

# **Zur Querkrafttragfähigkeit vorgefertigter Wandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton**

Vom Fachbereich  
Architektur / Raum- und Umweltplanung / Bauingenieurwesen  
der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität  
Kaiserslautern-Landau  
zur Verleihung des akademischen Grades

## **DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)**

genehmigte

### **DISSERTATION**

von

**Martina Henseler**

aus Mülheim-Kärlich

Dekan:	Prof. Dr.-Ing. K. Körkemeyer
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. M. Pahn
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. R. Zeitler
3. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. H. J. Schnell
Tag der mündlichen Prüfung:	12.07.2023

Kaiserslautern 2023

(D 386)



## **Danksagung**

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Hochschule Koblenz in Kooperation mit der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau.

Ein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell und Prof. Dr.-Ing. Ralf Zeitler für die Betreuung und Begutachtung dieser Arbeit, das entgegengebrachte Vertrauen und den wissenschaftlichen Austausch.

Weiterhin danke ich Frau apl. Prof. Dr.-Ing. Catherina Thiele für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission und die wertvollen, konstruktiven Anregungen.

Bedanken möchte ich mich für die finanzielle Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, sowie allen Teilnehmern des Projektbegleitenden Ausschusses.

Weiter bedanke ich mich bei allen Kollegen der RPTU Kaiserslautern für die kollegiale Aufnahme am Institut und den wissenschaftlichen Austausch.

Besonders möchte ich mich bei meinem geschätzten Kollegen Prof. Dr.-Ing. Martin Schäfer bedanken, der den Kontakt zur RPTU Kaiserslautern hergestellt hat und mich in den vielen Phasen der Bearbeitungszeit begleitet und bestärkt hat.

Darüber hinaus danke ich Herrn Uwe Sahn für die kollegiale, kritische und interessierte Begleitung meiner Arbeit und die Teilnahme am Projektbegleitenden Ausschuss.

Meinen Kollegen der Hochschule Koblenz möchte ich hier ganz besonders danken für das Bestärken und Begleiten über die vielen Jahre. So manch eine Hürde wurde leichter durch das große Vertrauen und das freundschaftliche Verhältnis zu meinen Kollegen. Die erforderliche Ablenkung zum fachlichen Thema hat mir immer wieder Kraft geschenkt das Ziel weiterzuverfolgen.

Vielen Dank an meine Freunde für das entgegengebrachte Verständnis und die nötige Ablenkung zum Thema, für die vielen guten Wünsche und das Vertrauen.

Von Herzen danke ich meinen Eltern, meinem Bruder Christian, unserer Hildegard und meinem Mann Fabian für das Vertrauen, das unermüdliche Bestärken und Motivieren. Ohne ihr Verständnis, ihre Unterstützung und ihre bedingungslose Liebe wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.





Martina Henseler

**Zur Querkrafttragfähigkeit vorgefertigter  
Wandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton**



# Inhalt

<b>Zusammenfassung</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Bezeichnungen</b>	<b>viii</b>
<b>1 Motivation</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Methodik und Gliederung der Arbeit	2
<b>2 Stand der Forschung</b>	<b>5</b>
2.1 Haufwerksporiger Leichtbeton	5
2.1.1 Normen	5
2.1.2 Charakteristik von haufwerksporigem Leichtbeton	6
2.1.3 Tragverhalten	8
2.1.4 Baustoffkennwerte	10
2.1.5 Grundlagen der Bemessung	14
2.1.6 Wandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton	14
2.1.7 Verbund- und Verankerungsverhalten	17
2.2 Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung	18
2.2.1 Allgemeines	18
2.2.2 Versagensarten	21
2.2.3 Tragmechanismen und Modelle	23
2.2.3.1 Sprengwerk und Bogen-Zugband-Modell	24
2.2.3.2 Zahnmodell	25
2.2.4 Bemessung	30
2.3 Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen mit Querkraftbewehrung	31
2.3.1 Allgemeines	31
2.3.2 Versagensarten	32
2.3.3 Tragmechanismen und Modelle	34
2.3.4 Bemessung	36
2.4 Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen aus haufwerksporigem Leichtbeton	40
2.4.1 Allgemeines	40
2.4.2 Versagensarten	40
2.4.3 Bemessung	41
2.5 Fazit	43

<b>3</b>	<b>Voruntersuchungen zur Verdichtung von LAC</b>	<b>45</b>
3.1	Ausgangssituation und Zielsetzung	45
3.2	Versuchsaufbau	45
3.3	Geometrie der Versuchskörper	46
3.4	Ergebnisse	47
3.5	Auswertung	50
<b>4</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen zur Verankerung</b>	<b>51</b>
4.1	Ausgangssituation und Zielsetzung	51
4.2	Versuchsaufbau	53
4.3	Versuchsprogramm	54
4.4	Geometrie der Versuchskörper	58
4.5	Herstellung und Verdichtung	58
4.6	Messtechnik	59
4.7	Versuchsdurchführung	60
4.8	Werkstoffeigenschaften	61
4.9	Ergebnisse	62
4.10	Auswertung	73
<b>5</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen an Wandelementen</b>	<b>75</b>
5.1	Ausgangssituation und Zielsetzung	75
5.2	Versuchsaufbau	75
5.3	Versuchsprogramm	76
5.4	Geometrie der Versuchskörper	78
5.5	Herstellung und Verdichtung	82
5.6	Messtechnik	82
5.7	Versuchsdurchführung	85
5.8	Werkstoffeigenschaften	85
5.9	Ergebnisse Bauteile ohne Querkraftbewehrung	87
5.9.1	Messergebnisse	87
5.9.2	Rissbildung und Versagen	90
5.9.3	Vergleich der Kraft-Verformungskurven	94
5.9.4	Traglasten und Vergleich mit Rechenwerten	96
5.9.5	Fazit	98
5.10	Ergebnisse Bauteile mit Querkraftbewehrung	99
5.10.1	Messergebnisse	99
5.10.2	Rissbildung und Versagen	102
5.10.3	Photogrammetrie	104
5.10.4	Vergleich der Kraft-Verformungskurven	106
5.10.5	Traglasten und Vergleich mit Rechenwerten	108

5.10.6 Fazit	111
<b>6 Bemessungsmodell</b>	<b>112</b>
6.1 Bauteile ohne Querkraftbewehrung	112
6.2 Bauteile mit Querkraftbewehrung	114
6.3 Anwendung und Umsetzbarkeit der Erkenntnisse	122
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>133</b>
7.1 Zusammenfassung	133
7.2 Ausblick	135
<b>Literatur</b>	<b>xii</b>
<b>Anhang A Versuchsprotokolle Verdichtungsversuche</b>	<b>A-1</b>
<b>Anhang B Versuchsprotokolle Auszugversuche</b>	<b>B-1</b>
<b>Anhang C Versuchsprotokolle Großversuche</b>	<b>C-1</b>
<b>Anhang D Lebenslauf</b>	<b>D-1</b>



## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird das Querkrafttragverhalten vorgefertigter Wandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton (LAC) untersucht.

Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge gilt als gut wärmedämmend und ressourcenschonend, weshalb er bei Verwendung in Fassadenelementen weiter an Bedeutung gewinnt. Allerdings führen unzureichende Erkenntnisse zum Querkrafttragverhalten freitragender Wandbauteile ohne und mit Querkraftbewehrung zu normativen Einschränkungen in der konstruktiven Durchbildung und Herstellung der Fertigteile.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Bemessungsmodells für freitragende Wandelemente aus LAC, das mit geeigneten Bewehrungskonstruktionen sowohl die einwandfreie Herstellung im üblichen Walzverfahren ermöglicht als auch die Tragfähigkeit der Elemente sicherstellt.

Zunächst werden experimentelle Untersuchungen zur Verdichtung von Elementen aus haufwerksporigem Leichtbeton durchgeführt. Darauf aufbauend ermöglichen Auszugversuche mit einem modifizierten BeamEndTest eine Aussage über das Verbund- und Verankerungsverhalten von Bewehrungsstäben in LAC.

Mit den Ergebnissen der Auszugversuche werden Großversuche an Wandbauteilen konzipiert und durchgeführt, welche die Beurteilung der Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen ohne und mit Querkraftbewehrung erlauben. Aus den experimentellen Untersuchungen wird ein an den Eurocode 2 und *DIN EN 1520:2011-06* angelehnter Bemessungsvorschlag entwickelt, der unter anderem auch die Schubschlankheit der Elemente und die Verankerung der Querkraftbewehrung als Einflussparameter berücksichtigt.

Teile dieser Arbeit wurden im Forschungsvorhaben „Innovative Konstruktions- und Bemessungsregeln zur Optimierung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von freitragenden Wandplatten aus LAC“ erarbeitet. Dabei handelt es sich um ein Kooperationsprojekt zwischen der Technischen Universität Kaiserslautern (Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell), der Hochschule Koblenz (Prof. Dr.-Ing. Ralf Zeitler) und dem Bundesverband Leichtbeton e.V. (Dieter Heller). Das Projekt wurde gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.





## Abstract

In the present work, the shear load behavior of prefabricated wall elements made of lightweight aggregate concrete (LAC) was examined. Lightweight concrete with open structure is considered to be extremely thermally insulating and resource-saving, which is increasingly gaining in importance in its use as a facade element.

However, insufficient knowledge about the shear load behavior of prefabricated wall elements with and without shear reinforcement leads to normative restrictions in the structural design and manufacture of the precast elements.

The aim of this thesis is the development of an applicable design model for prefabricated wall elements made of LAC, which, with suitable reinforcement structures, ensures flawless production in the usual producing process and the load-bearing capacity of the elements.

First, experimental investigations were carried out concerning the compressive strength of elements made from lightweight aggregate concrete. Basing on this, pull-out tests with a modified BeamEndTest generated a statement about the bonding and anchoring effect of reinforcing bars in LAC.

With the results of the pull-out tests, large-scale tests on wall elements were designed and carried out, which allow the assessment of the shear load capacity of elements with and without shear reinforcement. From the experimental investigations, a design proposal based on Eurocode 2 and *DIN EN 1520:2011-06* could be developed, which also takes into account the geometry of the elements and the anchoring of the shear reinforcement as parameters.

Some parts of this work were elaborated in the research project "Innovative construction and design concept for optimizing the shear load capacity and torsional load capacity of wall elements made of LAC". It was a cooperation project between the Technical University of Kaiserslautern (Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell), the University of Koblenz (Prof. Dr.-Ing. Ralf Zeitler) and the federal Association of lightweight concrete „Bundesverband Leichtbeton e.V.“ (Dieter Heller). The project was promoted by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy.

## Bezeichnungen

Im Folgenden werden die in dieser Arbeit verwendeten Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes definiert.

### Abkürzungen

BET	Auszugversuch (modifizierter BeamEndTest)
BV	Dreipunktbiegeversuch
DMS	Dehnmessstreifen
LAC	Lightweight Aggregate Concrete
WA	Wegaufnehmer
w/z-Wert	Wasser/Zement-Wert

### Lateinisch (kleine Buchstaben)

a	[m]	Abstand von Lasteinleitung zur Auflagerachse
a <sub>sw</sub>	[cm <sup>2</sup> /m]	Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung bezogen auf den Abstand zueinander
b <sub>w</sub>	[m]	kleinste Querschnittsbreite innerhalb der Zugzone
c <sub>nom</sub>	[mm]	Betondeckung
d	[m]	statische Höhe
f <sub>c</sub>	[N/mm <sup>2</sup> ]	gemessene Betondruckfestigkeit im Versuch
f <sub>cd</sub>	[N/mm <sup>2</sup> ]	Bemessungswert der Betondruckfestigkeit
f <sub>ck</sub>	[N/mm <sup>2</sup> ]	charakteristischer Wert der Betondruckfestigkeit
f <sub>t,flk</sub>	[N/mm <sup>2</sup> ]	Biegezugfestigkeit
f <sub>t,k</sub>	[N/mm <sup>2</sup> ]	einachsige Zugfestigkeit
f <sub>ywd</sub>	[N/mm <sup>2</sup> ]	Bemessungswert der Streckgrenze der Querkraftbewehrung
f <sub>ywk</sub>	[N/mm <sup>2</sup> ]	charakteristischer Wert der Streckgrenze der Querkraftbewehrung
h	[m]	Bauteilhöhe
k	[-]	Maßstabsfaktor
l	[m]	Spannweite
l <sub>b</sub>	[mm]	Verankerungslänge
s <sub>max</sub>	[mm]	Schlupf bei maximal erreichter Kraft im Versuch
s <sub>w</sub>	[cm]	Abstand der Querkraftbewehrung zueinander
w	[mm]	Durchbiegung
x	[m]	Druckzonenhöhe
z	[m]	innerer Hebelarm

