplatten aus LAC mit Querkraftbewehrung von Goltermann [11–13] haben gezeigt, dass „Versuche mit Bügeln sich generell ungünstiger verhalten als Versuche mit Schubleitern. Goltermann führt dies darauf zurück, dass der verschweißte Bügelkorb dem Verdichtungsprozess durch Walzen einen größeren Widerstand gegenüberstellt als die Schubleitern“ ([11] zitiert nach [14]). Zu dieser Erkenntnis kamen auch [15] und [16] in experimentellen Untersuchungen an der Technischen Universität Kaiserslautern.

Es ist bekannt, dass durch die Verwendung der in DIN 4213 [4] vorgeschriebenen geschlossenen Bügelkörbe in freitragenden Wandelementen Fehlstellen bei der Verdichtung im Walzvorgang auftreten können. [15] beschreibt die Entstehung der Fehlstellen als ein Zurückfedern des Bewehrungsnetzes durch Überfahren mit der Verdichtungswalze. Durch die trockene Frischbetonkonsistenz des LAC können sich die entstandenen Hohlräume unterhalb des Bewehrungsnetzes nach dem Überfahren mit der Walze nicht mehr mit Beton füllen und es entstehen Hohlräume.

Die Verdichtung im Walzverfahren führte in Versuchen von [15] zu Verwölbungen an der Oberfläche der Wandelemente. Nachträglich entnommene Bohrkerne zeigten deutliche Hohlräume im Betongefüge auf Höhe des Bewehrungsnetzes. Während [15] unter anderem Wandkonstruktionen mit Gitterträgern untersuchte, konnte [17] die Hohlraumbildung auch bei Wänden mit Querkraftbewehrung feststellen. Zum jetzigen Zeitpunkt kann die Herstellung einwandfreier Wandelemente mit geschlossenen Bewehrungskörben nur mit Hilfe einer konventionellen Verdichtung von Hand (Abbildung 2-3) gewährleistet werden.

## 2.7 Fazit

Aufgrund der aktuell in Deutschland geltenden Vorschriften [3, 4] können freitragende Wandelemente mit Querkraftbeanspruchung nicht im Walzverfahren hergestellt werden. Die Vorgabe eines geschlossenen Bewehrungskorbes nach DIN 4213 [4] erfordert eine aufwändige Verdichtung von Hand.

Die erwähnten Fehlstellen bei der Verdichtung von Wandelementen mit den normativ in Deutschland geforderten geschlossenen Bügelkörben erzwingen eine neuartige Bewehrungskonstruktion, die sowohl die Tragfähigkeit der Wandelemente sicherstellt als auch die Anforderungen an eine einwandfreie Herstellung erfüllt.

Die bisher bekannten Erkenntnisse zur Querkrafttragfähigkeit von Wandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton reichen nicht aus, um die Tragfähigkeit von freitragenden Wandelementen zielsicher vorherzusagen zu können. Dies spiegelt sich auch in den unterschiedlichen Bemessungsmodellen nach DIN EN 1520 [3] und DIN 4213 [4] wider.

Für eine wirtschaftliche Herstellung bedarf es neuer Erkenntnisse zum Querkrafttragverhalten und eine alternative Bewehrungskonstruktion, die eine Verdichtung im Walzverfahren ermöglicht.

### 3 Experimentelle Untersuchungen zur Verankerung

Das Verbund- und Verankerungsverhalten von Bewehrungsstäben in LAC unterscheidet sich grundlegend von der Verbundwirkung von Bewehrung in gefügedichtem Beton. Daher wurden zunächst Auszugversuche durchgeführt.

#### 3.1 Versuchsaufbau

In den experimentellen Untersuchungen wurden Probekörper aus haufwerksporigem Leichtbeton mit verzinkten, gerippten Bewehrungsstäben mit verschiedenen Verankerungsvarianten in einem modifizierten BeamEndTest (BET) geprüft. Dabei wurde bewusst auf Bügel und Umschnürungen verzichtet, um den Verankerungsbereich ungestört zu belassen. Die einbetonierten Bewehrungsstäbe wurden aus dem Prüfkörper herausgeführt und auf Zug beansprucht. Um einen kegelförmigen Betonausbruch an der Oberseite des Prüfkörpers zu vermeiden, wurde nach Empfehlung von [18] eine verbundfreie Vorlänge eingehalten, die hier mit 20 mm gewählt wurde.

Zur Durchführung der Versuche wurde ein Versuchsstand konzipiert, der den Einbau der Probekörper im Prüfportal ermöglichte. Der hergestellte Stahlrahmen zur Sicherung des Prüfkörpers in der Prüfmaschine wird in der folgenden Abbildung 3-1 dargestellt. Eine Systemskizze des Versuchsaufbaus ist Abbildung 3-2 zu entnehmen.

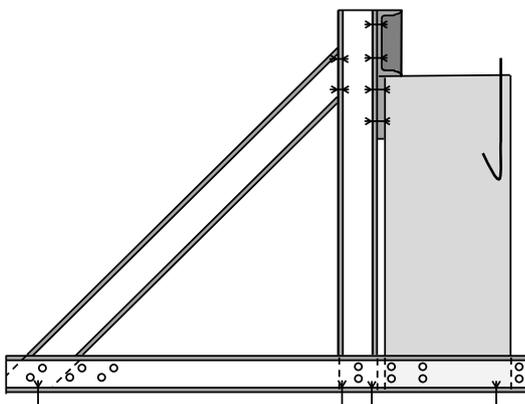


Abbildung 3-1: Stahlrahmen

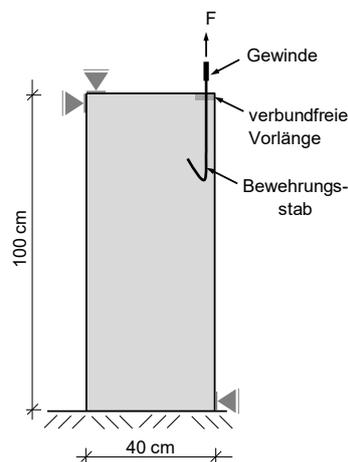


Abbildung 3-2: Systemskizze Auszugversuche

Ein eingebauter Prüfkörper, der mit dem Stahlrahmen im Prüfportal befestigt wurde, ist in Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4 dargestellt.

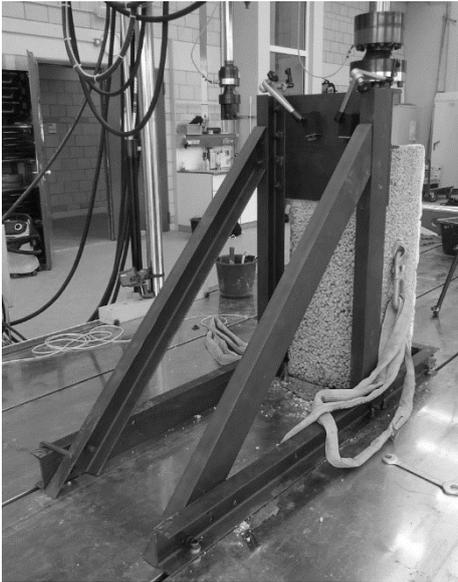


Abbildung 3-3: Stahlrahmen mit eingebautem Prüfkörper



Abbildung 3-4: Stahlrahmen mit eingebautem Prüfkörper

### 3.2 Versuchsprogramm

Um die Versuche eindeutig zuordnen zu können, wurde eine einheitliche Versuchsbezeichnung gewählt. Dabei wurde zunächst eine Langbezeichnung entwickelt, in der alle relevanten Versuchsparameter enthalten sind. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde zusätzlich eine Kurzbezeichnung eingeführt, bei der die Parameter in der Bezeichnung wegfallen. Das nachfolgend gezeigte Beispiel bekommt die Kurzbezeichnung BET-12.1s. Jede Variante eines Prüfkörpers wurde dreimal identisch hergestellt.

Kurzbezeichnung:

BET-12.1s

Langbezeichnung:

BET-12.1s\_8\_20\_200\_8\_300\_oHa

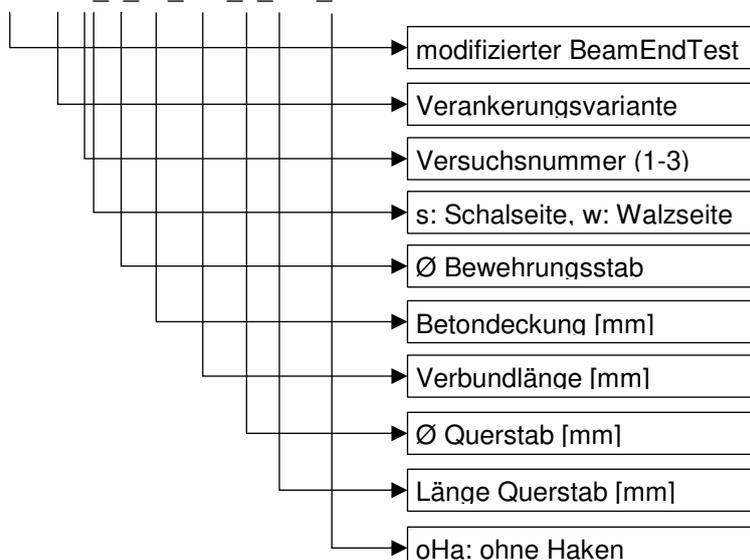


Abbildung 3-5: Bezeichnung der Versuchskörper in den Auszugversuchen

Bei allen Varianten wurde unterschieden, ob der Bewehrungsstab beim Betonvorgang auf der Schal- oder auf der Walzseite im Beton lag. Dies wird in den Versuchsbezeichnungen mit dem Index s für Schalseite und w für Walzseite gekennzeichnet. In den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 3-6, Abbildung 3-7) wird die Lage der Stäbe im Herstellungsprozess für beide Varianten schematisch dargestellt.

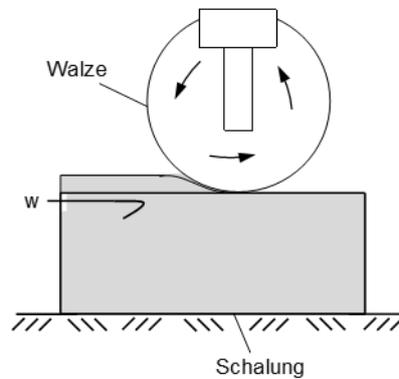
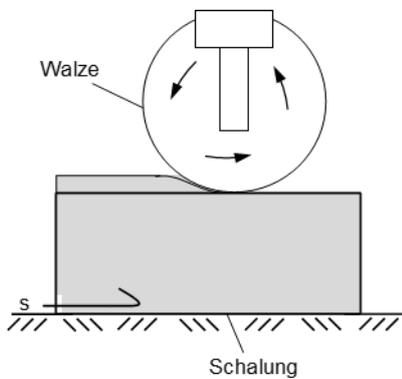


Abbildung 3-6: Bewehrungsstab an der Schalseite, Index s

Abbildung 3-7: Bewehrungsstab an der Walzseite, Index w

Im Folgenden wird das Versuchsprogramm der durchgeführten Auszugversuche dargestellt.

Tabelle 3-1: Versuchsprogramm Auszugversuche

Versuch	Skizze	Variation	$\varnothing$	$c_{nom}$	Verbundlänge $l_b$	Querstäbe angeschweißt	Länge Querstäbe	Langbezeichnung
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
Serie C								
BET-9s		Stabdurchmesser	10	20	200	-	-	BET-9.1s_10_20_200
BET-9w			10	20	200	-	-	BET-9.2s_10_20_200
BET-9w			10	20	200	-	-	BET-9.1w_10_20_200
								BET-9.2w_10_20_200
								BET-9.3w_10_20_200
BET-10s		gerades Stabende	8	20	200	-	-	BET-10.1s_8_20_200_oHa
BET-10w			8	20	200	-	-	BET-10.2s_8_20_200_oHa
BET-10w			8	20	200	-	-	BET-10.1w_8_20_200_oHa
								BET-10.2w_8_20_200_oHa
								BET-10.3w_8_20_200_oHa
BET-12s		gerades Stabende + angeschweißter Querstab	8	20	200	1 $\varnothing$ 8 mm	300	BET-12.1s_8_20_200_8_300_oHa
BET-12w			8	20	200	1 $\varnothing$ 8 mm	300	BET-12.2s_8_20_200_8_300_oHa
BET-12w			8	20	200	1 $\varnothing$ 8 mm	300	BET-12.1w_8_20_200_8_300_oHa
								BET-12.2w_8_20_200_8_300_oHa
								BET-12.3w_8_20_200_8_300_oHa
BET-13s		gerades Stabende + 2 angeschweißte Querstäbe	8	20	200	2 $\varnothing$ 8 mm	300	BET-13.1s_8_20_200_8_300_oHa
BET-13w			8	20	200	2 $\varnothing$ 8 mm	300	BET-13.2s_8_20_200_8_300_oHa
BET-13w			8	20	200	2 $\varnothing$ 8 mm	300	BET-13.1w_8_20_200_8_300_oHa
								BET-13.2w_8_20_200_8_300_oHa
								BET-13.3w_8_20_200_8_300_oHa

### 3.3 Geometrie der Versuchskörper

Im Folgenden wird die Geometrie der Versuchskörper in ihrer Lage im Herstellungsprozess dargestellt. Die Probekörper wurden in den Abmessungen von 40 cm x 40 cm x 100 cm in einem Fertigteilwerk hergestellt. Wie bereits beschrieben, sind die Herstellung und Verdichtung des hawerksporigen Leichtbetons von großer Bedeutung für die Materialeigenschaften des LAC. Aus diesem Grund wurde darauf geachtet, dass die Probekörper realitätsnahe Bauteildicken aufweisen. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass die Versuchsergebnisse auf realistische Bauteilgrößen übertragbar sind. Eine Skalierung auf kleinere Bauteildicken würde zu einer Verzerrung des Verdichtungsgrades und somit zu einer verfälschten Verankerungs- und Verbundwirkung führen. Zur Unterscheidung der Varianten mit Bewehrungsstäben an Schal- bzw. Walzseite werden die Versuche mit Stäben an der Schalseite immer mit einer durchgezogenen Linie in Diagrammen bzw. als Rahmen der Grafiken dargestellt. Die Versuche mit Bewehrung auf der Walzseite erhalten eine gestrichelte Linie als Kennzeichnung in Diagrammen und Zeichnungen. In den folgenden Abbildungen werden alle untersuchten Versuchskörpervarianten der Auszugversuche dargestellt.

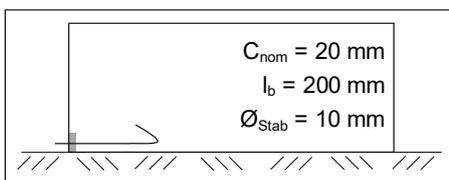


Abbildung 3-8: BET-9s

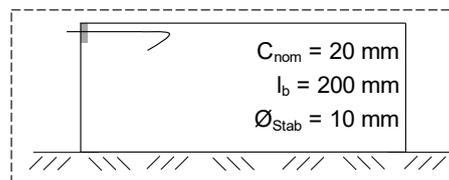


Abbildung 3-9: BET-9w

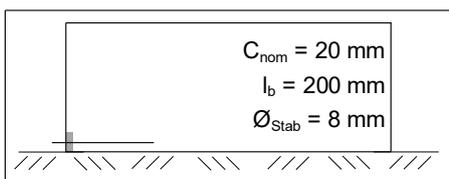


Abbildung 3-10: BET-10s

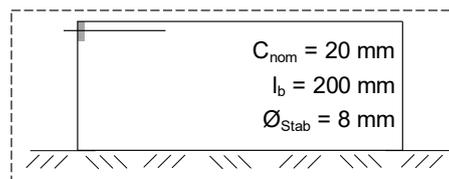


Abbildung 3-11: BET-10w

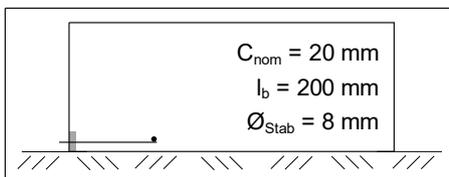


Abbildung 3-12: BET-12s

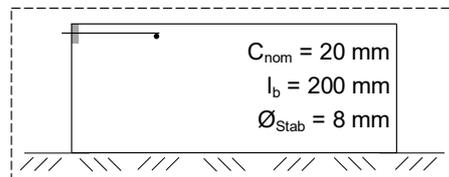


Abbildung 3-13: BET-12w

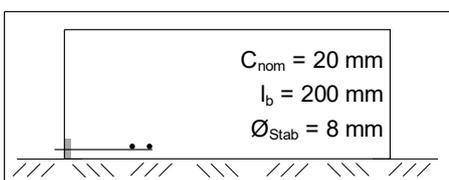


Abbildung 3-14: BET-13s

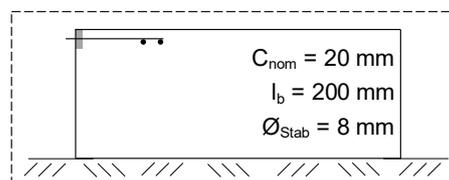


Abbildung 3-15: BET-13w

### 3.4 Herstellung und Verdichtung

Wie bei Bauteilen aus hawerksporigem Leichtbeton üblich, wurden alle Probekörper liegend betoniert und im Walzvorgang verdichtet. Dabei wurde zunächst Beton schichtweise in Stahlschalungen gefüllt und mit Tischrütlern verdichtet. Die oberen Betonschichten wurden mit einem Überschuss von etwa 10 % der Elementdicke aufgebracht und mit einer Vibrationswalze verdichtet.

### 3.5 Messtechnik

Um den Schlupf der Bewehrung, also die Differenzverschiebung zwischen Beton und Bewehrungsstab, messen zu können, musste die Bewehrung aus dem Bauteil herausgeführt werden. Dazu wurde bei den Varianten mit Haken ein Hilfsstab angeschweißt (Abbildung 3-16). Bei den Varianten ohne Haken wurde der Bewehrungsstab entsprechend verlängert. Damit die Hilfsstäbe keine zusätzliche Verbundspannung übertragen, wurden Kunststoffrohre über den Stab gezogen (Abbildung 3-17). Um später einen Wegaufnehmer an das Ende des Hilfsstabes anbringen zu können, wurde ein Platzhalter aus expandiertem Polystyrol (EPS) eingebaut (Abbildung 3-18). Dieser sollte nach dem Aushärten des Betons entfernt werden, um die Messtechnik applizieren zu können.



Abbildung 3-16: Bewehrungsstab mit Endhaken und angeschweißtem Hilfsstab



Abbildung 3-17: Bewehrungsstab mit Endhaken, angeschweißtem Hilfsstab und Kunststoffrohr



Abbildung 3-18: Bewehrungsstab mit Endhaken, angeschweißtem Hilfsstab, Kunststoffrohr und EPS-Platzhalter

Nach dem Entfernen des EPS-Platzhalters konnte der Hilfsstab freigelegt werden. Während der Versuche wurde ein Wegaufnehmer so angebracht, dass er gegen das Ende des Hilfsstabes messen konnte (Abbildung 3-19, Abbildung 3-20).



Abbildung 3-19: Bewehrungsstab mit Endhaken, angeschweißtem Hilfsstab und Kunststoffrohr



Abbildung 3-20: Bewehrungsstab mit Endhaken, angeschweißtem Hilfsstab und Kunststoffrohr

### 3.6 Versuchsdurchführung

Die Prüfkörper wurden mit dem zuvor dargestellten Stahlrahmen in der Prüfmaschine befestigt und gesichert. Die Zugkraft wurde mit Hilfe eines computergesteuerten Hydraulikzylinders weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min aufgebracht. Nach einem Kolbenweg von 30 mm wurden die Versuche beendet, da größere Verformungen aus baupraktischer Sicht nicht relevant erscheinen. Die Rissentwicklung auf der Betonoberfläche wurde durch eine Videokamera während der Versuche dokumentiert.

### 3.7 Werkstoffeigenschaften

#### 3.7.1 Haufwerksporiger Leichtbeton

Im Folgenden werden die Werkstoffeigenschaften der Probekörper dargestellt. Der verwendete Leichtbeton weist ein haufwerksporiges Gefüge auf und wurde mit Rohbims aus dem Neuwieder Becken hergestellt. Es wurden Bohrkerne aus den zusätzlich hergestellten Probekörpern ohne Bewehrung entnommen. Dabei wurde sowohl die Rohdichte als auch die Druckfestigkeit bestimmt. Alle Prüfkörper sollten die gleichen Werkstoffeigenschaften erhalten und wurden dementsprechend mit der gleichen Rezeptur hergestellt. Die nachfolgende Tabelle 3-2 zeigt die Ergebnisse der Prüfungen.

**Tabelle 3-2: Prüfung der Druckfestigkeit und der Rohdichte nach DIN EN 1354 [19]**

Versuch	Serie C	
	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Druckfestigkeit $f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	1034	4,7
2	1043	4,0
3	1054	4,7
4	1098	4,1
5	1058	4,7
6	1061	3,1
7	1084	4,7
8	1045	4,1
9	1016	3,0
10	1028	4,2
11	995	2,7
12	1099	5,2
13	1120	4,8
14	1113	4,8
<b>Mittelwert</b>	<b>1061</b>	<b>4,2</b>

### 3.7.2 Betonstahl

Um den Korrosionsschutz sicherzustellen, werden in haufwerksporigem Leichtbeton üblicherweise Bewehrungsstäbe aus verzinktem Betonstahl eingesetzt. Daher wurde für alle Versuche verzinkter Stabstahl B500 verwendet. Die Zugfestigkeit und die obere Streckgrenze wurden an jeweils 3 Zugproben überprüft. Dabei wurden alle eingesetzten Bewehrungsdurchmesser geprüft.

### 3.8 Versuchsergebnisse

Die dargestellten Auszugversuche sollten Aufschluss über die Verbund- und Verankerungswirkung von Bewehrung in LAC geben.

Während [17] anhand von 4-Punkt-Biegeversuchen an Platten zu dem Ergebnis kommt, dass es einen messbaren Verbund zwischen gerippten Bewehrungsstäben und LAC gibt, können in den in diesem Projekt durchgeführten Auszugversuchen kaum Verbundspannungen festgestellt werden. In den Ergebnissen der Versuchsreihe BET-10 wird deutlich, dass ohne Querdruck nahezu keine Verbundspannungen zwischen gerippten Bewehrungsstäben und LAC übertragen werden können. Die auftretende Auflagerpressung in großen Bauteilversuchen und wesentlich größere Verbundlängen, wie vermutlich auch in den Versuchen von [17], könnten zu erheblicher Steigerung der Verbund- und Verankerungswirkung führen. Allerdings wird die zusätzliche Druckspannung am Auflager nur auf die Verankerung der Längsbewehrung einen positiven Einfluss haben. Für die Verankerung der Schubbewehrung kann kein Querdruck angesetzt werden.

Nachfolgend werden die Kraft-Weg-Diagramme der Auszugversuche dargestellt.

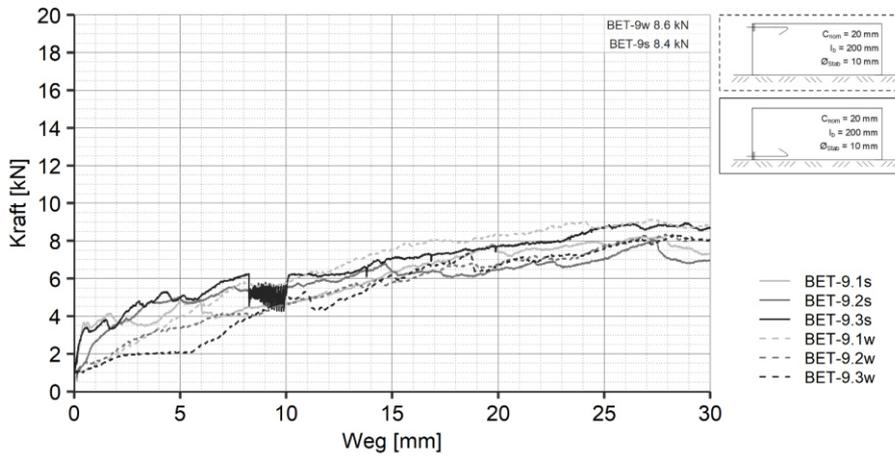


Abbildung 3-21: Kraft-Weg-Diagramm BET-9

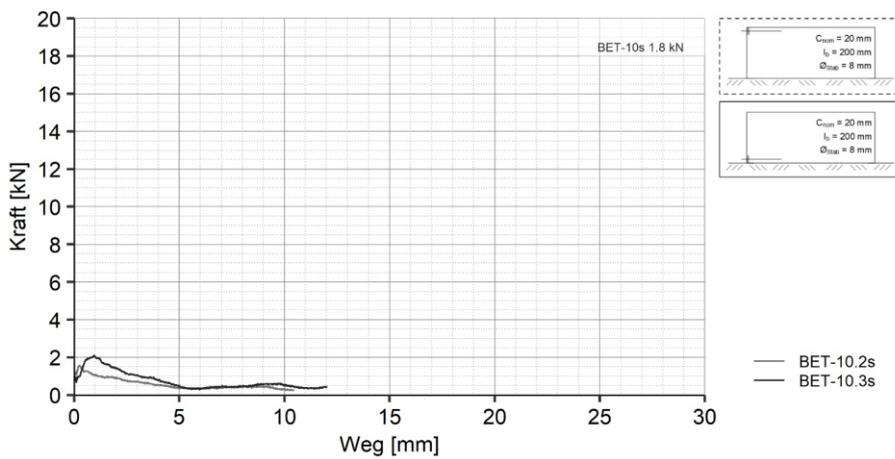


Abbildung 3-22: Kraft-Weg-Diagramm BET-10

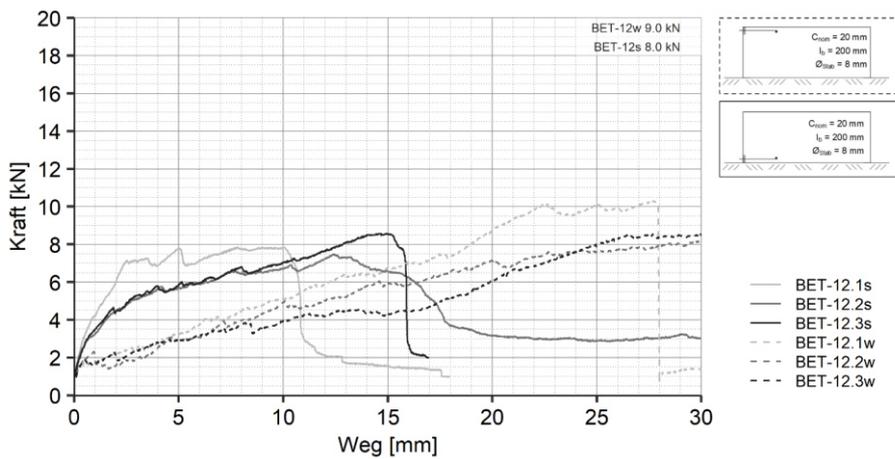


Abbildung 3-23: Kraft-Weg-Diagramm BET-12

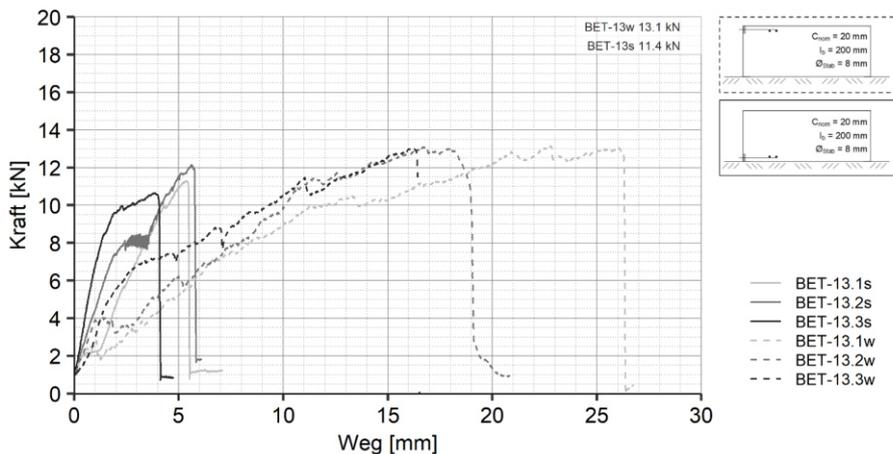
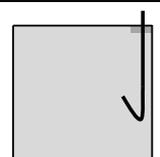
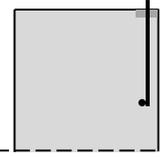
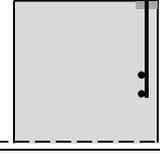


Abbildung 3-24: Kraft-Weg-Diagramm BET-13

Ähnlich der Definition eines guten und mäßigen Verbundes im Normalbeton, konnten auch im haufwerksporigen Leichtbeton Unterschiede in der Verbund- und Verankerungswirkung in Abhängigkeit von der Lage im Betonierprozess festgestellt werden. Während auf der unten liegenden Schalseite die maximalen Auszugskräfte früher erreicht werden, ergeben sich bei den Versuchen mit Stäben an der Walzseite die Maximalkräfte erst nach größeren Verformungen. Da in einem realen Bauteil grundsätzlich Bewehrungsstäbe sowohl im Schal- als auch im Walzbereich angeordnet werden, müssen stets beide Bereiche für die Verankerung berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird im Folgenden der 5 %-Fraktilwert der jeweiligen Verankerungsvariante für beide Bereiche bestimmt. Es wurde festgestellt, dass es im Rahmen der Auszugversuche in keiner Verankerungsvariante möglich war, einen Bewehrungsstab mit  $\varnothing 8$  oder  $\varnothing 10$  mm bis zu seiner Fließgrenze zu beanspruchen. Es erscheint daher sinnvoll, die ansetzbare Stahlspannung für Bewehrungsstäbe in Abhängigkeit von der Verankerungskonstruktion zu begrenzen und bei der Bemessung von Bauteilen aus haufwerksporigem Leichtbeton zu berücksichtigen.

In den Untersuchungen dieses Projekts erwiesen sich, neben der Verankerung mit Endhaken, die Varianten mit angeschweißten Querstäben als aussichtsreiche Verankerungsmöglichkeiten. Diese Varianten sollen im Weiteren für große Bauteilversuche eingesetzt werden. In Tabelle 3-3 werden die reduzierten Stahlspannungen für die maßgebenden Verankerungsvarianten als 5 %-Fraktilwert angegeben.

Tabelle 3-3: Ansetzbare Spannungen nach Verankerungsart

Verankerungsart	Ansetzbare Spannung (5 %-Fraktilwert)
 <p>Haken nach [3]</p>	60 N/mm <sup>2</sup>
 <p>Gerades Stabende mit einem angeschweißtem Querstab</p>	120 N/mm <sup>2</sup>
 <p>Gerades Stabende mit zwei angeschweißten Querstäben</p>	190 N/mm <sup>2</sup>

## 4 Experimentelle Untersuchung des Querkrafttragverhaltens von Wandelementen aus LAC

Das Ziel der im Folgenden dargestellten Versuche war es, grundlegende Erkenntnisse zum Querkrafttragverhalten von Wandelementen aus LAC zu erlangen und eine Querkraftbewehrungskonstruktion zu finden, die keinen Widerspruch zum Herstellungsverfahren darstellt. Dazu wurden Dreipunktbiegeversuche an Bauteilen mit und ohne Querkraftbewehrung durchgeführt.

### 4.1 Versuchsaufbau

In den experimentellen Untersuchungen wurden Wandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton auf ihre Querkrafttragfähigkeit hin getestet. Der Versuchsaufbau entsprach einem Dreipunktbiegeversuch (BV) mit einer Stützweite von 4,00 m.

Versuche aus [20] haben gezeigt, dass die ungünstigste Lastanordnung für Balken ohne Querkraftbewehrung die Belastung durch eine Einzellast darstellt. Daher wurden die Untersuchungen für alle Versuchsvarianten mit einer mittig angreifenden Einzellast durchgeführt. Bei Bauteilen mit Querkraftbewehrung können Bügel zu Imperfektionen führen, daher wurden auch diese Versuche mittig belastet.

Die Prüfkörper wurden auf zwei Rollenlagern über die gesamte Wandbreite gelagert und in ihrer Lage gesichert. Um eine zwängungsfreie Lagerung zu gewährleisten, wurde ein Auflager als verschieblich und ein Auflager als unverschieblich eingestellt. Stahlplatten mit Hartgummimatten zwischen Prüfkörper und Rollenlager dienten der gleichmäßigen Lastverteilung über eine Breite von 10 cm. Die Krafteinleitung erfolgte über einen Hydraulikzylinder, an den eine Kalotte angebracht war. Diese sollte eine Verdrehung des Prüfkörpers und der Lasteinleitungskonstruktion ermöglichen. Ein Halbzylinder unterhalb der Kalotte verteilte die Last über die volle Bauteilbreite. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4-1 schematisch dargestellt.

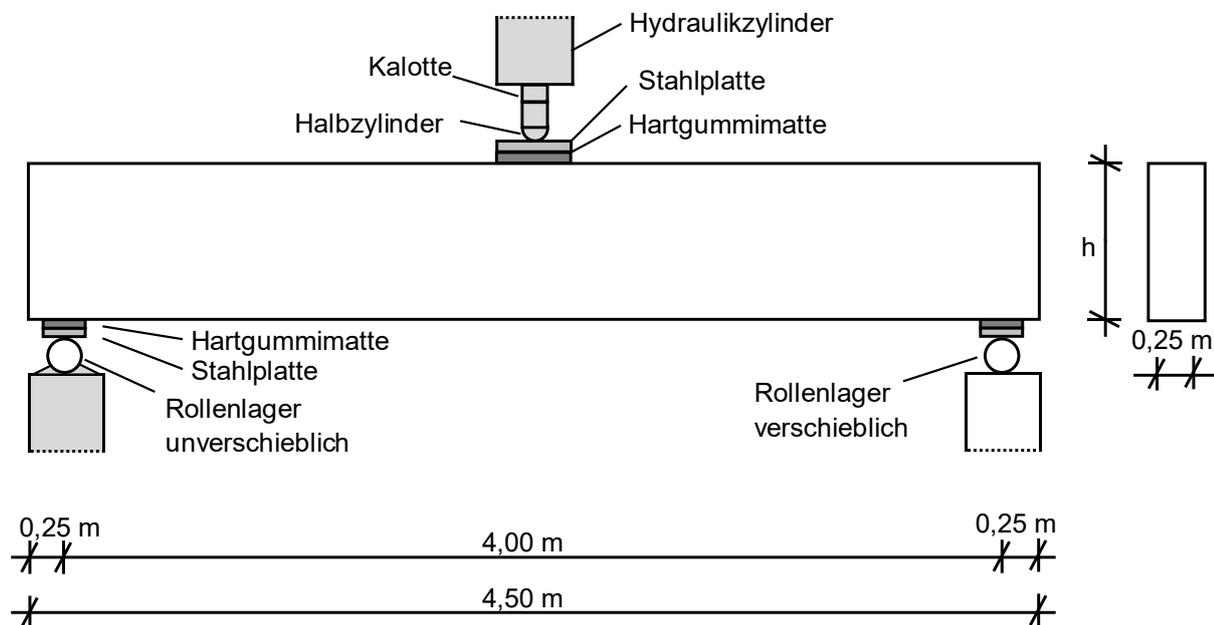


Abbildung 4-1: Schematischer Versuchsaufbau (BV), Ansicht Schalseite

## 4.2 Versuchsprogramm

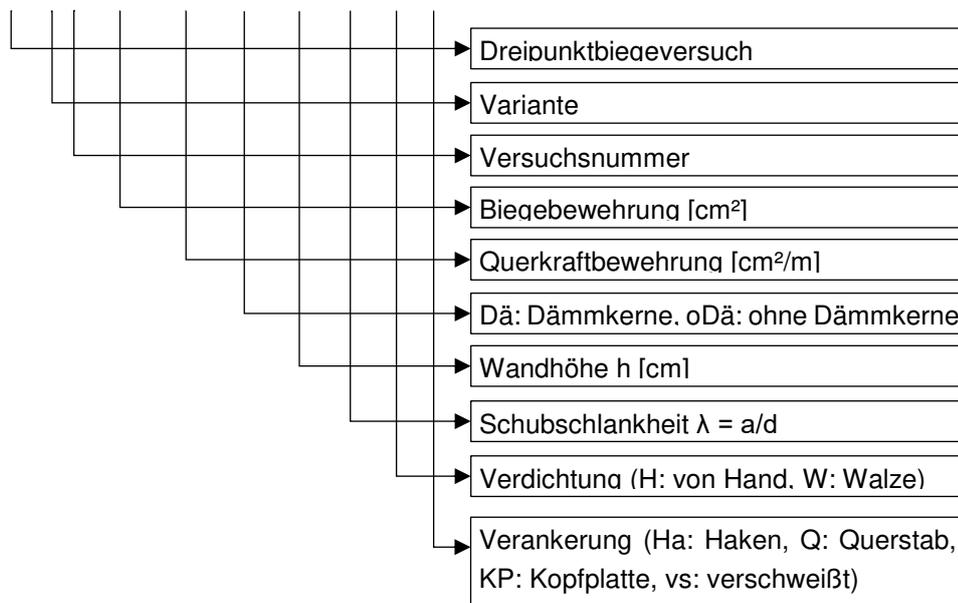
Entsprechend der Bezeichnungen der Auszugversuche, erhalten auch die Versuche an Wandbauteilen eine eindeutige Versuchsbezeichnung. Dabei wurde zunächst eine Langbezeichnung gewählt, in der alle relevanten Versuchsparameter enthalten sind, und zusätzlich eine Kurzbezeichnung eingeführt. Das hier gezeigte Beispiel bekommt entsprechend die Kurzbezeichnung BV-1.1.

Kurzbezeichnung:

BV-1.1

Langbezeichnung:

BV-1.1\_3,14\_1,57\_Dä\_100\_2,1\_H\_Ha



**Abbildung 4-2: Bezeichnung der Versuchskörper im Dreipunktbiegeversuch**

Zunächst wurden Wandelemente ohne Querkraftbewehrung hergestellt. Diese Versuche dienen dazu, eine Aussage über den Betontraganteil zur Querkrafttragfähigkeit treffen zu können.

Darüber hinaus wurden Versuche an Wandelementen mit Querkraftbewehrung und unterschiedlichen Bewehrungskonstruktionen durchgeführt. Dabei wurde sowohl der nach DIN 4213 [4] vorgeschriebene geschlossene Bügelkorb getestet als auch die europäische Variante der Schubleiter (DIN EN 1520 [3]). Zusätzlich wurden Varianten mit Einzelstäben und Endhaken geprüft.

Das Versuchsprogramm ist in der nachfolgenden Tabelle 4-1 dargestellt.

**Tabelle 4-1: Versuchsprogramm Dreipunktbiegeversuche**

Versuch	Variante	Biege- bewehrung	Querkraft- bewehrung	Dämm- kerne	Höhe	Schub- schlankheit	Verdichtung	Verankerung Längsbew.	Langbezeichnung
		[cmf]	[cm <sup>2</sup> /m]		[cm]	$\lambda = a/d$			
ohne Querkraftbewehrung									
BV-7.1	Längsbewehrung mit Endhaken	4,71	0,00	Ja	70	3,0	Walze	Haken	BV-7.1_4,71_0,00_Dä_70_3,0_W_Ha
BV-7.3									BV-7.3_4,71_0,00_Dä_70_3,0_W_Ha
BV-7.2	Längsbewehrung mit Kopfplatte	4,71	0,00	Ja	70	3,0	Walze	Kopfplatte	BV-7.2_4,71_0,00_Dä_70_3,0_W_KP
BV-8.1									BV-8.1_4,71_0,00_Dä_70_3,0_W_KP
BV-9.1	ohne Dämmkern	4,71	0,00	Nein	70	3,0	Walze	Haken	BV-9.1_4,71_0,00_oDä_70_3,0_W_Ha
BV-10.1	red. Längsbew.	2,36	0,00	Ja	70	3,0	Walze	Haken	BV-10.1_2,36_0,00_Dä_70_3,0_W_Ha
Bügelkorb DIN 4213									
BV-1.1									BV-1.1_3,14_1,57_Dä_100_2,1_H
BV-1.2	DIN 4213	3,14	1,57	Ja	100	2,1	Hand	verschweißt	BV-1.2_3,14_1,57_Dä_100_2,1_H
BV-1.3									BV-1.3_3,14_1,57_Dä_100_2,1_H
BV-2.1									BV-2.1_3,14_1,57_Dä_100_2,1_W
BV-2.2	Bügelkorb mit Walze verdichtet	3,14	1,57	Ja	100	2,1	Walze	verschweißt	BV-2.2_3,14_1,57_Dä_100_2,1_W
BV-2.3									BV-2.3_3,14_1,57_Dä_100_2,1_W
BV-3.1									BV-3.1_3,14_1,57_Dä_100_2,1_W
BV-3.2	Bügelkorb mit Walze verdichtet	3,14	1,57	Ja	100	2,1	Walze	verschweißt	BV-3.2_3,14_1,57_Dä_100_2,1_W
BV-3.3									BV-3.3_3,14_1,57_Dä_100_2,1_W
BV-14.1	DIN 4213	4,71	2,26	Ja	70	3,0	Hand	Haken	BV-14.1_4,71_2,26_Dä_70_3,0_H_Ha
BV-15.1	DIN 4213	4,71	2,26	Ja	70	3,0	Hand	Haken	BV-15.1_4,71_2,26_Dä_70_3,0_H_Ha
Schubleiter DIN EN 1520									
BV-4.1									BV-4.1_3,14_1,57_Dä_100_2,1_W
BV-4.2	Schubleiter	3,14	1,57	Ja	100	2,1	Walze	verschweißt	BV-4.2_3,14_1,57_Dä_100_2,1_W
BV-13.1		3,14	2,26	Ja	70	3,0	Walze	verschweißt	BV-13.1_3,14_2,26_Dä_70_3,0_W_vs
Einzelstäbe mit Endhaken									
BV-5.1									BV-5.1_3,14_1,57_Dä_100_2,1_W
BV-5.2	Einzelstäbe	3,14	1,57	Ja	100	2,1	Walze	Haken	BV-5.2_3,14_1,57_Dä_100_2,1_W
BV-5.3									BV-5.3_3,14_1,57_Dä_100_2,1_W
BV-12.1		4,71	2,26	Ja	70	3,0	Walze	Haken	BV-12.1_4,71_2,26_Dä_70_3,0_W_Ha
<b>Σ</b>									<b>24 Probekörper</b>

### 4.3 Geometrie der Versuchskörper

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Wandelemente mit verschiedenen Bewehrungskonstruktionen und Bauteilgeometrien geprüft.

Die Wanddicke wurde für alle Prüfkörper auf 25 cm festgelegt. Dies entspricht der Mindestdicke der praxisüblichen Wandelemente mit Dämmkernen. Bei diesen geringen Bauteilbreiten führen die eingesetzten Dämmkerne zur anteilmäßig größten Schwächung des Querschnittes. Außerdem ist von einer größtmöglichen Gleichmäßigkeit in der Verdichtung über die Breite des Bauteils auszugehen.

Der Einfluss der Belastungsart und der Lastposition ist bei Versuchen zur Querkrafttragfähigkeit besonders wichtig. Um ein Bauteil in Bezug auf seine Querkraftbeanspruchung beurteilen zu können, wurde die Schubschlankheit  $\lambda$  [21] eingeführt. Sie wird definiert als das Verhältnis der Biege- zur Querkraftbeanspruchung bezogen auf die statische Höhe  $d$ . Bei Einzellasten entspricht die Schubschlankheit vereinfachend dem Abstand der Krafteinleitung zum Auflager bezogen auf die statische Höhe. Daraus ergibt sich die Schubschlankheit  $\lambda = a/d$ .

Das sogenannte Schubtal nach [21] zeigt den Bereich, in dem in Abhängigkeit von der Schubschlankheit und dem Längsbewehrungsgrad ein Bauteil ohne Querkraftbewehrung seine Biegetragfähigkeit nicht erreicht, weil es zu einem vorzeitigen Schubversagen kommt. Ziel der Untersuchungen von [21] war es, über die geometrischen Einflüsse bis zum Erreichen der Biegetragfähigkeit ein vorzeitiges Querkraftversagen auszuschließen.

Es wird davon ausgegangen, dass sich bei Schubschlankheiten zwischen 1,0 und 3,0 Schubrisse im Bereich zwischen Auflager und Krafteinleitung bilden können, sodass sich keine direkte Druckstrebe in das Auflager mehr ausbilden kann [21], [22], [23]. Durch die Umlenkung der Schubkräfte kommt es zu einer Reduzierung der aufnehmbaren Querkraft. Bei schubschlanken Balken, also Balken mit Schubschlankheiten größer 3,0

[24], kann es zur Aktivierung weiterer Tragmechanismen wie der Bogentragwirkung kommen. Bei sehr großen Schubschlankheiten ( $\lambda > 8 - 13$ ) wird ein Biegeversagen maßgebend [21], [23].

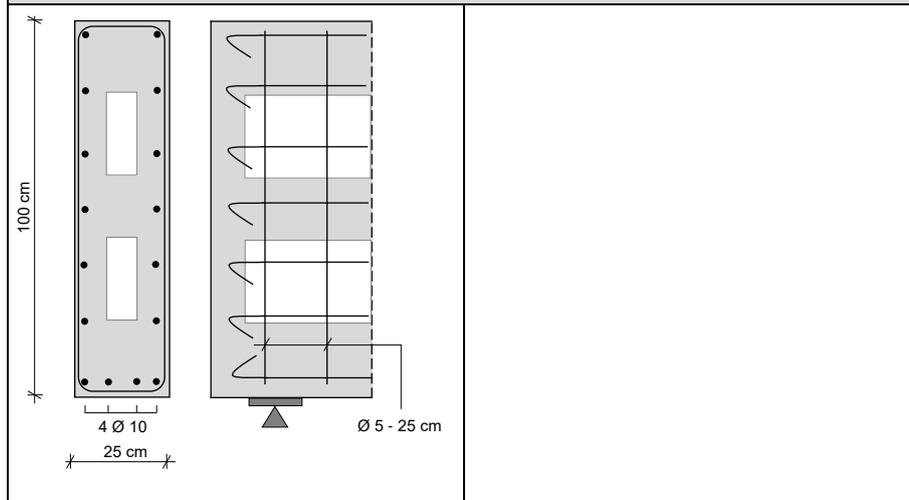
Nach [20] erwies sich in Versuchen mit und ohne Querkraftbewehrung eine Schubschlankheit zwischen 2,5 und 3,5 als ungünstigstes Momenten-Querkraft-Verhältnis. In den Versuchen in dieser Arbeit wurde die Geometrie der Versuchskörper und damit die Schubschlankheit in Anlehnung an das Schubtal von Kani [25] zwischen  $\lambda = 2,1$  und  $\lambda = 3,0$  variiert.

Der Längsbewehrungsgrad stellt für Bauteile ohne Querkraftbewehrung einen wichtigen Anteil an der Querkrafttragfähigkeit dar. Die Längsbewehrung kann sowohl zu einer Vergrößerung der ungerissenen Druckzone beitragen, als auch eine Verdübelung der Rissufer begünstigen [26]. Nach [26] ist daher ein Schubversagen von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung grundsätzlich an den Längsbewehrungsgrad gekoppelt. In Anlehnung an praxisübliche Bewehrungsmengen wurde für die in diesem Projekt durchgeführten Versuche der Längsbewehrungsgrad variiert (2 ‰, 3 ‰ und 4 ‰). Die Längsbewehrung wurde mit 3 Ø 10 mm, 4 Ø 10 mm und 6 Ø 10 mm ausgeführt, wobei letztere dem praxisüblichen Maximum entspricht. In Kombination mit den gewählten Schubschlankheiten und den variierten Längsbewehrungsgraden sollte in den Versuchen ein Querkraftversagen auftreten.

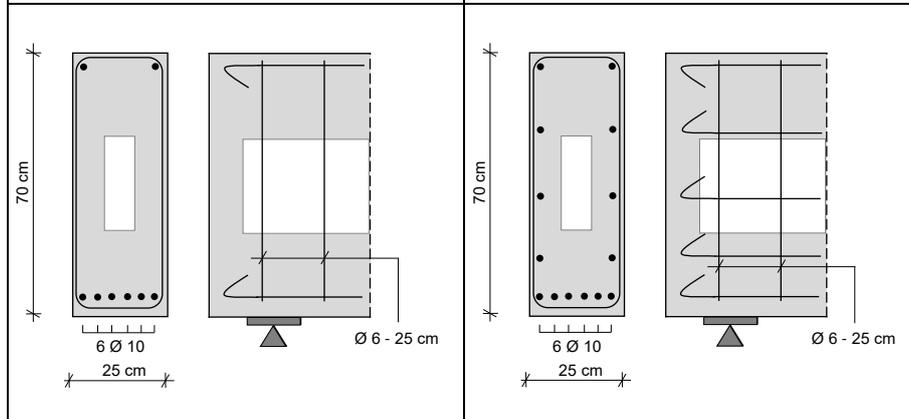
Im Folgenden werden die Bewehrungsskizzen der Versuchskörper dargestellt.

Ohne Querkraftbewehrung:	
<b>Abbildung 4-3: BV-7.1, BV-7.3 (Endhaken)</b>	<b>Abbildung 4-4: BV-7.2, BV-8.1 (Kopfplatte)</b>
<b>Abbildung 4-5: BV-9 (ohne Dämmkerne)</b>	<b>Abbildung 4-6: BV-10 (reduzierte Längsbew.)</b>

**Bügelkorb nach DIN 4213 [4]:**



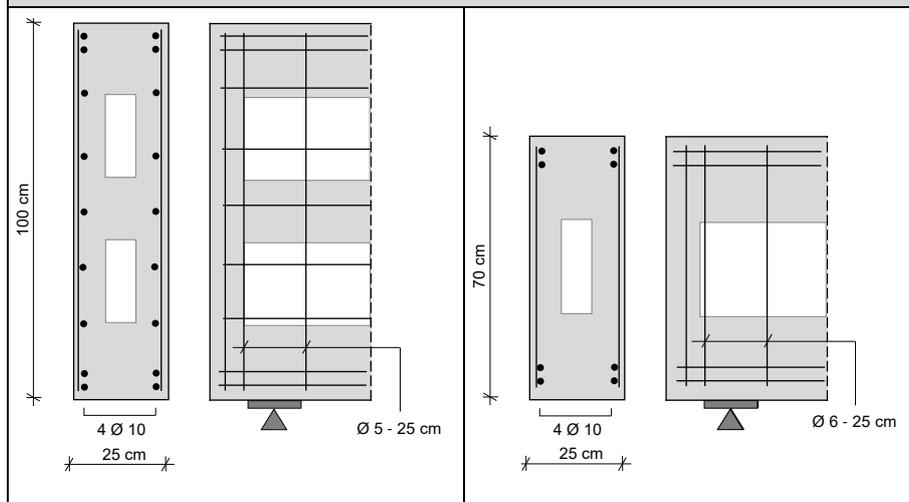
**Abbildung 4-7: BV-1, BV-2, BV-3**



**Abbildung 4-8: BV-14 (Bügelkorb)**

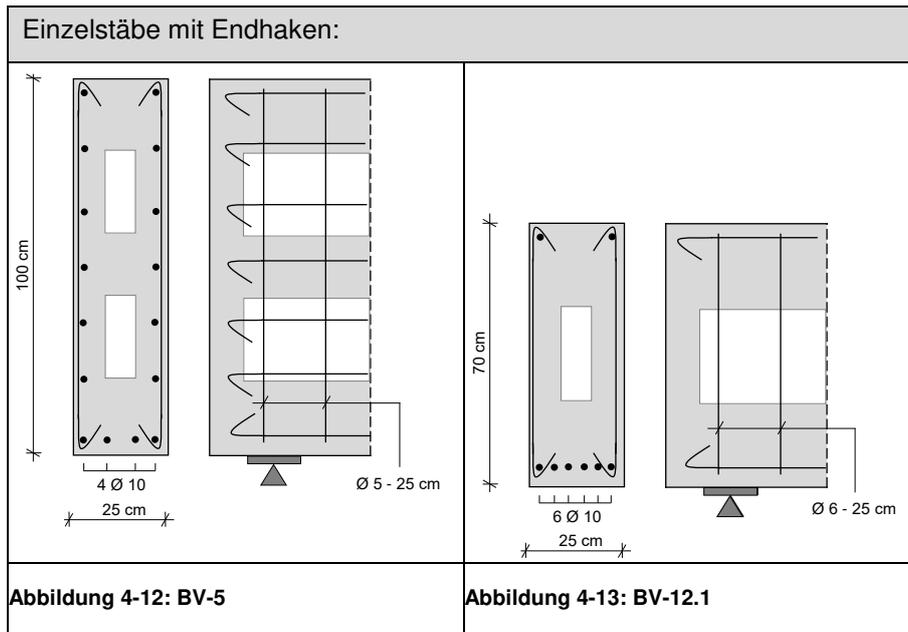
**Abbildung 4-9: BV-15 (Bügelkorb + zusätzliche Längsstäbe)**

**Schubleiter nach DIN EN 1520 [3]:**



**Abbildung 4-10: BV-4**

**Abbildung 4-11: BV-13**



#### 4.4 Herstellung und Verdichtung

Alle Prüfkörper wurden in einem Fertigteilwerk hergestellt. Die Verdichtung im Walzverfahren mittels Rüttelwalze (Abbildung 2-2) wird üblicherweise zur Herstellung von Wandelementen aus LAC verwendet und kam bei allen Varianten zum Einsatz.

Lediglich die Versuchsvariante mit Bügelkorb wurde von Hand verdichtet (Abbildung 2-3), da die deutsche Anwendungsnorm DIN 4213 [4] die Verdichtung mit Walze für freitragende Wandelemente mit geschlossenem Bewehrungskorb nicht zulässt.

Die Variante mit Bügelkorb wurde zusätzlich als Variante mit Walzenverdichtung hergestellt, um die einschränkende Vorgabe in DIN 4213 [4] zu überprüfen. Die jeweilige Art der Verdichtung ist in der Langbezeichnung der Versuche mit dem Index W für Walzenverdichtung und Index H für die Verdichtung von Hand gekennzeichnet.

#### 4.5 Messtechnik

Die Versuche wurden kontinuierlich mit einer Messrate von 10 Hz aufgezeichnet. Die Prüfgeschwindigkeit wurde auf 1 mm/min festgelegt. Um den Versuchsablauf und die Rissentwicklung nachvollziehen zu können, wurden die Versuche mit Fotos und Videos dokumentiert.

Zur Messung von Rissöffnungen und Verformungen wurden induktive Wegaufnehmer (WA) mit Messlängen von 50 und 100 mm am Prüfkörper angebracht. Die vertikalen Wegaufnehmer wurden auf der Schalseite befestigt, da die weiß verputzte Walzseite der Dokumentation der Rissentwicklung diene.

Mit Hilfe von Dehnmessstreifen (DMS) wurden die Dehnungen der Längsbewehrung aufgenommen. Dies sollte Aufschluss über die Beanspruchung der Längsbewehrung und einen Hinweis auf ein mögliches Biegeversagen geben.

In der nachfolgenden Abbildung 4-14 wird die Anordnung der Messtechnik schematisch dargestellt.

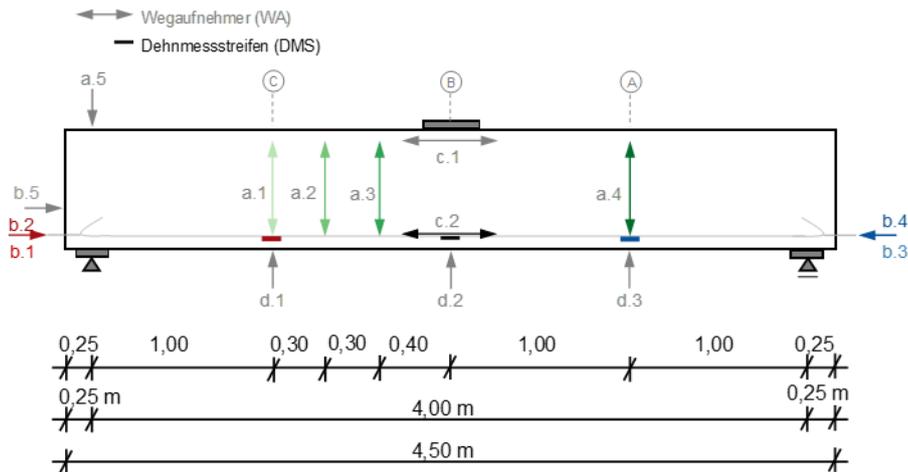


Abbildung 4-14: Messtechnik Anordnung, Ansicht Schalseite

#### 4.5.1 Wegaufnehmer (WA)

Zur Messung von Rissöffnungen und Verformungen wurden induktive Wegaufnehmer (WA) der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik mit Messlängen von 50 und 100 mm am Prüfkörper angebracht. Die vertikalen Wegaufnehmer wurden auf der Schalseite befestigt, da die weiß verputzte Walzseite der Dokumentation der Rissentwicklung diene.

Zunächst wurden drei Wegaufnehmer vertikal angeordnet, um die Entstehung von Schubrisen abzubilden (a.1 bis a.3). Zusätzlich wurde auf der anderen Seite des Prüfkörpers ein Wegaufnehmer im Viertelpunkt angebracht (a.4). Um mögliche Auflagersetzungen abzubilden, wurde ein WA vertikal auf der Wand in der Auflagerachse angebracht (a.5).

Zur Erfassung eines möglichen Verankerungsversagens wurden Hilfsstäbe mit Gewinde an die Längsbewehrung geschweißt und nach außen geführt (Abbildung 4-15). Dabei wurde die Schalung geschlitzt und die Hilfsstäbe mit Kunststoffrohren geschützt, um zusätzliche Verbundwirkung zu vermeiden. Die Hilfsstäbe wurden vor Versuchsbeginn mit Wegaufnehmern ausgestattet (b.1 bis b.4). Um einen Schlupf, also die Differenzverschiebung zwischen Bewehrungsstäben und Beton, messen zu können, wurde ein Wegaufnehmer zusätzlich auf der Betonoberfläche angebracht (b.5).

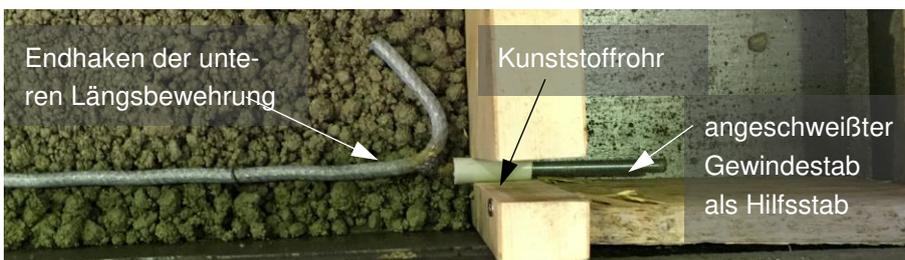


Abbildung 4-15: Bewehrungsstab mit Endhaken und angeschweißtem Hilfsstab

In der Mitte der Wandelemente wurden horizontal zwei Wegaufnehmer auf Höhe der Längsbewehrung in der Druck- und Zugzone angebracht, um Rückschlüsse auf ein mögliches Biegeversagen bzw. Druckzonenversagen ziehen zu können (c.1 und c.2).

Die Biegelinie des Elementes wurde mit Hilfe von Wegaufnehmern in den Viertelpunkten unterhalb des Prüfkörpers erfasst (d.1 bis d.3).

#### 4.5.2 Dehnungsmessung am Bewehrungsstab (DMS)

Mit Hilfe von Dehnmessstreifen des Typs LY41 (DMS) wurden die Dehnungen der Längsbewehrung aufgenommen. Dies sollte Aufschluss über die Beanspruchung der Längsbewehrung und einen Hinweis auf ein mögliches Biegeversagen geben. Die Anordnung der Dehnmessstreifen kann der Abbildung 4-14 entnommen werden.

#### 4.6 Versuchsdurchführung

Vor Beginn der Versuche wurden die Prüfkörper auf mögliche Risse und Fehlstellen, die durch die Herstellung oder den Transport entstehen können, untersucht. Sofern äußerlich Auffälligkeiten vorhanden waren, wurden diese fotografiert und dokumentiert.

Die Kraft wurde weggesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 1 mm/min aufgebracht. Dabei wurden Laststufen im Abstand von anfangs 10 kN und später 5 kN angefahren und für wenige Minuten gehalten. In dieser Zeit wurden auftretende Risse auf der weiß verputzten Walzseite angezeichnet.

Ein typischer Verlauf der Zylinderkraft in Abhängigkeit von der Zeit ist in der nachfolgenden Abbildung 4-16 am Beispiel des Versuchs BV-7.3 dargestellt.

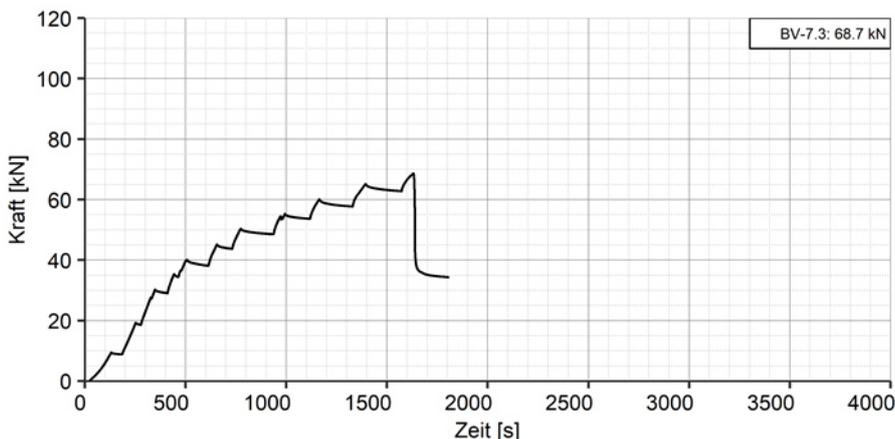


Abbildung 4-16: Kraft-Zeit-Diagramm, BV-7.3

#### 4.7 Werkstoffeigenschaften

##### 4.7.1 Haufwerksporiger Leichtbeton

Der verwendete Leichtbeton wies ein haufwerksporiges Gefüge auf und wurde mit Rohbims aus dem Neuwieder Becken hergestellt. Zu jeder Versuchsvariante und jeder Betoncharge wurden zusätzlich Elemente zur Entnahme von Bohrkernen hergestellt. Anhand der Bohrkernbeurteilung wurden die Materialeigenschaften Druckfestigkeit und Rohdichte des verwendeten Leichtbetons bestimmt.

Alle Prüfkörper sollten die gleichen Werkstoffeigenschaften erhalten und wurden dementsprechend mit der gleichen Rezeptur hergestellt. Die Ergebnisse der Materialprüfungen sind in Tabelle 4-2 dargestellt.

**Tabelle 4-2: Prüfung der Druckfestigkeit und der Rohdichte nach DIN EN 1354 [19]**

Versuch	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Druckfestigkeit $f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>ohne Querkraftbewehrung</b>		
BV-7.1	1125	4,4
BV-7.3	1184	4,9
BV-7.2	1125	4,4
BV-8.1	1006	3,1
BV-9.1	1167	4,4
BV-10.1	1185	5,2
<b>Bügelkorb DIN 4213</b>		
BV-1.1	1240	4,6
BV-1.2	1240	4,6
BV-1.3	1240	4,6
BV-2.1	1264	6,5
BV-2.2	1264	6,5
BV-2.3	1264	6,5
BV-3.1	1144	4,4
BV-3.2	1144	4,4
BV-3.3	1144	4,4
BV-14.1	1043	3,5
BV-15.1	1078	4,1
<b>Schubleiter DIN EN 1520</b>		
BV-4.1	1103	4,2
BV-4.2	1103	4,2
BV-13.1	1237	6,1
<b>Einzelstäbe mit Endhaken</b>		
BV-5.1	1097	4,2
BV-5.2	1097	4,2
BV-5.3	1097	4,2
BV-12.1	1128	5,0

#### 4.7.2 Betonstahl B500

Für die Bewehrung wurde verzinkter Betonstahl B500 verwendet. Dieser entsprach dem zuvor beschriebenen Material aus den vorausgegangenen Versuchen.

#### 4.8 Versuchsergebnisse

Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse der Dreipunktbiegeversuche dargestellt. Dabei werden zunächst die Kraft-Verformungs-Diagramme gezeigt. Die maximal erreichte Traglast im Versuch wird im Diagramm angegeben.

#### 4.8.1 Bauteile ohne Querkraftbewehrung

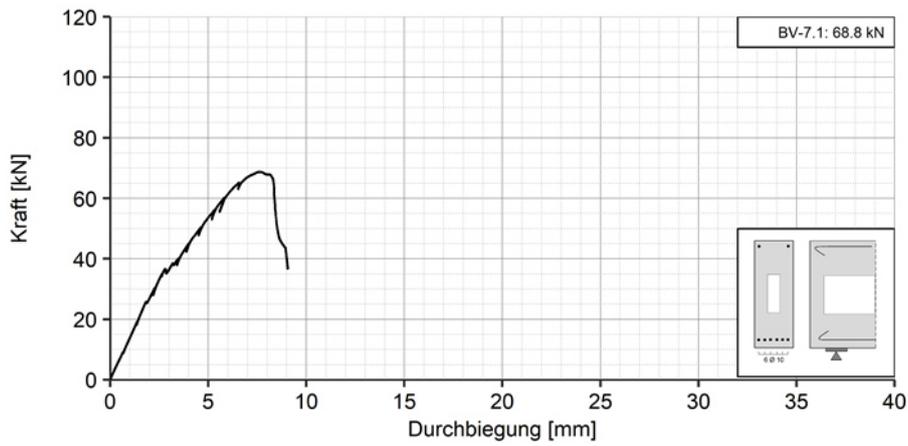


Abbildung 4-17: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-7.1

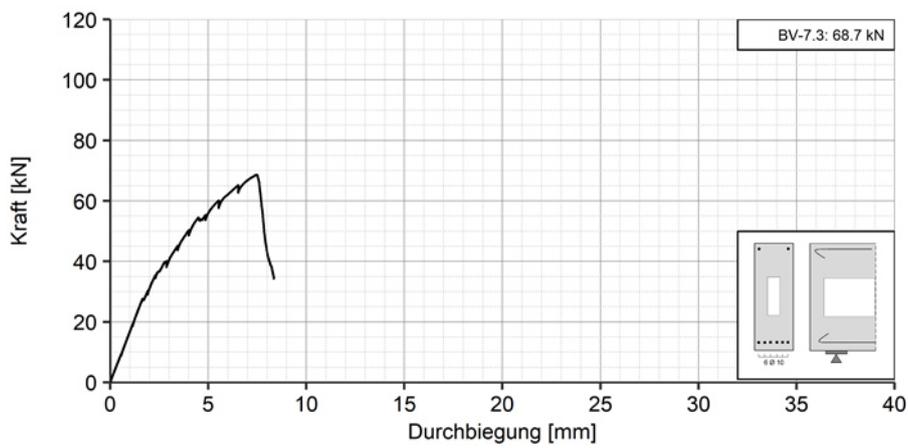


Abbildung 4-18: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-7.3

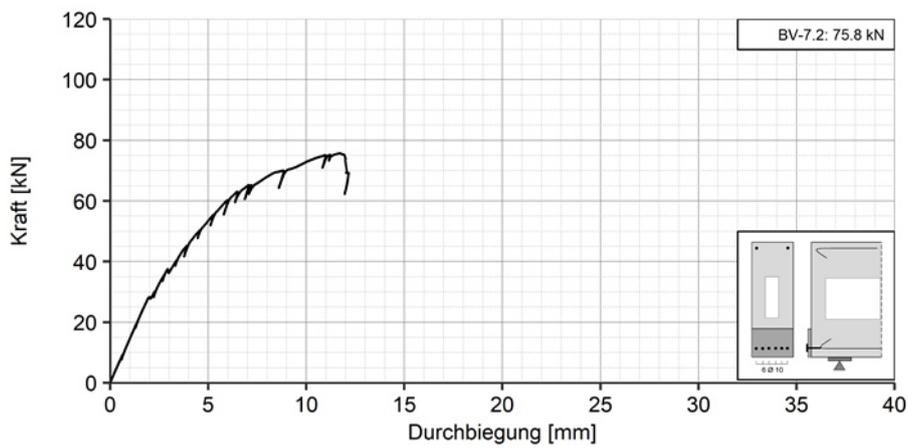


Abbildung 4-19: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-7.2, mit Kopfplatte

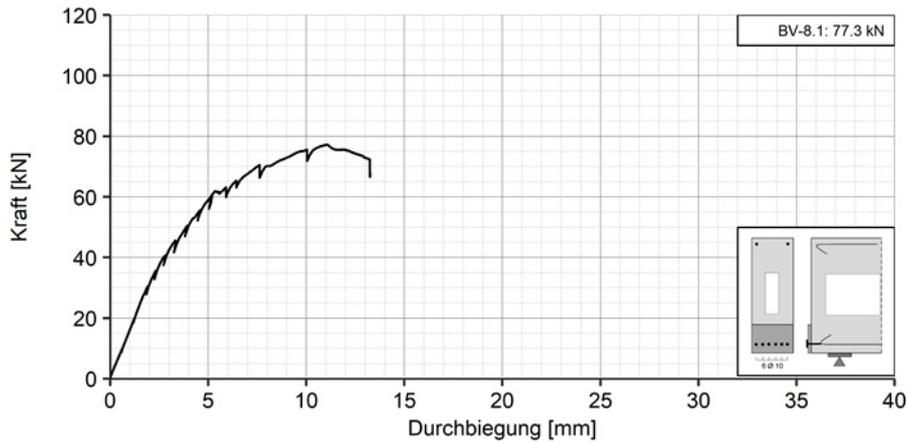


Abbildung 4-20: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-8.1, mit Kopfplatte

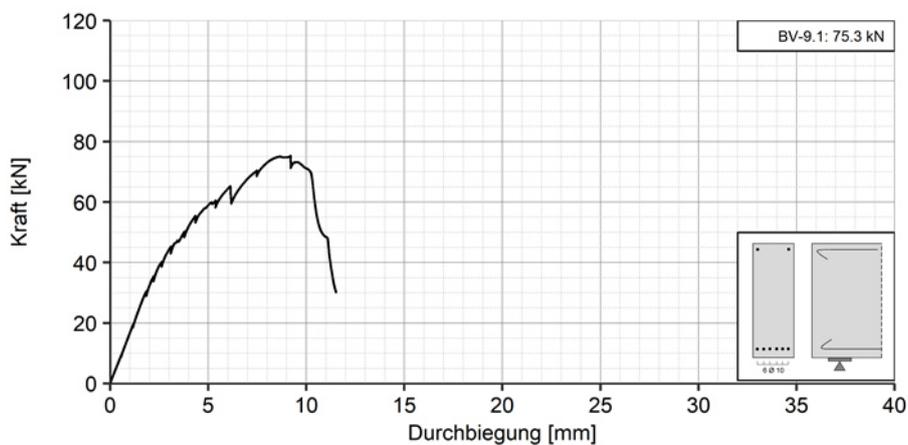


Abbildung 4-21: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-9.1, ohne Dämmkerne

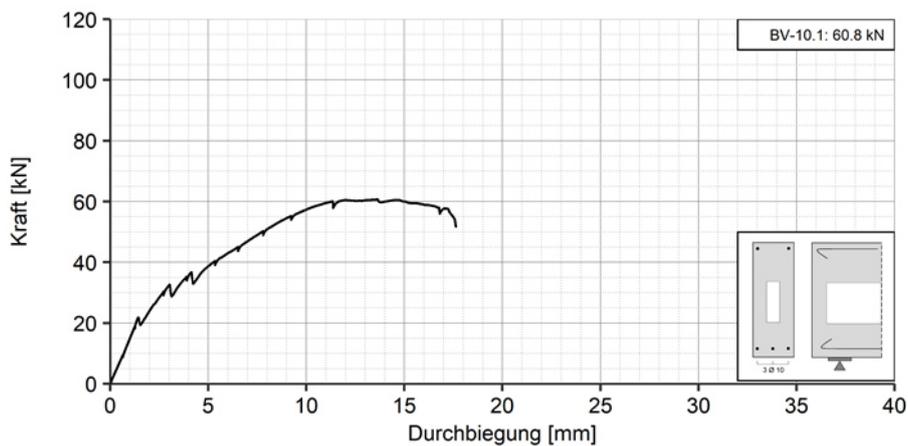


Abbildung 4-22: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-10.1, reduzierte Längsbewehrung

Es zeigt sich, dass die Variante mit Kopfplatte (Abbildung 4-19, Abbildung 4-20) die größte Traglast erreicht. Ausschließlich diese Variante versagte aufgrund eines Biegeschubversagens. Im Vergleich dazu versagten die Prüfkörper mit Verankerung mit Endhaken (BV-7, BV-9 und BV-10) früher durch ein Verankerungsversagen der Längsbewehrung.

Aus dem Vergleich der Varianten BV-7 und BV-9 (ohne Dämmkerne (Abbildung 4-19)) kann der Einfluss der Dämmkerne dargestellt werden. Es wird deutlich, dass die Dämmkerne zu einer Schwächung des Querschnitts und damit zu einer Traglastminderung führen. Die Kraft-Verformungskurven verlaufen bis zur Erstrissbildung

vergleichbar. Der maßgebende Schubriss öffnet sich im Bereich der Dämmkerne schneller, da die Schubübertragung der Rissufer geschwächt ist, und führt damit zu einer frühzeitigen Einschnürung der Druckzone.

Der Einfluss des Längsbewehrungsgrades wird aus dem Vergleich der Varianten BV 7 und BV-10 (reduzierte Längsbewehrung, Abbildung 4-22) sichtbar. Die Steifigkeitsänderung, also der Knick in der Kraft-Verformungskurve beim Übergang von Zustand I in Zustand II, ist bei der Variante mit reduzierter Längsbewehrung BV-10 früher und ausgeprägter aufgetreten. Dies zeigt deutlich, dass ein geringerer Längsbewehrungsgrad auch mit einer reduzierten Verankerungswirkung des Zugbandes einhergeht. Daraus ergibt sich ein entsprechend frühzeitiges Verankerungsversagen.

Die Interpretation der Versuchsergebnisse kann Kapitel 4.9 entnommen werden.