**Lateinisch (große Buchstaben)**

A	[cm <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche
A <sub>sl</sub>	[cm <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche der Biegebewehrung
A <sub>sw</sub>	[cm <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung
C <sub>Rd</sub>	[-]	Kalibrierfaktor für die Querkrafttragfähigkeit
C <sub>Rm</sub>	[-]	Kalibrierfaktor für die Querkrafttragfähigkeit auf Mittelwertniveau
E <sub>c</sub>	[N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul Beton
E <sub>s</sub>	[N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul Betonstahl
F	[kN]	einwirkende Kraft
F <sub>1</sub>	[kN]	Kraft nach 1 mm Verformung
F <sub>R</sub>	[kN]	rechnerische Traglast
F <sub>U</sub>	[kN]	erzielte Traglast im Bauteilversuch
G	[kN]	Belastung aus Eigengewicht
N <sub>Ed</sub>	[kN]	Bemessungswert der einwirkenden Längskraft
V	[kN]	Querkraft
V <sub>BPZ</sub>	[kN]	Querkraftanteil der Bruchprozesszone
V <sub>c</sub>	[kN]	Querkraftwiderstand eines Bauteils ohne Querkraftbewehrung
V <sub>Ed</sub>	[kN]	Bemessungswert der einwirkenden Querkraft
V <sub>Rd,1</sub>	[kN]	Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung für LAC
V <sub>Rd,2</sub>	[kN]	Tragfähigkeit der Betondruckstrebe für LAC
V <sub>Rd,3</sub>	[kN]	Querkrafttragfähigkeit mit Querkraftbewehrung für LAC
V <sub>Rd,cc</sub>	[kN]	Traganteil der Betons bei Bauteilen mit Querkraftbewehrung
V <sub>Rd,s</sub>	[kN]	Querkraftwiderstand begrenzt durch die Fließgrenze der Querkraftbewehrung
V <sub>Rd,max</sub>	[kN]	Querkraftwiderstand begrenzt durch Tragfähigkeit der Betondruckstrebe
V <sub>wd</sub>	[kN]	Traganteil der Querkraftbewehrung für LAC

**Symbole**

∅ <sub>Stab</sub>	[mm]	Stabdurchmesser Bewehrung
-------------------	------	---------------------------

**Griechisch (kleine Buchstaben)**

$\alpha$	[°]	Neigungswinkel der Querkraftbewehrung
$\alpha_s$	[-]	Verhältnis der E-Moduln von Bewehrung zu Beton
$\varepsilon_{cu}$	[‰]	Betonstauchung
$\gamma_c$	[-]	Teilsicherheitsbeiwert Beton
$\gamma_{mod}$	[-]	Modellsicherheit, Verhältnis Traglast im Versuch zu rechnerischer Traglast
$\gamma_s$	[-]	Teilsicherheitsbeiwert Betonstahl
$\eta_1$	[-]	Beiwert zur Berücksichtigung der Rohdichte von Leichtbeton
$\eta_2$	[-]	Beiwert zur Berücksichtigung der Rohdichte von Leichtbeton
$\lambda$	[-]	Schubschlankheit
$\nu_1$	[-]	Abminderungsfaktor für die Betondruckfestigkeit bei Schubrisen
$\theta$	[°]	Neigungswinkel der Druckstreben
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Trockenrohddichte Beton
$\rho_l$	[‰]	Längsbewehrungsgrad
$\rho_{l1}$	[‰]	Längsbewehrungsgrad LAC
$\sigma_1$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Hauptspannung
$\sigma_{1mm}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Stahlspannung nach 1 mm Schlupf
$\sigma_2$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Hauptspannung
$\sigma_{cp}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Betonlängsspannung in Höhe der Schwerachse
$\sigma_{max}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	maximale Stahlspannung
$\sigma_x$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Längsspannung im Querschnitt
$\tau$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Schubspannung im Querschnitt
$\tau_{Rd}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Bemessungswert der aufnehmbaren Schubspannung

**neue Bezeichnungen**

$a_l$	[-]	Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung der Schubschlankheit
$k_{LAC}$	[-]	Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung der Druckfestigkeit
$b_k$	[m]	Dicke des Dämmkerns
$V_{Rd,c}$	[kN]	Betontraganteil zur Querkrafttragfähigkeit
$V_{Rd,s}$	[kN]	Stahltraganteil zur Querkrafttragfähigkeit
$V_{Rd,c+s}$	[kN]	Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen mit Querkraftbewehrung

# 1 Motivation

## 1.1 Problemstellung

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 steigenden bauphysikalischen Anforderungen des Gebäudeenergiegesetzes gewinnen sie weiter an Bedeutung.

Unzureichende Erkenntnisse zum Querkrafttragverhalten freitragender Wandbauteile aus LAC führen zu normativen Einschränkungen, die den Herstellungsprozess und die konstruktive Durchbildung der Fertigteile erschweren.

Haufwerksporiger Leichtbeton kann aufgrund seiner trockenen Frischbetonkonsistenz nicht wie Normalbeton mit Innenrüttlern verdichtet werden. Daher wird ausschließlich mit Außenrüttlern verdichtet, wobei hauptsächlich das Walzverfahren zum Einsatz kommt. Mit der nachfolgenden Abbildung 1-1 kann ein Eindruck zum Frischbetonverhalten von LAC gewonnen werden.



Abbildung 1-1: Unverdichteter haufwerksporiger Leichtbeton im Herstellungsprozess

Zur Sicherstellung der Querkrafttragfähigkeit von freitragenden Wandelementen ist nach *DIN 4213:2015-10* ein geschlossener Bügelkorb vorgeschrieben. Das bewährte Verfahren zur Verdichtung der Wandelemente mit einer Rüttelwalze darf für freitragende Bauteile in Deutschland nicht angewendet werden. Begründet wird die Einschränkung mit Verdichtungsfehlern, die unterhalb der vorgeschriebenen geschlossenen Bügelkörbe im Gefüge des Leichtbetons hervorgerufen werden können, wenn mit Rüttelwalze verdichtet wird. Die Verdichtung muss demnach mit einem Handrüttler und einem Spezialaufsatz erfolgen, was mit einem hohen Zeit- und Personalaufwand verbunden ist.

### 1.2 Zielsetzung

Neue Erkenntnisse zum Querkrafttragverhalten von Wandbauteilen aus LAC sollen die einwandfreie Herstellung im Walzverfahren ermöglichen und gleichzeitig die Tragfähigkeit der Elemente sicherstellen. Das Ziel dieser Arbeit ist ein einheitliches Bemessungsmodell in Verbindung mit umsetzbaren Anwendungs- und Konstruktionsregeln. Dabei soll unter anderem die Verankerung und die Konstruktion der Bewehrung berücksichtigt werden.

### 1.3 Methodik und Gliederung der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit werden zunächst Untersuchungen zur Verdichtung von Elementen aus LAC durchgeführt. Durch die spezielle Art der Verdichtung mittels Rüttelwalze oder Handrüttler ergeben sich im Gefüge des Bauteils Unterschiede in der Rohdichte. Um die Auswirkungen der Herstellungsart auf das Gefüge und die Rohdichte in verschiedenen Höhenlagen im Bauteil zu untersuchen, werden Versuche an Bohrkernen durchgeführt. Die Bohrkernkerne werden aus vorgefertigten Elementen entnommen, in Scheiben geschnitten und in einem 3D-Digitalmikroskop auf Poren- und Hohlräume vermessen. In der optischen Messung können starke Unterschiede zwischen der unteren Schal- und der oberen Walzseite festgestellt werden. Durch den stark schwankenden Hohlraumgehalt kann auch auf Unterschiede im Verankerungsverhalten von Bewehrung in LAC geschlossen werden.

Da das Verbund- und Verankerungsverhalten der Bewehrung für die Tragfähigkeit eines Bauteils von besonderer Bedeutung ist, werden Versuche durchgeführt, die eine Aussage zur Verankerungstragfähigkeit von Bewehrung in haufwerksporigem Leichtbeton ermöglichen. In einem speziell entwickelten Stahlrahmen werden Bauteile eingespannt und ein herausragender Bewehrungsstab auf Zug beansprucht. Der Stahlrahmen ist dabei so konzipiert, dass der Verankerungsbereich der Bewehrung ungestört bleibt, sodass der Bewehrungsstab keine Querdrukbeanspruchung erfährt. Bei den Versuchen wird jeweils unterschieden, ob die Bewehrung im Herstellungsprozess an der Schal- oder Walzseite lag. Das Prüfprogramm sieht verschiedene Verankerungsvarianten vor. Eine besonders gute Verankerungstragfähigkeit kann bei Stäben mit Endhaken mit angeschweißtem Querstab oder Stäben mit geradem Stabende und angeschweißten Querstäben erzielt werden. Da in keinem Versuch die Fließgrenze der Bewehrung erreicht werden kann, wird eine maximal aufnehmbare Stahlspannung bestimmt.

Mit den Erkenntnissen der Auszugversuche werden Großversuche an Wandbauteilen konzipiert, die die Beurteilung der Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen ohne und mit Querkraftbewehrung ermöglichen. Das Querkrafttragverhalten von Bauteilen aus LAC ist maßgeblich von der Verankerung der Längs- und Querkraftbewehrung abhängig. Daher sind die Verankerungskonstruktionen der Bewehrung bei den durchgeführten Untersuchungen von besonderem Interesse. Versuche aus *Leonhardt und Mönning 1984* haben gezeigt, dass die ungünstigste Lastanordnung für Balken ohne Querkraftbewehrung die Belastung durch eine Einzellast darstellt. Der Versuchsaufbau entspricht daher einem Dreipunktbiegeversuch. Dazu werden Versuche mit

verschiedenen Bauteilgeometrien, Bewehrungsgraden und Bewehrungskonstruktionen durchgeführt.

Erste Versuche an Bauteilen ohne Querkraftbewehrung liefern Erkenntnissen zum Betontraganteil der Querkrafttragfähigkeit. Aus den Auszugversuchen ist bekannt, dass nicht von einer vollen Verankerung der Bewehrung ausgegangen werden kann. Demnach ist bei den Versuchen ohne Querkraftbewehrung die Verankerung der Längsbewehrung von besonderer Bedeutung. Der Einfluss der Verankerung wird festgestellt, indem Versuche mit Verankerung mittels Endhaken und Versuche mit einer zusätzlich angebrachten Kopfplatte an der Längsbewehrung durchgeführt werden. Die Variante mit Kopfplatte stellt dabei die volle Verankerung der Längsbewehrung dar. Da Wandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton häufig mit integrierten Dämmkernen hergestellt werden, wird zusätzlich der Einfluss der Dämmung überprüft, indem eine Variante ohne Dämmkerne untersucht wird. Der Längsbewehrungsgrad hat bei Bauteilen ohne Querkraftbewehrung einen großen Einfluss auf die Querkrafttragfähigkeit. Die Längsbewehrung kann sowohl zu einer Vergrößerung der ungerissenen Druckzone beitragen, als auch eine Verdübelung der Rissufer begünstigen (Hegger und Görtz 2002). Nach Hegger und Görtz 2002 ist daher ein Schubversagen von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung grundsätzlich an den Längsbewehrungsgrad gekoppelt. Eine Variante mit reduzierter Längsbewehrung ermöglicht Erkenntnisse zum Einfluss des Längsbewehrungsgrades. In Anlehnung an praxisübliche Bewehrungsmengen wird für die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche der Längsbewehrungsgrad variiert (2 ‰, 3 ‰ und 4 ‰). Die Längsbewehrung wird mit 3 Ø 10 mm, 4 Ø 10 mm und 6 Ø 10 mm ausgeführt, wobei letztere für eine Bauteilbreite von 25 cm dem praxisüblichen Maximum entspricht.

In Versuchen an Bauteilen mit Querkraftbewehrung werden unterschiedliche Querkraftbewehrungskonstruktionen getestet. Unter anderem werden der nach *DIN 4213:2015-10* vorgeschriebene geschlossene Bügelkorb und die europäische Variante der Schubleiter nach *DIN EN 1520:2011-06* untersucht. Darüber hinaus wird eine Variante mit Einzelstäben und Endhaken auf ihre Querkrafttragfähigkeit geprüft. Bei dieser Variante werden die Bewehrungsstäbe einzeln in das Bauteil gelegt und nur mit Endhaken verankert.

Neben verschiedenen Querkraftbewehrungsvarianten wird auch der Einfluss der Schubschlankheit untersucht. In Leonhardt und Mönning 1984 und Keller 2005 konnte ein Einfluss der Schubschlankheit festgestellt werden. Nach Leonhardt und Mönning 1984 erwies sich in Versuchen eine Schubschlankheit zwischen 2,5 und 3,5 als ungünstigstes Momenten-Querkraft-Verhältnis für einen Schubbruch bei Balken ohne Querkraftbewehrung. In den Versuchen dieser Arbeit wird die Schubschlankheit in Anlehnung an das Schubtal von Kani (Kani 1964) und den Erkenntnissen von Leonhardt und Mönning 1984 und Keller 2005 zwischen  $\lambda = 2,1$  und  $\lambda = 3,0$  variiert, um den Einfluss der Schubschlankheit zu untersuchen

Neben den Erkenntnissen zum Betontraganteil aus den Versuchen an Bauteilen ohne Querkraftbewehrung, liefern die Untersuchungen an Wandelementen mit Querkraftbewehrung Aussagen über den Anteil der Querkraftbewehrung an der Querkrafttragfähigkeit. Der Einfluss der Querkraftbewehrung ist besonders von deren Konstruktion und Verankerung abhängig.