## 4.8.2 Bauteile mit Querkraftbewehrung

### 4.8.2.1 Bügelkorb nach DIN 4213 [4]

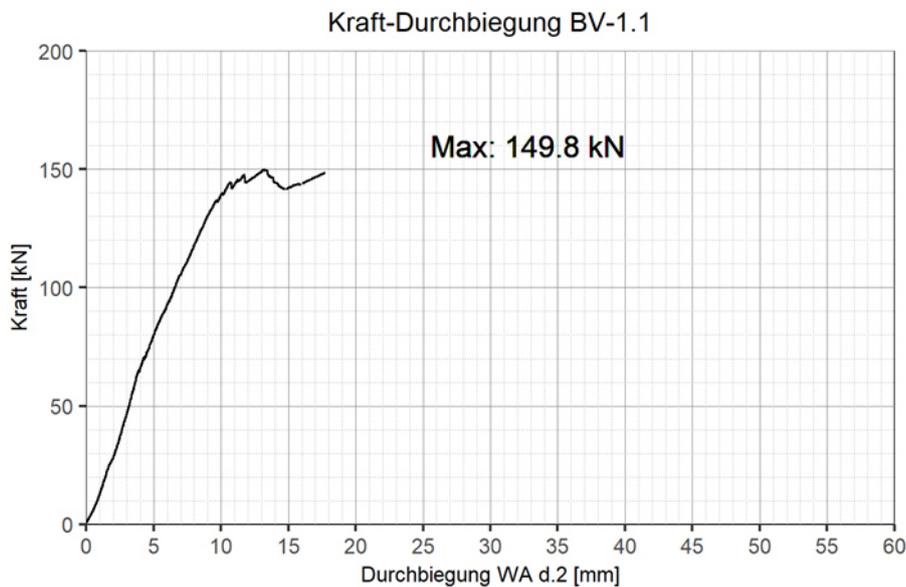


Abbildung 4-23: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-1.1, Bügelkorb DIN 4213

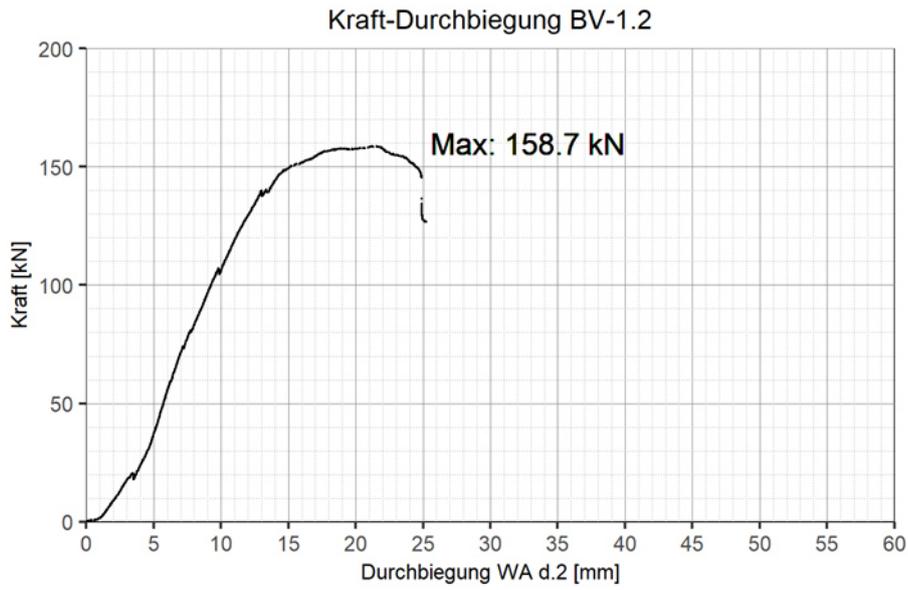


Abbildung 4-24: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-1.2, Bügelkorb DIN 4213

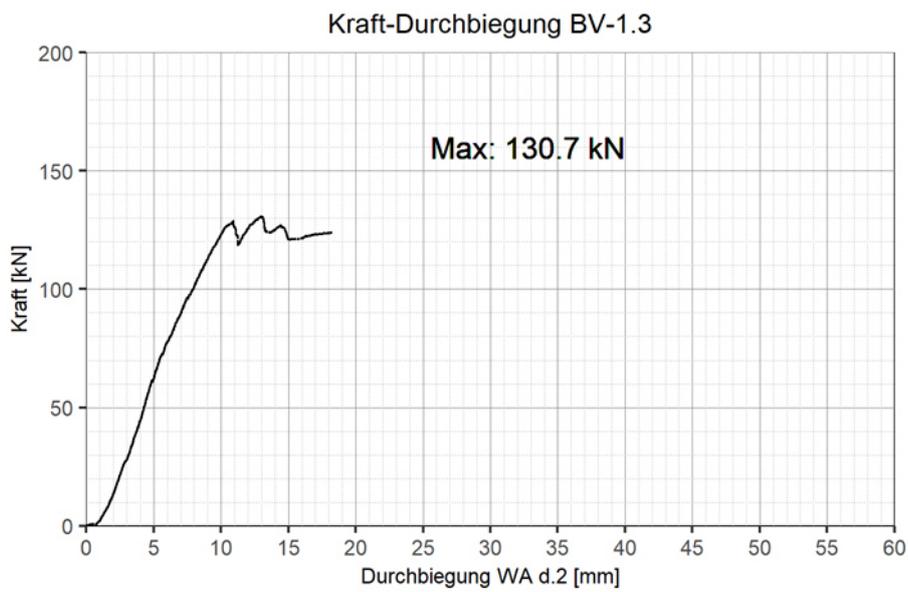


Abbildung 4-25: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-1.3, Bügelkorb DIN 4213

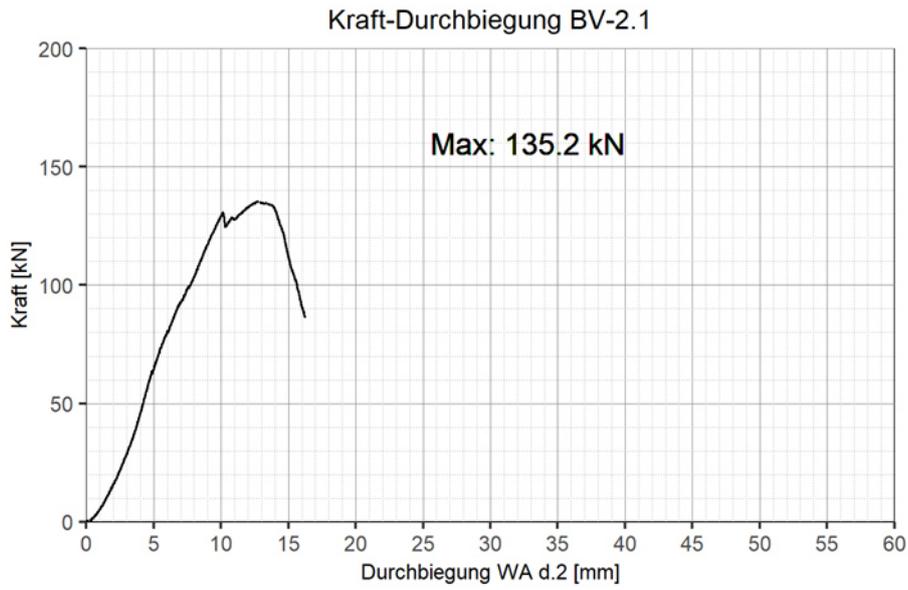


Abbildung 4-26: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-2.1, Bügelkorb

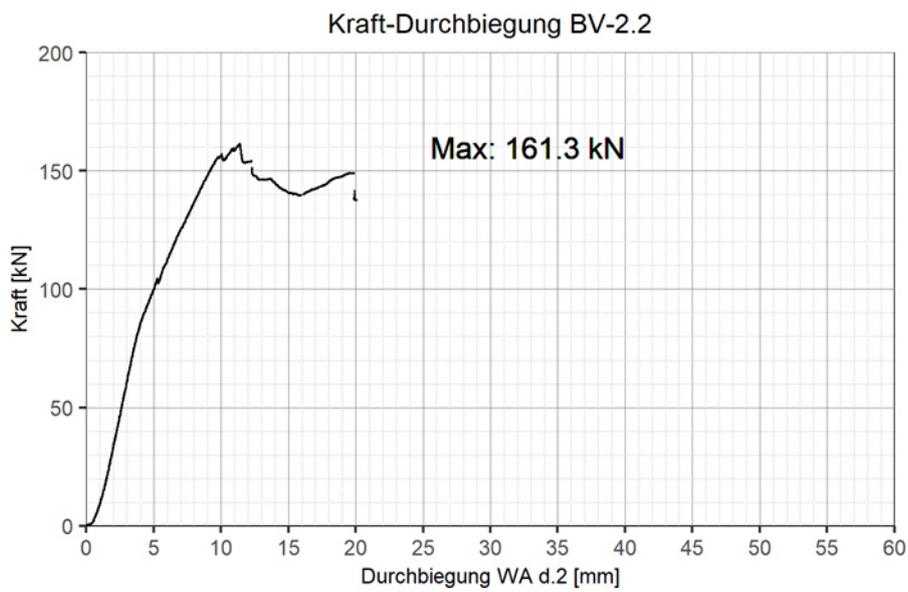


Abbildung 4-27: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-2.2, Bügelkorb

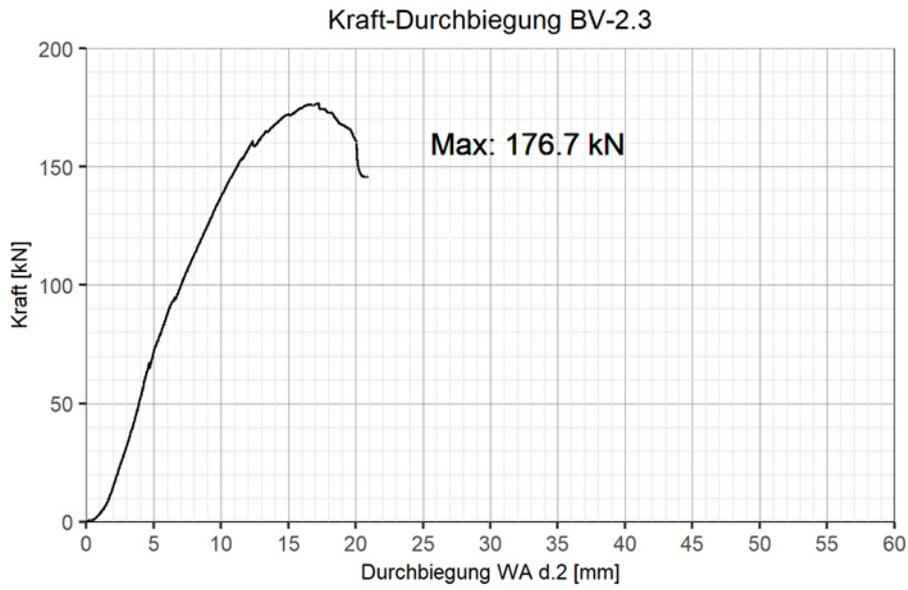


Abbildung 4-28: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-2.3, Bügelkorb

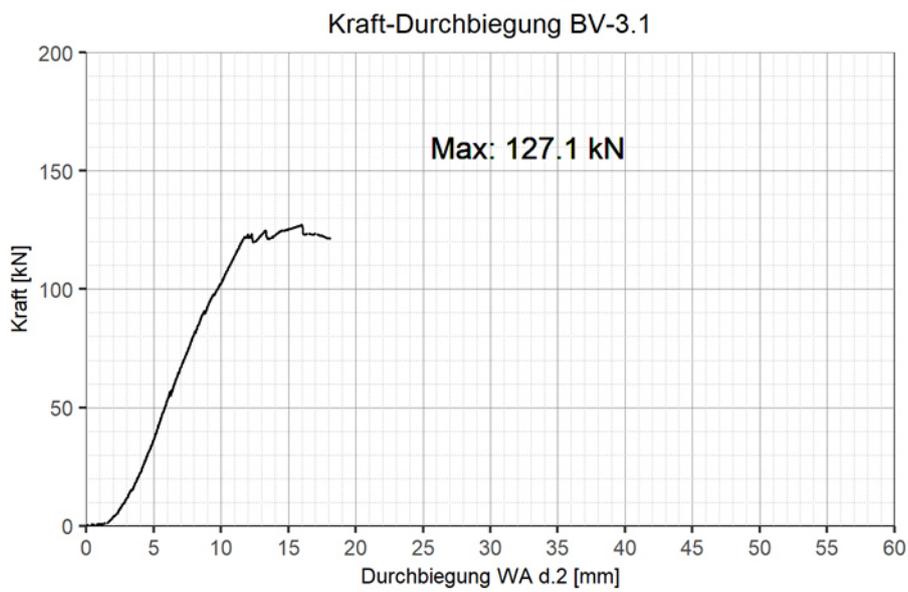


Abbildung 4-29: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-3.1, Bügelkorb

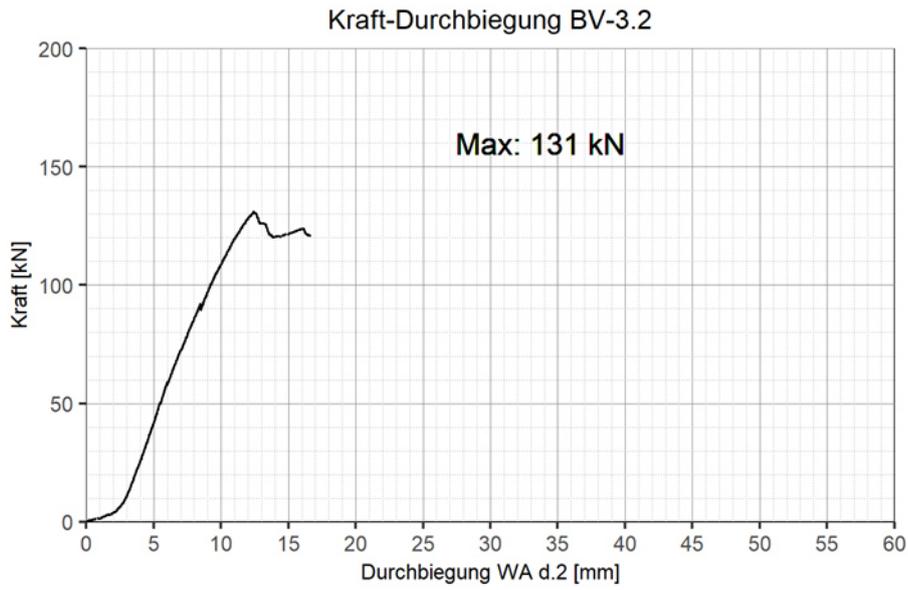


Abbildung 4-30: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-3.2, Bügelkorb

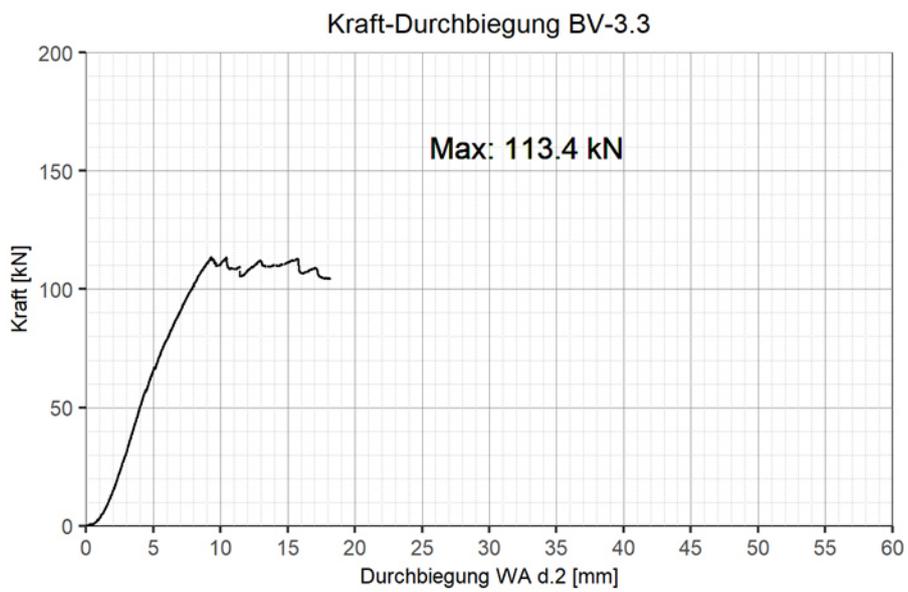


Abbildung 4-31: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-3.3, Bügelkorb

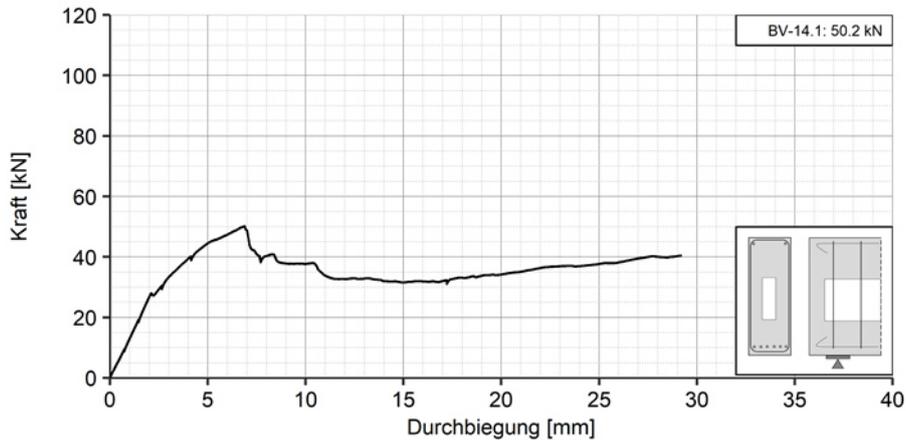


Abbildung 4-32: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-14.1, Biegelkorb DIN 4213

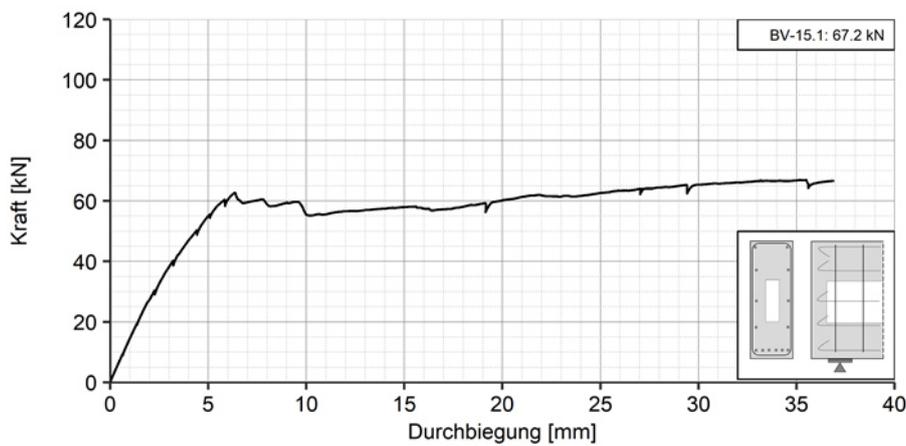


Abbildung 4-33: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-15.1, Biegelkorb DIN 4213

#### 4.8.2.2 Schubleiter nach DIN EN 1520 [3]

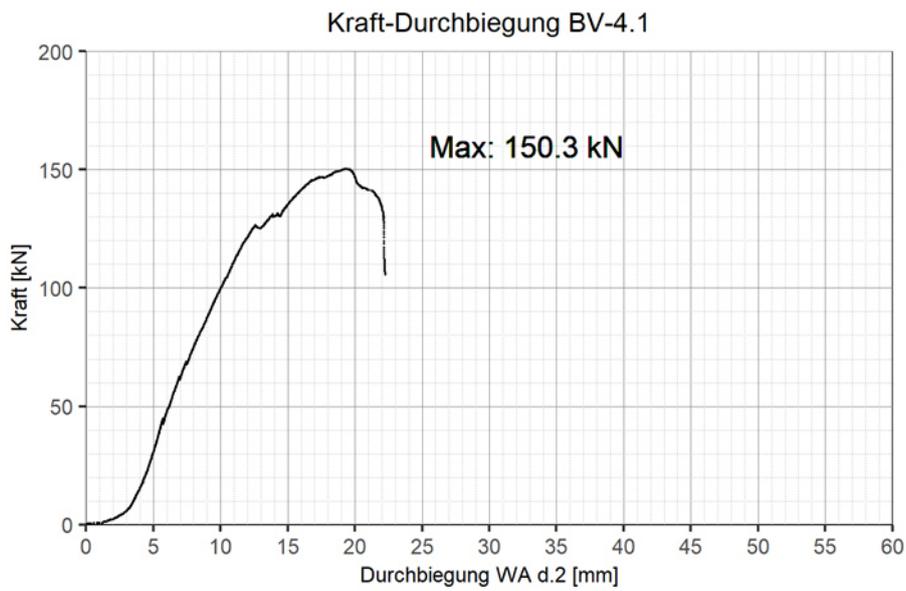


Abbildung 4-34: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-4.1, Schubleiter DIN EN 1520

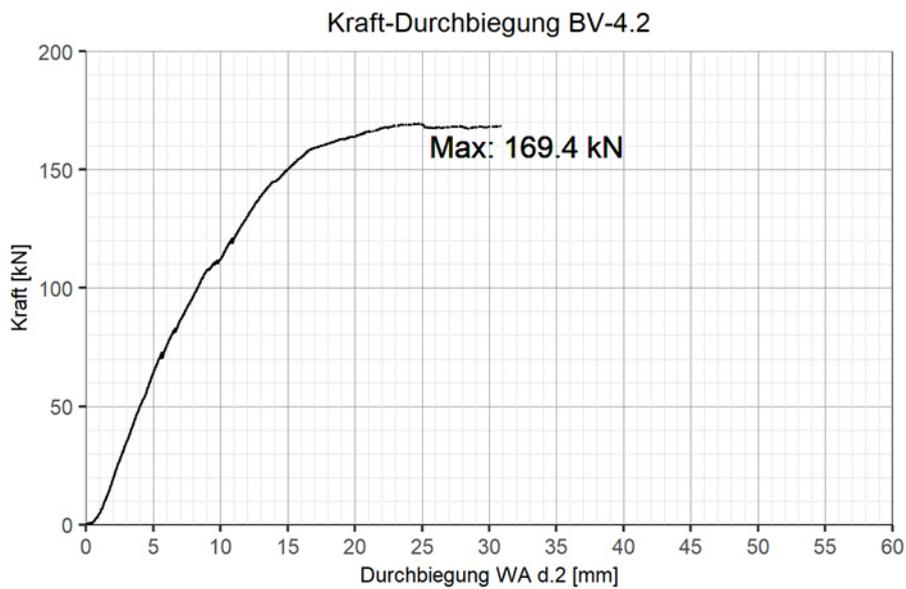


Abbildung 4-35: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-4.2, Schubleiter DIN EN 1520

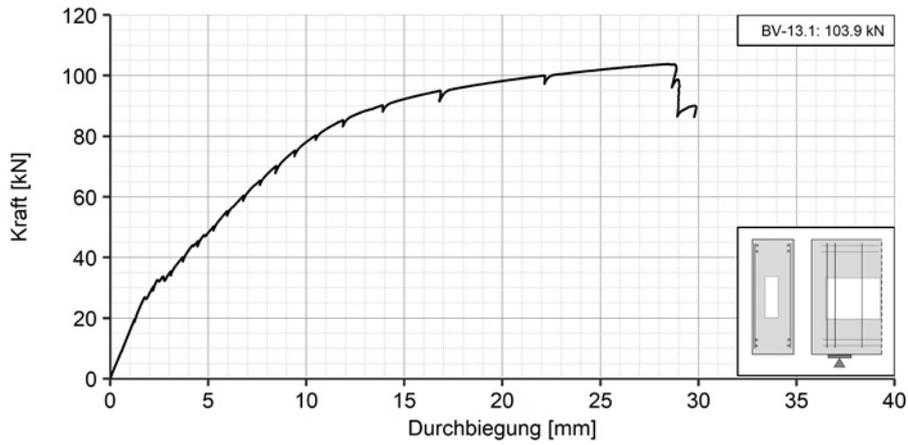


Abbildung 4-36: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-13.1, Schubleiter

#### 4.8.2.3 Einzelstäbe mit Endhaken

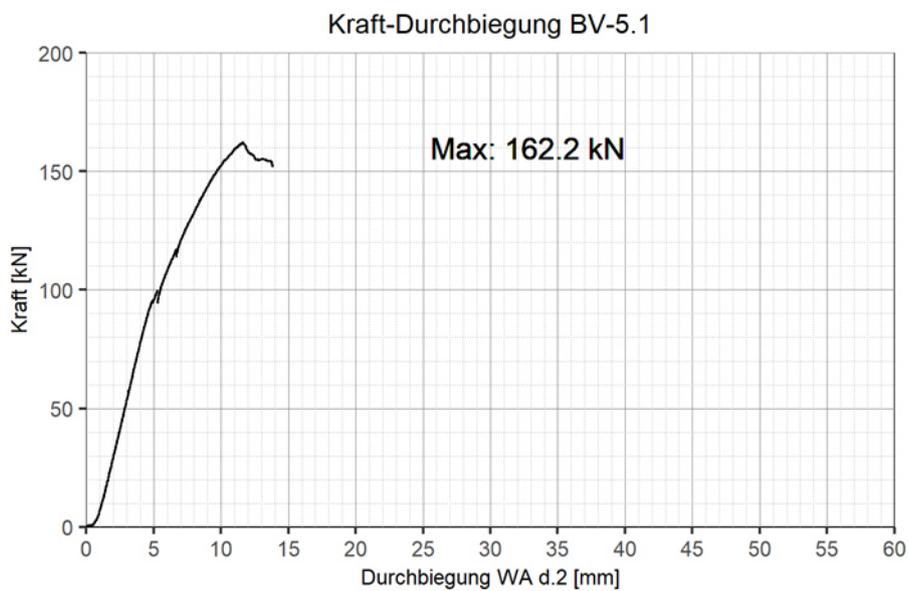


Abbildung 4-37: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-5.1, Einzelstäbe mit Endhaken

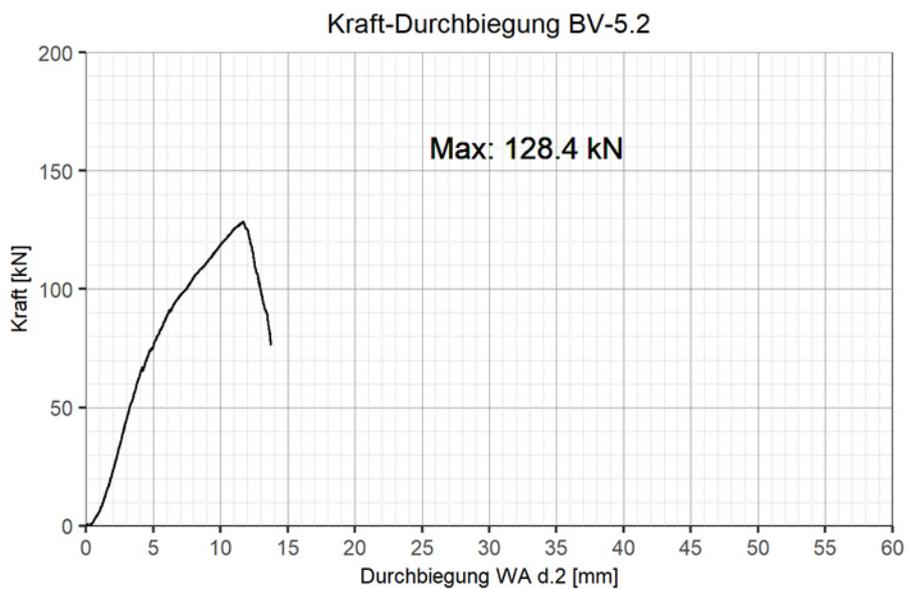


Abbildung 4-38: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-5.2, Einzelstäbe mit Endhaken

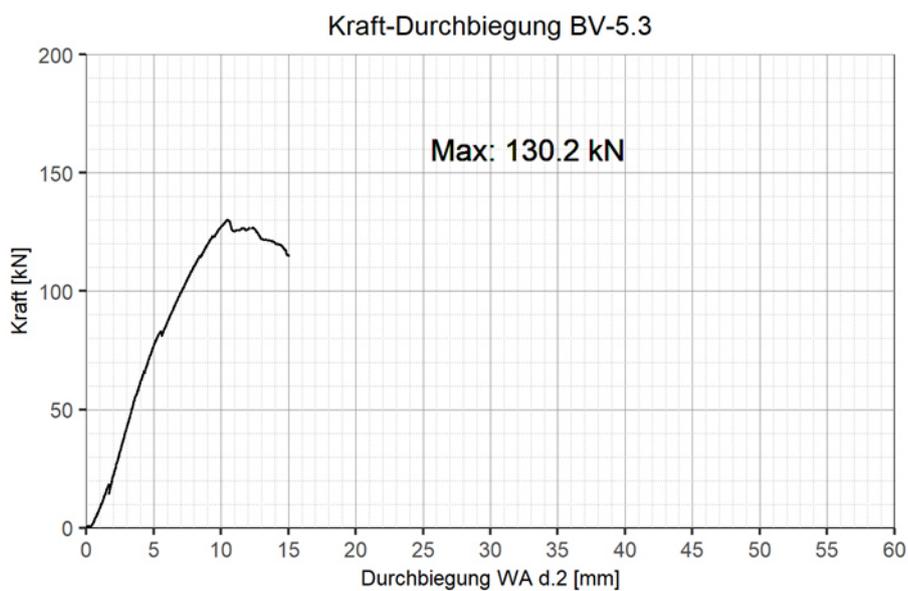


Abbildung 4-39: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-5.3, Einzelstäbe mit Endhaken

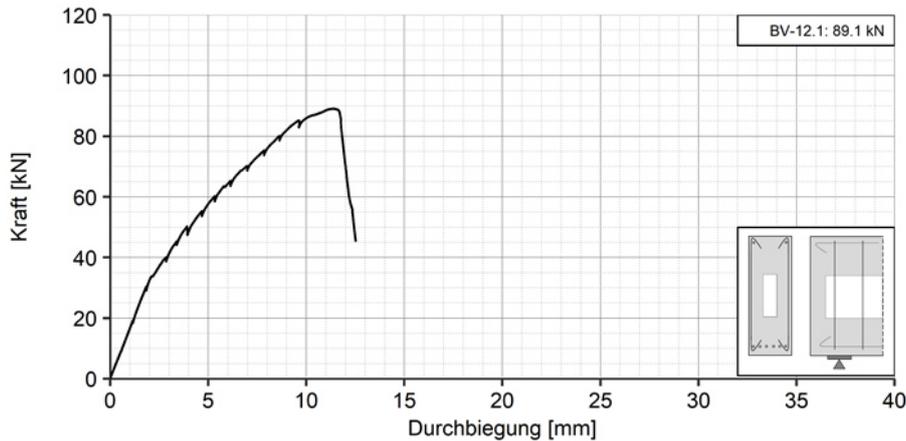


Abbildung 4-40: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-12.1, Einzelstäbe

Es zeigt sich, dass die Bewehrungsvariante BV-14 mit geschlossenem Bügelkorb nach DIN 4213 [4] die geringste Tragfähigkeit in den Untersuchungen erzielt hat (Abbildung 4-32). Dies könnte mit der erschwerten Verdichtung von Hand in Verbindung mit dem geschlossenen Bügelkorb zusammenhängen. Die Bewehrungsvariante BV-15 mit geschlossenem Bügelkorb (Abbildung 4-33) und zusätzlich eingebauter konstruktiver Längsbewehrung zeigt im Vergleich zu BV-14 eine verbesserte Tragfähigkeit um 34 %. Bei beiden Varianten mit geschlossenem Bügelkorb können eine im Verhältnis zur Bruchlast große Resttragfähigkeit und kein plötzliches Bauteilversagen festgestellt werden. Dies ist vermutlich durch die Eigensteifigkeit des Bewehrungskorbes begründet. Allerdings sind die maximal erreichten Bruchlasten im Vergleich zu den Varianten mit Schubleiter BV-13 (Abbildung 4-36) oder Einzelstäben BV-12 (Abbildung 4-40) um einiges geringer.

Die Bewehrungsvariante mit Einzelstäben mit Endhaken (BV-12) zeigt in den Versuchen die größte Steifigkeit, die sich durch ein frühes Erreichen der Maximalkraft darstellt. Die maximal erreichte Traglast liegt 77 % über der des Normprüfkörpers BV-14.

Die Variante BV-13 mit Schubleiter (Abbildung 4-36) konnte die größte Tragfähigkeit erreichen. Trotz des geringeren Längsbewehrungsgrades von 3 ‰ konnte diese Prüfkörpervariante 104 kN Traglast erreichen. In diesem Bauteil konnte ein Querkraftversagen bis zu dieser Traglast verhindert werden und es kam zu einem Versagen der Druckzone aufgrund einer Biegebeanspruchung. Die Verankerung der Längsstäbe durch angeschweißte vertikale Stäbe ist bis zu diesem Belastungszeitpunkt ausreichend.

Es zeigt sich, dass die Versuchsvarianten BV-1 (Abbildung 4-23, Abbildung 4-24, Abbildung 4-25) und BV-2 (Abbildung 4-26, Abbildung 4-27, Abbildung 4-28) mit geschlossenem Bügelkorb nach DIN 4213 [4] die geringsten Traglasten erreichen. Dahingegen können die Variante mit Schubleiter (BV-4) und mit Einzelstäben und Endhaken (BV-5) die größten Traglasten erreichen.

## 4.9 Interpretation der Versuchsergebnisse

### 4.9.1 Bauteile ohne Querkraftbewehrung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuche an Bauteilen ohne Querkraftbewehrung mit rechnerischen Traglasten verglichen. Als Vergleichswert wird der Widerstandswert  $V_{Rd1}$  nach Gleichung (2-1) aus DIN EN 1520 [3] unter Berücksichtigung von DIN 4213 [4] angesetzt.

$$V_{Rd1} = C_{Rd} \cdot k \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d \quad (2-1)$$

Dazu erfolgt zunächst die Umrechnung von  $V_{Rd1}$  auf das Mittelwertniveau  $V_{Rm1}$ .

$$V_{Rm1} = C_{Rm} \cdot k \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d \quad (4.1)$$

Zum Vergleich mit den erreichten Traglasten wird die mittlere aufnehmbare Querkraft  $V_{Rm1}$  als rechnerisch aufnehmbare Traglast  $F_{VRm1}$  unter Berücksichtigung des Eigengewichts umgerechnet.

$$F_{VRm1} = 2 \cdot V_{Rm1} - G \quad (4.2)$$

mit:  $G$  Eigengewicht des Versuchskörpers

Zur Auswertung werden die erzielten Traglasten im Versuch  $F_U$  auf die rechnerische Traglast  $F_R$  nach Gleichung (4.2) bezogen. In Anlehnung an das DAfStb-Heft 597 [27] wird das Verhältnis als Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  bezeichnet.

$$\gamma_{mod} = \frac{F_U}{F_R} \quad (4.3)$$

mit:  $F_U$  erzielte Traglast im Versuch  
 $F_R$  rechnerisch aufnehmbare Last

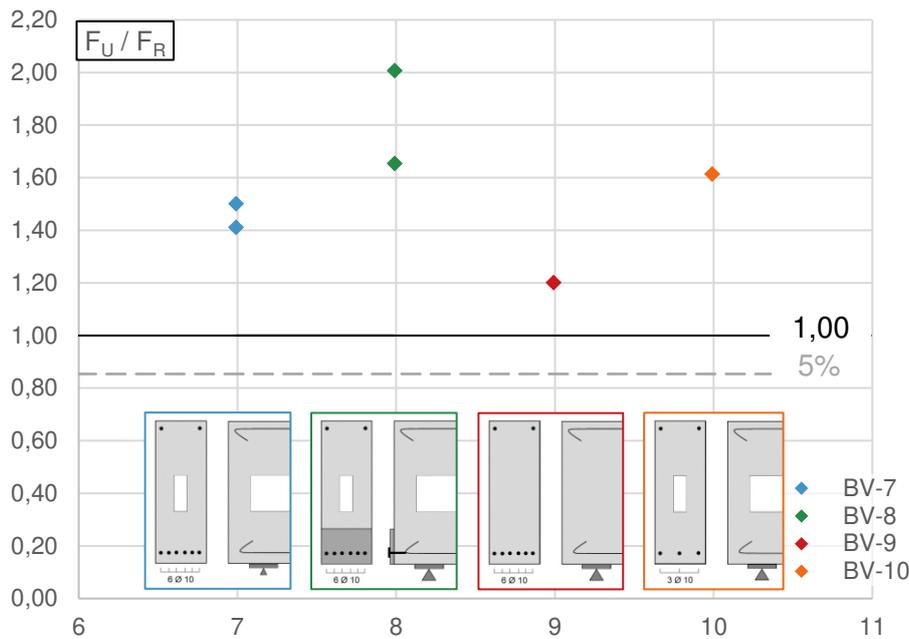
In Tabelle 4-3 werden die erreichten und rechnerischen Traglasten, die zugehörigen Materialkennwerte, Bewehrungsgehalte und die Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  der untersuchten Prüfkörper dargestellt. Alle Versuchsergebnisse übertreffen die rechnerisch vorhergesagte Traglast.

**Tabelle 4-3: Ergebnisse Bauteile ohne Querkraftbewehrung**

Versuch	Druckfestigkeit	Rohdichte	Bewehrungsgrad	Längsbewehrung	Querkraftbewehrung	DIN 4213 Gl. (5.2)	Maximallast im Versuch	$\gamma_{mod}$
	$f_c$	$\rho$	$\rho_1$	$A_{sl}$	$a_{sw}$	$F_{VRm1}$	$F_u$	$F_u / F_{VRm1}$
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[-]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> /m]	[kN]	[kN]	[-]
BV-7.1	4,4	1125	0,004	4,71	0,00	45,9	68,8	1,50
BV-7.2	4,4	1125	0,004	4,71	0,00	45,9	75,8	1,65
BV-7.3	4,9	1184	0,004	4,71	0,00	48,7	68,7	1,41
BV-8.1	3,1	1006	0,004	4,71	0,00	38,5	77,3	2,01
BV-9.1	4,4	1167	0,003	4,71	0,00	62,7	75,3	1,20
BV-10.1	5,2	1185	0,002	2,36	0,00	37,7	60,8	1,61
							<b>Mittelwert</b>	<b>1,56</b>

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass der Mittelwert der Modellsicherheit  $\gamma_{mod} = 1,56$  beträgt, was einer Traglastreserve von 56 % entspricht. Der Vergleich der Versuchsergebnisse mit den rechnerischen Traglasten zeigt zunächst gute Übereinstimmungen. Bedingt durch die großen Streuungen mit einer Standardabweichung von 0,27 ergibt sich der 5 %-Fraktilwert zu 0,93. Die Bemessung liegt damit auf der unsicheren Seite.

In Abbildung 4-41 wird die Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  für die jeweiligen Prüfkörpervarianten dargestellt. Dabei wird der 5 %-Fraktilwert als untere Grenze angezeigt.



**Abbildung 4-41: Ergebnisse der Versuche an Bauteilen ohne Querkraftbewehrung**

Die Versuche an Bauteilen ohne Querkraftbewehrung haben gezeigt, dass die Querkrafttragfähigkeit mit der Bemessungsgleichung für  $V_{Rd1}$  (Gl. (2-1)) nach DIN EN 1520 [3] und DIN 4213 [4] nicht mit ausreichender Zuverlässigkeit vorhergesagt werden kann.