1 Motivation

Aus den experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit wird ein Bemessungskonzept abgeleitet, das aus einem Betontraganteil und einem Stahltraganteil besteht. Der Stahltraganteil wird dabei mit Hilfe der reduzierten Stahlspannungen aus den Auszugversuchen bestimmt.

In der nachfolgenden Abbildung 1-2 wird eine schematische Darstellung der Methodik dieser Arbeit gezeigt.

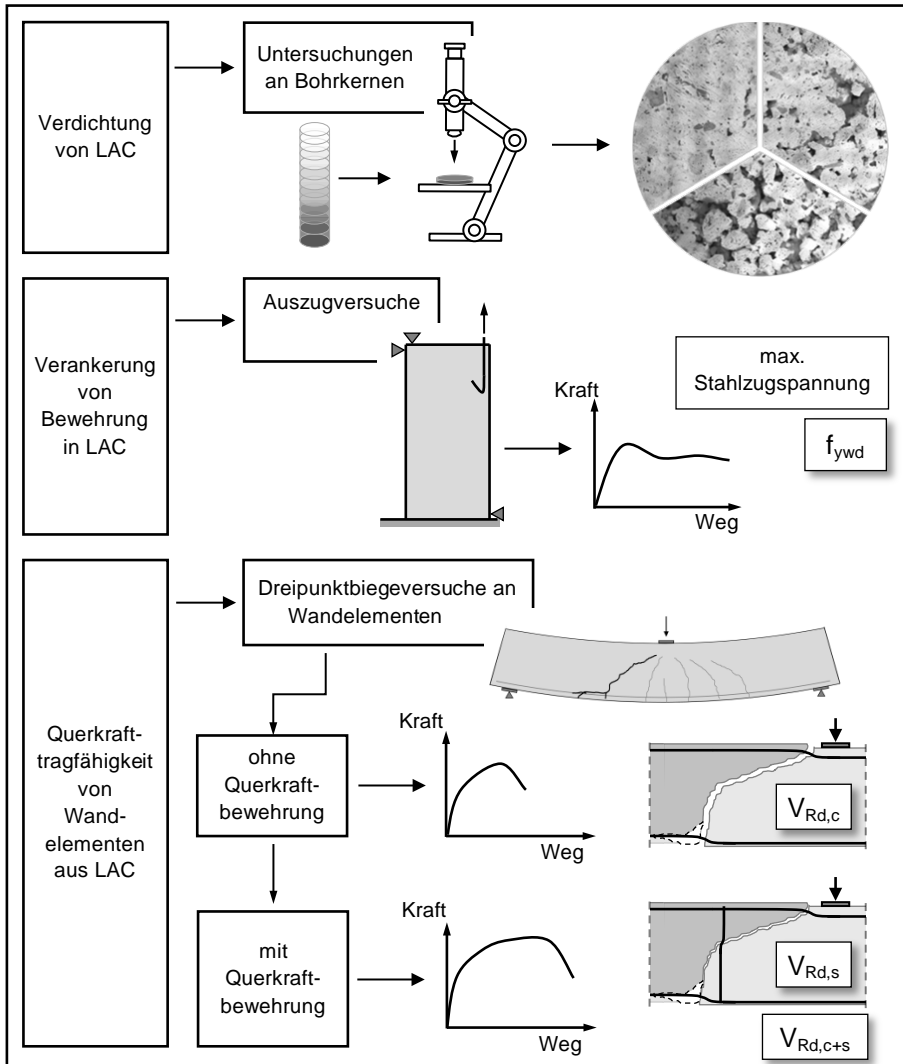


Abbildung 1-2: Schematische Darstellung der Methodik



## 2 Stand der Forschung

### 2.1 Haufwerksporiger Leichtbeton

Beton wird nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* in Normal- und Leichtbeton unterschieden. Dabei gelten Betone mit einer Trockenrohichte  $\rho \leq 2200 \text{ kg/m}^3$  als Leichtbeton.

Normalbeton  $\rho > 2200 \text{ kg/m}^3$

Leichtbeton  $\rho \leq 2200 \text{ kg/m}^3$

Leichtbetone zeichnen sich durch ihr geringes Eigengewicht aus, das hauptsächlich durch leichte Zuschläge und Hohlräume bzw. Luftporen im Zementleim erzeugt wird. Verglichen mit Normalbeton mit schwerer Gesteinskörnung und dichtem Zementleim wird Leichtbeton in verschiedene Kategorien in Abhängigkeit von der Art der Zuschläge und der Beschaffenheit des Gefüges eingeteilt.

Grundsätzlich lassen sich Leichtbetone wie folgt kategorisieren:

- Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge (gefügedichter Leichtbeton)
- Porenleichtbeton (Schaumbeton)
- Porenbeton (dampfgehärtet)
- Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge (haufwerksporiger Leichtbeton)

#### 2.1.1 Normen

Während Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* bemessen wird, gelten für haufwerksporigen Leichtbeton gesonderte Regelwerke. Die ersten Normen zu haufwerksporigem Leichtbeton *DIN 4028:1982-01* und *DIN 4232:1987-09* waren nach dem globalen Sicherheitskonzept aufgebaut (*Schwing 2006*). Während *DIN 4028:1982-01* bewehrte Dach- und Deckenplatten und ausfachende Wandtafeln regelte, beinhaltet *DIN 4232:1987-09* nur unbewehrte Wandelemente aus geschosshohen, großformatigen Fertigteilen aus haufwerksporigem Leichtbeton. Um neue Möglichkeiten der Anwendung von haufwerksporigem Leichtbeton zu eröffnen und ein neues Sicherheitskonzept zu etablieren, wurden die alten Vorschriften durch neue Normen ersetzt (*Schwing 2006*).

Heute gilt die europäische Produktnorm *DIN EN 1520:2011-06* in Verbindung mit der deutschen Anwendungsnorm *DIN 4213:2015-10*. Die *DIN EN 1520:2011-06* befasst sich mit vorgefertigten Bauteilen aus haufwerksporigem Leichtbeton und bestimmt die Eigenschaften des Materials sowie wesentliche Anforderungen an die Herstellung und an die Bemessung. Sie regelt jedoch nicht umfassend die Bemessung und bauliche Durchbildung von Bauwerken. Dies wird in Deutschland durch die ergänzende nationale Anwendungsnorm *DIN 4213:2015-10* geregelt (*Thienel 2014*).

Zusätzlich gelten die Technischen Regeln *DIBt:2005-03* für vorgefertigte, bewehrte, tragende Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton, die zum Teil bereits in *DIN EN 1520:2011-06* aufgenommen sind. Zum besseren Verständnis der technischen Regeln wurden zusätzlich Erläuterungen von *Roeser und Wittig 2004* veröffentlicht. Die neuen Normen bauen entsprechend den Eurocodes auf dem Teilsicherheitskonzept auf (*Schwing 2006*).

### 2.1.2 Charakteristik von haufwerksporigem Leichtbeton

Während bei den gefügedichten Leichtbetonen nur die schwere Gesteinskörnung durch leichte Zuschläge ersetzt und das Gefüge mit Sanden und Zementleim geschlossen wird, ist für den haufwerksporigen Leichtbeton (LAC - Lightweight Aggregate Concrete) ein offenes Gefüge mit größeren Hohlräumen charakteristisch. Diese 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 verbinden.

Somit verbleiben auch nach dem Verdichten gezielt Hohlräume im Gefüge des haufwerksporigen Leichtbetons. Die nachfolgende Abbildung 2-1 zeigt schematisch die punktweise Verbindung der Gesteinskörnung. Abbildung 2-2 ist eine Mikroskopaufnahme einer Bohrkernuntersuchung an LAC.

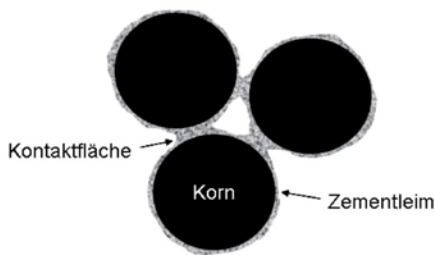


Abbildung 2-1: Punktuelle Kontaktflächen zwischen Gesteinskörnern im haufwerksporigen Leichtbeton (Thienel 2015)

Abbildung 2-2: Gefüge haufwerksporiger Leichtbeton

Bei haufwerksporigem Leichtbeton kommen sowohl natürliche, leichte Gesteinskörnungen (z. B.: gebrochene Schaumlava, Bims), als auch industriell gefertigte Gesteinskörnungen (z. B.: Blähton, Blähschiefer) zum Einsatz. Vorzugsweise wird gebrochenes Material verwendet, da es sich besser verzahnt und somit zu einer höheren Festigkeit führt (Grübl und Karl et al 2001, Thienel 2015).

Der Wasser-Zement-Wert von haufwerksporigem Leichtbeton kann nur in engen Grenzen gewählt werden. Ist der Zementleim zu trocken, wird die Gesteinskörnung nicht ausreichend umhüllt und die Körnung ist nicht miteinander verbunden. Ist der w/z-Wert zu hoch, der Beton entsprechend zu nass, tropft der Zementleim ab und verstopft tiefer liegende Hohlräume. Dabei muss auch auf die unterschiedliche Wasseraufnahme der Gesteinskörnungen geachtet werden. Damit der Zementleim möglichst dickflüssig ist, wird in der Praxis der w/z-Wert zwischen 0,35 und 0,4 eingestellt (Sagmeister 1999). Entscheidend für die Druckfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons ist weniger der w/z-Wert, sondern vielmehr das gleichmäßige Umhüllen und Verbinden der Gesteinskörnung (Thienel 2015).

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 speziellen Verdichtungstechniken 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 2-3). Alternativ dazu besteht für Sonderfälle die Möglichkeit der Verdichtung von Hand, wobei mit einem Handrüttler und einem Spezialaufsatz verdichtet wird (Abbildung 2-4).

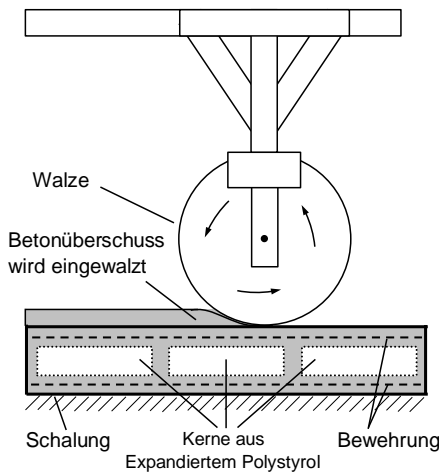


Abbildung 2-3: Verdichtung von Bauteilen aus LAC mit Walze

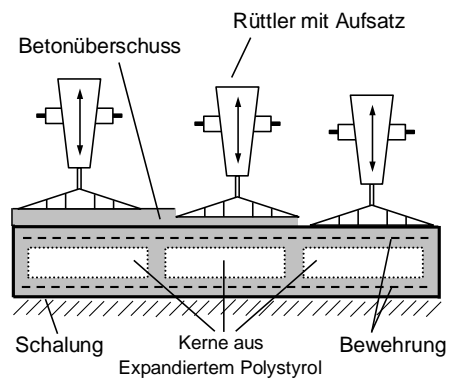


Abbildung 2-4: Verdichtung von Bauteilen aus LAC mit Handrüttler und Spezialaufsatz

Bei den genannten Herstellungsverfahren entsteht eine offene Oberflächenstruktur, die sich auf der Schal- und auf der Walzseite unterscheidet. Die untenliegende Schalseite ist durch den Schaltisch vergleichsweise glatt. Die obenliegende Walzseite ist rauer und wird meist noch im Walzvorgang verputzt, sodass sich der Putz mit der offenen Struktur verbindet.

Bei der Herstellung von Bauteilen aus LAC ist eine gezielte Verdichtung auf ein definiertes Maß erforderlich, um zwischen Festigkeit (hohes Verdichtungsmaß) und geringer Rohdichte (geringes Verdichtungsmaß) den richtigen Kompromiss zu finden (Sagmeister 1999). 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 (Thienel 2015).