Daher wird eine Abminderung der bisherigen Bemessungsgleichung für  $V_{Rd1}$  (Gl. (2-1)) vorgeschlagen. Die Versuchskörper dieses Projekts weisen auf einen Abminderungsbeiwert von 0,85 hin. Dieser könnte durch zukünftige Versuche mit einem größeren Versuchsumfang zu Verbesserungen führen.

$$V_{Rd1} = 0,85 \cdot C_{Rd} \cdot k \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d \quad (4.4)$$

Darüber hinaus ist eine Berücksichtigung der Dämmkerne als hohlen Kern im Bauteil in jedem Fall erforderlich. Die Definition von  $b_w$  als kleinste Querschnittsbreite muss die Dämmkerndicke als Abzugsglied enthalten.

$$b_w = b - b_k \quad (4.5)$$

- mit:  $b$       Breite des Bauteils  
 $b_k$       Dicke des Dämmkerns

#### 4.9.2 Bauteile mit Querkraftbewehrung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuche an Bauteilen mit Querkraftbewehrung mit rechnerischen Traglasten verglichen. Als Vergleichswert wird der Widerstandswert  $V_{Rd3}$  nach Gleichung (2-5) aus DIN EN 1520 [3] unter Berücksichtigung von DIN 4213 [4] angesetzt. Dabei wird in Anlehnung an DIN 4213 [4] die Streckgrenze der Querkraftbewehrung  $f_{yw}$  auf 400 N/mm<sup>2</sup> und der Einfluss des Druckstrebenwinkels auf  $\cot \theta = 1,2$  festgelegt.

$$V_{Rd3} = a_{sw} \cdot z \cdot f_{yw} \cdot \cot \theta \quad (2-5)$$

- mit:  $f_{yw}$        $\leq 400 \text{ N/mm}^2$   
 $\cot \theta$        $\cot \theta = 1,2$  für reine Biegung nach DIN 4213 [4]

Der Widerstandswert  $V_{Rd3}$  wird mit Gleichung (4.6) in die rechnerisch aufnehmbare Traglast  $F_{VR3}$  unter Berücksichtigung des Eigengewichts umgerechnet.

$$F_{VR3} = 2 \cdot V_{R3} - G \quad (4.6)$$

mit:  $G$  Eigengewicht des Versuchskörpers

Entsprechend der zuvor dargestellten Versuche werden die experimentellen Traglasten mit den rechnerisch aufnehmbaren Traglasten ins Verhältnis gesetzt.

Die Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  wird nach Gleichung (4.7) bestimmt.

$$\gamma_{mod} = \frac{F_U}{F_R} \quad (4.7)$$

mit:  $F_U$  erzielte Traglast im Versuch  
 $F_R$  rechnerisch aufnehmbare Last

In Tabelle 4-4 werden die experimentellen und rechnerischen Traglasten, die zugehörigen Materialkennwerte, Bewehrungsgehalte und die Modellsicherheit der untersuchten Prüfkörper, sortiert nach ihrer Bewehrungskonstruktion, dargestellt.

**Tabelle 4-4: Ergebnisse Bauteile mit Querkraftbewehrung**

Versuch	Druckfestigkeit	Rohdichte	Bewehrungsgrad	Längsbewehrung	Q-Bewehrung	Streckgrenze für Querkraftbewehrung	DIN 4213 Gl. (5.4)	Maximallast im Versuch	$\gamma_{mod}$
	$f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_1$ [-]	$A_{sl}$ [cm <sup>2</sup> ]	$a_{sw}$ [cm <sup>2</sup> /m]	$f_{yk}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$F_{VRm3}$ [kN]	$F_u$ [kN]	$F_u / F_{VRm3}$ [-]
Bügelkorb		DIN 4213							
BV-1.1	4,6	1240	0,0019	3,14	1,57	400	117,6	149,8	1,27
BV-1.2	4,6	1240	0,0019	3,14	1,57	400	117,6	158,7	1,35
BV-1.3	4,6	1240	0,0019	3,14	1,57	400	117,6	130,7	1,11
BV-2.1	6,5	1264	0,0019	3,14	1,57	400	117,4	135,2	1,15
BV-2.2	6,5	1264	0,0019	3,14	1,57	400	117,4	161,3	1,37
BV-2.3	6,5	1264	0,0019	3,14	1,57	400	117,4	176,7	1,51
BV-3.1	4,4	1144	0,0019	3,14	1,57	400	118,7	127,1	1,07
BV-3.2	4,4	1144	0,0019	3,14	1,57	400	118,7	131,0	1,10
BV-3.3	4,4	1144	0,0019	3,14	1,57	400	118,7	113,4	0,96
BV-14.1	3,5	1043	0,0041	4,71	2,26	400	122,6	50,2	0,41
BV-15.1	4,1	1078	0,0041	4,71	2,26	400	122,3	67,2	0,55
Schubleiter		DIN EN 1520							
BV-4.1	4,2	1103	0,0019	3,14	1,57	400	119,2	150,3	1,26
BV-4.2	4,2	1103	0,0019	3,14	1,57	400	119,2	169,4	1,42
BV-13.1	6,1	1237	0,0028	3,14	2,26	400	121,1	103,9	0,86
Einzelstäbe									
BV-5.1	4,2	1097	0,0019	3,14	1,57	400	119,2	162,2	1,36
BV-5.2	4,2	1097	0,0019	3,14	1,57	400	119,2	128,4	1,08
BV-5.3	4,2	1097	0,0019	3,14	1,57	400	119,2	130,2	1,09
BV-12.1	5,0	1128	0,0041	4,71	2,26	400	121,9	89,1	0,73
<b>Mittelwert</b>									<b>1,09</b>

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass der Mittelwert der Modellsicherheit  $\gamma_{mod} = 1,09$  beträgt, was zunächst eine Traglastreserve von 9 % darstellt. Bedingt durch verhältnismäßig große Streuungen liegt die Bemessung jedoch auf der unsicheren Seite.

In Abbildung 4-42 wird die Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  für die jeweiligen Bewehrungsvarianten, sortiert nach Bügelkorb, Schubleiter und Einzelstäbe, dargestellt.

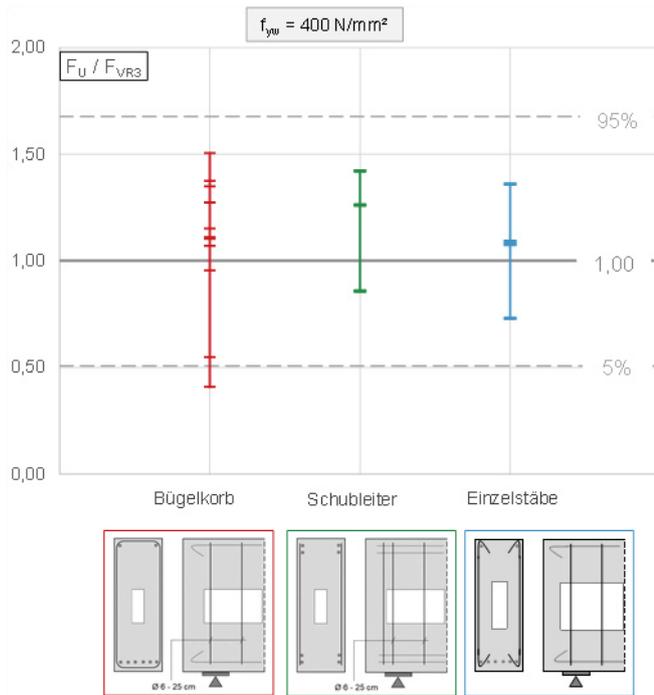


Abbildung 4-42: Ergebnisse der Versuche an Bauteilen mit Querkraftbewehrung,  $f_{yw} = 400 \text{ N/mm}^2$

Bauteile mit Querkraftbewehrung können nach der Bemessungsformel für  $V_{Rd,3}$  aus Gleichung (2-5) nach DIN EN 1520 [3] und DIN [4] 4213 nicht mit ausreichender Sicherheit bemessen werden.

In den Auszugversuchen in Kapitel 3 wurde gezeigt, dass die Verankerung von Bewehrung in haufwerksporigem Leichtbeton nachgiebig ist und nicht von einer vollen Verankerung ausgegangen werden kann. Aufgrund der Ergebnisse der Auszugversuche wird eine Abminderung der ansetzbaren Stahlspannungen vorgeschlagen. Dazu sollte in Abhängigkeit der gewählten Querkraftbewehrungskonstruktion die jeweilige ansetzbare Stahlspannung aus Tabelle 3-3 als charakteristische Streckgrenze der Querkraftbewehrung  $f_{ywk}$  eingesetzt werden.

Der Anteil der Querkraftbewehrung an der Querkrafttragfähigkeit eines Bauteils  $V_{Rd,3}$  wird wie folgt modifiziert:

$$V_{Rd,3} = a_{sw} \cdot z \cdot f_{ywd} \quad (4.8)$$

Betonstahl

$f_{ywk}$  nach Tabelle 3-3

Je nach gewählter Querkraftbewehrungskonstruktion wird die rechnerisch ansetzbare Spannung angepasst (Tabelle 3-3). Der Druckstrebenwinkel wird zu  $45^\circ$ , also der  $\cot \theta$  zu 1,0, angenommen und entfällt daher in der Bemessungsgleichung.

Aus den experimentellen Untersuchungen an querkraftbewehrten Wandbauteilen aus LAC geht hervor, dass bei den in diesem Projekt untersuchten Elementen kein Stahlzugversagen der Querkraftbewehrung maßgebend für das Bauteilversagen wird.

In Anlehnung an die auf europäischer Ebene gültige Gleichung (2-6) aus DIN EN 1520 [3] wird vorgeschlagen, in der Bemessung für querkraftbewehrte Bauteile sowohl einen Traganteil für den Leichtbeton als auch einen Traganteil der Querkraftbewehrung zu berücksichtigen. Der Betontraganteil ist aus den Ergebnissen der Versuche ohne Querkraftbewehrung (Gl. (4.4)) bekannt.

Zur Bemessung der Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen mit Querkraftbewehrung wird Gleichung (4.9) vorgeschlagen.

$$V_{Rd} = V_{Rd,1} + V_{Rd,3} \quad (4.9)$$

mit:  $V_{Rd,1}$       Betontraganteil nach Gl. (4.4)  
 $V_{Rd,3}$       Stahltraganteil, Beitrag der Querkraftbewehrung zum  
                 Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft nach Gl. (4.8)

Durch die in diesem Projekt untersuchten Prüfkörper ergeben sich die nachfolgend dargestellten Anwendungsgrenzen.

Anwendungsgrenzen:

Druckfestigkeit	$f_c$	1,7 bis 7,2 N/mm <sup>2</sup>
Rohdichte	$\rho$	880 bis 1300 kg/m <sup>3</sup>
Stabdurchmesser	$\varnothing_{la}$	8 mm und 10 mm
Schubslankheit	$\lambda$	< 3,0
Zuschlagsstoff		Rohbims

## **5 Experimentelle Untersuchung des Tragverhaltens unter kombinierter Biege-, Querkraft- und Torsionsbeanspruchung von Wandelementen aus LAC**

### **5.1 Allgemeines Versuchskonzept**

Ausgangspunkt für die Ausarbeitung des Prüfkonzepts bilden die Anforderungen der DIN EN 1520 und DIN 4213 an die Herstellung und konstruktive Durchbildung von bewehrten, freitragenden Bauteilen aus LAC, sowie die Belastungssituation, die sich im Tragwerk für das betrachtete Bauteil (hier: Sturzwandplatte) einstellt.

#### **5.1.1 Einwirkungen aus der realen Einbausituation**

Im Allgemeinen ist ein freitragendes Fassadenbauteil aus LAC, das oberhalb einer größeren Öffnung (z.B. einem Tor) angeordnet ist und an das über einen Winkel ein Trapezblech angeschlossen ist für eine kombinierte Beanspruchung aus den folgenden Lasten zu dimensionieren:

- Ständige Lasten:
  - Eigengewicht des bewehrten LAC-Bauteils
  - Eigengewicht der Dachkonstruktion
- Veränderliche Lasten:
  - Wind (Dach- und Wandfläche)
  - Schnee (Dach)
  - Verkehrslasten (Dach)

Aus dieser Belastungssituation ergibt sich für die Bemessung des Bauteils die Notwendigkeit die Tragfähigkeit gegenüber einer interaktiven Beanspruchung aus Biegemoment, Querkraft und Torsion nachzuweisen. Da bereits im Rahmen der durchgeführten Tastversuche an der TU Kaiserslautern (vgl. Kapitel 2.5) das Erreichen der Biegetragfähigkeit oder der Betondruckfestigkeit zum Versagen führte wird eine reine Torsionsbelastung nicht weiter betrachtet.

#### **5.1.2 Konstruktive Durchbildung**

Die zu untersuchenden Variationen an konstruktiven Durchbildungen ergibt sich aus der Motivation des Forschungsvorhabens. Demnach soll eine offene Bewehrungskonstruktion entwickelt und erforscht werden, die die Herstellung im Walzverfahren erlaubt. Um den Vergleich zu den aktuell zulässigen Bewehrungskonstruktionen nach DIN 4213 und DIN EN 1520 zu ermöglichen sollten diese Varianten bei der Untersuchung berücksichtigt werden. Des Weiteren ist zu überprüfen ob eine offene Bewehrungskonstruktion die Torsionslasten aus den exzentrisch angeschlossenen Dachlasten aufnehmen kann oder ob eine aus einzelnen nicht miteinander verbundenen Stäben bestehende Bewehrungskonstruktion gefunden werden kann, die die Herstellung im Walzverfahren ermöglicht und einem geschlossenen Bügel möglichst nahe kommt.

#### **5.1.3 Beton und Dämmkerne**

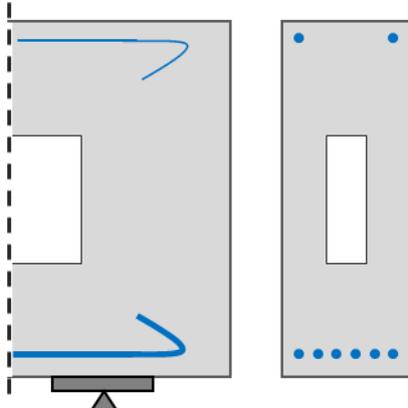
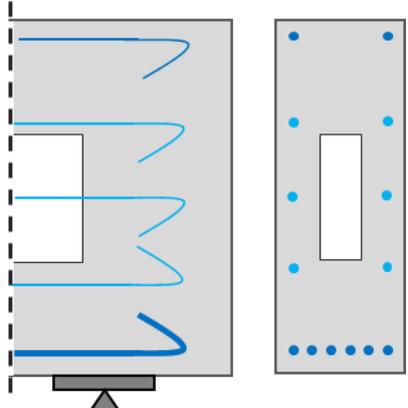
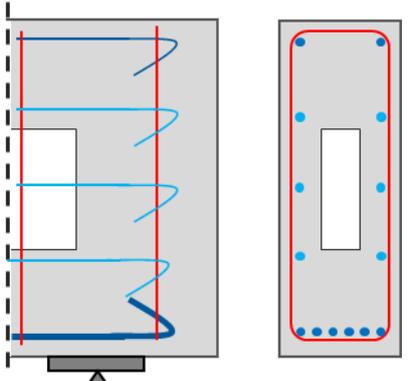
Als Beton wird ein LAC8/9 gewählt um die Vergleichbarkeit der gewonnenen Ergebnisse mit denen der HS Koblenz verbleichen zu können. Alle Probekörper besitzen einen Dämmkern aus Styropor.

### **5.2 Probekörper**

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden insgesamt sechs Probekörper unter wirken kombinierten Beanspruchung auf Biegung, Querkraft und Torsion experimentell untersucht. Die Probekörper besitzen identische Abmessungen mit einer Länge von 4,50 m, einer Breite von 0,25 m und einer Höhe von 0,70 m. In Tabelle 5-1 sind die Probekörper der Interaktionsversuche skizziert und die einzelnen Elemente benannt.

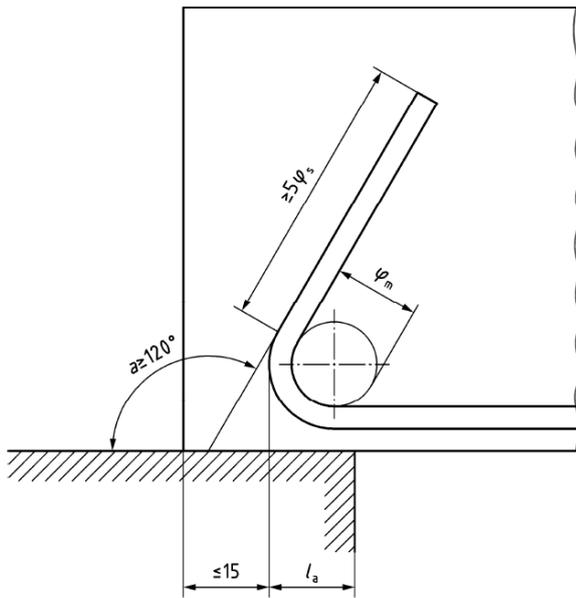
Um die Anforderungen der DIN 4213 und DIN EN 1520 quantitativ gegenüberzustellen und zu bewerten wird je Probekörper entsprechend den Regelungen der Normen für die experimentellen Untersuchungen vorgesehen: IV3 erfüllt die Vorgaben der DIN 4213 und IV4 die der DIN EN 1520. Der Einfluss der Querkraftbewehrung auf die Tragfähigkeit kann anhand von Versuchen an Bauteilen ohne Querkraftbewehrung ermittelt werden (IV1 und IV2). Um den Vergleich zu den experimentellen Untersuchungen der HS Koblenz zu ermöglichen, wird ein Probekörper mit reiner Längsbewehrung vorgesehen (IV1). Die Bewehrungskonstruktionen der Probekörper IV5 und IV6 wurden im Rahmen des Projektes entwickelt. Probekörper IV5 besitzt eine offene Bewehrungskonstruktion, wobei der vertikale Lastabtrag über einzelne Stäbe mit Endhaken an beiden Enden sicherstellt werden soll. IV6 entspricht dem Aufbau von IV5, wobei zusätzlich Randstecker vorgesehen wurden um einen geschlossenen Bewehrungskorb nachzuempfinden.

**Tabelle 5-1: Probekörper für die Interaktionsversuche**

Skizze	Beschreibung
<b>Beuteile ohne Querkraftbewehrung</b>	
	<p><b>IV1   Interaktionsversuch 1</b>  <math>A_{sl,oben} = 2 \text{ } \varnothing 10</math>  <math>A_{sl,unten} = 6 \text{ } \varnothing 10</math>                      Mit Dämmkernen                      Verdichtung: mit Verdichtungswalze</p>
	<p><b>IV2   Interaktionsversuch 2</b>  <math>A_{sl,oben} = 2 \text{ } \varnothing 10</math>  <math>A_{sl,längs} = 3 \text{ } \varnothing 6 / 20 \text{ cm}</math>  <math>A_{sl,unten} = 6 \text{ } \varnothing 10</math>                      Mit Dämmkernen                      Verdichtung: mit Verdichtungswalze</p>
<b>Bauteile mit Querkraftbewehrung</b>	
	<p><b>IV3   Interaktionsversuch 3</b>  <math>A_{sl,oben} = 2 \text{ } \varnothing 10</math>  <math>A_{sl,längs} = 3 \text{ } \varnothing 6 / 20 \text{ cm}</math>  <math>A_{sl,unten} = 6 \text{ } \varnothing 10</math>                      Mit Dämmkernen</p> <p>Q-Bew: Geschlossener umlaufender Bügelkorb nach DIN 4213  <math>A_{sw} = \varnothing 6 / 25 \text{ cm}</math></p> <p>Verdichtung: von Hand mit Rüttler und Spezialaufsatz</p>

	<p><b>IV4   Interaktionsversuch 4</b></p> <p><math>A_{sl,oben} = 4 \text{ } \varnothing 10</math>  <math>A_{sl,längs} = 3 \text{ } \varnothing 6 / 20 \text{ cm}</math>  <math>A_{sl,unten} = 6 \text{ } \varnothing 10</math>                  Mit Dämmkernen</p> <p>Q-Bew: Schubleiter nach DIN EN 1520  <math>A_{sw} = \varnothing 6 / 25 \text{ cm}</math></p> <p>Verdichtung: mit Verdichtungswalze</p>
	<p><b>IV5   Interaktionsversuch 5</b></p> <p><math>A_{sl,oben} = 2 \text{ } \varnothing 10</math>  <math>A_{sl,längs} = 3 \text{ } \varnothing 6 / 20 \text{ cm}</math>  <math>A_{sl,unten} = 6 \text{ } \varnothing 10</math>                  Mit Dämmkernen</p> <p>Q-Bew: Vorzugsvariante  <math>A_{sw} = \varnothing 6 / 25 \text{ cm}</math></p> <p>Verdichtung: mit Verdichtungswalze</p>
	<p><b>IV6   Interaktionsversuch 6</b></p> <p><math>A_{sl,oben} = 4 \text{ } \varnothing 10</math>  <math>A_{sl,längs} = 3 \text{ } \varnothing 6 / 20 \text{ cm}</math>  <math>A_{sl,unten} = 6 \text{ } \varnothing 10</math>                  Mit Dämmkernen</p> <p>Q-Bew: Vorzugsvariante inkl. Randstecker  <math>A_{sw} = \varnothing 6 / 25 \text{ cm}</math></p> <p>Verdichtung: mit Verdichtungswalze</p>

Die Bewehrungsstäbe der unteren und oberen Längsbewehrung (IV1-IV6), sowie die über die Höhe verteilten Längsbewehrungsstäbe (IV2-IV6) wurden an beiden Stabenden zu Haken nach DIN EN 1520 Bild 10.A (siehe Abbildung 5-1) ausgebildet.



**Legende**

- $\phi_m \geq 2,5 \phi_s$
- $\phi_s$  Durchmesser des Bewehrungsstabs
- $l_a$  verfügbare Verankerungslänge

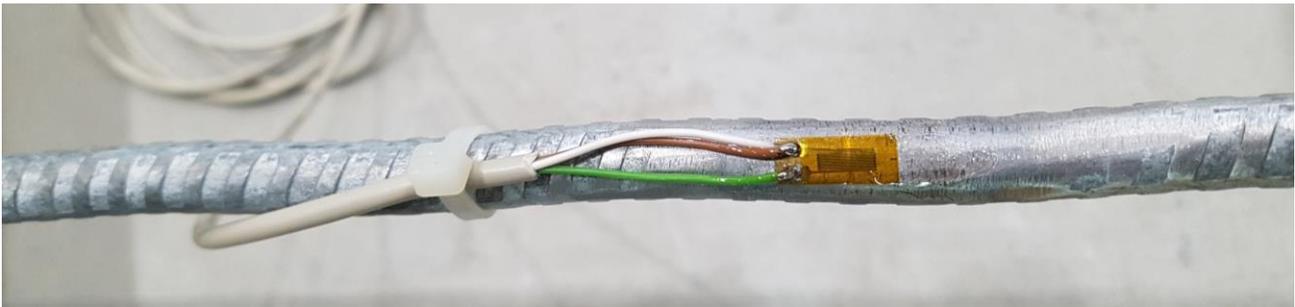
**Abbildung 5-1: Verankerung glatter Bewehrungsstäbe nach DIN EN 1520, Bild A.10 [3]**

### 5.3 Herstellung der Probekörper

Die Probekörper wurden im Werk der Firma Thermodur Wandelemente GmbH & Co. KG, Neuwied hergestellt. Im Vorfeld wurden ausgewählte Bewehrungsstäbe der unteren Längsbewehrung im Labor für konstruktiven Ingenieurbau der TU Kaiserslautern mit Dehnmessstreifen versehen.

#### 5.3.1 Dehnmessstreifen (DMS)

Um die auftretenden Stahldehnungen der unteren Längsbewehrung zu messen, kamen Dehnmessstreifen (DMS) der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt vom Typ 6/120 LY41 zum Einsatz. Der Widerstand der verwendeten DMS beträgt  $120 \Omega \pm 0,30 \%$  und der k-Faktor  $2,09 \pm 1,0 \%$ . Abbildung 5-2 zeigt eine aufgeklebte DMS samt Anschlusskabel auf einem 10 mm Bewehrungsstab.



**Abbildung 5-2: DMS aufgeklebt auf einen Bewehrungsstab Ø10**

Die DMS-Bezeichnung wurde anhand der Anzahl der DMS je Stab, der Anzahl der Stäbe mit dieser Zahl an DMS und der Position der DMS-Messstelle gewählt.

### 3.9.C

- Position der DMS: A oder C in den 1/4-Punkten, B in Bauteilmitte
- Nummer des Stabes mit 1, 2 oder 3 DMS (Fortlaufend)
- Anzahl der DMS (1, 2 oder 3) je Stab

Die Stahldehnungen wurden in den Viertelpunkten sowie Mittig in der Achse der Prüflast gemessen. Bezogen auf die Stützweite von 4,00 m ergibt sich demnach ein Abstand von 1,00 m zwischen Auflager und DMS als auch zwischen den DMS-Messpunkten. Die Position der DMS wird im DMS-Namen durch einen Buchstaben (A, B oder C) angegeben.

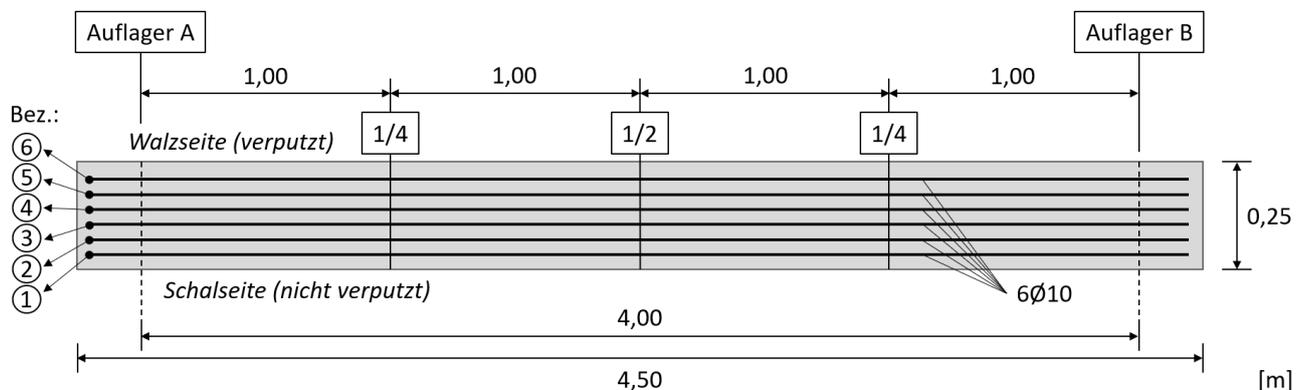


Abbildung 5-3: Positionierung und Benennung der DMS-Messstellen

Die Bewehrungsstäbe wurden ausgehend von der Schalseite hin zu Walzseite von 1 bis 6 nummeriert (siehe Abbildung 5-3). In Tabelle 5-2 sind die DMS der Probekörper IV1 bis IV6 für die Positionen gemäß der Bezeichnung nach Abbildung 5-3 zusammengestellt.

Tabelle 5-2: Zuordnung der DMS zu den Probekörpern IV1 bis IV6

Probekörper	Bewehrungsstab Nr.	DMS nach Position		
		¼-Punkt, bei Auflager A	Mittig	¼-Punkt, bei Auflager B
IV1	6	3.9.C	(3.9.B)*	3.9.A
	1	-	1.7.B	-
IV2	6	3.8.C	3.8.B	3.8.A
	1	-	1.8.B	-
IV3	6	2.9.A	2.9.B	-
	4	2.12.A	2.12.B	-
	1	2.10.A	2.10.B	-
IV4	4	(3.2.C)*	3.2.B	(3.2.A)*
	1	-	1.12.B	-
IV5	6	2.1.A	2.1.B	-
IV6	1	2.4.A	2.4.B	-

\* DMS wurden bei der Betonage beschädigt

Die DMS 3.9.B, 3.2.C und 3.2.A wurden bei der Betonage beschädigt und konnten daher bei der Versuchsdurchführung nicht zur Messung der Stahldehnung genutzt werden.

### 5.3.2 Herstellung der Probekörper

Die Probekörper wurden im Werk der Firma Thermotur Wandelemente GmbH & Co. KG in Neuwied hergestellt. Dabei wurden die Elemente liegend gefertigt. Der Herstellungsprozess unterliegt folgendem Ablauf:

- Aufstellen der seitlichen Schalungen auf der Schalplattform
- Schichtweise einbringen des Betons, der Bewehrungsstäbe und Transportanker, sowie der Dämmkerne; die letzte Betonschicht wird dabei überhöht eingebracht

- Mehrmaliges verdichten mittels Außenrüttler, sowie anschließende Verdichtung durch Rüttelwalze bzw. von Hand mit Rüttler und Spezialaufsatz
- Aushärtungsprozess
- Walzseite wird abschließend verputzt

Aufgrund des Herstellungsprozesses wird zwischen Schal- und Walzseite unterschieden. Dabei wurde die Walzseite mit einer Putzschicht versehen um bei der Durchführung die Rissentwicklung nachverfolgen zu können.

Der Herstellungsprozess ist in Abbildung 5-4 exemplarisch für den Probekörper IV5 in einem Flussdiagramm dargestellt.

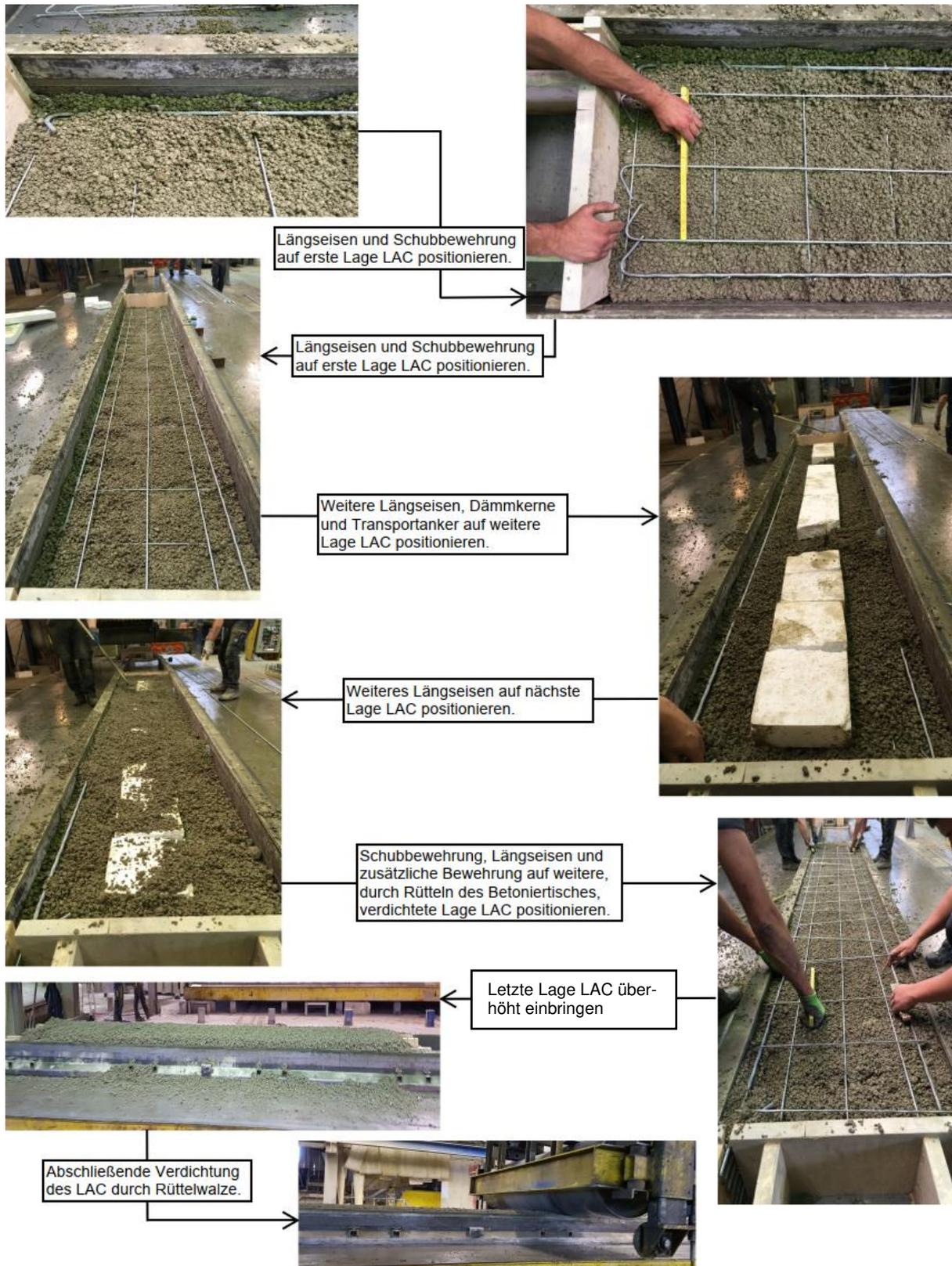


Abbildung 5-4: Flussdiagramm Herstellung IV5

## 5.4 Versuchsaufbau

Die Probekörper werden in einem modifizierten 3-Punkt-Biegeversuch geprüft. Der Versuchsaufbau und das statische System ist in Abbildung 5-5 dargestellt. Der Stützweite beträgt 4,00 m und der Abstand zwischen Auflagerachse dem Probekörperend zu beiden Seiten 0,25 m.

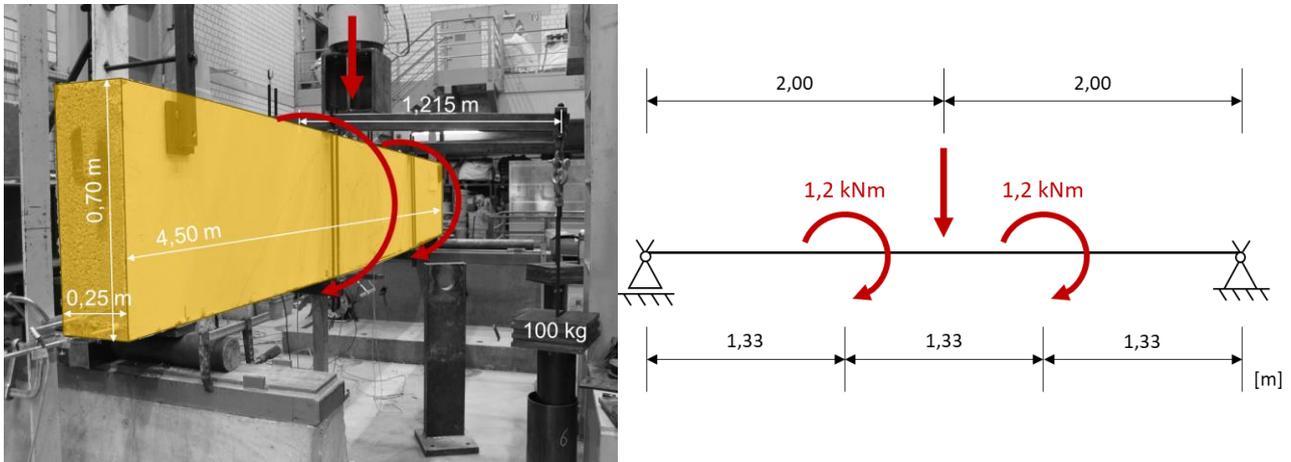


Abbildung 5-5: Versuchsaufbau und statisches System der Interaktionsversuche

Beide Auflager sind als Kabellager nach Abbildung 5-6 ausgeführt.