### 2.1.3 Tragverhalten

#### Normalbeton und Leichtbeton

Im Beton verlaufen Druckspannungen über die jeweils steiferen Komponenten aus Zuschlag, Zementstein und Kontaktzonen. Das Tragverhalten von Beton hängt dabei von den Festigkeiten bzw. von den Steifigkeitsverhältnissen der Einzelkomponenten ab (*Leufgens 2010*). Der Kraftfluss im Leichtbeton unterscheidet sich grundsätzlich von demjenigen im Normalbeton (*Leonhardt und Mönning 1984*). Bei normalfestem Beton versagt, bedingt durch den hohen E-Modul der dichten Zuschläge, immer die Zementmatrix, deren mechanischen Eigenschaften wesentlich durch den w/z-Wert bestimmt werden (*Sagmeister 1999*). Im Leichtbeton versagen vornehmlich die leichten Zuschlagskörner. Im Folgenden werden Trajektorienbilder der Hauptspannungen für Normal- und gefügedichten Leichtbeton dargestellt (Abbildung 2-5, Abbildung 2-6).

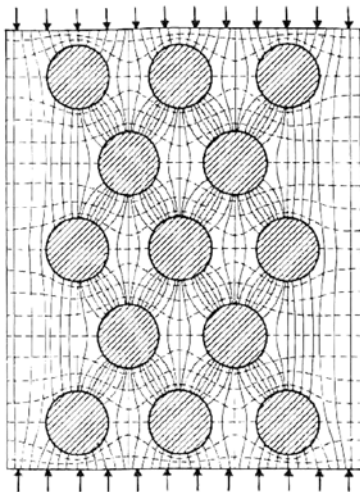


Abbildung 2-5: Trajektorienbild Normalbeton  
(*Wischers und Lusche 1972*)

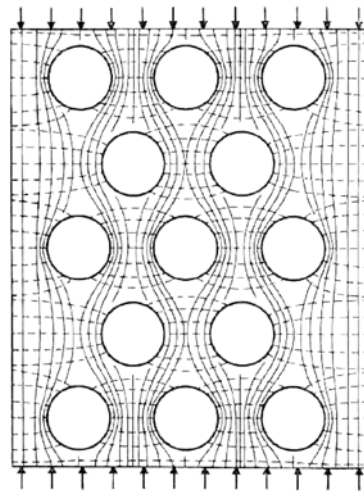


Abbildung 2-6: Trajektorienbild Leichtbeton  
(*Wischers und Lusche 1972*)

In Abbildung 2-5 wird deutlich, dass der Kraftfluss bei Normalbeton von Korn zu Korn verläuft, wohingegen bei Leichtbeton die Druckspannungen an der leichten Gesteinskörnung vorbei gelenkt und über den vergleichsweise steifen Zementstein abgetragen werden (Abbildung 2-6). Die Krümmung der Drucktrajektorien über und unter den Zuschlagskörnern führt bei Leichtbeton zu Querkzug im Zementstein. Daher hängt die Festigkeit des Leichtbetons wesentlich von der Zementsteinfestigkeit und der Struktur des Zementsteins ab. Außerdem sind die Kornform, die Kornverteilung und der Kornabstand von großer Bedeutung für die Festigkeit des Leichtbetons (*Leonhardt und Mönning 1984*).

Neben Zementstein und Zuschlag können auch die Kontaktzonen zwischen Gesteinskörnung und Zementstein das Tragverhalten beeinflussen und das Versagen herbeiführen. Da sich bei Normalbeton ein Wasserfilm um die schweren Zuschläge

bildet und so für eine verringerte Haftung zwischen Zementleim und Korn führt, entstehen Risse im Normalbeton meist um die Gesteinskörnung herum. Dahingegen führen porige Zuschläge im Leichtbeton zu einer Speicherung des überschüssigen Wassers in den offenporigen Zuschlägen. Dieses aufgesogene Wasser steht für den fortschreitenden Hydratationsprozess des Zementsteins wieder zur Verfügung und wird allgemein als innere Nachbehandlung bezeichnet (Faust 2003, Thienel 2006, Leufgens 2010). Zusätzlich führen bei Leichtbetonen die hohe Oberflächenporosität und die Rauigkeit der Gesteinskörnung zu einem verbesserten Verbund und einer verbesserten mechanischen Verzahnung zwischen Zementmatrix und Leichtzuschlag (Leufgens 2010).

### Haufwerksporiger Leichtbeton

Bei haufwerksporigem Leichtbeton entsteht kein geschlossenes Zementleimgefüge, sondern es bilden sich lediglich dünne Stege aus Zementstein, die die Gesteinskörnung punktwise verkitten. Nach Sagmeister 1999 werden drei Versagensmechanismen unterschieden, die in Abbildung 2-7 schematisch dargestellt sind.

- Kornbruch
- Haftungsversagen in der Kontaktzone
- Zugversagen im Zementleim

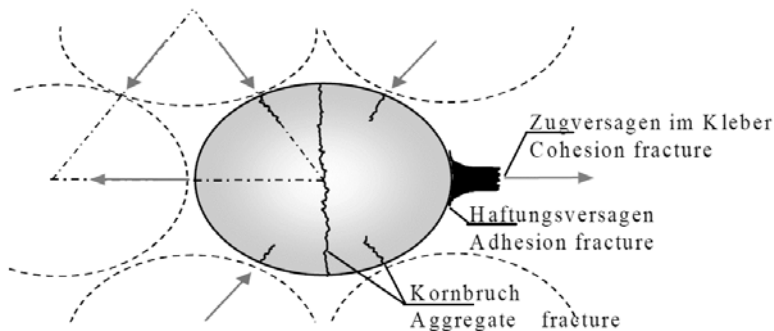


Abbildung 2-7: Versagensmechanismen in haufwerksporigem Leichtbeton (Sagmeister 1999)

Durch eine Anpassung des Gefügebauaufbaus kann die Festigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons maßgeblich beeinflusst werden. Nach Sagmeister 1999 führt die Erhöhung der Zementleimmenge und das Einbringen von Stützkorn zu einer gleichmäßigeren Verteilung der Spannungen auf das einzelne Korn, was zu einer geringeren Spaltzugbeanspruchung führt. Außerdem wird die Haftfläche am Korn und zwischen den Körnern größer, sodass sich Zugkräfte besser verteilen können und die dünnen Zementstege weniger stark belastet werden. Die Festigkeit des LAC kann bei annähernd gleichbleibendem Zementanteil durch die Anpassung der Kornverteilung gesteuert werden. Je mehr Haufwerksporen mit Zementleim und Stützkorn geschlossen werden, desto größer wird die Festigkeit und desto geringer werden die Wärmedämmeigenschaften. Der Übergang vom haufwerksporigen zum gefügedichten Leichtbeton ist dabei fließend (Sagmeister 1999). Dieser Zusammenhang wird in der nachfolgenden Abbildung 2-8 dargestellt.

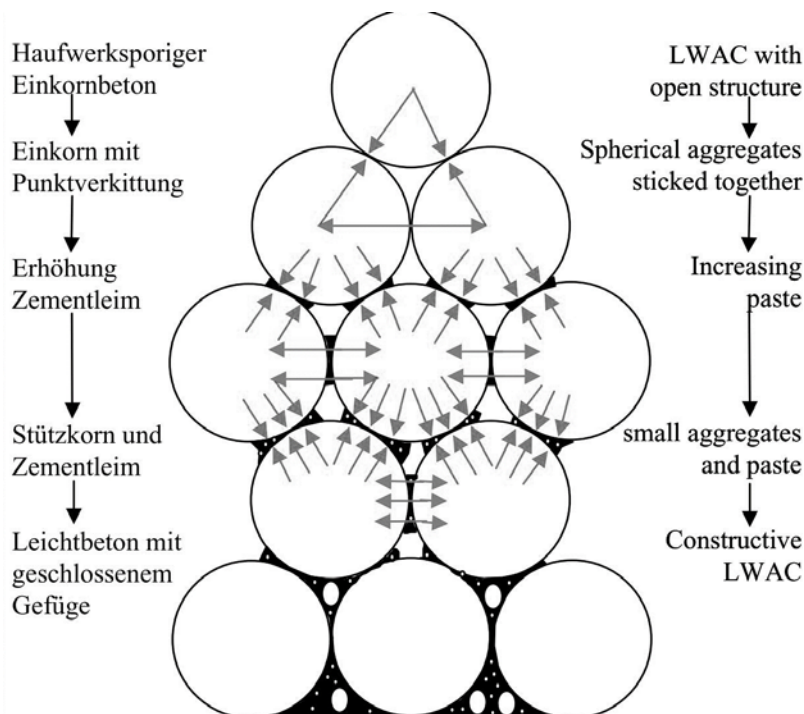


Abbildung 2-8: Einfluss des Gefügebau auf die Lastabtragung (Sagmeister 1999)

Das Tragverhalten von haufwerksporigem Leichtbeton unter Zug-, Biegezug- und Druckbeanspruchung wird nach *Leufgens 2010* von den Festigkeits- und Steifigkeitsverhältnissen der Einzelkomponenten Zuschlag und Zementstein bestimmt. Die Zugfestigkeit haufwerksporiger Leichtbetone hängt allerdings auch von den ausgebildeten dünnen Stegen aus Zementleim und deren Anzahl im Gefüge zwischen den Zuschlägen zur punktuellen Übertragung der Zugkräfte ab (*Leufgens 2010*).

#### 2.1.4 Baustoffkennwerte

Die im Folgenden dargestellten Baustoffkennwerte für haufwerksporigen Leichtbeton sind aus der europäischen Produktnorm *DIN EN 1520:2011-06* entnommen und mit den nationalen Regelungen der Anwendungsnorm *DIN 4213:2015-10* ergänzt. Zusätzlich wird auf verschiedene Veröffentlichungen und Gutachten (*Roeser 2008*, *Roeser 2013a*, *Roeser 2013b*, *DIBt:2005-03*) verwiesen.

Explizit aufgeführt werden Rohdichte, Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, einachsige Zugfestigkeit, Spannungsdehnungs-Zusammenhang und E-Modul.

Weitere Materialeigenschaften von haufwerksporigem Leichtbeton (z. B. Querdehnzahl, Wärmedehnzahl, Trocknungsschwindmaß, Kriechbeiwert, Wärmeleitzahl etc.) werden nicht gesondert aufgeführt, da sie nicht der Lösung der Fragestellung dienen. Die Rechenwerte für diese Materialeigenschaften können der europäischen Produktnorm *DIN EN 1520:2011-06* entnommen werden.

## Rohdichte

Nach *DIN EN 1520:2011-06* kann die Trockenrohddichte für LAC entweder als deklarierter Mittelwert oder als deklarierte Rohdichteklasse angegeben werden. Die Trockenrohddichte muss nach *DIN EN 992:1995-09* an Bohrkernen, Prismen oder Würfeln, die aus einem Element entnommen sind, ermittelt werden.

Tabelle 2-1: Grenzabweichungen der mittleren Trockenrohddichte für LAC vom deklarierten Mittelwert in [kg/m<sup>3</sup>] (Tabelle 1 aus *DIN EN 1520:2011-06*)

Deklarierte mittlere Trockenrohddichte	≤ 1 000	> 1 000
Größte Abweichung des tatsächlichen Mittelwerts einer Probe vom deklarierten Mittelwert	50	100
Größte Abweichung der Einzelwerte einer Probe vom deklarierten Mittelwert	100	150

Tabelle 2-2: Rohdichteklassen von LAC (Tabelle 2 aus *DIN EN 1520:2011-06*)

Rohdichteklasse	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Mittlere Trockenrohddichte	≥ 400	> 500	> 600	> 700	> 800	> 900	> 1 000	> 1 200	> 1 400	> 1 600	> 1 800
kg/m <sup>3</sup>	≤ 500	≤ 600	≤ 700	≤ 800	≤ 900	≤ 1 000	≤ 1 200	≤ 1 400	≤ 1 600	≤ 1 800	≤ 2 000

## Druckfestigkeit

Nach *DIN EN 1520:2011-06* wird die Druckfestigkeit von LAC entweder als deklarierte charakteristische Druckfestigkeit oder als deklarierte Festigkeitsklasse angegeben.

Die Druckfestigkeit muss nach *DIN EN 1354:2005-09* an aus vorgefertigten Elementen entnommenen Bohrkernen oder Würfeln bestimmt werden. Dabei muss der Durchmesser des Bohrkerns seiner Länge entsprechen. Für Würfel und Bohrkern gilt die Mindestabmessung von 100 mm.

Nach *Thienel 2005* sieht die europäische Norm *DIN EN 1520:2011-06* Abminderungs- und Umrechnungsfaktoren vor, die die nachfolgenden Einflüsse berücksichtigen:

- kleinere Probekörpergröße
- Unterschied zwischen Proben, die aus einem Bauteil entnommen sind und separat hergestellter Probekörper ( $f_{\text{Bauteilprobe}} = 0,85 \cdot f_{\text{separater Probekörper}}$ )
- bei separat hergestellten Proben: abweichende Probengeometrie und die charakteristische Festigkeit für Zylinder

Für die Bemessung sind in Deutschland laut Anwendungsnorm *DIN 4213:2015-10* lediglich die deklarierten Festigkeitsklassen der nachfolgenden Tabelle 2-3 zulässig.

Tabelle 2-3: Festigkeitsklassen und Festigkeitsanforderungen für LAC in [MPa] (Tabelle 7 aus DIN EN 1520:2011-06)

Festigkeitsklasse	LAC 2	LAC 4	LAC 6	LAC 8	LAC 10	LAC 12	LAC 15	LAC 20	LAC 25
$f_{ck}$	2	4	6	8	10	12	15	20	25
$f_{c,3}^a$	≥ 4	≥ 7	≥ 9	≥ 11	≥ 13	≥ 15	≥ 18	≥ 24	≥ 29
$f_{c,n}^b$	≥ $f_{ck} + K_n \cdot s_n^d$								
$f_{cmin}^c$ für $n < 6$	≥ 1,5	≥ 3,5	≥ 5,5	≥ 7,0	≥ 9,0	≥ 11	≥ 14	≥ 19	≥ 24
$f_{cmin}^c$ für $6 \leq n \leq 9$	≥ 1,5	≥ 3,0	≥ 4,5	≥ 6,0	≥ 7,5	≥ 9,0	≥ 12	≥ 17	≥ 22
$f_{cmin}^c$ für $n \geq 10$	≥ 1,5	≥ 3,0	≥ 4,0	≥ 5,5	≥ 7,0	≥ 8,0	≥ 11	≥ 16	≥ 21
<p>a Geforderte mittlere Druckfestigkeit jeder Prüferie von drei aufeinander folgenden Probekörpern.</p> <p>b Geforderte mittlere Druckfestigkeit einer Prüferie mit <math>n \geq 6</math> Probekörpern. Die von der Anzahl <math>n</math> der Probekörper abhängigen <math>K_n</math>-Werte sind aus Tabelle 4 zu entnehmen.</p> <p>c Kleinster Einzelwert der Druckfestigkeit einer Prüferie von <math>n</math> Probekörpern.</p> <p>d <math>s_n</math> ist die Standardabweichung der Druckfestigkeit einer Prüferie mit <math>n</math> Prüfergebnissen.</p>									

### Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit  $f_{t,flk}$  für LAC darf nach DIN EN 1520:2011-06 aus der Druckfestigkeit und der Rohdichte wie folgt abgeschätzt werden.

$$f_{t,flk} = 0,42 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \cdot \eta_1 \quad (2.1)$$

mit:  $\eta_1 = 0,40 + 0,60 \cdot \rho/2200$  (2.2)

$\rho$  Trockenrohddichte

Während nach DIN EN 1520:2011-06 für Rohdichten kleiner 1400 kg/m<sup>3</sup> der Beiwert  $\eta_1$  auf 0,78 begrenzt wird, gilt nach DIN 4213:2015-10 die Gleichung (2.2) für alle Rohdichten. Diese Änderung erfolgte durch die Mitteilung des DIBt:2005-03. Alternativ ist die Bestimmung der Biegezugfestigkeit von LAC anhand von Prüfungen nach DIN EN 1521:1996-12 zulässig.

### Einachsige Zugfestigkeit

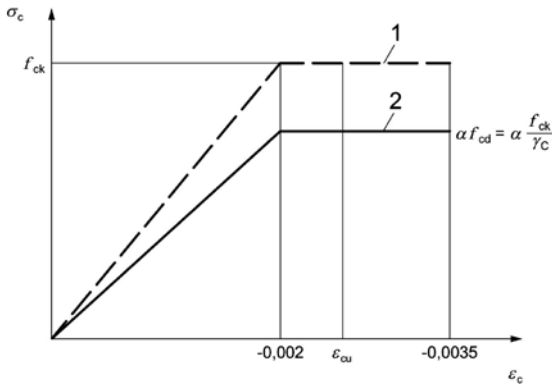
Die einachsige Zugfestigkeit  $f_{t,k}$  von LAC darf nach DIN EN 1520:2011-06 aus der Druckfestigkeit wie folgt abgeschätzt werden.

$$f_{t,k} = 0,1 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (2.3)$$

In Versuchen von Thienel 2013 konnte der nach Gleichung (2.3) festgelegte Ansatz bestätigt werden.



## Spannungsdehnungsdiagramm

Abbildung 2-9: Spannungsdehnungsdiagramm für LAC (Bild A.1 aus *DIN EN 1520:2011-06*)

Das idealisierte Spannungsdehnungsdiagramm für LAC besteht aus einem linearen Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bis zu einer Stauchung  $\epsilon_c$  von 0,002 bei einer Spannungshöhe, die dem Bemessungswert der Festigkeit entspricht. Die Spannungsdehnungslinie setzt sich bei einer konstanten Spannungsdehnungshöhe fort, bis der Höchstwert der Stauchung  $\epsilon_{cu}$  erreicht ist.

$$\epsilon_{cu} = 0,0035 \cdot \eta_1 \geq 0,002 \quad (2.4)$$

$$\text{mit: } \eta_1 = 0,40 + 0,60 \cdot \rho / 2200 \quad (2.2)$$

In Übereinstimmung mit DIN 1045-1 und *DIN EN 1992-1-1:2011-01* wird vom Ebenbleiben der Querschnitte, dem vollkommenen Verbund zwischen Beton und Bewehrung und der Vernachlässigung der Betonzugfestigkeit ausgegangen (*Hegger und Roeser 2004*).

**E-Modul**

Der Elastizitätsmodul von LAC darf nach *DIN EN 1520:2011-06* aus der Druckfestigkeit und der Rohdichte abgeschätzt werden.

$$E_{cm} = 10\,000 \cdot f_{ck}^{\frac{1}{3}} \cdot \eta_2 \quad (2.5)$$

$$\text{mit: } \eta_2 = (\rho / 2200)^2 \quad \text{für } \rho > 1400 \text{ kg/m}^3 \quad (2.6)$$

$$\eta_2 = 0,64 \cdot \rho / 2200 \quad \text{für } \rho \leq 1400 \text{ kg/m}^3 \quad (2.7)$$

Der Elastizitätsmodul von LAC kann nach *DIN EN 1352:1997-02* auch experimentell ermittelt werden.

### 2.1.5 Grundlagen der Bemessung

Die aktuell gültigen Normen für Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton bauen auf dem Teilsicherheitskonzept entsprechend den 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*. Auf der Widerstandsseite gelten die europäische Produktnorm *DIN EN 1520:2011-06*, die deutsche Anwendungsnorm *DIN 4213:2015-10* und die technischen Regeln *DIBt:2005-03*. 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 (*DIN 4213:2015-10*).

### 2.1.6 Wandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton

Haufwerksporige Leichtbetone mit leichten Zuschlägen werden wegen ihrer guten Wärmedämmeigenschaften und dem geringen Eigengewicht in großem Umfang für Mauersteine und vorgefertigte Dach-, Decken- und Wandelemente mit tragender oder nichttragender Funktion eingesetzt (*Grübl und Karl et al 2001, Thienel 2015*). 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, das Gewicht der darüber liegenden Wandelemente und geringfügige weitere Lasten (Dachlasten ggfs. mit Exzentrizität und Windlasten) durch Druckkontakt nach unten bis zur Gründung weiter. Neben ständigen Einwirkungen aus dem Eigengewicht sind nach *DIN EN 1520:2011-06* auch Wind- und Schneelasten sowie thermische Einwirkungen zu berücksichtigen. Das statische System entspricht einem Einfeld- oder Durchlaufträger. Es handelt sich nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* um einen balkenartigen Träger und nicht um ein wandartiges Bauteil, da die Stützweite mehr als das Dreifache der Höhe beträgt.

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 Elemente abgetragen werden. Durch die meist lineare Belastung entsteht eine Biege- und Querkraftbeanspruchung der Bauteile. Freitragende Wandelemente werden auch in Form von Frostschrägen zur Abtragung von Lasten zwischen Einzelfundamenten eingesetzt. In der nachfolgenden Abbildung 2-10 wird die Anordnung von vorgefertigten Wandelementen aus LAC in der Stapelbauweise schematisch dargestellt.

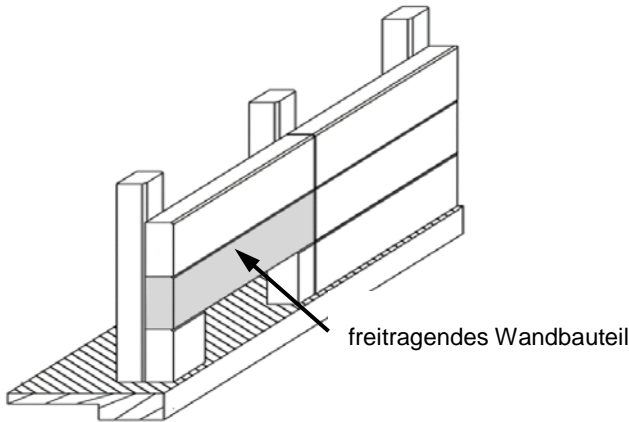


Abbildung 2-10: Wandelemente aus LAC, Stapelbauweise (nach Bild A.5 aus *DIN 4213:2015-10*)

Wandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton werden in verschiedenen Elementdicken, üblicherweise zwischen 20 und 40 cm, hergestellt. Je nach Wandstärke und Betonrezeptur können U-Werte von bis zu  $0,49 \text{ W/m}^2\text{K}$  erreicht werden (*Thermodur 2013*). Dies entspricht einer Wärmeleitfähigkeit von  $0,2 \text{ W/mK}$ . Durch den Einsatz von zusätzlich eingebauter Kerndämmung aus expandiertem Polystyrol können die Wärmedämmeigenschaften der Wandelemente verbessert oder die Wandstärke bei gleichbleibendem U-Wert reduziert werden. Für den Einbau der Dämmkerne werden nach *DIN EN 1520:2011-06* Vorgaben zur Anordnung in den Wandelementen gegeben. Entlang der Längs- und Querränder muss ein massiver Leichtbetonstreifen mit einer Mindestbreite von 150 mm angeordnet werden. Außerdem dürfen im Verankerungsbereich der Längsbewehrung keine Dämmkerne angeordnet werden (*DIN EN 1520:2011-06*).

Wände aus haufwerksporigem Leichtbeton werden üblicherweise liegend im Walzverfahren hergestellt (Abbildung 2-3). Für freitragende Wandelemente ist in Deutschland die Herstellung im Walzverfahren laut *DIN 4213:2015-10* jedoch ausgeschlossen. Daher müssen diese Elemente in deutschen Fertigteilwerken von Hand verdichtet werden (Abbildung 2-4). Auf europäischer Ebene sind dagegen keine Einschränkungen zum Herstellungsverfahren angegeben (*DIN EN 1520:2011-06*).

Zur konstruktiven Durchbildung von freitragenden Wandelementen schreibt die europäische Produktnorm *DIN EN 1520:2011-06* 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 *DIN 4213:2015-10* ist dagegen vorgeschrieben, dass die Querkraftbewehrung von freitragenden Wandelementen ausschließlich mit geschlossenen, umlaufenden Bewehrungskörben in Form von Bügeln erfolgen muss. Untersuchungen an Balken und Wandplatten aus LAC mit Querkraftbewehrung von Goltermann (*Goltermann 2009, 2014; Goltermann und Ingholt et al 1997*) 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“ (Goltermann und Ingholt et al 1997 zitiert nach Hegger und Roeser 2004). Zu dieser Erkenntnis kamen auch Nguyen 2008 und Schnell und Hanz 2014 in experimentellen Untersuchungen an der Technischen Universität Kaiserslautern.

Es ist bekannt, dass durch die Verwendung der in DIN 4213:2015-10 vorgeschriebenen geschlossenen Bügelkörbe in freitragenden Wandelementen Fehlstellen bei der Verdichtung im Walzvorgang auftreten können. Nguyen 2008 beschreibt die Entstehung der Fehlstellen als ein Zurückfedern des Bewehrungsnetzes durch Überfahren mit der Verdichtungswalze. Infolge der trockenen 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. In der nachfolgenden Abbildung 2-11 ist dieser Vorgang schematisch dargestellt.