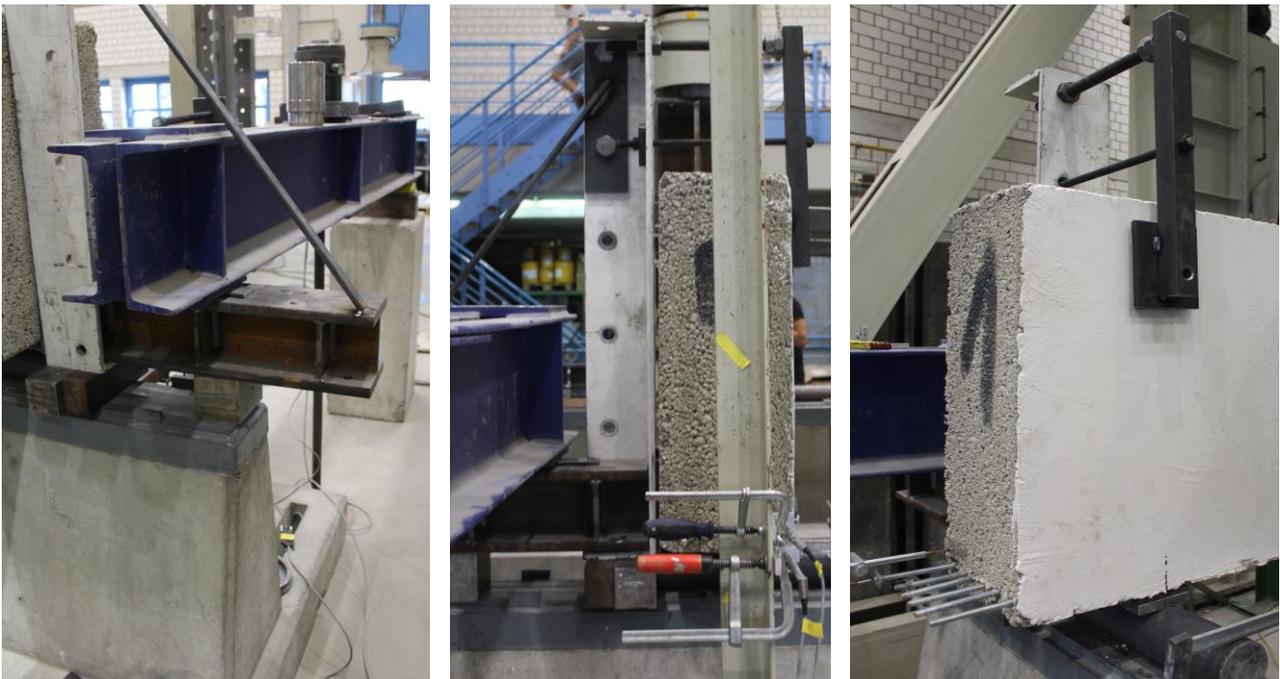
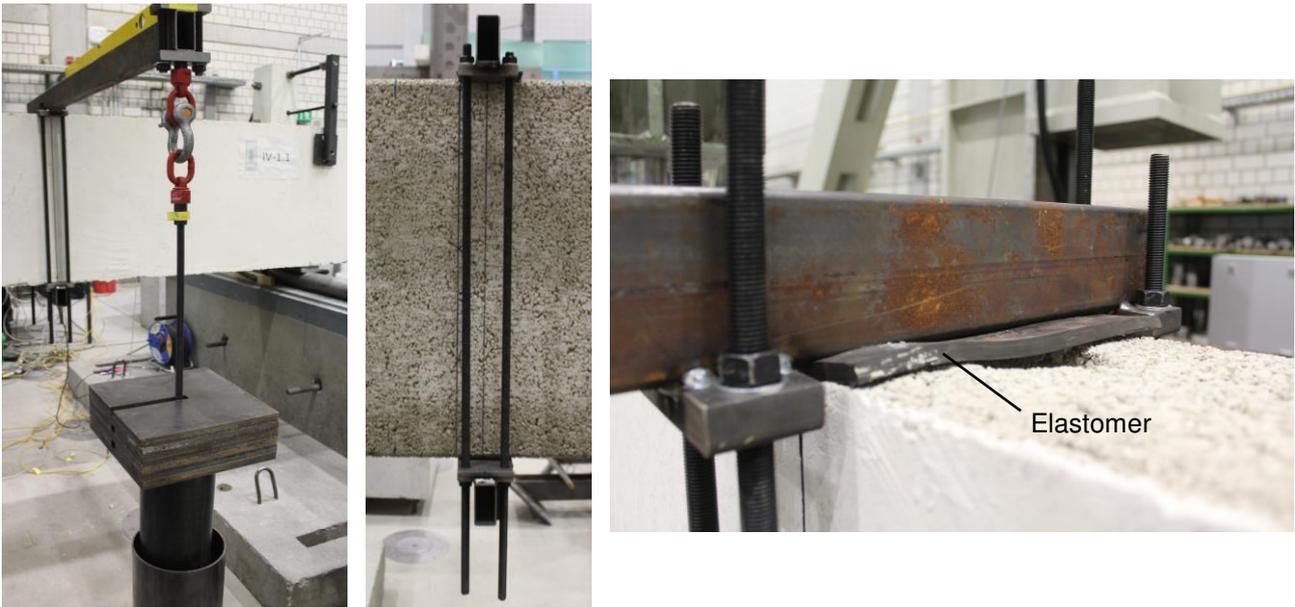


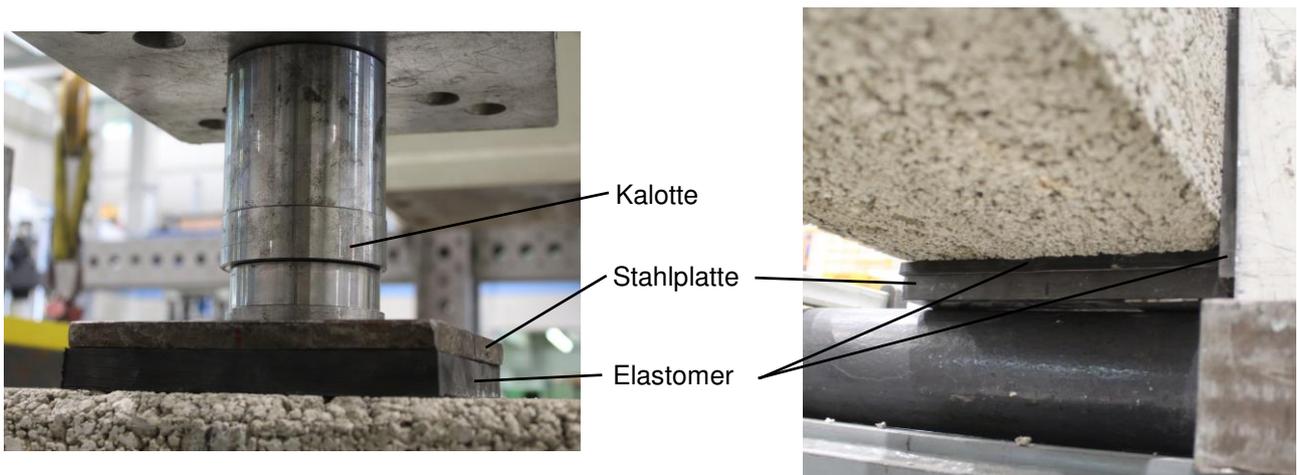
Abbildung 5-6: Kabellagerung

Mittig wird der Probekörper mit einer vertikalen Einzellast beansprucht. In den Drittelpunkten werden zwei auskragende Stahlkonstruktionen befestigt, an deren Ende eine Totlast von jeweils 100 kg angebracht wird (siehe Abbildung 5-7). Aufgrund der Exzentrizität der Totlast in Bezug auf die Schwerachse des Probekörpers von 1,215 m ergibt sich das Torsionsmoment zu 1,2 kNm.



**Abbildung 5-7: Auskragende Stahlkonstruktion mit Totlast (links), Rückseite/Schalseite (Mitte), Ausbildung der Kontaktfläche zw. Stahlkonstruktion und Probekörper (rechts)**

Um Unebenheiten auszugleichen kommen im Bereich der Lasteinleitung und an den Auflagern Elastomere zum Einsatz (siehe Abbildung 5-8 und Abbildung 5-7).



**Abbildung 5-8: Lasteinleitung (links) und Auflager (rechts)**

## 5.5 Messkonzept

Das Messkonzept für die Untersuchung einer Tragfähigkeit von bewehrten Bauteilen aus LAC bestand neben den DMS aus neun linearen Wegaufnehmern (50 und 100 mm), sowie zwei Neigungssensoren und ist in schematisch in Ansicht (siehe Abbildung 5-9) und Schnitt (siehe Abbildung 5-10) als im Versuch (siehe Abbildung 5-11) dargestellt. Die Bezeichnung der Wegaufnehmer setzt sich wie folgt zusammen:

WA-1-Vo

Beschreibung des Messwertes, Ziel der Messung:

- Vo und Vu: horizontale Verformung am oberen und unteren Bauteilrand in Feldmitte senkrecht zur Bauteilebene
- D: Durchbiegung in Bauteilmitte
- Ss und Sb: Seitliche Verschiebung und/oder Verformung des Bewehrungsstabes und des Betons in der Bauteilebene
- R: Vertikale Rissentwicklung im Abstand von 35 cm zur Lasteinleitung

Nummer des Wegaufnehmers (Fortlaufend)

Wegaufnehmer

Ansicht Schalseite

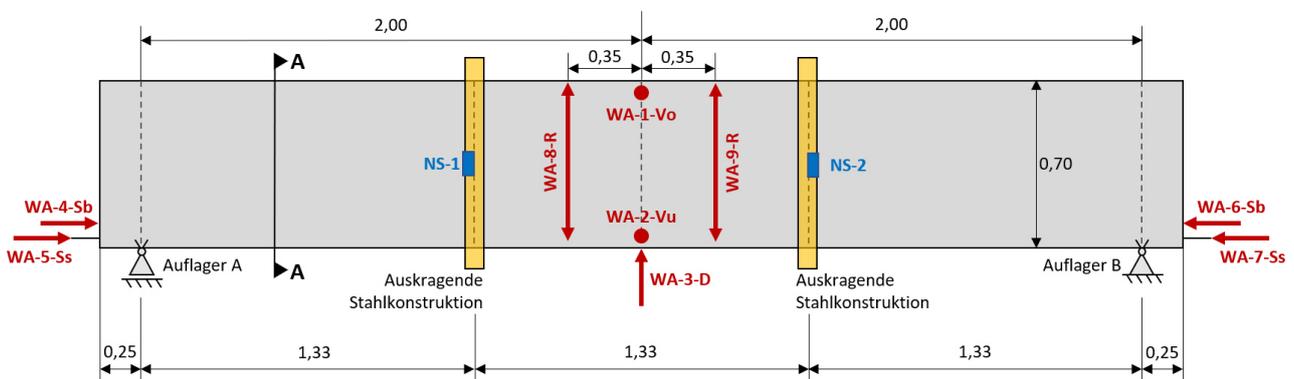


Abbildung 5-9: Messkonzept, Ansicht Schalseite

Schnitt A-A

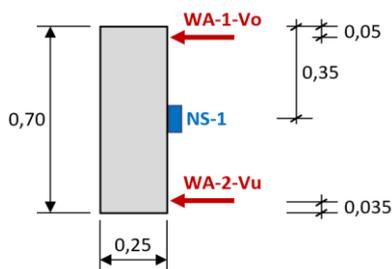


Abbildung 5-10: Messkonzept, Schnitt A-A (vgl. Abbildung 5-9)

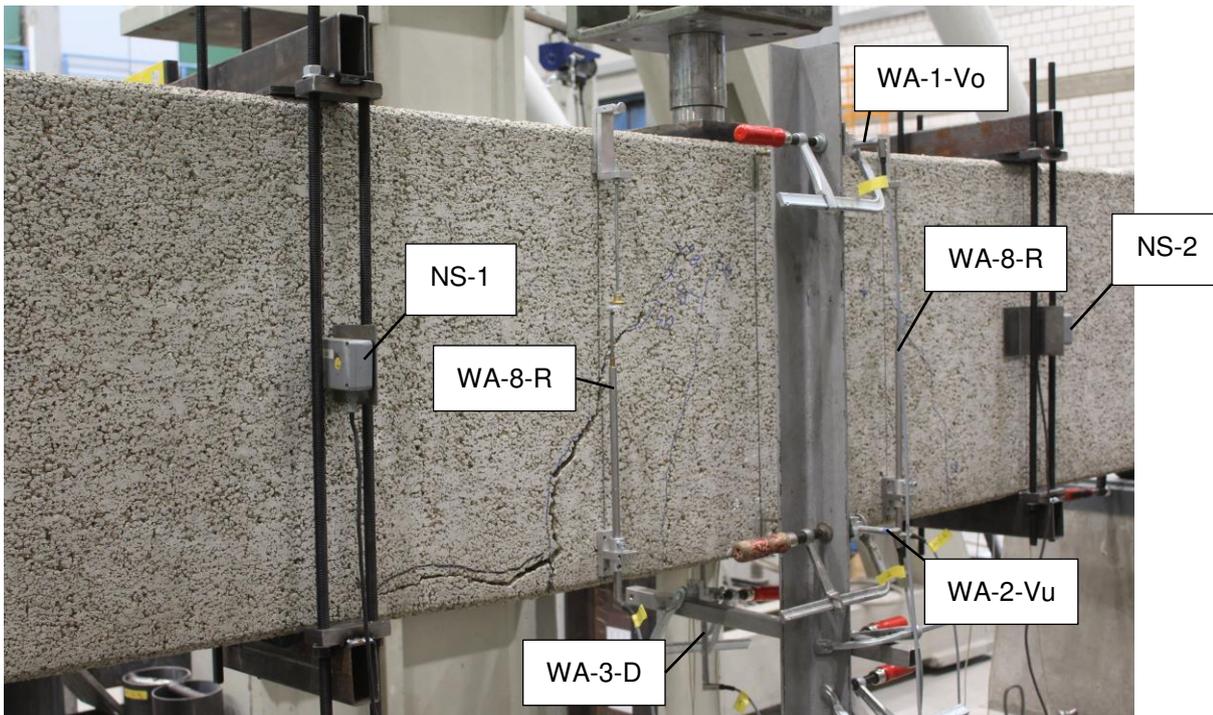


Abbildung 5-11: Probekörper mit Messtechnik

Um die Verschiebung und/oder Verformung des Bauteils in der Bauteilebene zu messen wurden die Bewehrungsstäbe der unteren Längsbewehrung mittels angeschweißter  $\varnothing 10$  mm Stäbe über die Bauteilgrenzen hinaus verlängert. Die Wegaufnehmer wurden dabei an einer externen Halterung fixiert, vgl. Abbildung 5-12.

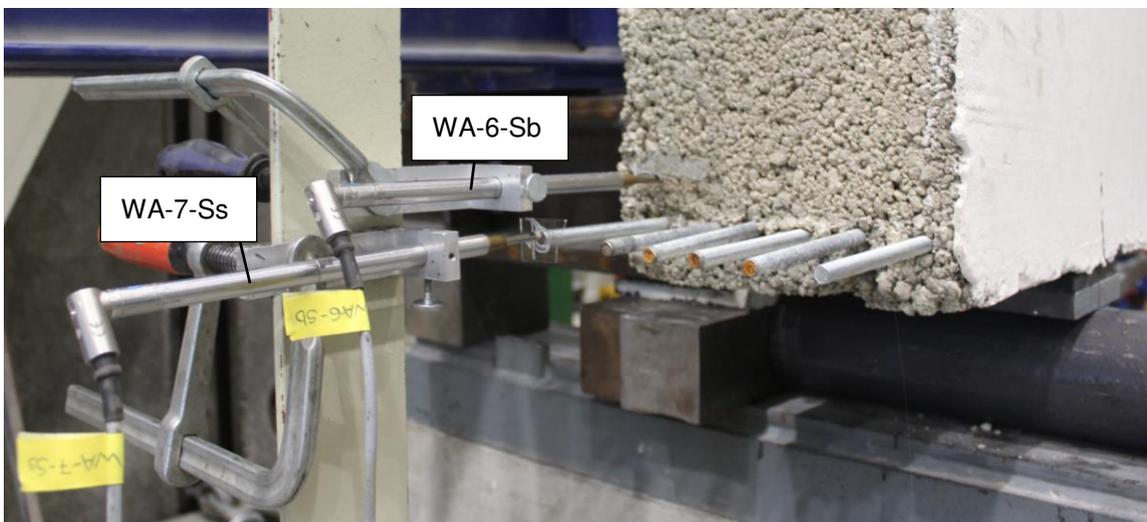


Abbildung 5-12: Messung der horizontalen Verschiebung am Beispiel von IV1

## 5.6 Versuchsdurchführung

Nach dem Einbau des Probekörpers in den Prüfstand und dem Anbringen, sowie Einrichten der Messinstrumente wurden zunächst die auskragende Stahlkonstruktion an den Drittpunkten befestigt. Anschließend wurde die Messung gestartet und der Prüfzylinder abgesenkt bevor die Totlasten an den Enden der Stahlkonstruktion angehängt wurden. Der Versuch wurde weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min durchgeführt. Dabei wurden Intervalle zwischen 5 und 10 kN gewählt und die Prüflast gehalten um auftretende Risse zu markieren.

Bei der Durchführung von Versuch IV2 wurde der Probekörper ungewollt mit einer Prüflast von ca. 40 kN vorbelastet, bevor die Totlasten befestigt wurden und die Messung gestartet wurde.

## 5.7 Versuchsbegleitende Materialprüfung

Parallel zur Herstellung der Probekörper wurde auf derselben Schalplattform ein zusätzliches Bauteil (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt exemplarisch das Begleitbauteil des Versuchs BV-10.1, der HS Koblenz), hergestellt, das zur Entnahme von Bohrkernen zur versuchsbegleitenden Materialprüfung genutzt wurde.



Abbildung 5-13: Separater Probekörper zur Materialprüfung

Die Interaktionsversuche IV1 und IV2 wurden am 22.07.2019, IV3 und IV4 am 23.07.2019 und IV5 und IV6 am 24.07.2019 im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau an der TU Kaiserslautern durchgeführt. Die Materialprüfung fand am 23.07.2019 an der HS Koblenz statt. Die Ergebnisse der Materialprüfung sind in Tabelle 5-3 angegeben.

Tabelle 5-3: Ergebnisse der versuchsbegleitenden Materialprüfungen an Bohrkernen entnommen aus separaten Bauteilen

Dem Begleitbauteil zugehöriger Probekörper	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]		Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	
	Ergebnisse aus 3 Bohrkernen	Durchschnitt	Ergebnisse aus 3 Bohrkernen	Durchschnitt
IV1	1065,97   1082,40   1052,41	1066,93	3,4   4,3   3,4	3,70
IV2	1123,33   1126,22   1100,18	1116,58	3,6   5,7   4,3	4,53
IV3	993,45   960,36   980,68	978,16	3,2   2,9   3,2	3,10
IV4	1211,64   1198,16   1157,90	1189,21	4,9   5,2   4,6	4,90
IV5	1248,80   1206,33   1240,97	1232,03	6,1   4,8   5,5	5,47
IV6	910,11   990,37   961,68	945,05	1,5   2,5   1,5	1,83

## 5.8 Versuchsergebnisse

### 5.8.1 Erreichte Traglast und Verformung in Feldmitte

In Abbildung 5-14 sind die Kraft-Verformungskurven für die Versuche IV1 bis IV6 dargestellt. Der Weg wurde im Versuch durch den Wegaufnehmer WA-3-D gemessen. Bei den Versuchen IV3 und IV6 wurden der Wegaufnehmer während der Prüfung entfernt um eine Beschädigung des Messinstruments zu vermeiden, sodass für die weitere Auswertung der Weg des Prüfzylinders (kurz: Z-Weg) herangezogen wurde.

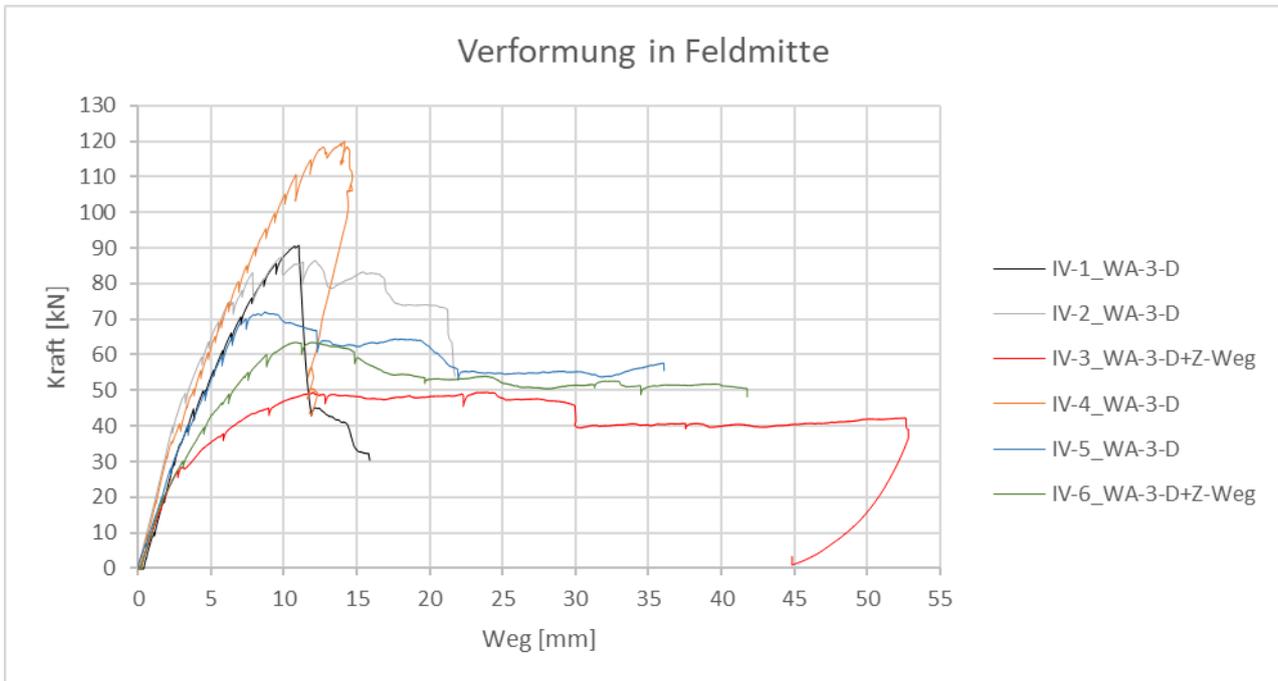


Abbildung 5-14: Kraft-Weg-Diagramm in Feldmitte (WA-3-D) der Versuche IV1 bis IV6

Die Maximalwerte der erreichten Traglast und der auftretenden Verformung sind in Tabelle 5-4 für die Versuche IV1 bis IV6 zusammen mit dem entsprechend zugehörigen Gegenwert angegeben. Die Werte wurden dabei nicht aufgerundet, sondern nach der zweiten Nachkommastelle abgeschnitten.

Tabelle 5-4: Maximalwerte der Last und Verformung der Versuche IV1 bis IV6

Versuch	Max. Last		Max. Verformung	
	Last [kN]	Weg [mm]	Last [kN]	Weg [mm]
IV1	<b>90,80</b>	11,01	30,41	<b>15,88</b>
IV2	<b>87,40</b>	9,88	54,06	<b>21,72</b>
IV3	<b>49,50</b>	23,92	38,90	<b>52,84</b>
IV4	<b>120,0</b>	14,15	110,23	<b>14,68</b>
IV5	<b>72,04</b>	8,70	56,00	<b>36,07</b>
IV6	<b>63,52</b>	10,77	50,19	<b>41,77</b>

### 5.8.2 Rissbilder

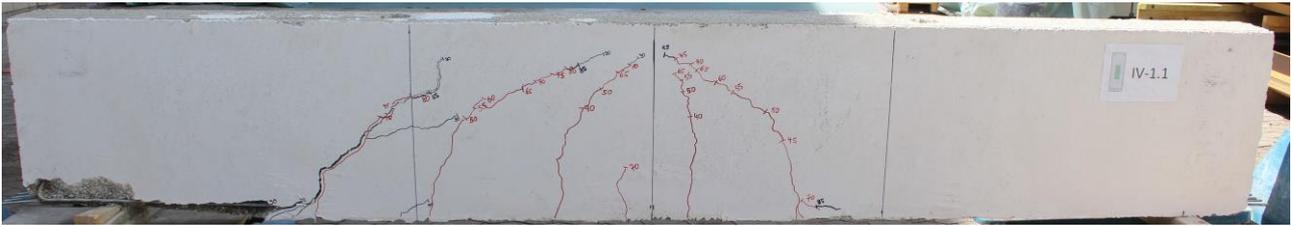


Abbildung 5-15: Rissbild der Schalseite von IV1

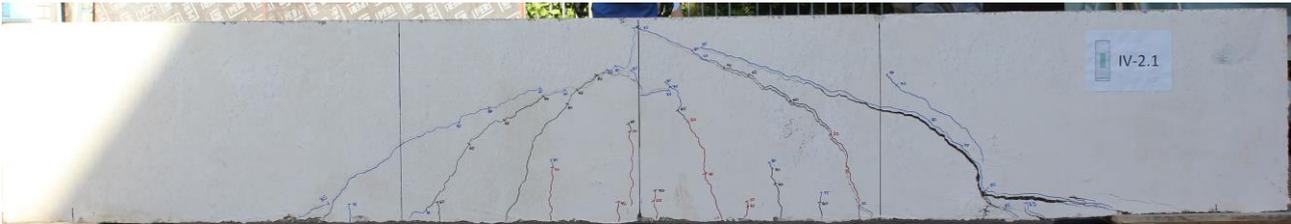


Abbildung 5-16: Rissbild der Schalseite von IV2



Abbildung 5-17: Rissbild der Schalseite von IV3



Abbildung 5-18: Rissbild der Schalseite von IV4

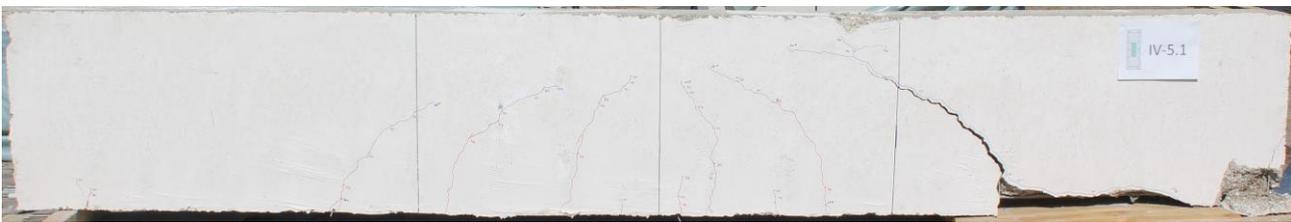


Abbildung 5-19: Rissbild der Schalseite von IV5

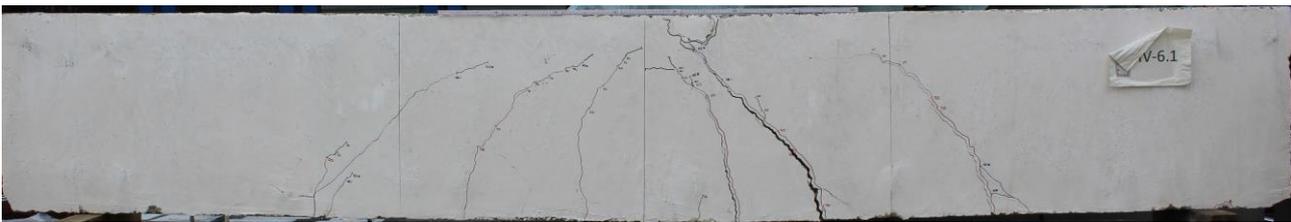


Abbildung 5-20: Rissbild der Schalseite von IV6

### 5.8.3 Horizontale Verformung am oberen und unteren Bauteilrand in Feldmitte

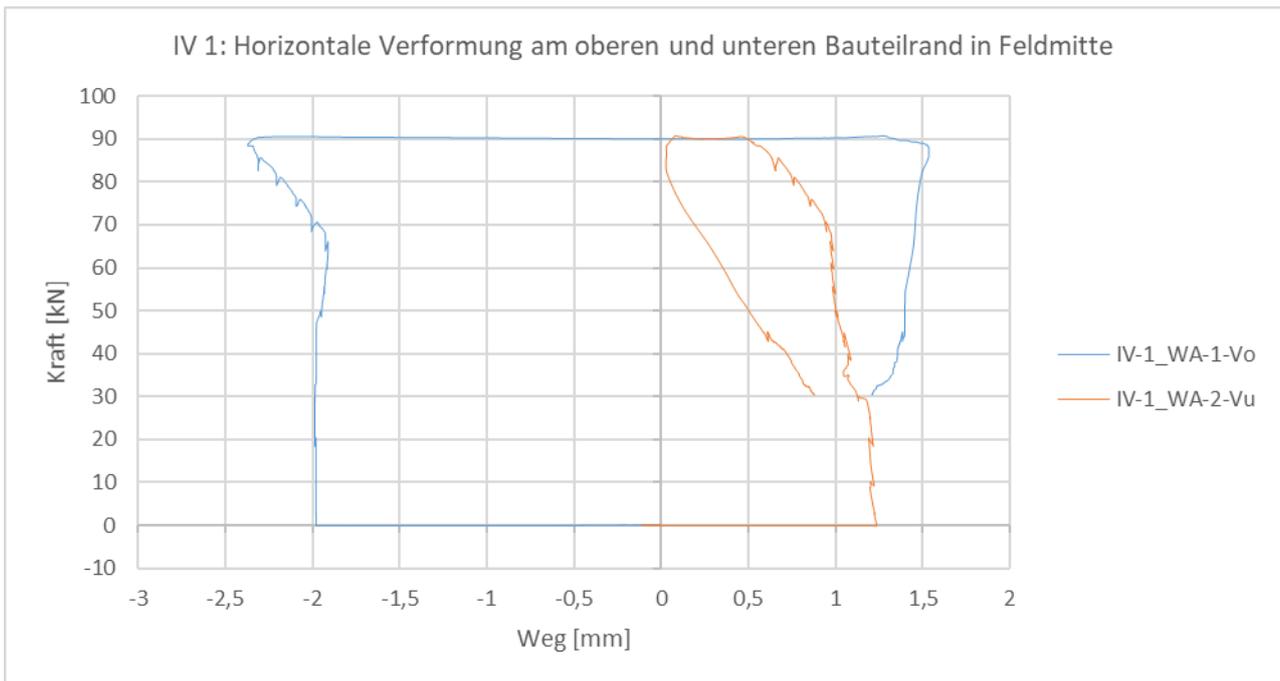


Abbildung 5-21: Horizontale Verformung am oberen und unteren Bauteilrand in Feldmitte von IV1

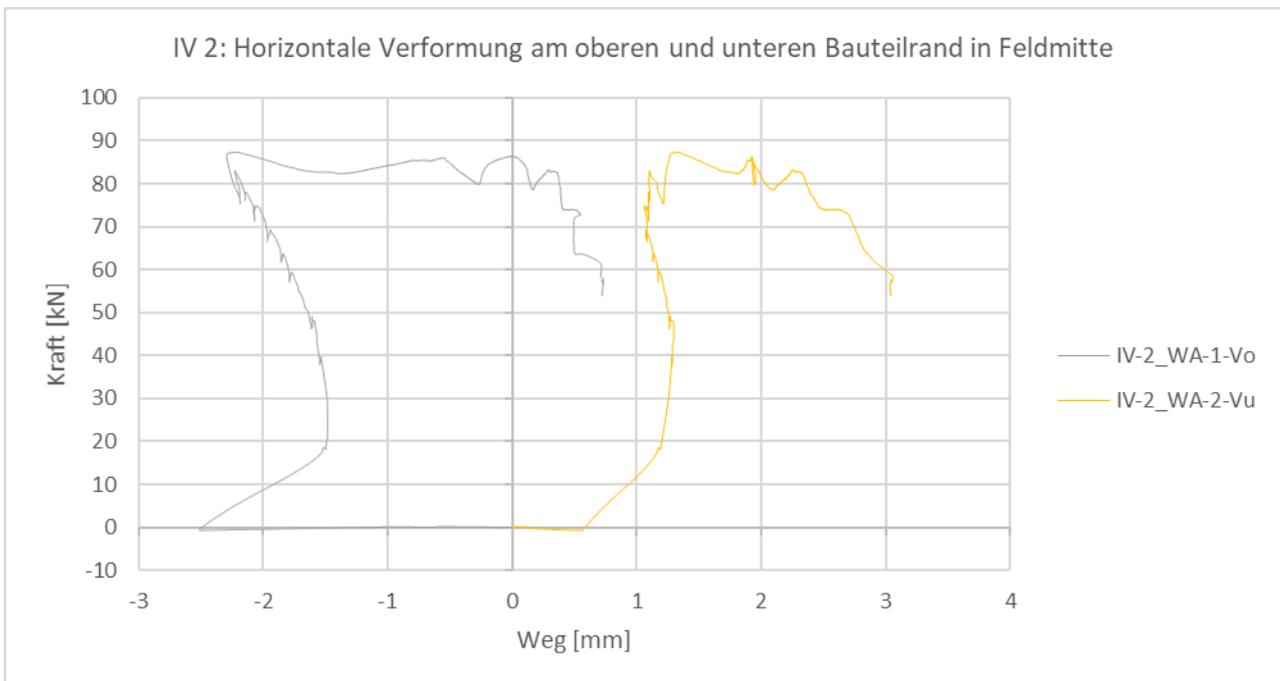


Abbildung 5-22: Horizontale Verformung am oberen und unteren Bauteilrand in Feldmitte von IV2

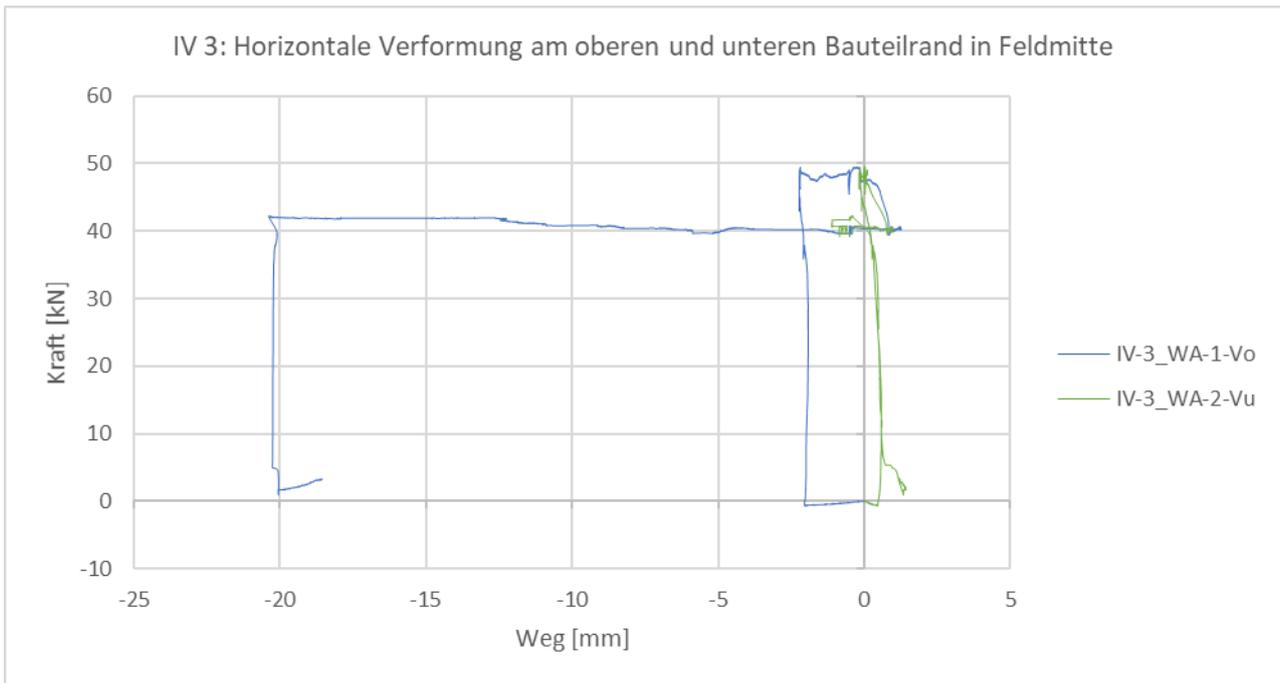


Abbildung 5-23: Horizontale Verformung am oberen und unteren Bauteilrand in Feldmitte von IV3

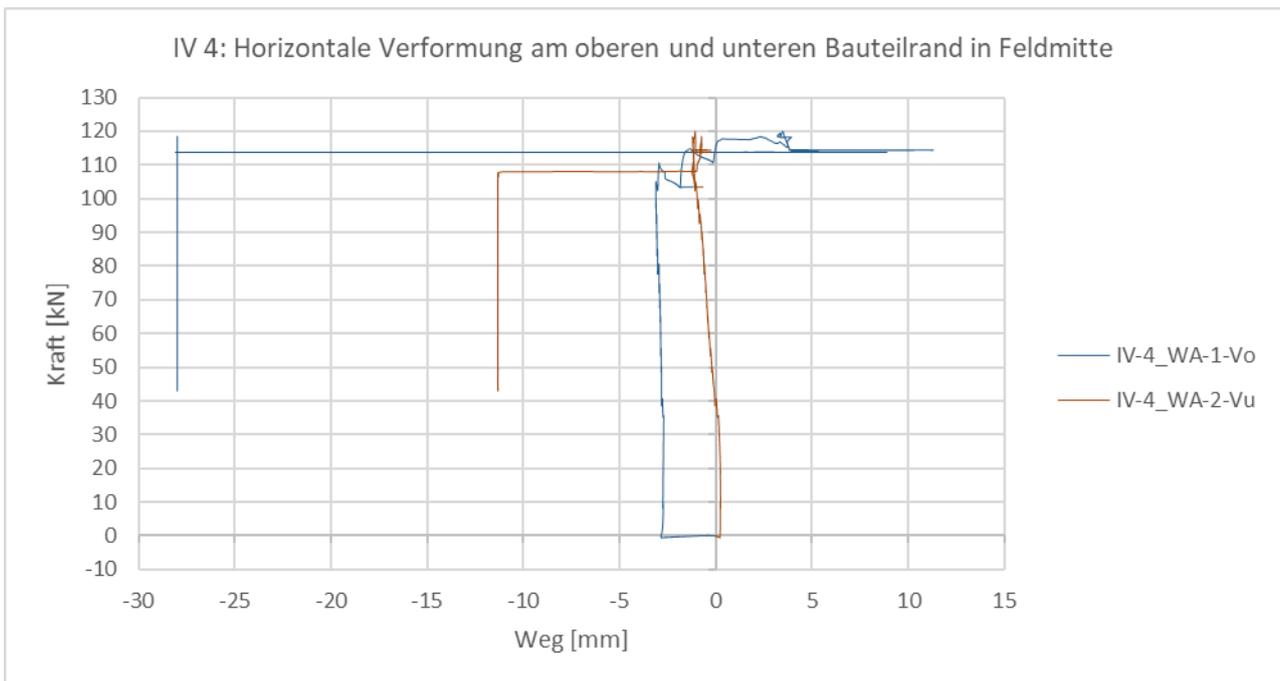


Abbildung 5-24: Horizontale Verformung am oberen und unteren Bauteilrand in Feldmitte von IV4