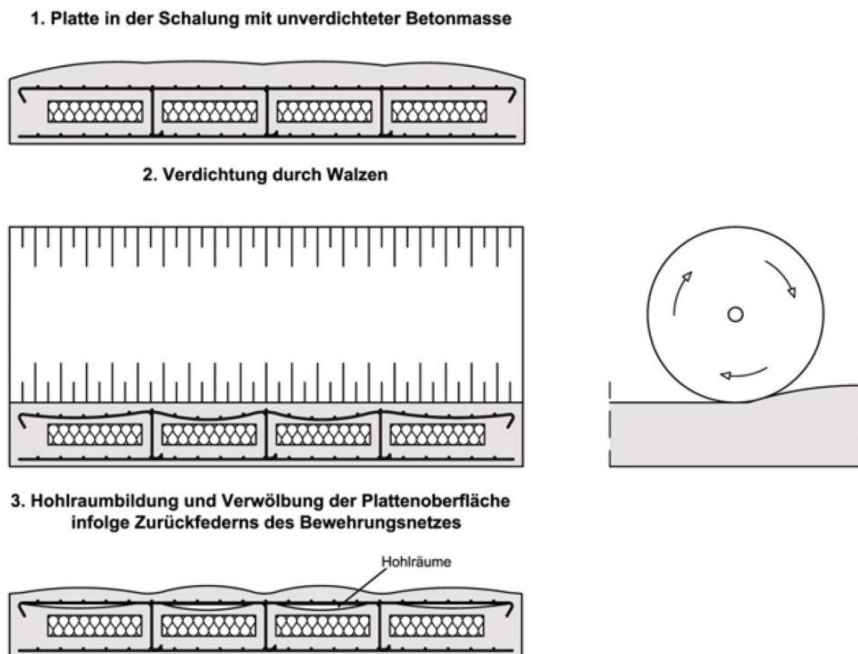


Abbildung 2-11: Hohlräumbildung durch Zurückfedern des Bewehrungsnetzes (nach Nguyen 2008)

Die Verdichtung im Walzverfahren führte in Versuchen von Nguyen 2008 zu Verwölbungen an der Oberfläche der Wandelemente. Nachträglich entnommene Bohrkernzeigten deutliche Hohlräume im Betongefüge auf Höhe des Bewehrungsnetzes. Während Nguyen 2008 unter anderem Wandkonstruktionen mit Gitterträgern untersuchte, konnte Hanz 2017 die Hohlräumbildung 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 2-4) sichergestellt werden.

### 2.1.7 Verbund- und Verankerungsverhalten

Die Verbundfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons mit kleinen Rohdichteklassen ist sehr gering und reicht daher zur Verankerung gerader Stabenden nicht aus. Auch die Verwendung von gerippten Bewehrungsstäben bringt gegenüber glatten Stäben keine nennenswerte Verbesserung des Verbundverhaltens (*Grübl und Karl et al 2001*). Nach *DIN EN 1520:2011-06* wird daher vorgegeben, dass die Verankerung von Bewehrungsstäben in LAC in Form von Schlaufen bzw. Haken erfolgen muss. Bei der Verankerung mit Endhaken müssen die Stäbe im Endbereich über eine Länge von mindestens  $l_b = 30 \cdot \varnothing$  über das Auflager geführt werden. Zusätzlich müssen zwei Bügel über dem Auflager die längs angeordnete Zugbewehrung umschließen. In beiden Fällen müssen die Stäbe mindestens 10 mm dick mit Beton mit einer Trockenrohddichte  $>1200 \text{ kg/m}^3$  und einer Druckfestigkeit von mindestens  $6 \text{ N/mm}^2$  umhüllt sein.

Laut *Hegger und Roeser 2004* kann die Annahme des Ebenbleibens der Querschnitte für haufwerksporigen Leichtbeton aufgrund des speziellen Verbundverhaltens als nicht zutreffend vorausgesetzt werden. Das Tragverhalten entspricht im Wesentlichen einem unterspannten Bogen, sodass die volle Zugkraft der Bewehrung am Haken verankert werden muss (*Hegger und Roeser 2004*).

In *Hanz 2017* wurde die Verankerungs- und Verbundwirkung von Bewehrungsstäben in haufwerksporigem Leichtbeton experimentell untersucht. Dabei wurden 4-Punkt-Biegeversuche an Platten aus LAC mit den folgenden Varianten durchgeführt:

- gerader Bewehrungsstab ohne Endhaken, mit Verbund
- Bewehrungsstab mit Endhaken, ohne Verbund
- Bewehrungsstab mit Endhaken, mit Verbund

*Hanz 2017* kommt zu dem Ergebnis, dass die Variante mit Endhaken und Verbund die höchsten Traglasten erzielt und das Tragverhalten keinem unterspannten Bogen entspricht. Ein „gewisser Verbund“ (*Hanz 2017*) zwischen Bewehrung und LAC sei zu erkennen, ein zuverlässiges Rissmodell wie in Normalbeton kann nach *Hanz 2017* jedoch noch nicht angegeben werden. Abbildung 2-12 zeigt die Ergebnisse aus *Hanz 2017* anhand von Last-Verformungskurven.

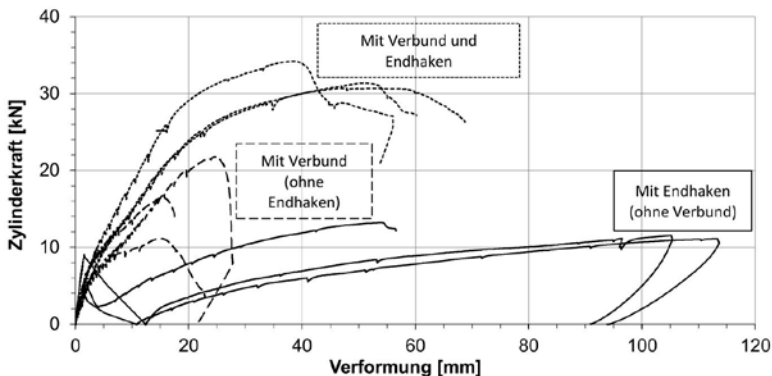


Abbildung 2-12: Last-Verformungskurven Verankerung Bewehrung in LAC (*Hanz 2017*)

## 2.2 Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung

### 2.2.1 Allgemeines

Der Einfluss der Belastungsart und der Lastposition ist bei Versuchen zur Querkrafttragfähigkeit besonders hoch. Um ein Bauteil in Bezug auf seine Querkraftbeanspruchung beurteilen zu können, wurde von *Kani 1966* die Schubslankheit  $\lambda$  eingeführt. Sie wird definiert als das Verhältnis der Biege- zur Querkraftbeanspruchung bezogen auf die statische Höhe  $d$ . Bei Einzellasten entspricht die Schubslankheit vereinfachend dem Abstand der Kräfteinleitung zum Auflager bezogen auf die statische Höhe (Abbildung 2-13).

$$\lambda = \frac{a}{d} \tag{2.8}$$

mit:         $a$             Abstand Kräfteinleitung zum Auflager (Einzellast)  
                $d$             statische Höhe

Das sogenannte Schubtal nach *Kani 1966* zeigt den Bereich, in dem in Abhängigkeit von der Schubslankheit und dem Längsbewehrungsgrad, ein Bauteil ohne Querkraftbewehrung seine Biegetragfähigkeit nicht erreicht, weil es zu einem vorzeitigen Schubversagen kommt. Ziel der Untersuchungen von *Kani 1966* war es, über die geometrischen Einflüsse bis zum Erreichen der Biegetragfähigkeit ein vorzeitiges Querkraftversagen auszuschließen. In der nachfolgenden Abbildung 2-13 wird das Schubtal nach Kani schematisch dargestellt.

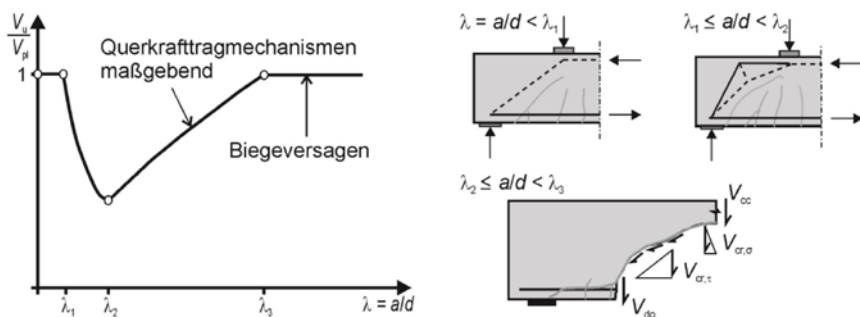


Abbildung 2-13: Schubtal nach *Kani 1966* (*Ruiz und Muttoni et al 2015* nach *Reißen 2016*)

Es wird davon ausgegangen, dass sich bei Schubslankheiten zwischen 1,0 und 3,0 Schubrisse im Bereich zwischen Auflager und Kräfteinleitung bilden können, sodass sich keine direkte Druckstrebe mehr ausbilden kann (*Kani 1966*). Durch die Umlenkung der Schubkräfte kommt es zu einer Reduzierung der aufnehmbaren Querkraft. Bei schubslanken Balken, also Balken mit Schubslankheiten größer 3,0 (*Fischer 1997*), kann es zur Aktivierung weiterer Tragmechanismen wie der Bogentragwirkung kommen. Bei sehr großen Schubslankheiten ( $\lambda > 8 - 13$ ) wird ein Biegeversagen maßgebend (*Kani 1966, Reißen 2016*).

Während in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* das statische System und die Lastposition lediglich auf der Einwirkungsseite durch die Reduktion auflagnaher Lasten einen Einfluss auf die Querkraftbemessung haben, wird die Schubslankheit in anderen Bemessungsmodellen berücksichtigt. Im Bemessungskonzept nach *ModelCode 2010* beispielsweise, das auf der Simplified Modified Compression Field Theory (SMCFT) nach *Bentz und Vecchio et al 2006* und *Muttoni 2003* basiert, wird das Momenten-Querkraft-Verhältnis mit einbezogen. Andere Modellvorstellungen wie die Modified Compression Field Theory (MCFT) nach *Vecchio und Collins 1986*, die in *ACI 318:2008-01* die Bemessung für Bauteile ohne Querkraftbewehrung regelt, berücksichtigen den Einfluss der Schubslankheit. Ein Vergleich der Modelle kann *Reißen 2016* entnommen werden.

Querkräfte treten in einem Bauteil immer dann auf, wenn Biegemomente über die Länge der Bauteilachse veränderlich sind. Durch die Biegebeanspruchung entstehen Druck- und Zuggurkräfte im Querschnitt, welche in Bereichen veränderlicher Biegung ihre Größe ändern. In diesen Bereichen sind Querkräfte erforderlich, um ein Gleichgewicht, also die Kopplung der Gurtkräfte, herstellen zu können. Solange der Beton keine Risse aufweist (Zustand I), gelten die Zusammenhänge der technischen Biegetheorie.

Längsspannung: 
$$\sigma_x = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{w} \quad (2.9)$$

Schubspannung: 
$$\tau_{xz} = \frac{V}{A} \quad (2.10)$$

Die rechnerisch ermittelten Schubspannungen sind nur als Hilfsgröße zu betrachten und stellen keine real auftretenden Spannungen dar. Tatsächlich treten in einem Bauteil ausschließlich Zug- und Druckspannungen auf, die sogenannten Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$ . Schubspannungen beschreiben lediglich die Abweichungen der Hauptspannungen vom gewählten Koordinatensystem. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 2-14 dargestellt.

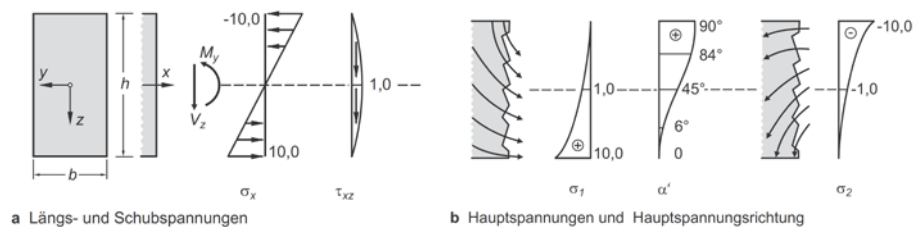


Abbildung 2-14: Spannungen eines ungerissenen, biege- und querkraftbeanspruchten Trägersteges nach der technischen Biegetheorie (*Zlich und Zehetmaier 2010*)

In Höhe der Schwerachse gleichen sich die Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  aus, sodass die Längsspannung  $\sigma_x$  gleich Null ist. In dieser Spannungsnulllinie verlaufen die Hauptspannungen unter  $45^\circ$  geneigt zur Stabachse, daher nimmt die Schubspannung  $\tau_{xz}$  in Höhe der Schwerachse ihren maximalen Wert an.

Der Verbundwerkstoff Stahlbeton kann jedoch nur effektiv ausgenutzt werden, wenn durch Rissbildung Zugkräfte auf die eingebaute Bewehrung übertragen werden.

## 2 Stand der Forschung

Allerdings verliert die technische Biegetheorie ihre Gültigkeit, sobald erste Risse auftreten. Die Betrachtung der Spannungstrajektorien im ungerissenen Zustand (Abbildung 2-15,c) dient daher vorwiegend dem Verständnis der Rissentwicklung und weniger zur Bestimmung der tatsächlichen Tragfähigkeit.