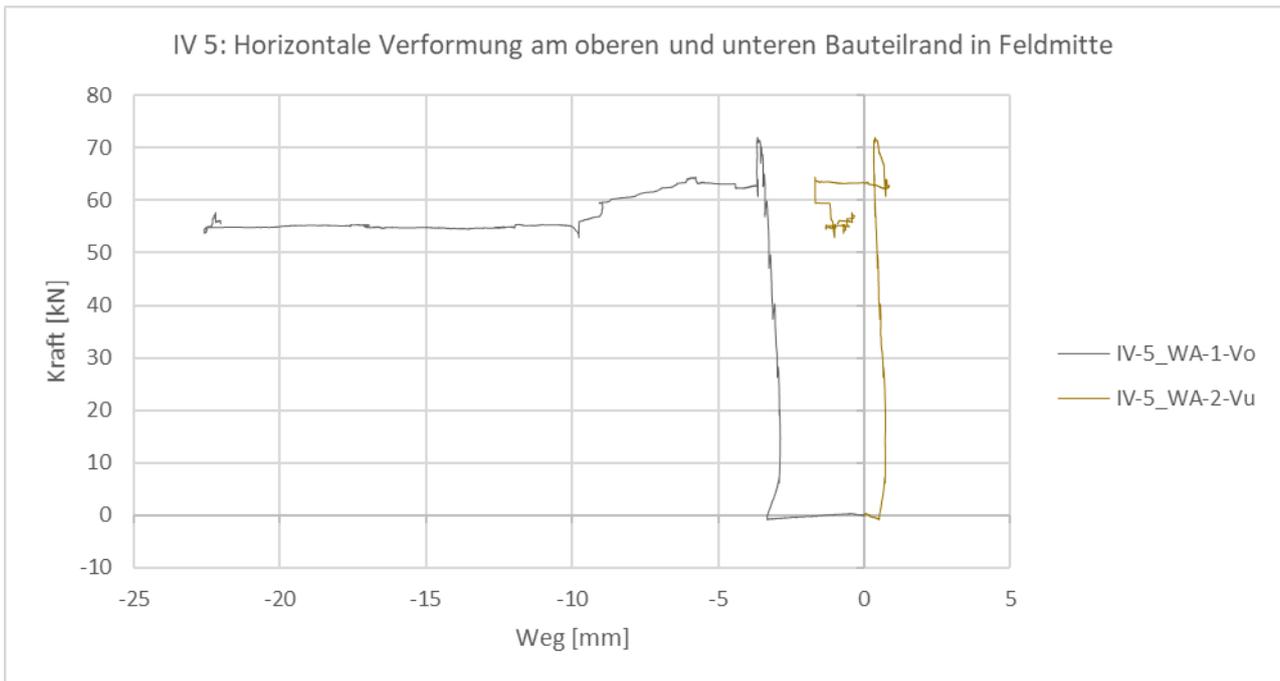


Abbildung 5-25: Horizontale Verformung am oberen und unteren Bauteilrand in Feldmitte von IV5

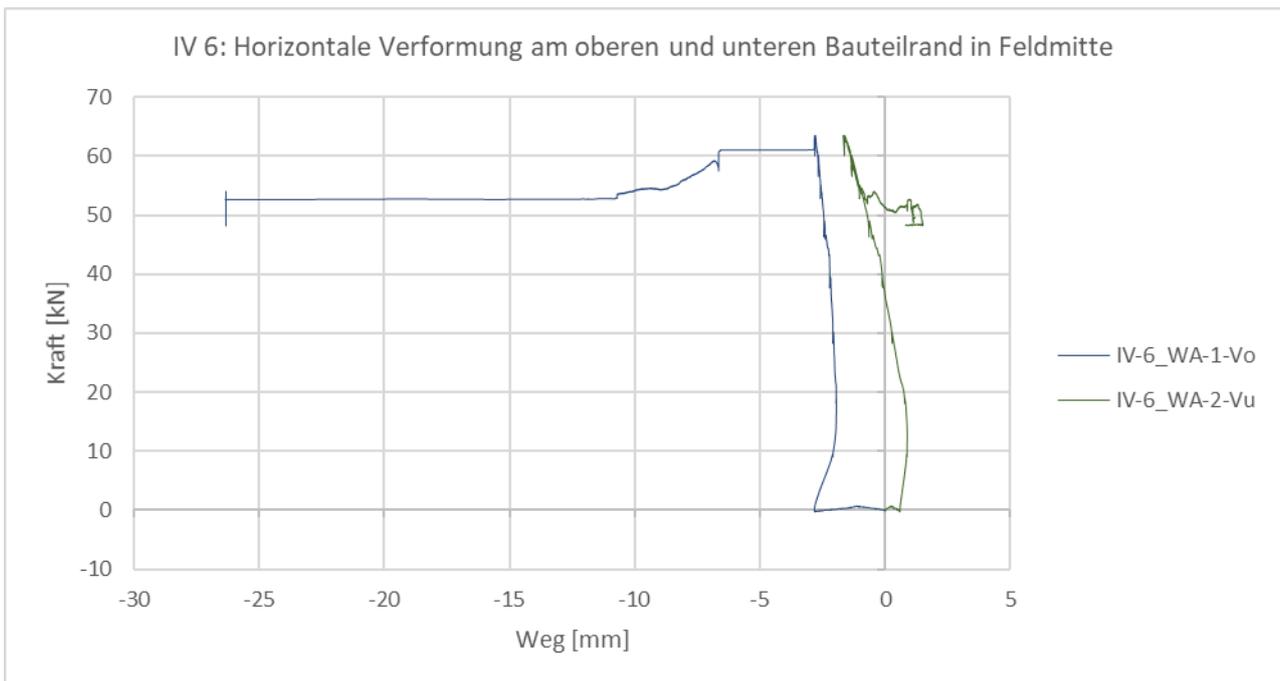


Abbildung 5-26: Horizontale Verformung am oberen und unteren Bauteilrand in Feldmitte von IV6

### 5.8.4 Neigung im Drittelspunkt

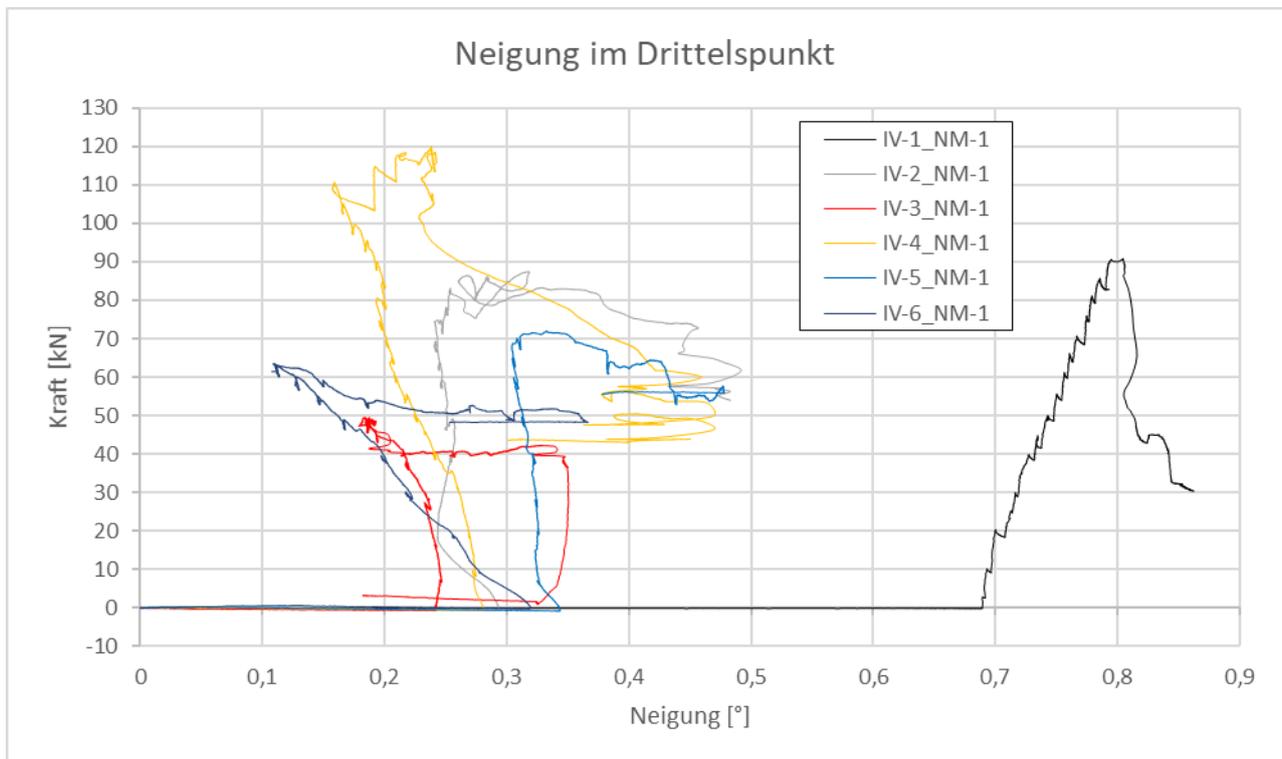


Abbildung 5-27: Neigung im Drittelspunkt der Versuche IV1 bis IV6

### 5.8.5 Verformungen in der Bauteilebene

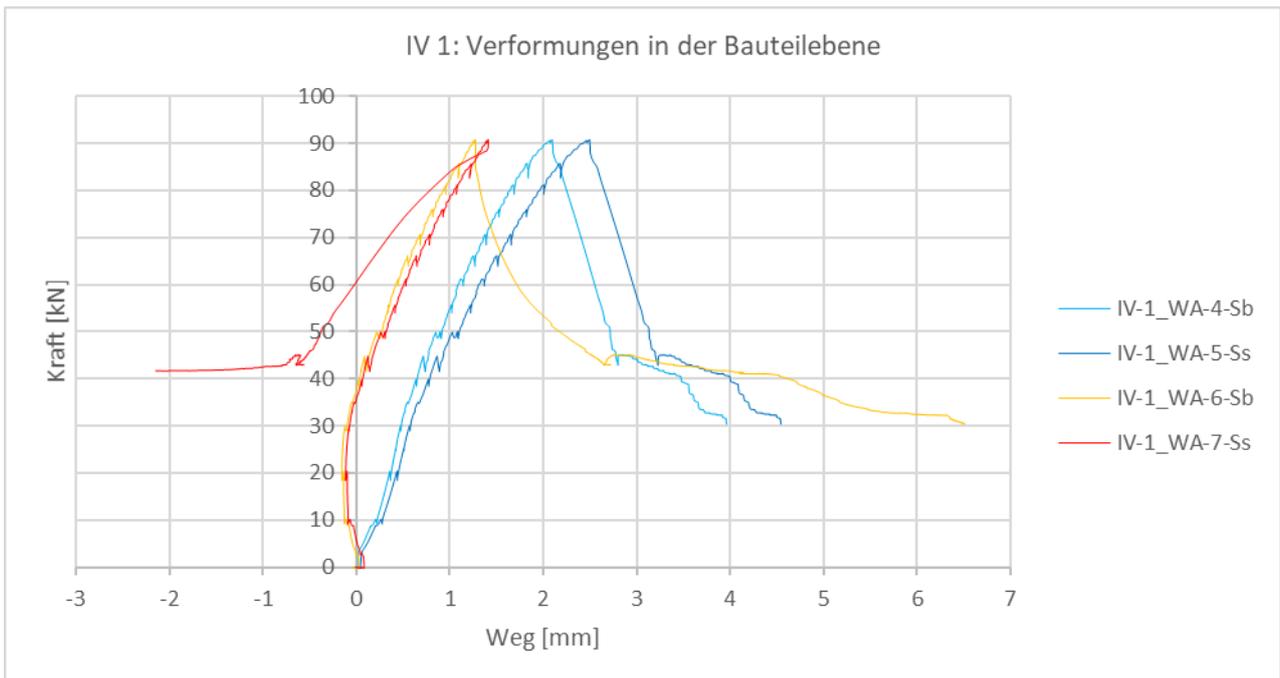


Abbildung 5-28: Verformung in der Bauteilebene von IV1

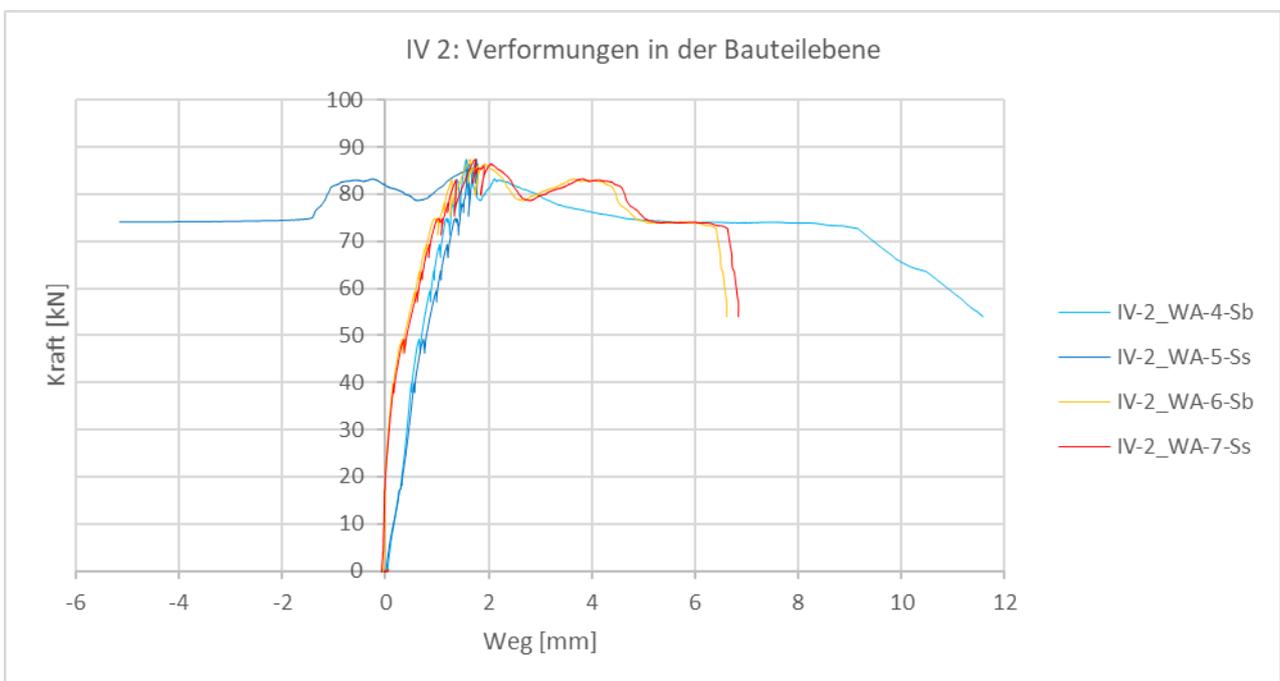


Abbildung 5-29: Verformung in der Bauteilebene von IV2

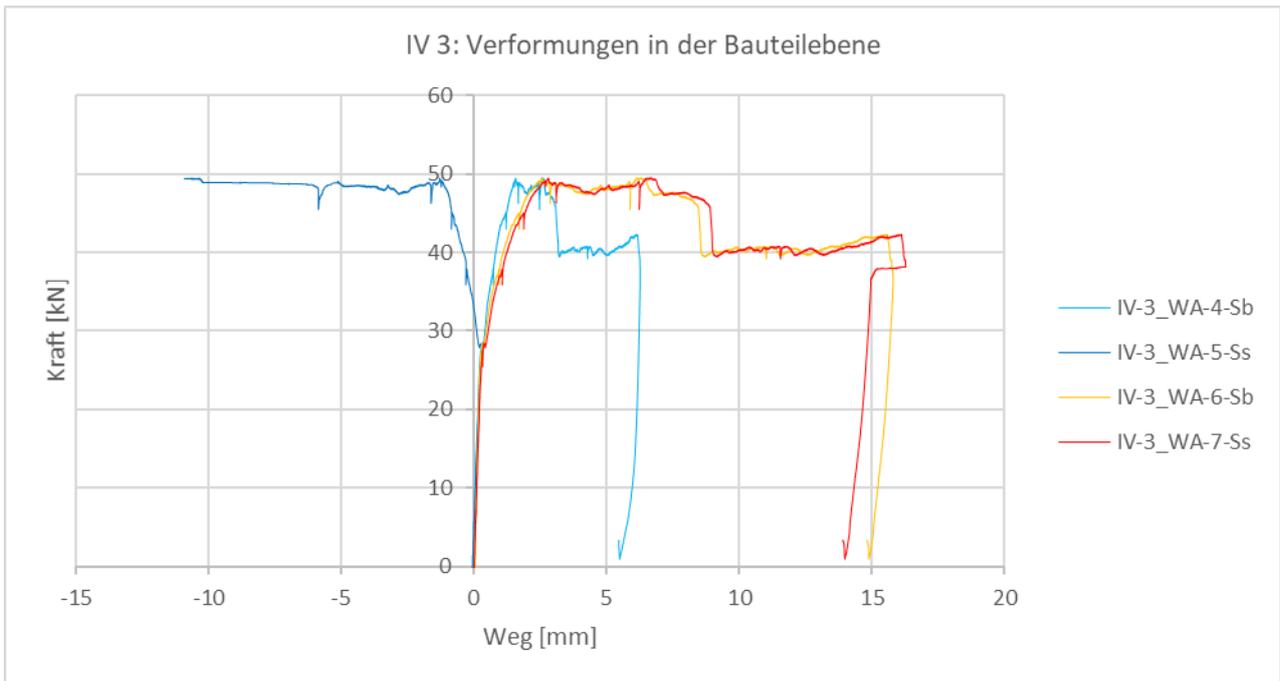


Abbildung 5-30: Verformung in der Bauteilebene von IV3

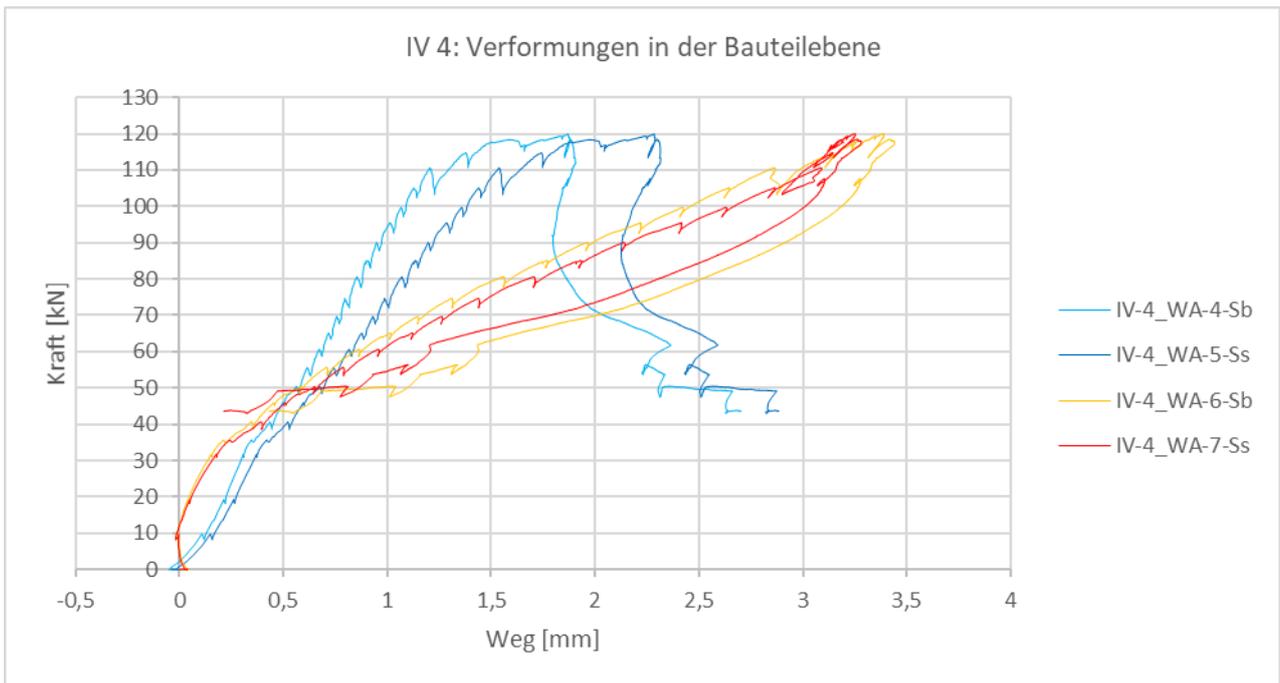


Abbildung 5-31: Verformung in der Bauteilebene von IV4

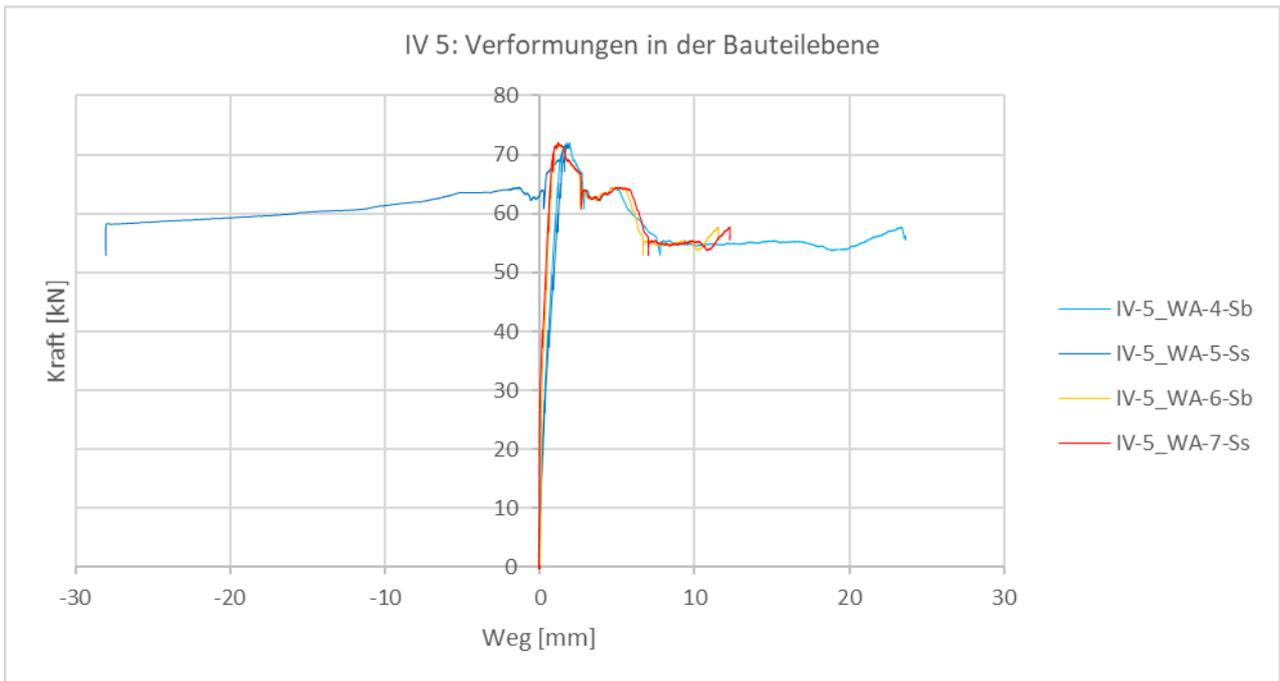


Abbildung 5-32: Verformung in der Bauteilebene von IV5

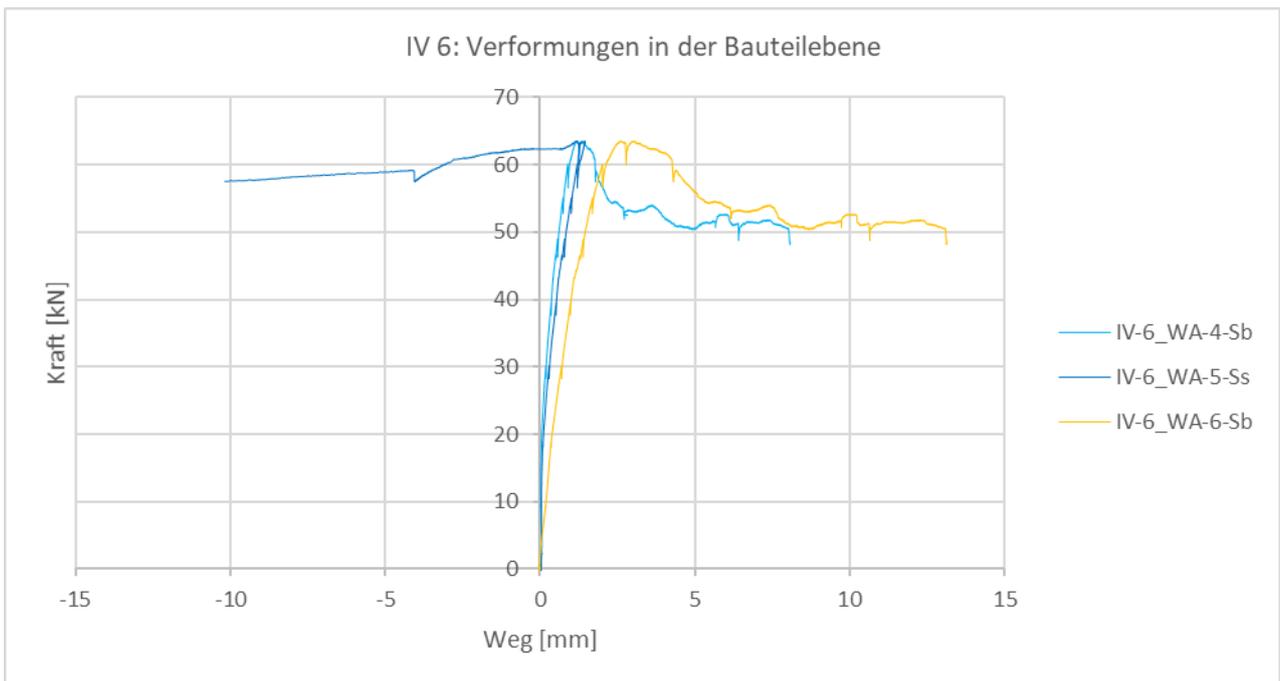


Abbildung 5-33: Verformung in der Bauteilebene von IV6

Der Wegaufnehmer WA-7-Ss wurde bei Versuch IV6 nicht verwendet.