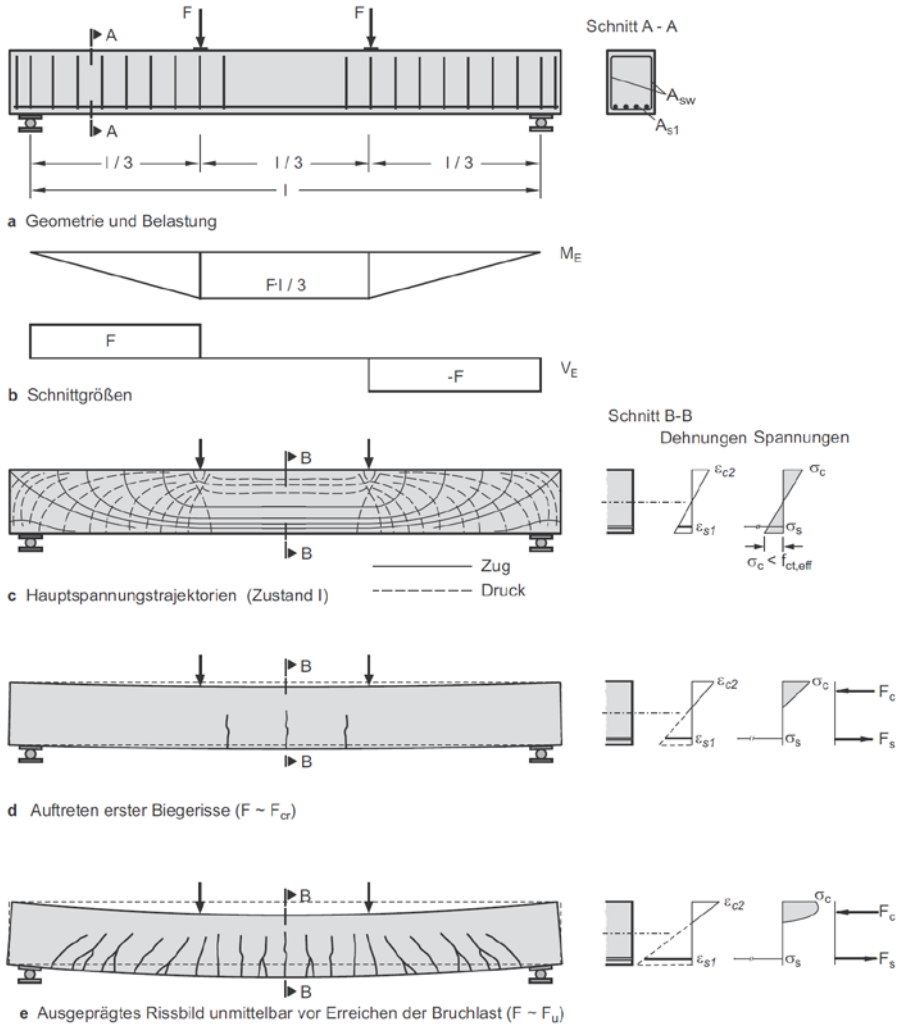


Abbildung 2-15: Verhalten eines Einfeldträgers im Versuch (Zilch und Zehetmaier 2010)

Wird bei zunehmender Belastung die Betonzugfestigkeit am Bauteilrand überschritten, stellen sich erste Risse ein, die in etwa senkrecht zu den Hauptzugspannungen verlaufen. In Bereichen konstanter Biegebeanspruchung verlaufen Biegerisse nahezu vertikal. Biegeschubrisse entwickeln sich aus Biegerissen und verlaufen im querkraftbeanspruchten Bereich schräg, zur Feldmitte hin. Wird die Last weiter gesteigert, bilden sich weitere Risse in Auflagernähe, also in den Bereichen größerer Querkraftbeanspruchung (Abbildung 2-15,e).



### 2.2.2 Versagensarten

Bei Bauteilen ohne Querkraftbewehrung können verschiedene Versagensarten auftreten, die unmittelbar auf eine Querkraftbeanspruchung zurückzuführen sind. Der Inhalt wurde im Wesentlichen aus *Zilch und Zehetmaier 2010* entnommen.

#### Biegeschubversagen

Bei schlanken Balken bildet sich mit steigender Belastung aus einem oder mehreren Biegerissen ein maßgebender Biegeschubriss, der etwa in Höhe der Dehnungsnulllinie abknickt und schräg zur Lasteinleitung hinwächst. Dieser maßgebende Biegeschubriss wird kritischer Schubriss genannt. Der Verlauf ähnelt den Hauptdruckspannungstrajektorien im ungerissenen Zustand. Zeitgleich entwickelt sich dieser kritische Schubriss in Höhe der Längsbewehrung horizontal zum Auflager hin. Dadurch trennt er Druck- und Zuggurt voneinander und die Rissufer schieben sich aneinander vorbei. Mit zunehmender Öffnung des kritischen Schubrisses erfolgt eine Umlagerung der inneren Kräfte in ein Sprengwerk, wobei die Längsbewehrung das Zugband bildet. Die Möglichkeit zur Umlagerung in ein Sprengwerk hängt von der Bauteilgeometrie und den Materialeigenschaften ab (*Zink 2000*). Die nachfolgende Abbildung 2-16 zeigt schematisch die Systemumlagerung in ein Sprengwerk.

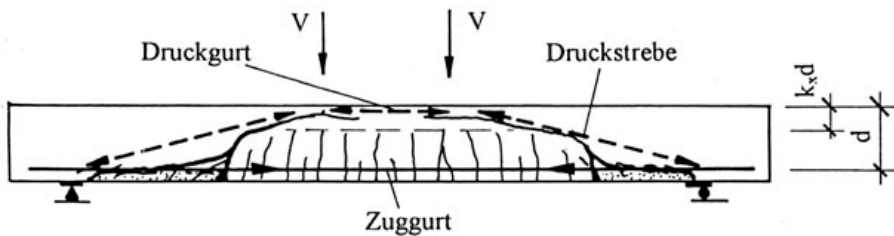


Abbildung 2-16: Systemumlagerung in ein Sprengwerk (*Zink 2000*)

Mit weiterem Vordringen des Schubrisses in die Druckzone kommt es zu einem schlagartigen Versagen der verbleibenden Druckzone aufgrund der kombinierten Biege- und Querkraftbeanspruchung. Das stabile Risswachstum ist mit dem Vordringen des Biegeschubrisses in die Druckzone beendet. Die maximale Last beim plötzlichen Öffnen des Biegeschubrisses entspricht demnach der Schubrisslast. Das instabile Risswachstum des Biegeschubrisses stellt dabei die primäre Versagensursache dar. Die Einschnürung und damit das Versagen der Druckzone ist lediglich die Folge daraus.

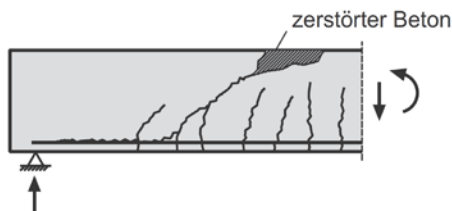


Abbildung 2-17: Biegeschubversagen bei Trägern ohne Querkraftbewehrung (*Zilch und Zehetmaier 2010*)

### Stegzugbruch

Bei Trägern aus profilierten Querschnitten mit dünnen Stegen und starken Gurten kann es zu einem Stegzugbruch durch Überschreiten der Betonzugfestigkeit im Trägersteg kommen (Abbildung 2-18). Die Zugzone des Trägers bleibt dabei zunächst ungerissen. Die Risse entstehen im Steg und setzen sich in den Zug- und Druckgurt fort. Dies führt dann zu einem schlagartigen Bruch, ähnlich dem Biegeschubversagen.

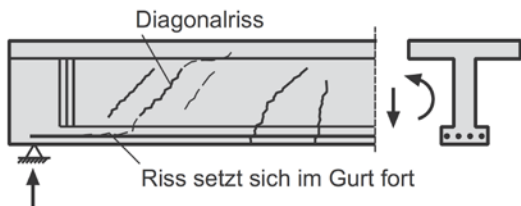


Abbildung 2-18: Stegzugversagen bei Trägern ohne Querkraftbewehrung (Zilch und Zehetmaier 2010)

### Verankerungsversagen

Zu einem Verankerungsversagen kann es durch unzureichende Verankerung der Biegezugbewehrung kommen (Abbildung 2-19). Durch den bei steigender Belastung auftretenden horizontalen Riss auf Höhe der Biegebewehrung (Dübelriss), der sich immer weiter in Richtung Auflager ausbildet, kann es zu einem Abplatzen der Betondeckung und zu einem damit einhergehenden Anstieg der Stahlzugkraft im Verankerungsbereich der Bewehrung kommen. Dies führt dann zu einem schlagartigen Herausziehen der Bewehrungsstäbe und somit zum Bauteilversagen. Eine Umlagerung in ein Sprengwerk ist dann nicht mehr möglich, da zur Ausbildung eines Sprengwerks die volle Verankerung der Biegebewehrung zwingende Voraussetzung ist.

Ein Verankerungsversagen kann auch als sekundäres Versagen nach dem Biegeschubversagen beobachtet werden.

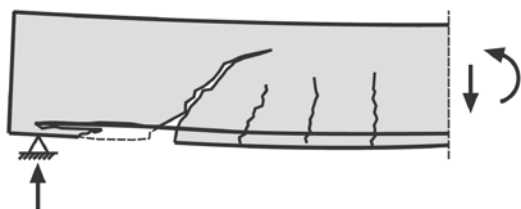


Abbildung 2-19: Verankerungsversagen bei Trägern ohne Querkraftbewehrung (Zilch und Zehetmaier 2010)

### 2.2.3 Tragmechanismen und Modelle

Bei Stahlbetonbauteilen ohne Querkraftbewehrung wird die Querkrafttragfähigkeit durch verschiedene Traganteile beeinflusst. Wegen der komplexen Vorgänge, die bei einem Biegeschubversagen ablaufen, ist es bisher noch nicht gelungen ein allgemein anerkanntes, mechanisch begründetes Modell zur Vorhersage der Versagenslast zu entwickeln. Es existieren eine Reihe von Modellvorstellungen, aus denen verschiedene Traganteile hervorgehen.

Während Einigkeit über einzelne Tragmechanismen besteht, werden die Zusammenhänge und die Frage, wie groß der Anteil der Mechanismen an der Gesamttragfähigkeit ist, aktuell weiter diskutiert.

Am Querkraftabtrag bei schubslanken Balken sind nach allgemeiner Auffassung drei grundlegende Tragmechanismen beteiligt (Görtz 2004):

$V_{c,comp}$	Tragfähigkeit der ungerissenen Druckzone
$V_{c,r}$	Rissreibung/ Rissverzahnung
$V_{c,Dü}$	Dübelwirkung der Längsbewehrung

Weitere Traganteile sind u. a. die Zahnbiegung, der Querkraftanteil der Bruchprozesszone und der Einfluss von Längskräften.

Nach Fischer 1997 spielt im Allgemeinen die Zugfestigkeit des Betons eine ausschlaggebende Rolle für die Schubtragfähigkeit bei Bauteilen ohne Querkraftbewehrung.

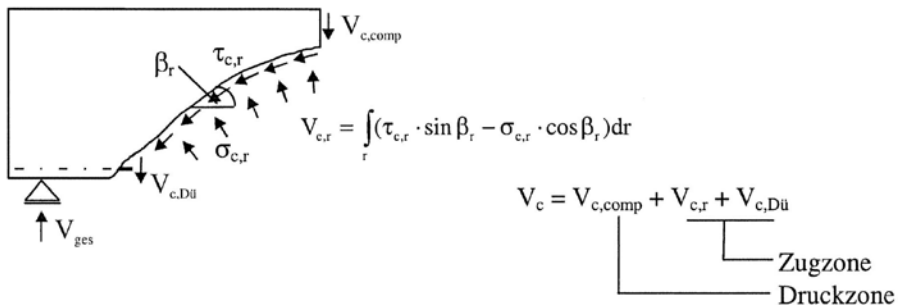


Abbildung 2-20: Traganteile von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung (Görtz 2004)

Das Tragverhalten, das sich in der Realität tatsächlich einstellt, ergibt sich aus einer Kombination der zuvor genannten Querkrafttragmechanismen. Dazu existieren verschiedene Modellvorstellungen wie z. B. das Sprengwerk- bzw. Bogen-Zugband-Modell oder aber Zahn- und Kammmodelle, die mit den Tragmechanismen kombiniert werden (Muttoni 2003).

Eine chronologische Entwicklung der vorhandenen Modelle zur Beschreibung und Berechnung der Querkrafttragfähigkeit kann Albrecht 2014 entnommen werden.

### 2.2.3.1 Sprengwerk und Bogen-Zugband-Modell

Als die klassischen Tragmodelle werden für Stahlbetonbalken das Sprengwerk und das Bogen-Zugband-Modell beschrieben. Bei einer Belastung mit Punktlasten stellt ein Sprengwerk mit Zugband den idealen Tragmechanismus dar. Die Druckkräfte werden dabei über Betondruckstreben bis zum Auflager geleitet. Die Längsbewehrung wirkt als Zugstrebe und bildet somit das statische Gleichgewicht (Abbildung 2-21).