### 5.8.6 DMS

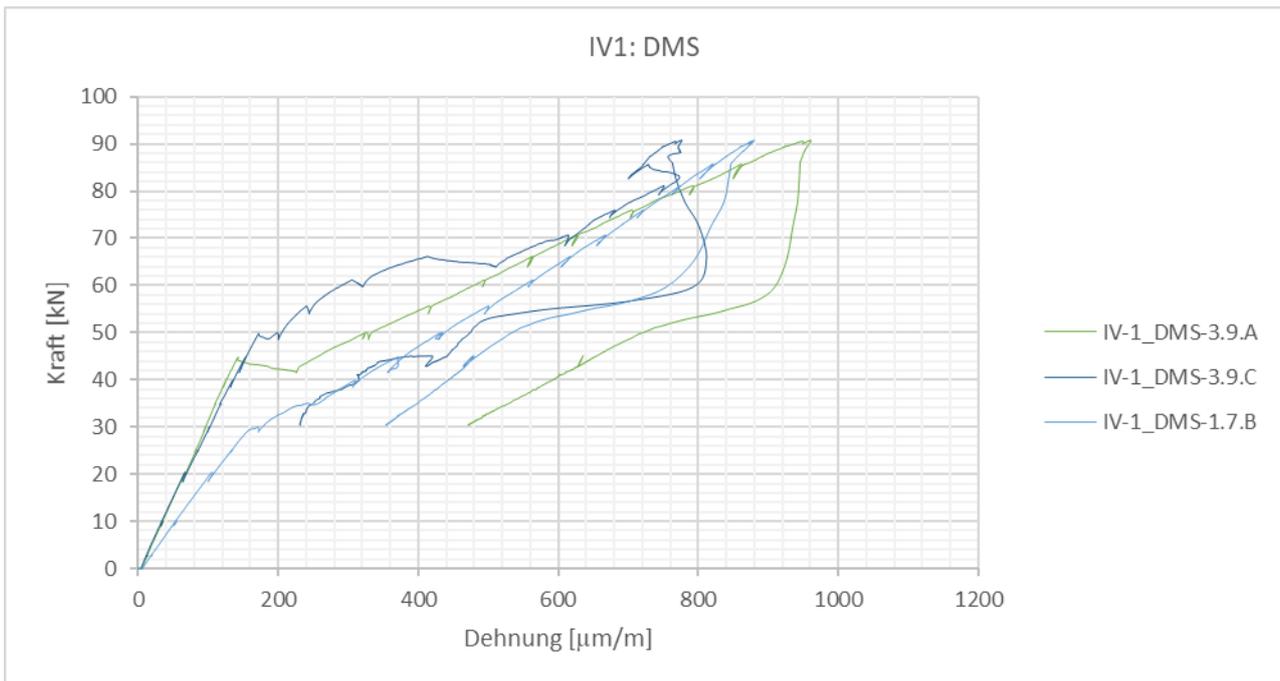


Abbildung 5-34: Ergebnisse der DMS-Messung von IV1

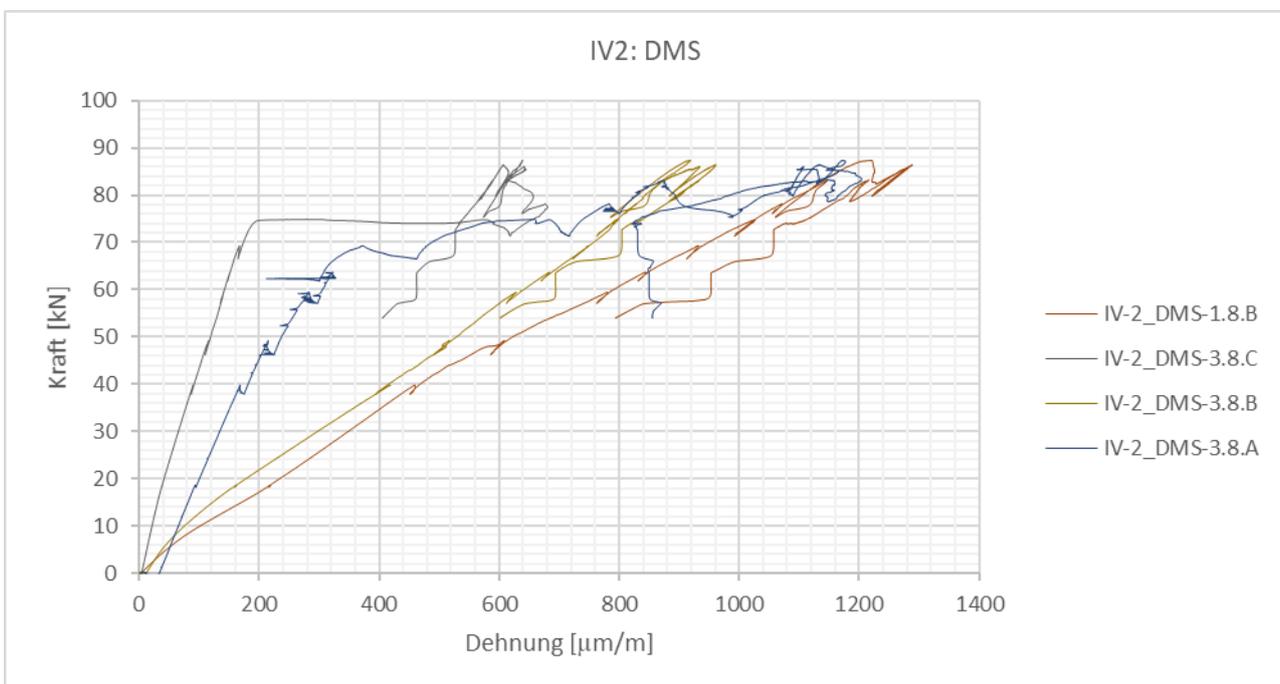


Abbildung 5-35: Ergebnisse der DMS-Messung von IV2

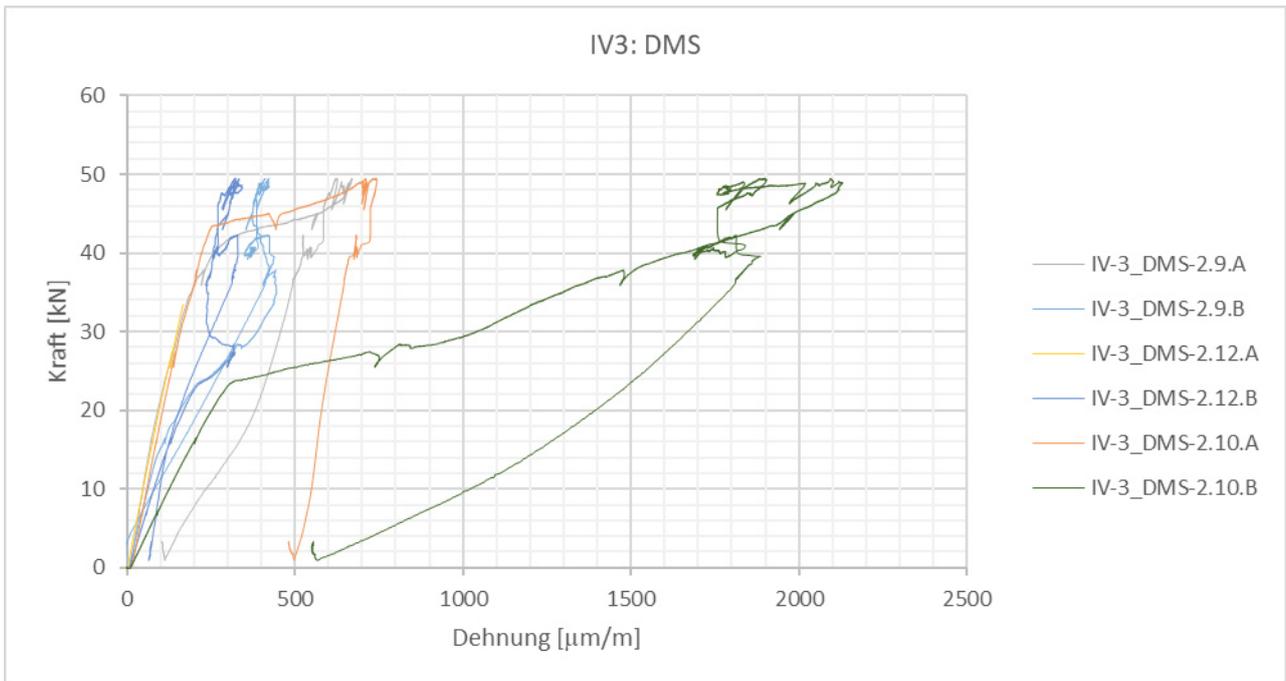


Abbildung 5-36: Ergebnisse der DMS-Messung von IV3

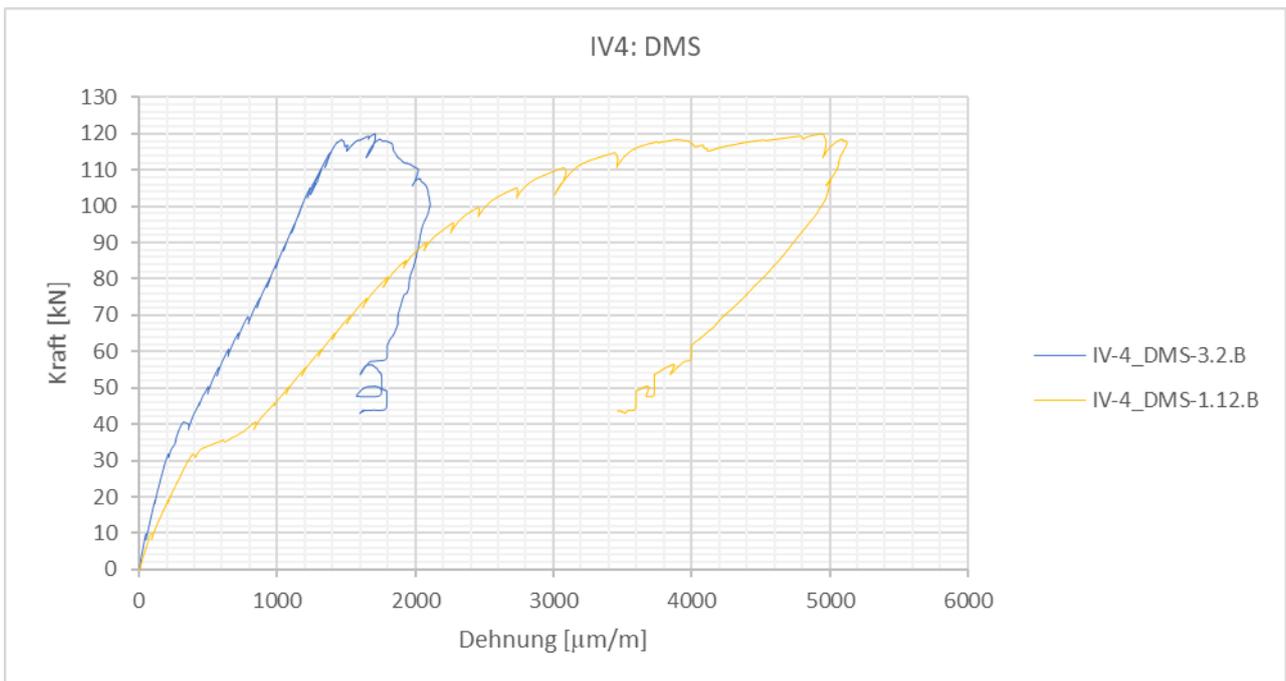


Abbildung 5-37: Ergebnisse der DMS-Messung von IV4

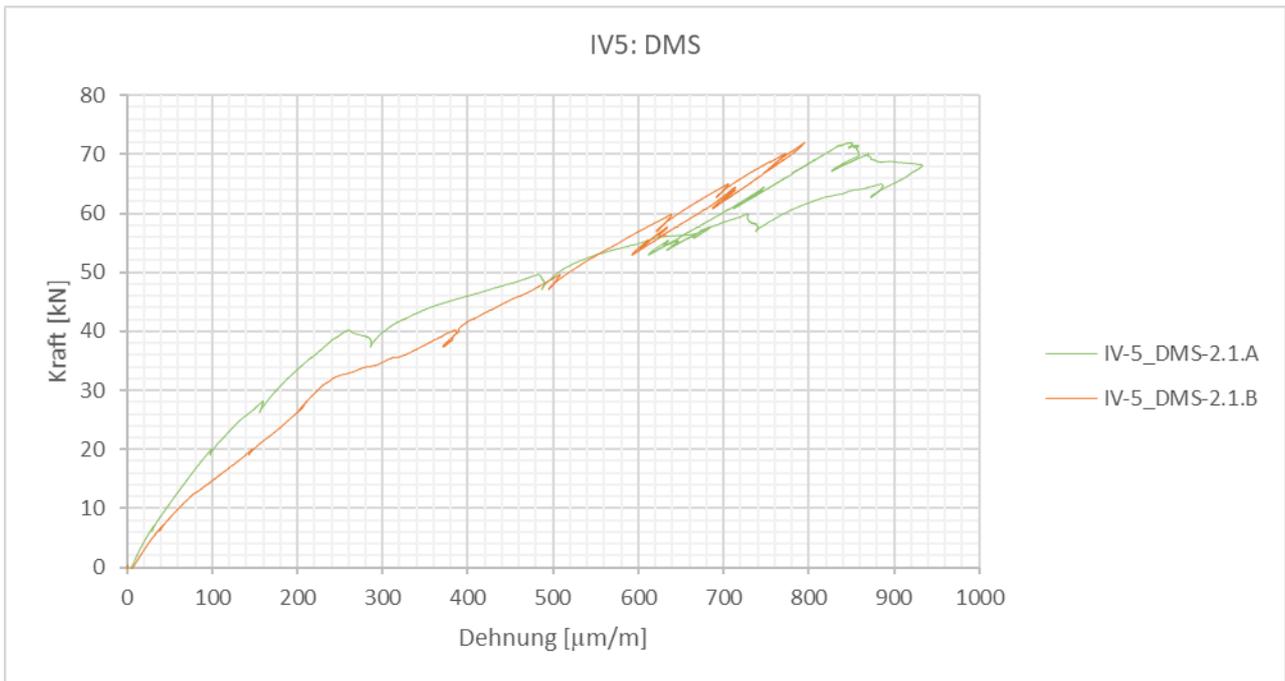


Abbildung 5-38: Ergebnisse der DMS-Messung von IV5

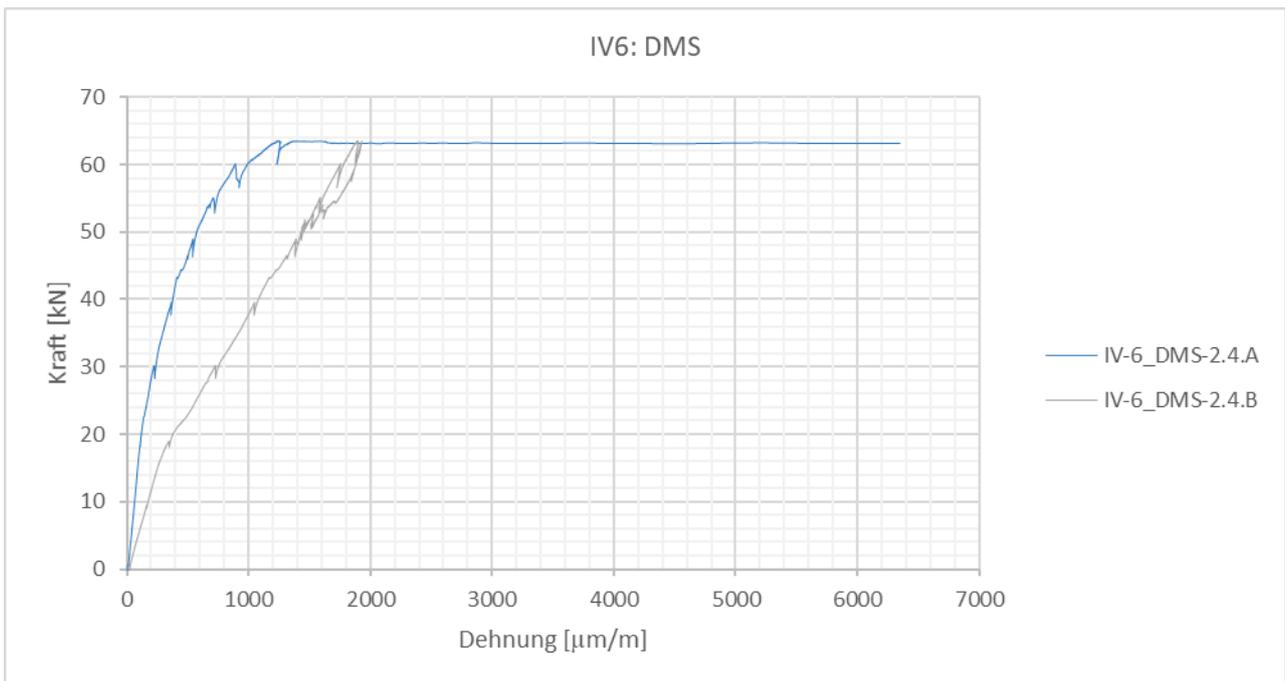


Abbildung 5-39: Ergebnisse der DMS-Messung von IV6

### 5.8.7 Zeitlicher Verlauf

#### 5.8.7.1 Zeit-Weg-Diagramme von IV1

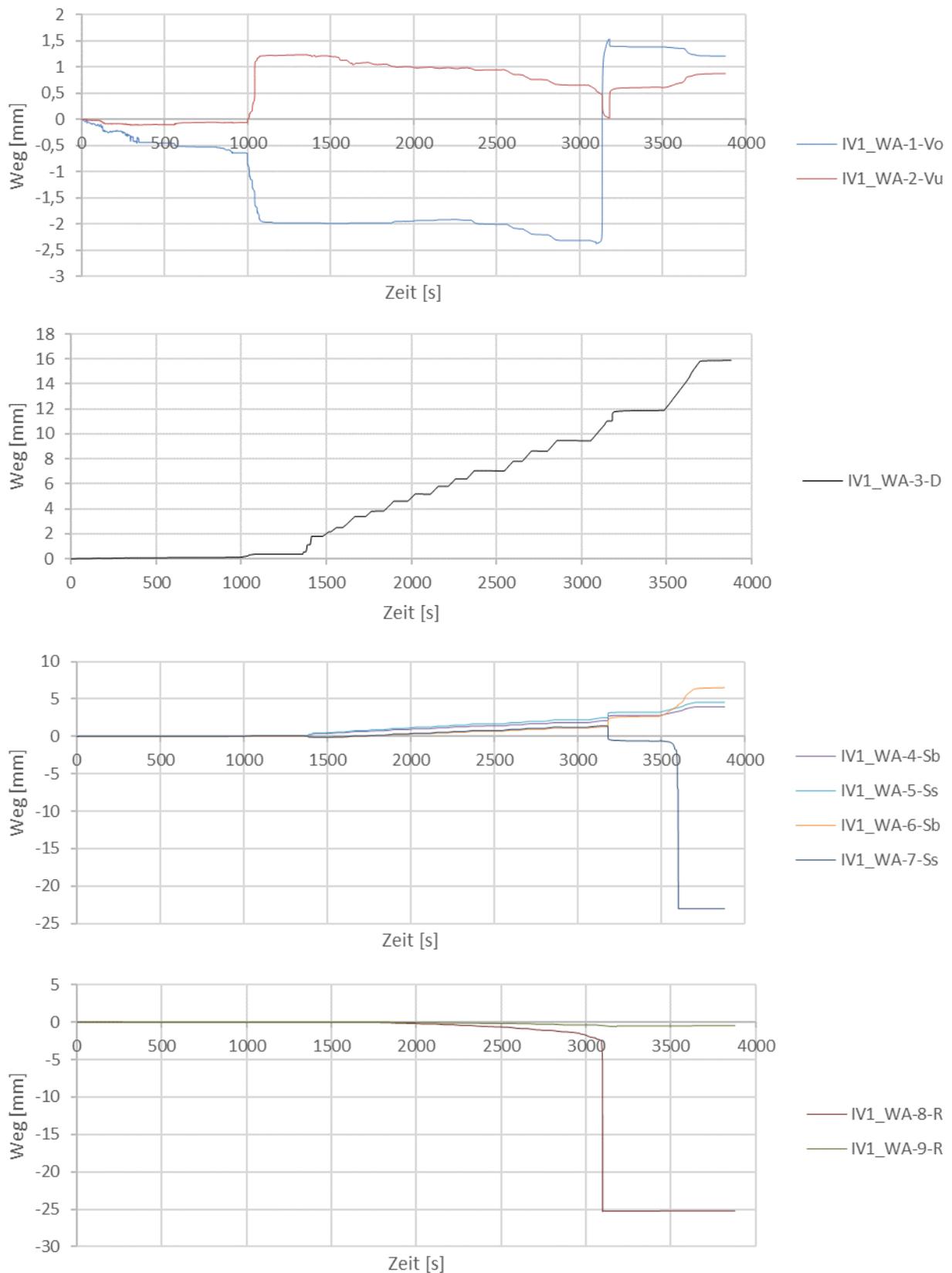


Abbildung 5-40: Gegenüberstellung der Zeit-Weg-Diagramme der WA1 bis WA9 von IV1

### 5.8.7.2 Zeit-Weg-Diagramme von IV2

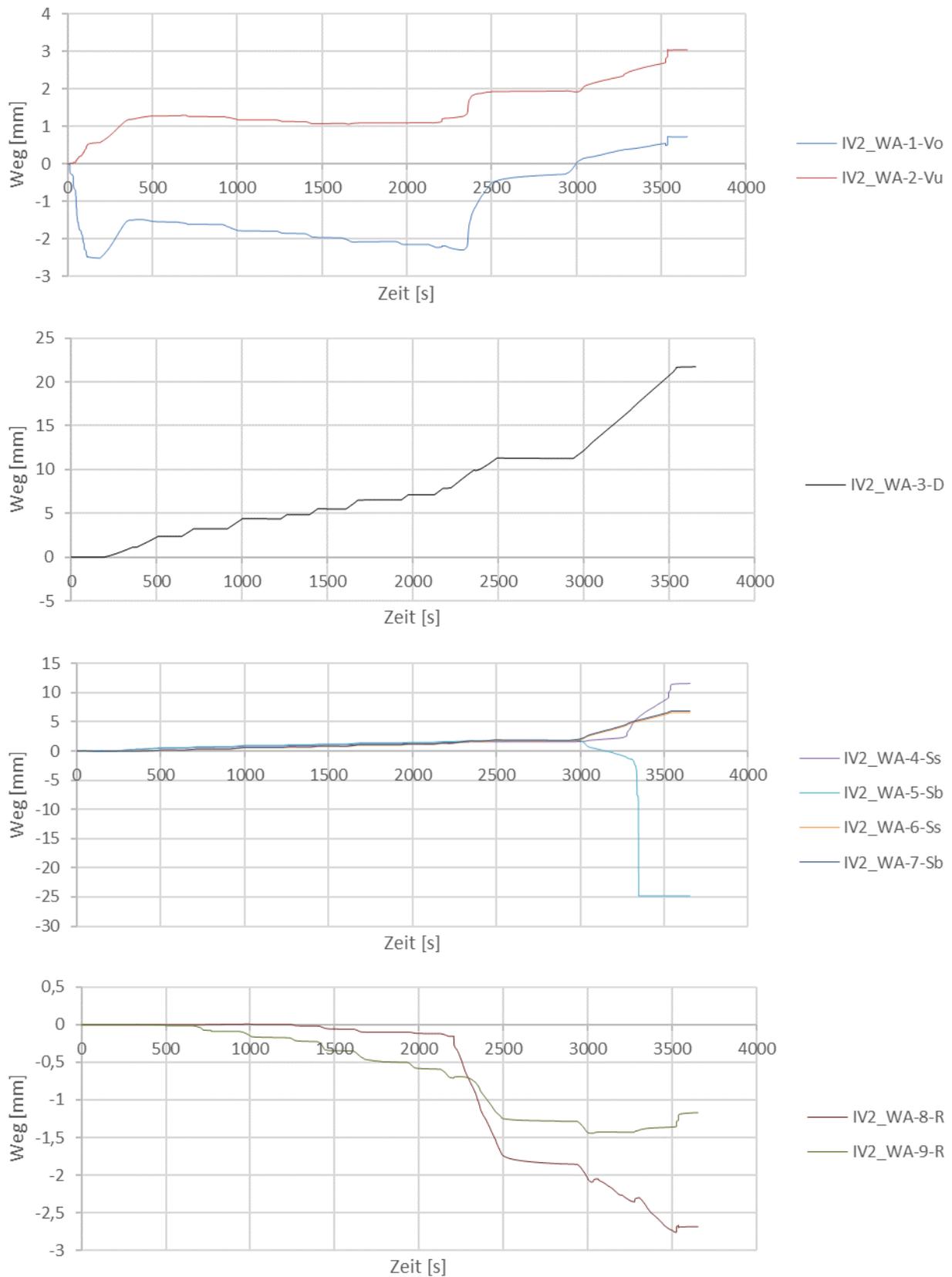


Abbildung 5-41: Gegenüberstellung der Zeit-Weg-Diagramme der WA1 bis WA9 von IV2

### 5.8.7.3 Zeit-Weg-Diagramme von IV3

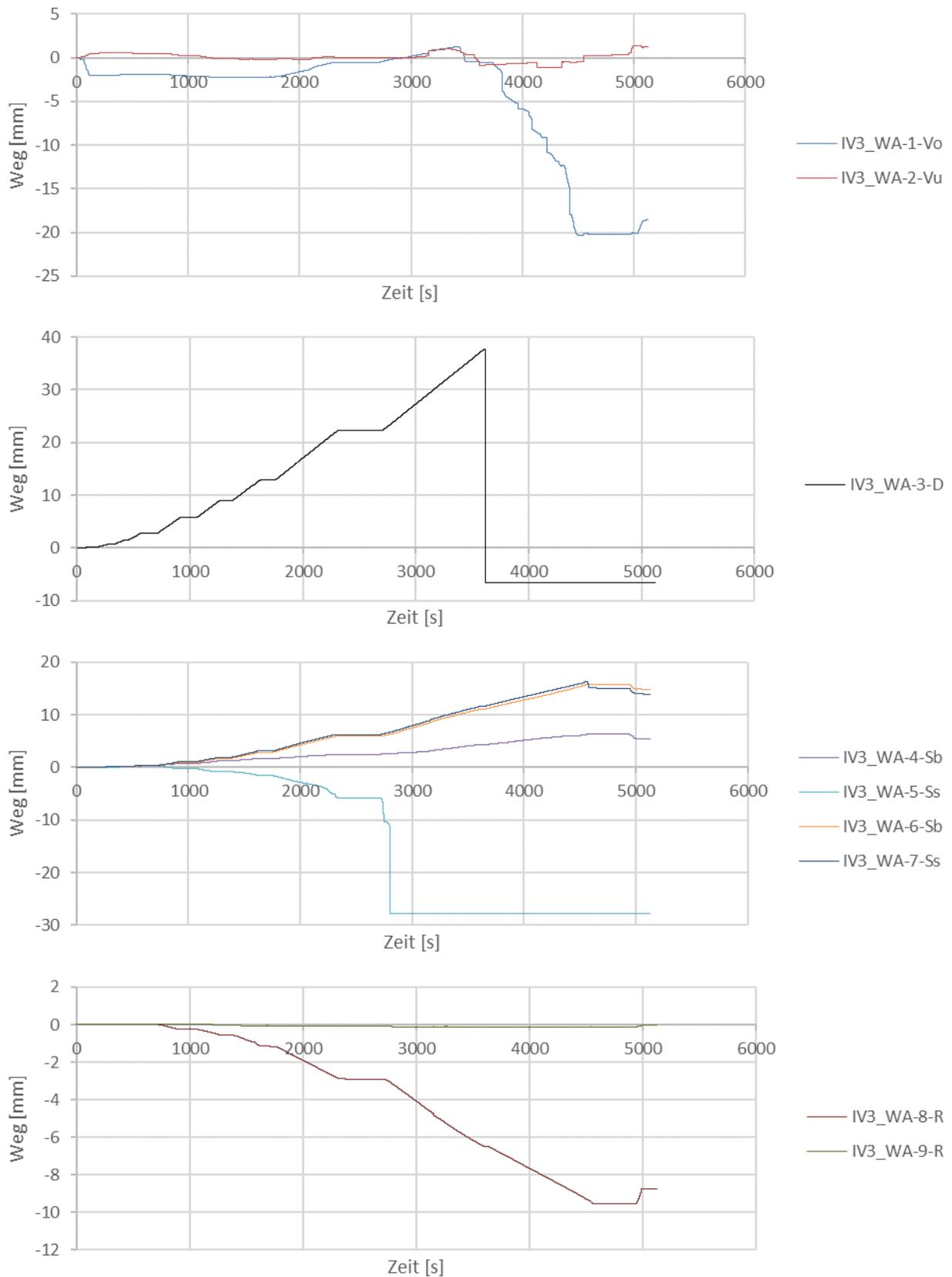


Abbildung 5-42: Gegenüberstellung der Zeit-Weg-Diagramme der WA1 bis WA9 von IV3

### 5.8.7.4 Zeit-Weg-Diagramme von IV4

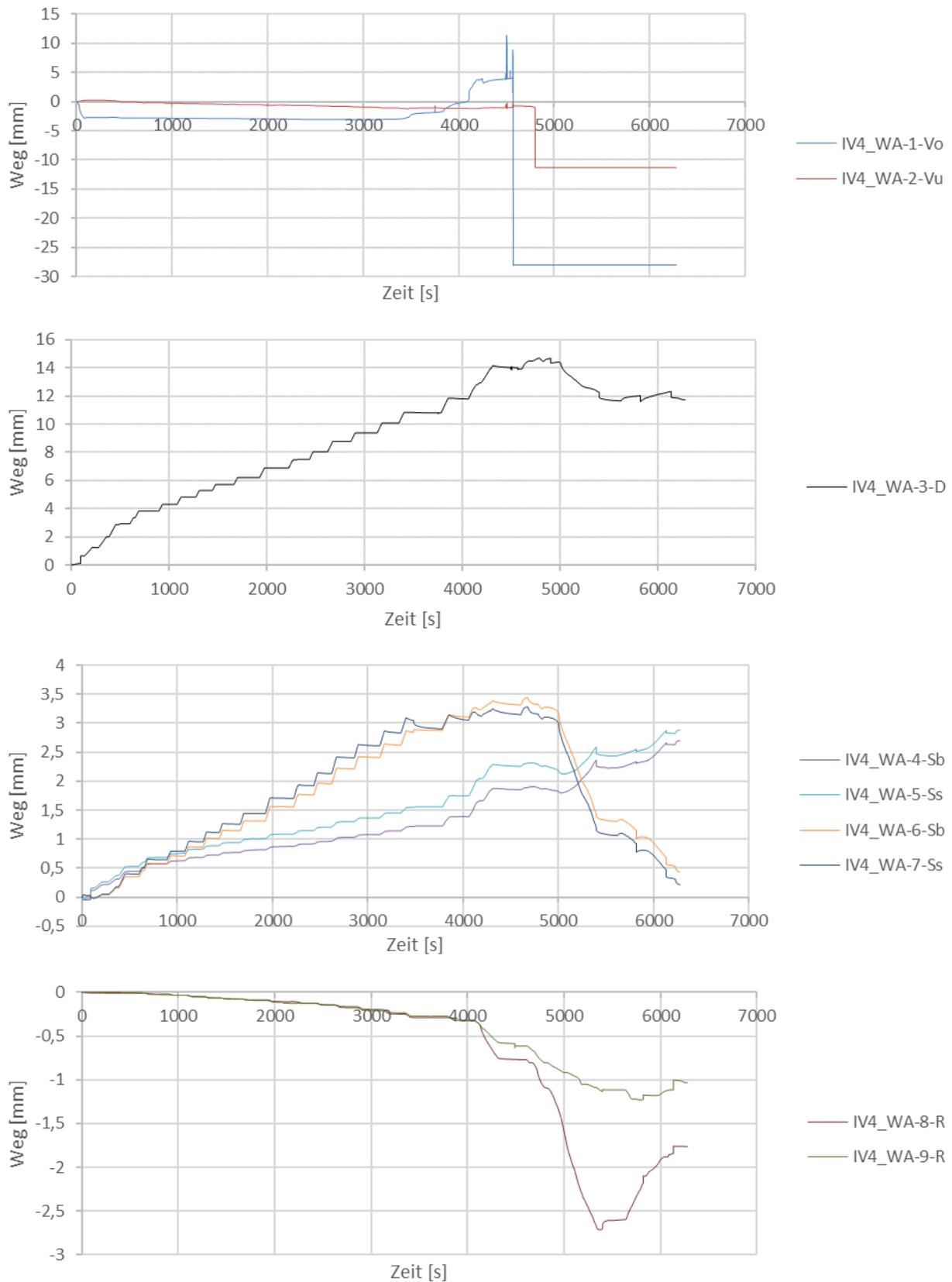


Abbildung 5-43: Gegenüberstellung der Zeit-Weg-Diagramme der WA1 bis WA9 von IV4

### 5.8.7.5 Zeit-Weg-Diagramme von IV5

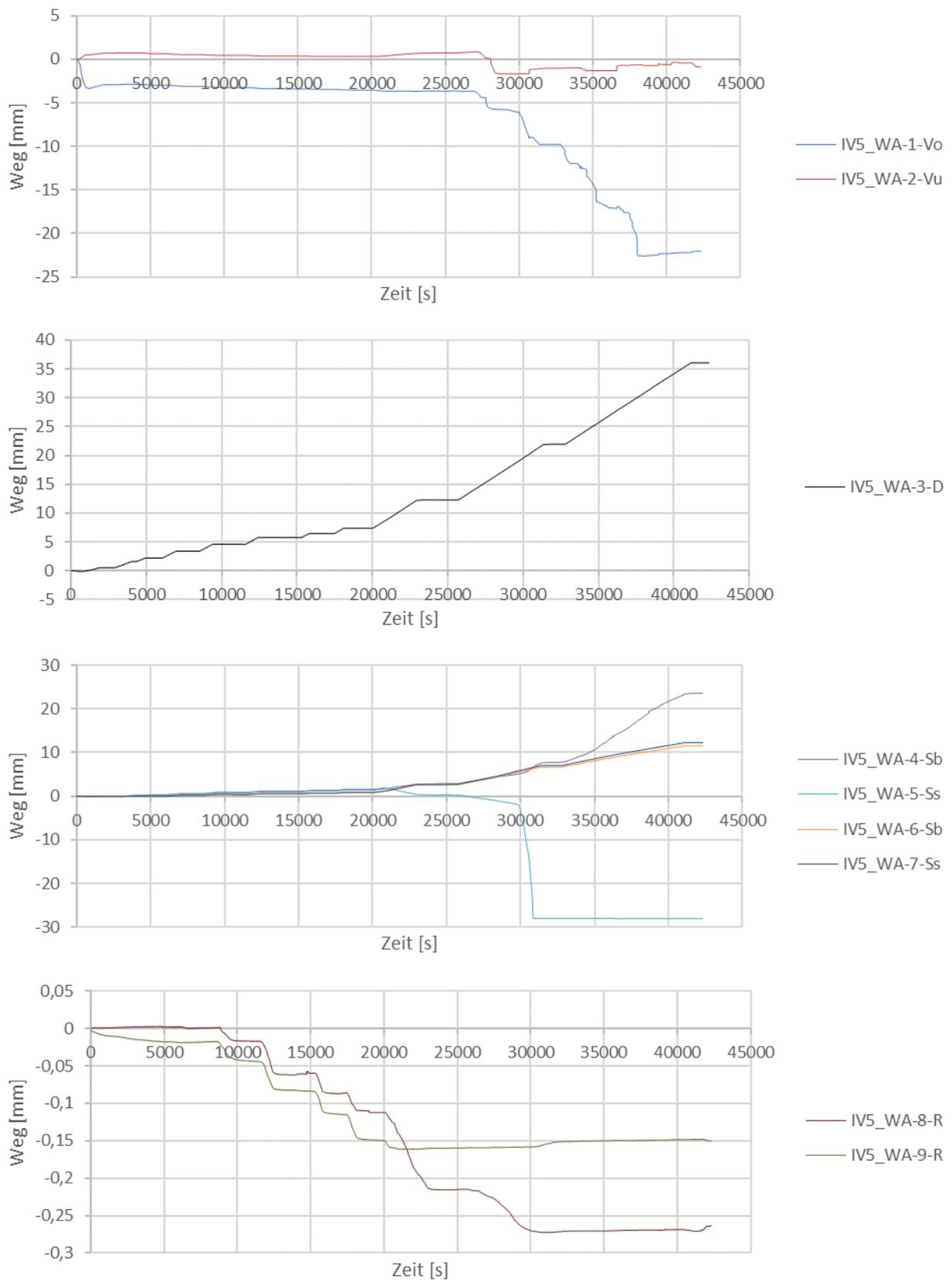


Abbildung 5-44: Gegenüberstellung der Zeit-Weg-Diagramme der WA1 bis WA9 von IV5

**5.8.7.6 Zeit-Weg-Diagramme von IV6**

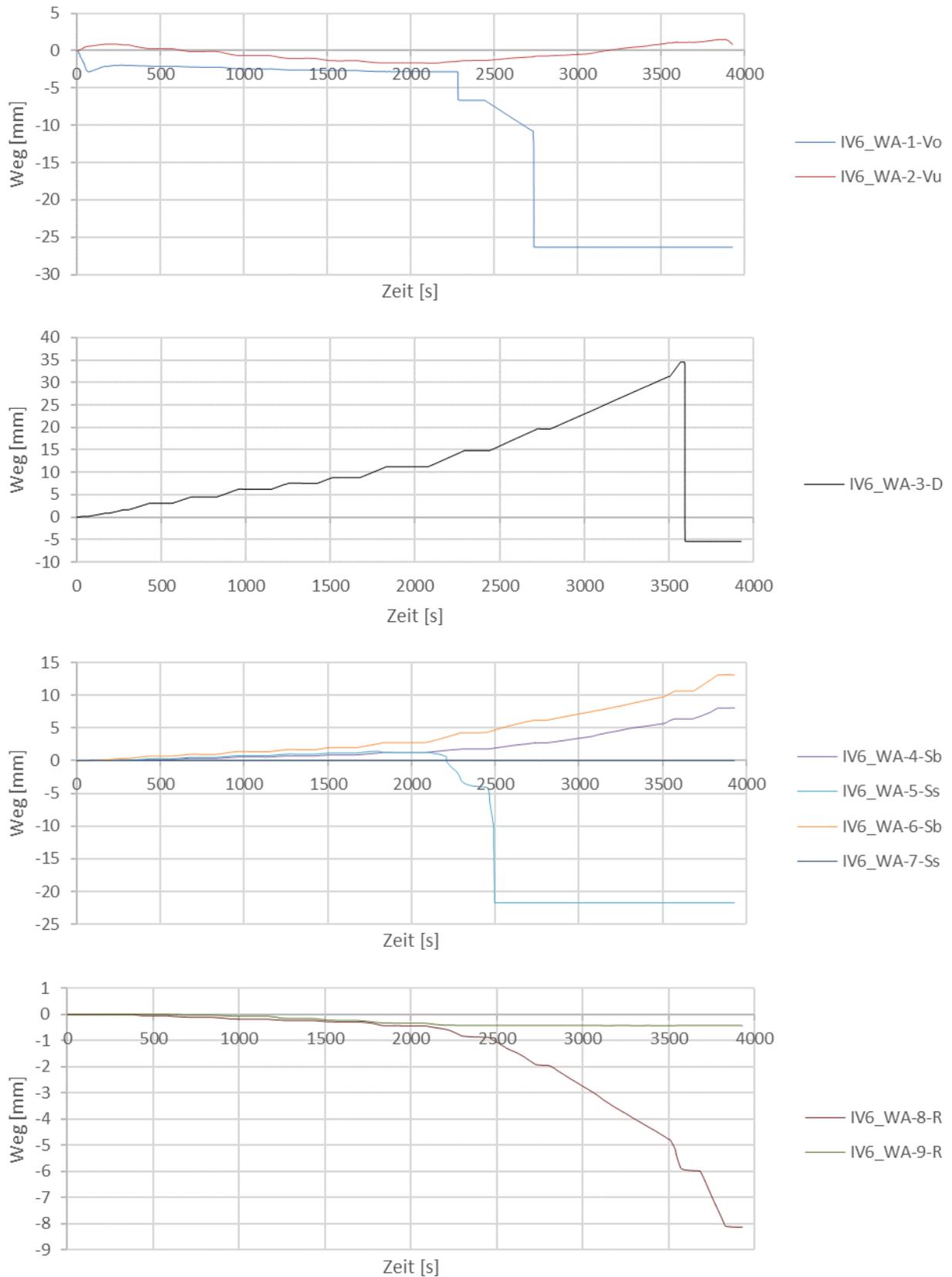


Abbildung 5-45: Gegenüberstellung der Zeit-Weg-Diagramme der WA1 bis WA9 von IV6

### 5.8.8 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der Interaktionsversuche an insgesamt sechs Probekörpern unterschiedlicher konstruktiver Durchbildungen der Kapitel 5.8.1 bis 5.8.7 werden abschließend zusammengefasst.

- Bei den Probekörpern IV1, IV2, IV3, IV5 und IV6 trat ein Versagen der Verankerung ein, lediglich bei dem Probekörper IV4 (Schubleiter nach DIN 1520) wurde kein Verankerungsversagen beobachtet
- Schubslankheit  $a/d$  mit  $a = 200$  cm im Bereich zwischen 3,0 ( $d = 66,50$  cm) und 3,2 ( $d = 62,73$ )
- Keine Torsionsrisse aufgrund der entsprechend der realen Einwirkungen geringen Torsionsbelastung
- Lasteinleitung ohne Rollenlager ausgeführt (nicht verschieblich) und wirkt daher wie ein Auflager für die eingeleiteten Torsionsbelastungen
- Messergebnisse liefern quantitative Aussage über das Tragverhalten des untersuchten Bauteils und können nicht auf einzelne Effekte/ Traganteile zurückgeführt werden

### 5.9 Interpretation der Versuchsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuche an Bauteilen unterschiedlicher konstruktiver Durchbildungen, wobei im Besonderen zwischen Bauteilen mit und ohne Querkraftbewehrung unterschieden werden kann, mit den rechnerischen Traglasten verglichen.

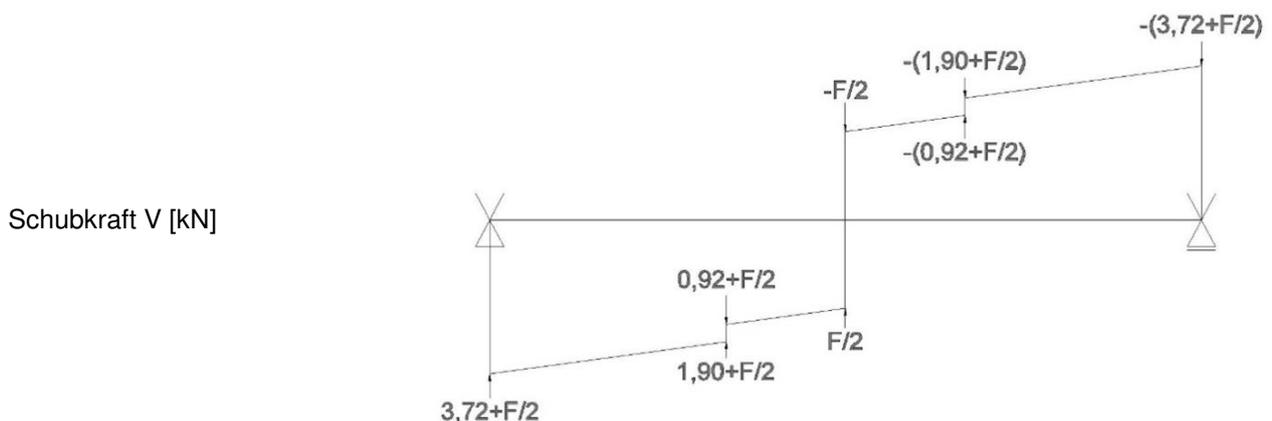
Grundlage für die Berechnung der Schub- und Biegetragfähigkeit von bewehrten Bauteilen aus LAC bildet die DIN 4213, die in Bezug auf die Bemessung primär auf der Anhang A (normativ) der DIN EN 1520 verweist. Dabei werden die Regelungen der DIN EN 1520 nicht vollständig übernommen, sondern eingeschränkt für Deutschland zugelassen.

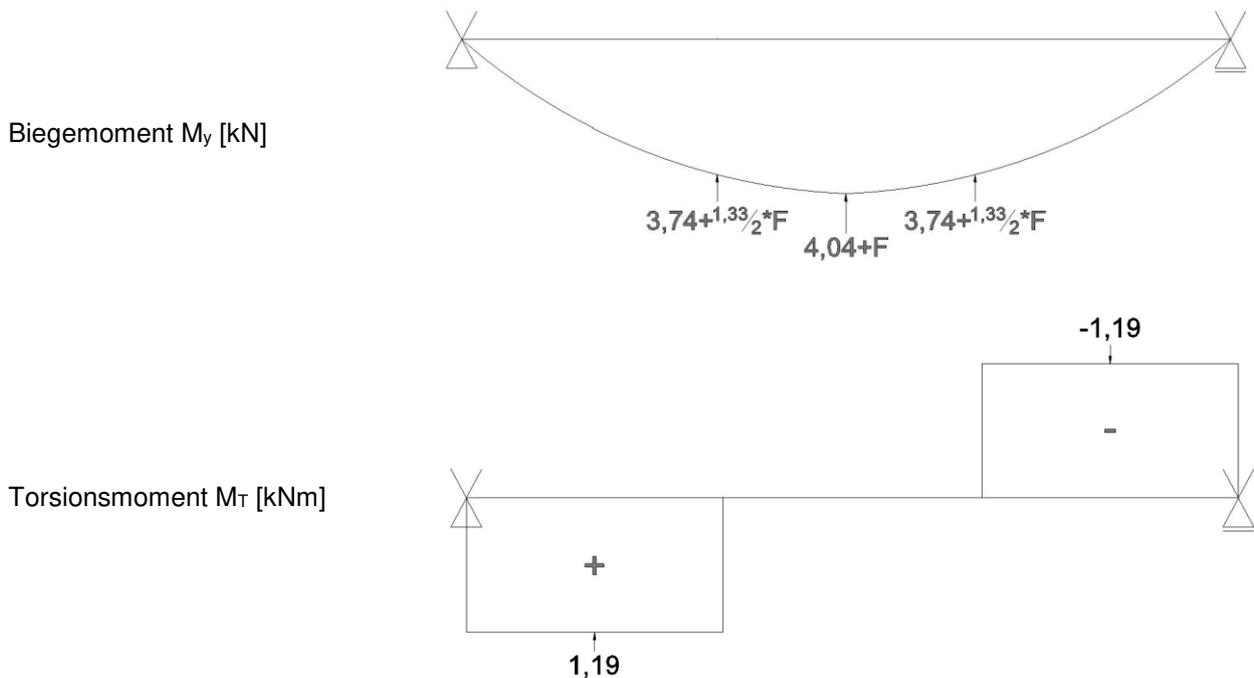
Zur Sicherstellung der Torsionstragfähigkeit gibt die DIN 4213 lediglich einen Mindestwert des von dem Bauteil aufzunehmenden Torsionsmomentes  $T_{Ed}$  in Abhängigkeit von dem Bemessungswert der vertikalen Auflagerkraft an (vgl. Kapitel 2.2.1). Daher wird für die Berechnung auf die Regelungen des EC2 zurückgegriffen.

Die Inhalte dieses Kapitels wurden primär im Rahmen der Bachelorarbeit von Herr Laurenz Kutscheid (Kaiserslautern, 2021) erarbeitet [28].

#### 5.9.1 Schnittgrößenermittlung in Abhängigkeit der Prüflast F

In Abhängigkeit der Prüflast  $F$  ergeben sich für das statische System (vgl. Abbildung 5-5) und unter Wirken der exzentrisch angeordneten Totlasten folgende Schnittgrößenverläufe:





Aus den Verläufen ergeben sich die relevanten Schnittgrößen zu:

Querkraft:  $V_{max} = 3,72 \text{ kN} + F \text{ [kN]}$

Biegemoment:  $M_{y,max} = 4,04 \text{ kN} + F \text{ [kN]}$

Torsionsmoment:  $M_{T,max} = 1,19 \text{ kNm}$

## 5.9.2 Gegenüberstellung von berechneten Traglasten und Versuchsergebnissen

### 5.9.2.1 Biegetragfähigkeit

Die Ergebnisse der Bauteilversuche werden im Folgenden mit den rechnerischen Traglasten verglichen. Im ersten Schritt erfolgt die Betrachtung der Biegetragfähigkeit der sechs Probekörper IV1 bis IV6.

Zur Bestimmung der Biegetragfähigkeit der Prüfkörper werden die Ergebnisse der Dehnmessstreifen in Bauteilmitte herangezogen. Dabei werden aus den gemessenen Dehnungen mithilfe des bekannten E-Moduls der unteren Längsbewehrung die Spannungen und Dehnungen des Betons berechnet. Die ermittelte Druckspannung in der Betondruckzone kann anschließend mit der Betondruckfestigkeit (vgl. Kapitel 5.7) verglichen werden. In Tabelle 5-5 sind die Ergebnisse in Bezug auf die Biegetragfähigkeit der Prüfkörper IV1 bis IV6 dargestellt.

Die maximal zulässige Betonstauchung  $\epsilon_{cu}$  [‰] berechnet sich nach DIN 4213 [4] in Abhängigkeit der Betonrohddichte  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] wie folgt:

$$\epsilon_{cu} = 0,0035 \cdot \eta_1 \geq 0,002 \quad (5-1)$$

mit:  $\eta_1 = 0,4 + 0,6 \cdot \frac{\rho}{2200}$

Die Ergebnisse der DMS-Messung in Bauteilmitte, die Stahldehnung  $\epsilon_{s,DMS}$  in [µm/m] und [‰], werden zur Ermittlung der Stahlspannung  $\sigma_s$  [N/mm<sup>2</sup>] der unteren Längsbewehrung herangezogen. Unter der Annahme,

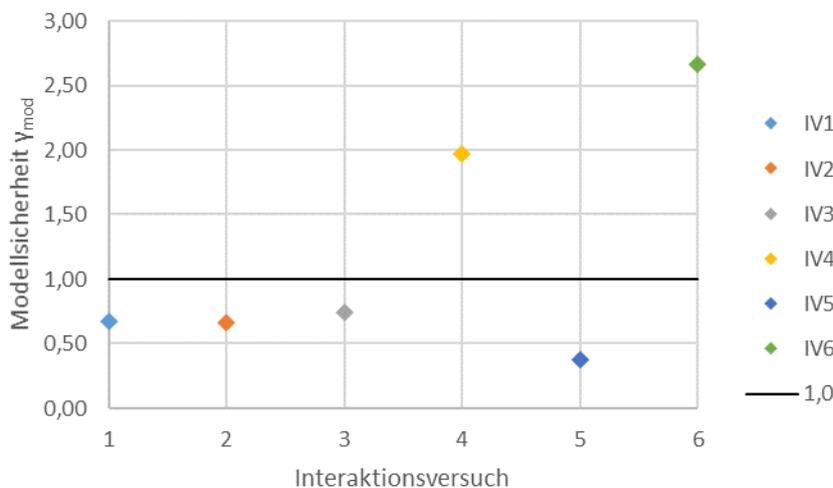
dass die Zugbeanspruchung der unteren Längsbewehrung und die Druckbelastung in der Betondruckzone im Gleichgewichte stehen müssen, kann die Betondruckspannungen  $\sigma_c$  [N/mm<sup>2</sup>] sowie die Betonstauchung  $\epsilon_c$  [‰] in Bauteilmitte berechnet werden.

**Tabelle 5-5: Biegetragfähigkeit der Bauteile IV1 bis IV6**

Ver- such	Beton- roh- dichte	Zul. Be- tonstau- chung	Stabdehnung der DMS in Bauteilmitte		Stahlspan- nung	Beton- druckspan- nung	Be- tonstau- chung	Betondruck- festigkeit	-
	$\rho$	$\epsilon_{cu}$	$\epsilon_{s,DMS}$		$\sigma_s$	$\sigma_c$	$\epsilon_c$	$f_c$	$\sigma_c/f_c$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[‰]	[ $\mu$ m/m]	[‰]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
IV1	1066,93	2,42	879,22	0,88	175,84	2,49	3,70	3,70	<b>0,67</b>
IV2	1116,58	2,47	1068,50	1,07	213,70	3,03	4,53	4,53	<b>0,67</b>
IV3	978,16	2,33	880,61	0,88	176,12	2,30	3,10	3,10	<b>0,74</b>
IV4	1189,23	2,54	3325,52	3,33	<del>665,10</del> 500*	9,66	4,90	4,90	<b>1,97</b>
IV5	1232,03	2,58	795,09	0,80	159,02	2,08	5,47	5,47	<b>0,38</b>
IV6	954,05	2,31	1869,01	1,87	373,80	4,89	1,83	1,83	<b>2,67</b>
<b>Mittelwert</b>									<b>1,18</b>
* Stahlspannung $\sigma_s$ überschreitet die Streckgrenze des Betonstahls									

Die zulässige maximale Stahldehnung  $\epsilon_{s,DMS}$  von 10 ‰ wurde nach DIN EN 1520 [3] nach den Messergebnissen der DMS in Bauteilmitte bei keinem der sechs Prüfkörper überschritten. Auch der Vergleich der zulässigen Betonstauchung  $\epsilon_{cu}$  [‰] nach DIN 4213 (vgl. Gl. (5-1)) mit der auftretenden Betonstauchung in Bauteilmitte  $\epsilon_c$  [‰] zeigt, dass auf Grundlage der für die Berechnung getroffenen Annahmen die zulässige Stauchung bei keinem der sechs Versuche überschritten wurde.

In Abbildung 5-46 ist  $\sigma_c/f_c$  für die jeweiligen Prüfkörpervarianten dargestellt.



**Abbildung 5-46: Biegetragfähigkeit der Prüfkörper IV1 bis IV6**

Die Ergebnisse zeigen, dass bei den Prüfkörpern IV4 und IV6 die Betonstauchung in der Druckzone in Bauteilmitte  $\sigma_c$  die Druckfestigkeit des LAC  $f_c$  überschritt, wonach ein Versagen der Betondruckzone eingetreten ist.

### 5.9.2.2 Querkrafttragfähigkeit

Zunächst werden die Ergebnisse der Versuche an Bauteilen ohne Querkraftbewehrung mit den rechnerischen Traglasten in Bezug auf die Querkrafttragfähigkeit verglichen. Grundlage und Vorgehensweise entsprechen dabei der Interpretation der Versuchsergebnisse von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung von Kapitel 4.9.1.

In Tabelle 5-6 werden die erreichten und rechnerischen Traglasten, die zugehörigen Materialkennwerte, Bewehrungsgehalte und die Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  der untersuchten Prüfkörper dargestellt. Alle Versuchsergebnisse übertreffen die rechnerisch vorhergesagte Traglast.

**Tabelle 5-6: Querkrafttragfähigkeit der Bauteile ohne Querkraftbewehrung (IV1, IV2)**

Ver- such	Druckfes- tigkeit	Roh- dichte	Beweh- rungs- grad	Längsbe- weh- rung	Querkraftbe- weh- rung	DIN 4213 Gl. (5.2)	Maximallast im Versuch	$\gamma_{mod}$
	$f_c$	$\rho$	$\rho_1$	$A_{sl}$	$a_{sw}$	$V_{Rm1}$	$V_u$	$V_u/V_{Rm1}$
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[-]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> /m]	[kN]	[kN]	[-]
IV1	3,70	1066,93	0,004	4,71	0	27,94	49,12	<b>1,76</b>
IV2	4,53	1116,58	0,004	4,71	0	30,48	47,42	<b>1,56</b>
<b>Mittelwert</b>								<b>1,66</b>

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass der Mittelwert der Modellsicherheit  $\gamma_{mod} = 1,66$  beträgt, was einer Traglastreserve von 66 % entspricht.

Die Versuche an Bauteilen ohne Querkraftbewehrung unter kombinierter Biege-, Querkraft und Torsionsbeanspruchung bestätigen somit das Fazit von Kapitel 4.9.1 und zeigen, dass die Querkrafttragfähigkeit mit der Bemessungsgleichung für  $V_{Rd1}$  nach DIN EN 1520 [3] und DIN 4213 [4] nicht mit ausreichender Zuverlässigkeit vorhergesagt werden kann.

Anschließend werden die Ergebnisse der Versuche an Bauteilen mit Querkraftbewehrung entsprechend des Vorgehens in Kapitel 4.9.2 verglichen. Als Vergleichswert wird der Widerstandswert  $V_{Rd3}$  nach Gleichung (2 5) aus DIN EN 1520 [3] unter Berücksichtigung von DIN 4213 [4] angesetzt. Dabei wird in Anlehnung an DIN 4213 [4] die Streckgrenze der Querkraftbewehrung  $f_{yw}$  auf 400 N/mm<sup>2</sup> und der Einfluss des Druckstrebenwinkels auf  $\cot \theta = 1,2$  festgelegt.

In Tabelle 5-7 werden die experimentellen und rechnerischen Traglasten, die zugehörigen Materialkennwerte, Bewehrungsgehalte und die Modellsicherheit der untersuchten Prüfkörper dargestellt.

**Tabelle 5-7: Querkrafttragfähigkeit der Bauteile mit Querkraftbewehrung (IV3 bis IV6)**

Ver- such	Druck- festigkeit	Roh- dichte	Beweh- rungs- grad	Längs- beweh- rung	Querkraft- beweh- rung	Streckgrenze für Querkraft- bewehrung	DIN 4213 Gl. (5.4)	Maximal- last im Versuch	$\gamma_{mod}$
	$f_c$	$\rho$	$\rho_1$	$A_{sl}$	$a_{sw}$	$f_{yw}$	$V_{Rm3}$	$V_u$	$V_u/V_{Rm3}$
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[-]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> /m]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[kN]	[-]
IV3	3,10	978,16	0,004	4,71	2,26	400	63,68	28,47	<b>0,45</b>
IV4	4,90	1189,23	0,004	4,71	2,26	400	63,30	63,73	<b>1,01</b>
IV5	5,47	1232,03	0,004	4,71	2,26	400	63,68	39,74	<b>0,62</b>
IV6	1,83	954,05	0,004	4,71	2,26	400	60,24	35,48	<b>0,59</b>
<b>Mittelwert</b>								<b>0,67</b>	

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass der Mittelwert der Modellsicherheit  $\gamma_{mod} = 0,67$  beträgt. Demnach sind keine Traglastreserven vorhanden.

Die Ergebnisse bestätigen die Aussage von Kapitel 4.9.2, wonach Bauteile mit Querkraftbewehrung nach der Bemessungsformel für  $V_{Rd3}$  aus Gleichung (2 5) nach DIN EN 1520 [3] und DIN 4213 [4] nicht mit ausreichender Sicherheit bemessen werden können.

In Abbildung 5-47 wird die Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  für die Prüfkörpervarianten IV1 bis IV6 dargestellt.

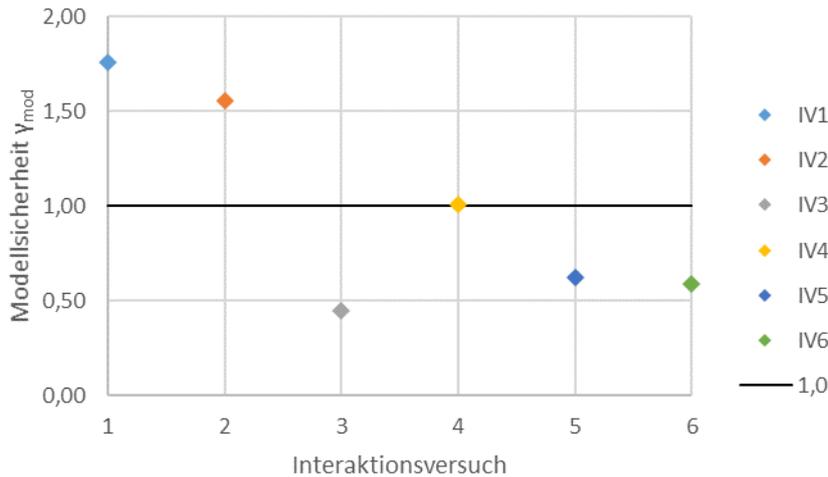


Abbildung 5-47: Querkrafttragfähigkeit der Bauteile ohne (IV1 und IV2) und mit (IV3 bis IV6) Querkraftbewehrung

### 5.9.2.3 Torsion

Zur Bewertung der Torsionstragfähigkeit bewehrter Bauteile aus LAC werden die Regelungen des EC2 herangezogen. Im EC 2 wird zur Abtragung eines einwirkenden Torsionsmoments ein räumliches Fachwerkmodell angenommen, dass sich nur bei Bauteilen mit Querkraftbewehrung einstellen kann.

Die erforderliche Längsbewehrungsmenge  $A_{sl}$  zur Aufnahme einwirkender Torsionsbelastungen berechnet sich nach DIN EN 1992-1-1 nach Gleichung (5-2).

$$A_{sl} = \frac{T_{Ed} \cdot \cot \theta \cdot u_k}{2 \cdot A_k \cdot f_{ywd}} \quad (5-2)$$

Unter der Annahme von  $\cot \theta$  zu 1,2 ergeben sich die in Tabelle 5-8 dargestellten Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  für die sechs untersuchten Prüfkörper. Alle Versuchsergebnisse übertreffen die rechnerisch vorhergesagte Traglast.

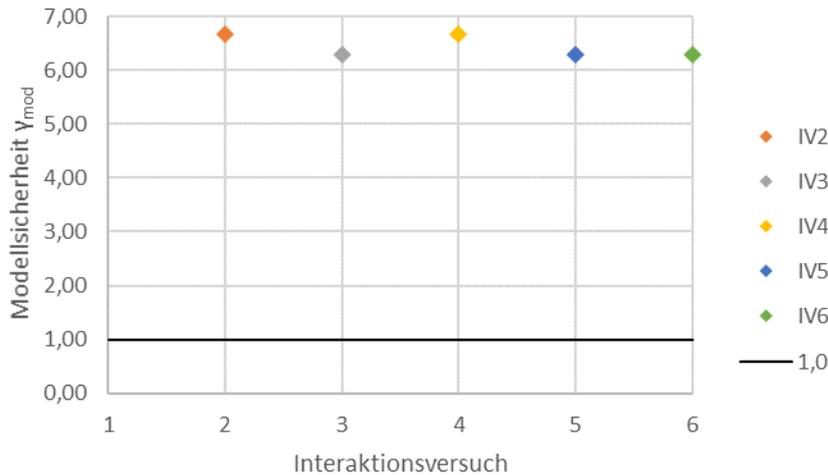
Tabelle 5-8: Torsionstragfähigkeit in Längsrichtung der Bauteile mit Torsionslängsbewehrung (IV2 bis IV6)

Ver-such	Druckfes-tigkeit	Roh-dichte	Längsbe-wehrung	Streck-grenze			EC2 Gl. 5.7	Maximallast im Versuch	$\gamma_{mod}$
	$f_c$	$\rho$	$A_{sl}$	$f_{yw}$	$A_k$	$u_k$	$T_{Rm,I}$	$T_u$	$T_u/T_{Rm,I}$
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm]	[kNcm]	[kNcm]	[-]
IV2	4,53	1116,58	1,7	400	1134,0	162,0	793,33	119	<b>6,67</b>
IV3	3,10	978,16	1,7	400	1038,2	157,2	748,52	119	<b>6,29</b>
IV4	4,90	1189,23	1,7	400	1134,0	162,0	793,33	119	<b>6,67</b>
IV5	5,47	1232,03	1,7	400	1038,2	157,2	748,52	119	<b>6,29</b>

IV6	1,83	954,05	1,7	400	1038,2	157,2	748,52	119	<b>6,29</b>
<b>Mittelwert</b>									<b>6,44</b>

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass der Mittelwert der Modellsicherheit  $\gamma_{mod} = 6,44$  beträgt, was einer Traglastreserve von 544 % entspricht.

In Abbildung 5-48 wird die Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  für die jeweiligen Prüfkörpervarianten dargestellt.



**Abbildung 5-48: Torsionstragfähigkeit in Längsrichtung der Bauteile mit Torsionslängsbewehrung (IV2 bis IV6)**

Die erforderliche Bewehrungsmenge  $a_{sw}$  in Querrichtung berechnet sich nach DIN EN 1992-1-1 nach Gleichung (5-3).

$$a_{sw} = \frac{A_{sw}}{s_w} = \frac{T_{Ed} \cdot \tan \theta}{2 \cdot A_k \cdot f_{ywd}} \quad (5-3)$$

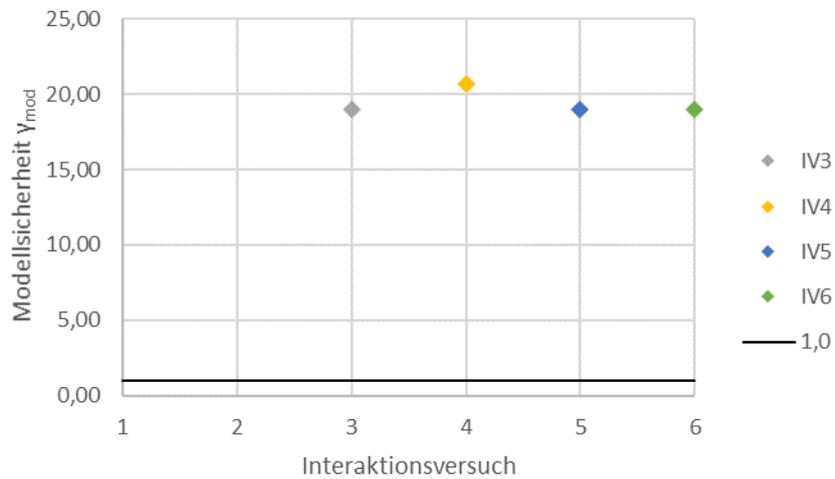
In Tabelle 5-9 werden die erreichten und rechnerischen Traglasten, die zugehörigen Materialkennwerte, Bewehrungsgehalte und die Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  der untersuchten Prüfkörper IV3 bis IV6 (Bauteile mit Querkraftbewehrung) dargestellt. Auch hier wurde  $\cot \theta$  zu 1,2 angenommen. Alle Versuchsergebnisse übertreffen die rechnerisch vorhergesagte Traglast.

**Tabelle 5-9: Torsionstragfähigkeit in Querrichtung der Bauteile mit Torsionsquerbewehrung (IV3 bis IV6)**

Ver-such	Druckfestig-keit	Roh-dichte	Querkraftbe-wehrung	Streck-grenze		EC2	Maximallast im Versuch	$\gamma_{mod}$
	$f_c$	$\rho$	$a_{sw}$	$f_{yw}$	$A_k$	$T_{Rm,w}$	$T_u$	$T_u/T_{Rm,w}$
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[cm <sup>2</sup> /m]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[kNcm]	[kNcm]	[-]
IV3	3,10	978,16	2,26	400	1038,2	2254,56	119,0	<b>18,95</b>
IV4	4,90	1189,23	2,26	400	1134,0	2462,50	119,0	<b>20,69</b>
IV5	5,47	1232,03	2,26	400	1038,2	2254,56	119,0	<b>18,95</b>
IV6	1,83	954,05	2,26	400	1038,2	2254,56	119,0	<b>18,95</b>
<b>Mittelwert</b>								<b>19,38</b>

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass der Mittelwert der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}} = 19,38$  beträgt, was einer Traglastreserve von 1838 % entspricht.

In Abbildung 5-49 wird die Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  für die jeweiligen Prüfkörpervarianten dargestellt.



**Abbildung 5-49: Torsionstragfähigkeit in Querrichtung der Bauteile mit Torsionsquerbewehrung (IV3 bis IV6)**

Die Ergebnisse zur Torsionstragfähigkeit zeigen, dass die Prüfkörper sehr hohe Tragreserven besitzen, was auf die Abbildung einer konstanten Torsionsbelastung mittels Totlasten von jeweils 100 kg in den Drittelpunkten des Bauteils zurückzuführen ist.

## **6      **Ausblick und offene Fragen****

Die Untersuchungen dieses Projekts liefern einen Beitrag zum Verständnis der Querkraft- und Torsionstragverhaltens von Bauteilen aus haufwerksporigem Leichtbeton. Aus den neuen Erkenntnissen ergeben sich wiederum weitere offene Fragen, die es zu beantworten gilt.

So stellt sich die Frage wie das Querkrafttragverhalten von Durchlaufsystemen zu beurteilen ist. Insbesondere können hier Momentennullpunkte wegen der fehlenden Betondruckzone kritisch sein.

Auch größere Schubschlankheiten könnten von Interesse sein.

In den Untersuchungen dieses Projekts wurden Bauteilversuche mit mittig angeordneten Einzellasten durchgeführt. Durch weitere Untersuchungen unter Gleichstreckenlasten können womöglich weitere Einsparpotenziale herausgearbeitet werden. Dies könnte zu einer besseren Ausnutzung der Elemente führen.

In dem Zusammenhang könnten weitere Bewehrungskonstruktionen untersucht werden. Eine an den Auflagerseiten aufgebogene Längsbewehrung könnte zum Querkraftabtrag beitragen und möglicherweise Querkraftbewehrung einsparen. Gerade durch die liegende Herstellung der Wandelemente aus LAC entsteht durch eine aufgebogene Längsbewehrung kein allzu großer Mehraufwand beim Einbau der Bewehrung. Hier sollte allerdings besonders auf die Verankerung am Ende der Längsstäbe und an den Umlenkstellen geachtet werden.

In diesem Projekt haben sich die Verankerungsbereiche der Bewehrung als kritische Stellen in einem Bauteil aus haufwerksporigem Leichtbeton herausgestellt. Hier könnte ein Bemessungskonzept für die Biegetragfähigkeit, das auf der Verankerung der Längsbewehrung aufbaut, sinnvoll sein. Hierzu wären Auszugversuche mit zusätzlich aufgebrachtten Querdruckspannungen von Interesse.

Interessant wäre außerdem eine Überprüfung des Bauteilverhaltens bei höheren Druckfestigkeiten durch Anpassung der Rezeptur des LAC. Der Anteil der Druckzonentragfähigkeit könnte durch eine Anpassung der Betondruckfestigkeit weiter an Bedeutung gewinnen.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] *Sagmeister, B.*: Rezeptoptimierung von haufwerksporigem Leichtbeton. *In*: Sonderdruck des BFT (1999), S. 70-77.
- [2] *Thienel, K.-C.*: Sonderbetone – Gefügedichter und haufwerksporiger Leichtbeton. Universität der Bundeswehr München, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, München Ausgabe 2015.
- [3] DIN EN 1520: Vorgefertigte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton und mit statisch anrechenbarer oder nicht anrechenbarer Bewehrung. Ausgabe Juni 2011.
- [4] DIN 4213: Anwendung von vorgefertigten Bauteilen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit statisch anrechenbarer oder nicht anrechenbarer Bewehrung in Bauwerken. Ausgabe Oktober 2015.
- [5] Technische Regeln für vorgefertigte bewehrte tragende Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton. DIBt, Ausgabe März 2005.
- [6] Thermodur Wandelemente GmbH & Co. KG: Thermodur Wandelemente – Produktinformation, Neuwied Ausgabe 2013.
- [7] Ingenieurbüro Christoph Werf: Bewehrungsplan Sturzelement Ausgabe 2019.
- [8] *Schnell, J.; Krummenacker, J.*: Projekt 15014Sn/04511: Tastversuche zur Torsionstragfähigkeit von Wandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton – Versuchsbericht. Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern Ausgabe April 2015.
- [9] *Thienel, K.-C.*: Sonderbetone – Gefügedichter und haufwerksporiger Leichtbeton. Universität der Bundeswehr München, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, München Ausgabe 2015.
- [10] *Grübl, P.; Karl, S.; Weigler, H.*: Beton – Arten, Herstellung und Eigenschaften, Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau, Ernst, Berlin, 2001.
- [11] *Goltermann, P.; Ingholt, N.U.; Larsen, H.*: Lightweight Aggregate Concrete Beams – Load Bearing Capacity. Nordic Concrete Research, Oslo Ausgabe 1997.
- [12] *Goltermann, P.*: Load-carrying capacity of lightly reinforced, prefabricated walls of lightweight aggregate concrete with open structure. *In*: Materials and Structures (2009), Heft 5, S. 581-591.
- [13] *Goltermann, P.*: Prefabricated elements and structures: Developments, tests and experiences. Technical University of Denmark Ausgabe 2014.
- [14] *Hegger, J.; Roeser, W.*: Gutachten zur DIN EN 1520: 2002 Fassung Juli 2003. H+P Ingenieure GmbH & Co. KG Ausgabe 2004.
- [15] *Nguyen, V.L.*: Entwicklung einer Konstruktion für zweischichtige Wandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton – Experimentelle und theoretische Untersuchungen. Diplomarbeit. Technische Universität Kaiserslautern FG Massivbau Ausgabe 2008.
- [16] *Schnell, J.; Hanz, F.*: Ergebnisse zu Verdichtungsversuchen an Wandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton (LAC). Versuchsbericht. Technische Universität Kaiserslautern FG Massivbau, Kaiserslautern Ausgabe 2014.
- [17] *Hanz, F.*: Beitrag zur Bemessung von dreischichtigen Wandtafeln aus haufwerksporigem Leichtbeton – Dissertation. Technische Universität Kaiserslautern FG Massivbau Ausgabe 2017.
- [18] *Wildermuth, A.*: Untersuchungen zum Verbundverhalten von Bewehrungsstäben mittels vereinfachter Versuchskörper, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 609, Beuth, Berlin, 2013.
- [19] 1354: Bestimmung der Druckfestigkeit von haufwerksporigem Leichtbeton. DIN EN, Ausgabe September 2005.
- [20] *Leonhardt, F.; Mönnig, E.*: Grundlagen zur Bemessung im Stahlbetonbau, Vorlesungen über Massivbau Teil 1, Springer-Verlag, Berlin [etc.], 1984.
- [21] *Kani, G.N.J.*: Basic Facts Concerning Shear Failure. *In*: ACI Journal Proceedings 63 (1966), Heft 6.
- [22] *Ruiz, M.F.; Muttoni, A.; Sagaseta, J.*: Shear strength of concrete members without transverse reinforcement – A mechanical approach to consistently account for size and strain effects. *In*: Engineering Structures 99 (2015), S. 360-372.

- [23] *Reißen, K.:* Zum Querkrafttragverhalten von einachsig gespannten Stahlbetonplatten ohne Querkraftbewehrung unter Einzellasten – Dissertation. RWTH Aachen Ausgabe 2016.
- [24] *Fischer, J.:* Versagensmodell für schubslanke Balken, Deutscher Ausschuss für StahlbetonHeft 480, Beuth Verlag, Berlin, Germany, 1997.
- [25] *Kani, G.N.J.:* The Riddle of Shear Failure and its Solution. *In:* ACI Journal Proceedings 61 (1964), Heft 4.
- [26] *Hegger, J.; Görtz, S.:* Querkraftbemessung nach DIN 1045-1. *In:* Beton- und Stahlbetonbau 97 (2002), Heft 9, S. 460-470.
- [27] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (*Hrsg.*): Erweiterte Datenbanken zur Überprüfung der Querkraftbemessung für Konstruktionsbetonbauteile mit und ohne Bügel, DAfStb-Heft Heft 597, Beuth, Berlin, 2012.
- [28] *Kutscheid, L.:* Bemessung von freitragenden Fassadenelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton (LAC) und Vergleich mit experimentellen Daten. Kaiserslautern, Technische Universität Kaiserslautern, Bachelorarbeit, 2021.

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Gefüge haufwerksporiger Leichtbeton .....	6
Abbildung 2-2: Verdichtung von Bauteilen aus LAC mit Walze.....	7
Abbildung 2-3: Verdichtung von Bauteilen aus LAC von Hand.....	7
Abbildung 2-4: Wandelemente aus LAC, Stapelbauweise (nach Bild A.5 aus [4]) .....	8
Abbildung 2-5: Ausbildung einer Verbindung zw. Trapezblech und Wandelement mit Winkel [6].....	10
Abbildung 2-6: Bewehrungsplan eines Sturzwandelementes mit/ohne Trapezblechaufleger [7] .....	11
Abbildung 3-1: Stahlrahmen .....	14
Abbildung 3-2: Systemskizze Auszugversuche.....	14
Abbildung 3-3: Stahlrahmen mit eingebautem Prüfkörper .....	15
Abbildung 3-4: Stahlrahmen mit eingebautem Prüfkörper .....	15
Abbildung 3-5: Bezeichnung der Versuchskörper in den Auszugversuchen .....	15
Abbildung 3-6: Bewehrungsstab an der Schalseite, Index s .....	16
Abbildung 3-7: Bewehrungsstab an der Walzseite, Index w .....	16
Abbildung 3-8: BET-9s.....	17
Abbildung 3-9: BET-9w.....	17
Abbildung 3-10: BET-10s.....	17
Abbildung 3-11: BET-10w.....	17
Abbildung 3-12: BET-12s.....	17
Abbildung 3-13: BET-12w.....	17
Abbildung 3-14: BET-13s.....	17
Abbildung 3-15: BET-13w.....	17
Abbildung 3-16: Bewehrungsstab mit Endhaken und angeschweißtem Hilfsstab .....	18
Abbildung 3-17: Bewehrungsstab mit Endhaken, angeschweißtem Hilfsstab und Kunststoffrohr.....	18
Abbildung 3-18: Bewehrungsstab mit Endhaken, angeschweißtem Hilfsstab, Kunststoffrohr und EPS-Platzhalter .....	18
Abbildung 3-19: Bewehrungsstab mit Endhaken, angeschweißtem Hilfsstab und Kunststoffrohr.....	19
Abbildung 3-20: Bewehrungsstab mit Endhaken, angeschweißtem Hilfsstab und Kunststoffrohr.....	19
Abbildung 3-21: Kraft-Weg-Diagramm BET-9 .....	21
Abbildung 3-22: Kraft-Weg-Diagramm BET-10 .....	21
Abbildung 3-23: Kraft-Weg-Diagramm BET-12 .....	21
Abbildung 3-24: Kraft-Weg-Diagramm BET-13 .....	22
Abbildung 4-1: Schematischer Versuchsaufbau (BV), Ansicht Schalseite.....	23
Abbildung 4-2: Bezeichnung der Versuchskörper im Dreipunktbiegeversuch .....	24
Abbildung 4-3: BV-7.1, BV-7.3 (Endhaken).....	26

Abbildung 4-4: BV-7.2, BV-8.1 (Kopfplatte).....	26
Abbildung 4-5: BV-9 (ohne Dämmkerne) .....	26
Abbildung 4-6: BV-10 (reduzierte Längsbew.) .....	26
Abbildung 4-7: BV-1, BV-2, BV-3 .....	27
Abbildung 4-8: BV-14 (Bügelkorb).....	27
Abbildung 4-9: BV-15 (Bügelkorb + zusätzliche Längsstäbe) .....	27
Abbildung 4-10: BV-4.....	27
Abbildung 4-11: BV-13.....	27
Abbildung 4-12: BV-5.....	28
Abbildung 4-13: BV-12.1.....	28
Abbildung 4-14: Messtechnik Anordnung, Ansicht Schalseite .....	29
Abbildung 4-15: Bewehrungsstab mit Endhaken und angeschweißtem Hilfsstab .....	29
Abbildung 4-16: Kraft-Zeit-Diagramm, BV-7.3.....	30
Abbildung 4-17: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-7.1 .....	32
Abbildung 4-18: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-7.3.....	32
Abbildung 4-19: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-7.2, mit Kopfplatte .....	32
Abbildung 4-20: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-8.1, mit Kopfplatte .....	33
Abbildung 4-21: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-9.1, ohne Dämmkerne .....	33
Abbildung 4-22: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-10.1, reduzierte Längsbewehrung .....	33
Abbildung 4-23: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-1.1, Bügelkorb DIN 4213 .....	34
Abbildung 4-24: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-1.2, Bügelkorb DIN 4213 .....	35
Abbildung 4-25: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-1.3, Bügelkorb DIN 4213 .....	35
Abbildung 4-26: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-2.1, Bügelkorb.....	36
Abbildung 4-27: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-2.2, Bügelkorb.....	36
Abbildung 4-28: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-2.3, Bügelkorb.....	37
Abbildung 4-29: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-3.1, Bügelkorb.....	37
Abbildung 4-30: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-3.2, Bügelkorb.....	38
Abbildung 4-31: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-3.3, Bügelkorb.....	38
Abbildung 4-32: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-14.1, Bügelkorb DIN 4213 .....	39
Abbildung 4-33: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-15.1, Bügelkorb DIN 4213 .....	39
Abbildung 4-34: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-4.1, Schubleiter DIN EN 1520.....	40
Abbildung 4-35: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-4.2, Schubleiter DIN EN 1520.....	40
Abbildung 4-36: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-13.1, Schubleiter .....	41
Abbildung 4-37: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-5.1, Einzelstäbe mit Endhaken .....	41

Abbildung 4-38: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-5.2, Einzelstäbe mit Endhaken .....	42
Abbildung 4-39: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-5.3, Einzelstäbe mit Endhaken .....	42
Abbildung 4-40: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-12.1, Einzelstäbe .....	43
Abbildung 4-41: Ergebnisse der Versuche an Bauteilen ohne Querkraftbewehrung.....	45
Abbildung 4-42: Ergebnisse der Versuche an Bauteilen mit Querkraftbewehrung, $f_{yw} = 400 \text{ N/mm}^2$ .....	47
Abbildung 5-1: Verankerung glatter Bewehrungsstäbe nach DIN EN 1520, Bild A.10 [3] .....	52
Abbildung 5-2: DMS aufgeklebt auf einen Bewehrungsstab $\varnothing 10$ .....	52
Abbildung 5-3: Positionierung und Benennung der DMS-Messstellen .....	53
Abbildung 5-4: Flussdiagramm Herstellung IV5 .....	55
Abbildung 5-5: Versuchsaufbau und statisches System der Interaktionsversuche .....	56
Abbildung 5-6: Kabellagerung .....	56
Abbildung 5-7: Auskragende Stahlkonstruktion mit Totlast (links), Rückseite/Schalseite (Mitte), Ausbildung der Kontaktfläche zw. Stahlkonstruktion und Probekörper (rechts) .....	57
Abbildung 5-8: Lasteinleitung (links) und Auflager (rechts).....	57
Abbildung 5-9: Messkonzept, Ansicht Schalseite.....	58
Abbildung 5-10: Messkonzept, Schnitt A-A (vgl. Abbildung 5-9).....	58
Abbildung 5-11: Probekörper mit Messtechnik.....	59
Abbildung 5-12: Messung der horizontalen Verschiebung am Beispiel von IV1 .....	59
Abbildung 5-13: Separater Probekörper zur Materialprüfung.....	60
Abbildung 5-14: Kraft-Weg-Diagramm in Feldmitte (WA-3-D) der Versuche IV1 bis IV6 .....	61
Abbildung 5-15: Rissbild der Schalseite von IV1 .....	62
Abbildung 5-16: Rissbild der Schalseite von IV2.....	62
Abbildung 5-17: Rissbild der Schalseite von IV3.....	62
Abbildung 5-18: Rissbild der Schalseite von IV4.....	62
Abbildung 5-19: Rissbild der Schalseite von IV5.....	62
Abbildung 5-20: Rissbild der Schalseite von IV6.....	62
Abbildung 5-21: Horizontale Verformung am oberen und unteren Bauteilrand in Feldmitte von IV1 .....	63
Abbildung 5-22: Horizontale Verformung am oberen und unteren Bauteilrand in Feldmitte von IV2 .....	63
Abbildung 5-23: Horizontale Verformung am oberen und unteren Bauteilrand in Feldmitte von IV3 .....	64
Abbildung 5-24: Horizontale Verformung am oberen und unteren Bauteilrand in Feldmitte von IV4 .....	64
Abbildung 5-25: Horizontale Verformung am oberen und unteren Bauteilrand in Feldmitte von IV5 .....	65
Abbildung 5-26: Horizontale Verformung am oberen und unteren Bauteilrand in Feldmitte von IV6 .....	65
Abbildung 5-27: Neigung im Drittelspunkt der Versuche IV1 bis IV6 .....	66
Abbildung 5-28: Verformung in der Bauteilebene von IV1 .....	67
Abbildung 5-29: Verformung in der Bauteilebene von IV2 .....	67

Abbildung 5-30: Verformung in der Bauteilebene von IV3 .....	68
Abbildung 5-31: Verformung in der Bauteilebene von IV4 .....	68
Abbildung 5-32: Verformung in der Bauteilebene von IV5 .....	69
Abbildung 5-33: Verformung in der Bauteilebene von IV6 .....	69
Abbildung 5-34: Ergebnisse der DMS-Messung von IV1 .....	70
Abbildung 5-35: Ergebnisse der DMS-Messung von IV2 .....	70
Abbildung 5-36: Ergebnisse der DMS-Messung von IV3 .....	71
Abbildung 5-37: Ergebnisse der DMS-Messung von IV4 .....	71
Abbildung 5-38: Ergebnisse der DMS-Messung von IV5 .....	72
Abbildung 5-39: Ergebnisse der DMS-Messung von IV6 .....	72
Abbildung 5-40: Gegenüberstellung der Zeit-Weg-Diagramme der WA1 bis WA9 von IV1 .....	73
Abbildung 5-41: Gegenüberstellung der Zeit-Weg-Diagramme der WA1 bis WA9 von IV2 .....	74
Abbildung 5-42: Gegenüberstellung der Zeit-Weg-Diagramme der WA1 bis WA9 von IV3 .....	75
Abbildung 5-43: Gegenüberstellung der Zeit-Weg-Diagramme der WA1 bis WA9 von IV4 .....	76
Abbildung 5-44: Gegenüberstellung der Zeit-Weg-Diagramme der WA1 bis WA9 von IV5 .....	77
Abbildung 5-45: Gegenüberstellung der Zeit-Weg-Diagramme der WA1 bis WA9 von IV6 .....	78
Abbildung 5-46: Biegetragfähigkeit der Prüfkörper IV1 bis IV6 .....	81
Abbildung 5-47: Querkrafttragfähigkeit der Bauteile ohne (IV1 und IV2) und mit (IV3 bis IV6) Querkraftbewehrung .....	83
Abbildung 5-48: Torsionstragfähigkeit in Längsrichtung der Bauteile mit Torsionslängsbewehrung (IV2 bis IV6) .....	84
Abbildung 5-49: Torsionstragfähigkeit in Querrichtung der Bauteile mit Torsionsquerbewehrung (IV3 bis IV6) .....	85

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Zusammenfassung der Ergebnisse des Projektes 15014Sn/04511 .....	12
Tabelle 3-1: Versuchsprogramm Auszugversuche .....	16
Tabelle 3-2: Prüfung der Druckfestigkeit und der Rohdichte nach DIN EN 1354 [19] .....	20
Tabelle 3-3: Ansetzbare Spannungen nach Verankerungsart .....	22
Tabelle 4-1: Versuchsprogramm Dreipunktbiegeversuche .....	25
Tabelle 4-2: Prüfung der Druckfestigkeit und der Rohdichte nach DIN EN 1354 [19] .....	31
Tabelle 4-3: Ergebnisse Bauteile ohne Querkraftbewehrung.....	44
Tabelle 4-4: Ergebnisse Bauteile mit Querkraftbewehrung.....	46
Tabelle 5-1: Probekörper für die Interaktionsversuche .....	50
Tabelle 5-2: Zuordnung der DMS zu den Probekörpern IV1 bis IV6.....	53
Tabelle 5-3: Ergebnisse der versuchsbegleitenden Materialprüfungen an Bohrkernen entnommen aus separaten Bauteilen.....	60
Tabelle 5-4: Maximalwerte der Last und Verformung der Versuche IV1 bis IV6 .....	61
Tabelle 5-5: Biegetragfähigkeit der Bauteile IV1 bis IV6 .....	81
Tabelle 5-6: Querkrafttragfähigkeit der Bauteile ohne Querkraftbewehrung (IV1, IV2) .....	82
Tabelle 5-7: Querkrafttragfähigkeit der Bauteile mit Querkraftbewehrung (IV3 bis IV6).....	82
Tabelle 5-8: Torsionstragfähigkeit in Längsrichtung der Bauteile mit Torsionslängsbewehrung (IV2 bis IV6)	83
Tabelle 5-9: Torsionstragfähigkeit in Querrichtung der Bauteile mit Torsionsquerbewehrung (IV3 bis IV6) ..	84