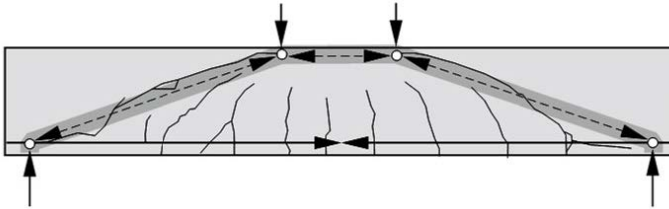


Abbildung 2-21: Sprengwerkmodell bei Einzellasten (Zilch und Zehetmaier 2010)

Wird ein Balken durch eine Gleichstreckenlast beansprucht, stellt sich durch kontinuierliches Umlenken der Druckstrebe ein parabelförmiger Druckbogen ein (Abbildung 2-22). Die Zugspannungen im Zugband werden auch hier von der Biegebewehrung aufgenommen.

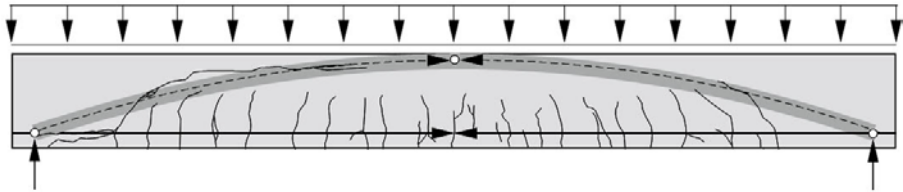


Abbildung 2-22: Bogen-Zugband-Modell bei Gleichstreckenlast (Zilch und Zehetmaier 2010)

Diese Tragmechanismen können sich allerdings nur bei gedrungeneren Balken einstellen. Bei sehr schlanken Balken sind weitere Tragmechanismen erforderlich.

### 2.2.3.2 Zahnmodell

Ein Modell, das auf *Kani 1964* zurückgeht, ist das sogenannte Kamm- bzw. Zahnmodell. Bei dieser Modellvorstellung geht man von einem Balken aus, der sich unter steigender Last in eine kammartige Struktur umwandelt. Der Betonzahn beschreibt dabei einen Bereich im Betonelement, der von Biegeschubrissen begrenzt wird und mit der Betondruckzone verbunden bleibt (Abbildung 2-23). Das Betonelement stellt dann die Verbindung zwischen Zug- und Druckzone dar und ermöglicht den Abbau der Zugspannungen in der Bewehrungslage.

In diesem Modell wird die Querkraft durch die folgenden Tragmechanismen abgetragen:

- $V_{cc}$  Tragfähigkeit der ungerissenen Druckzone
- $V_{cr}$  Rissverzahnung
- $V_d$  Dübelwirkung der Längsbewehrung

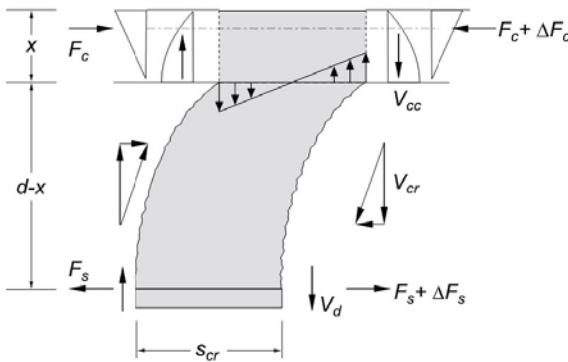


Abbildung 2-23: Zahnmodell zur Beschreibung des Tragverhaltens von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung (*Zilch und Zehetmaier 2010*)

Der Traganteil dieser einzelnen Mechanismen an der Gesamttragfähigkeit des Bauteils hängt vom Verformungszustand der Betonzähne gegeneinander ab und ist somit in Abhängigkeit von der Belastung veränderlich. Daher ist eine Kombination der Tragmechanismen über Verträglichkeitsbedingungen erforderlich.

#### Tragfähigkeit der ungerissenen Druckzone

Der Querkraftabtrag über die ungerissene Biegedruckzone stellt einen wesentlichen Anteil an der gesamten Querkrafttragfähigkeit eines Bauteils ohne Querkraftbewehrung dar. Wird die Spannungsverteilung in der Druckzone als dreiecksförmig idealisiert (Abbildung 2-23), kann die Druckzonenhöhe  $x$  eines einfach bewehrten Rechteckquerschnitts nach der folgenden Gleichung berechnet werden (*Zilch und Zehetmaier 2010*):

$$\xi = \frac{x}{d} = \sqrt{\alpha_s^2 \cdot \rho_1^2 + 2 \cdot \alpha_s \cdot \rho_1} - \alpha_s \cdot \rho_1 \quad (2.11)$$

mit:  $\alpha_s = \frac{E_s}{E_c}$   $\rho_1 = \frac{A_{sI}}{b_w \cdot d}$

Görtz 2004 belegt die große Bedeutung der ungerissenen Druckzone für die Querkrafttragfähigkeit und bestätigt die Untersuchungen von Zink 2000. Während in dem Modell von Zink 2000 die maximale Schubspannung der Betonzugspannung entspricht, zeigt Görtz 2004 in seinen Untersuchungen, dass eine Umlagerung in ein Sprengwerk zu einer Steigerung der Querkrafttragfähigkeit führt.

### Rissverzahnung

Biegeschubrisse zeigen einen gekrümmten Rissverlauf, wodurch die Rissöffnung  $w_{cr}$  auch gleichzeitig eine vertikale Relativverschiebung  $v_{cr}$  bewirkt (Abbildung 2-24). Über die gebrochene und somit raue Oberfläche der Rissufer können Reibungskräfte aktiviert werden (Walraven 1980), deren vertikaler Anteil zum Querkraftabtrag beiträgt. Da bei Normalbeton Risse üblicherweise an den Zuschlagkörnern vorbei verlaufen, können Kräfte über die hervorstehende Gesteinskörnung übertragen werden.

Die maßgebenden Einflussfaktoren auf die Rissverzahnung werden im Folgenden aufgelistet:

- Betontyp (Normalbeton, Leichtbeton, LAC)
- Druckfestigkeit von Zuschlag und Zementstein
- Sieblinie und Größtkorn des Zuschlags

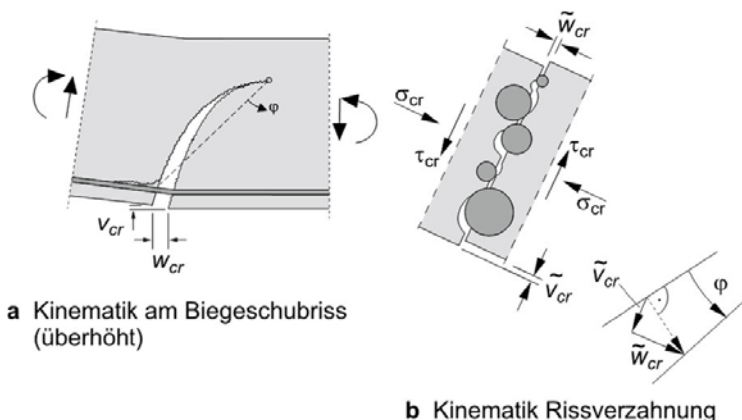


Abbildung 2-24: Verzahnung der Rissufer (Zilch und Zehetmaier 2010)

In Reineck 1990 wird die Rissreibung, also die Kornverzahnung der Rissufer, als der größte Anteil am Gesamtquerkraftabtrag beschrieben. Sobald die Tragmechanismen der Zugzone (Dübelwirkung und Rissreibung) ausfallen, kommt es zu einem Aufweiten des Schubrisses und zu einem Fortschreiten in die Druckzone, wodurch das Bauteilversagen ausgelöst wird.

### Dübelwirkung der Längsbewehrung

Die Längsbewehrung verbindet benachbarte, durch Schubrisse getrennte, Betonzähne miteinander. Sie wirkt als eine Art Dübel und überträgt Querkräfte, wodurch im angrenzenden Beton die sogenannten Bettungsspannungen entstehen (Abbildung 2-25,a).

Zur Aktivierung der Dübelwirkung ist eine vertikale Verschiebung im Biegeschubriss erforderlich (Abbildung 2-24,a). Die Rissuferverschiebung aktiviert die Dübelkraft  $V_d$  und belastet zunächst die Betondeckung. Diese Beanspruchung muss über Betonzugspannungen zwischen den Bewehrungsstäben nach oben gehängt werden (Abbildung 2-25,b). Mit steigender Dübelkraft bildet sich ein horizontaler Riss auf Höhe der Längsbewehrung (Dübelriss), der zum Abplatzen der Betondeckung führen kann (Abbildung 2-25,c). Folglich lässt der Anteil des über die Dübelkraft abgetragenen Querkraftanteils nach und muss durch andere Tragmechanismen kompensiert werden (Abbildung 2-25,d).

Die Dübelwirkung wird vorrangig durch die nachfolgenden Faktoren beeinflusst:

- Betonzugfestigkeit
- Geometrie des Bauteilquerschnittes
- Biegesteifigkeit der Bewehrung

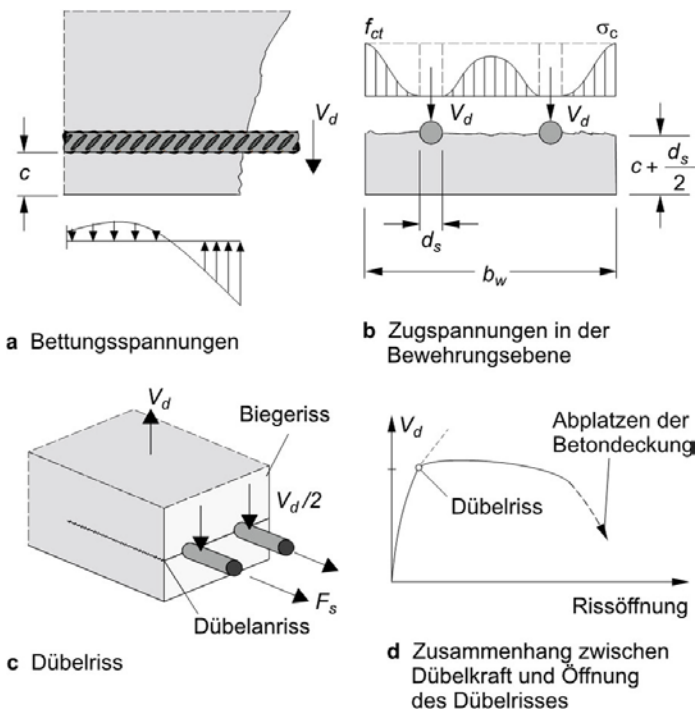


Abbildung 2-25: Dübelwirkung der Längsbewehrung (Zilch und Zehetmaier 2010)

Der Anteil der Dübelwirkung der Längsbewehrung am Querkraftabtrag gehört zu den viel diskutierten Tragmechanismen (König und Zink 1999). Während insbesondere

Zahnmodelle die Dübelwirkung berücksichtigen (*Reineck 1990, Fischer 1997, Görtz 2004*), wird dieser Tragmechanismus in anderen Modellvorstellungen vernachlässigt (*Kordina und Blume 1985, Remmel 1994*).

Ob und in welcher Weise die Dübeltragfähigkeit zur Steigerung der Querkrafttragfähigkeit beiträgt, ist vom Lastniveau bei Aktivierung des Dübels abhängig (*König und Zink 1999* nach *Thiele 2010*). Der Ausfall der Dübelwirkung wird in *Fischer 1997* als maßgebendes Versagenskriterium schubslanker Balken beschrieben. Eine Steigerung der Belastung ist solange möglich, bis die Zugfestigkeit des Betons überschritten wird und sich der Horizontalriss entlang der Längsbewehrung bildet. Dies führt zur weiteren Öffnung des Schubrisses, sodass keine Spannungen mehr über Rissverzahnung übertragen werden können. Da der Ausfall der Dübelwirkung nicht kompensiert werden kann, wächst der Riss instabil entlang der Längsbewehrung und gleichzeitig zur Lasteinleitung hin und führt letztlich zum Gesamtversagen.

Die Bildung des Horizontalrisses kann laut *Fischer 1997* zwei verschiedene Ursachen haben. Zum einen die Verdübelungswirkung der Bewehrung, zum anderen ein zumindest teilweises Verbundversagen zwischen Bewehrung und Beton. *Fischer 1997* konnte seinen Versagensmechanismus durch numerische Rissfortschrittsanalysen mit der Finite-Elemente-Methode und dem Vergleich mit Versuchen aus der Literatur bestätigen.

*Zink 2000* verweist auf eine Kombination aus Dübelwirkung und Tragfähigkeit der ungerissenen Druckzone. Durch Aktivieren der Dübelwirkung und damit einhergehender Verformung des Bauteils könne sich der Schubriss weiter in die Druckzone entwickeln. Dies führe zur Einschnürung der Druckzone und damit zur Reduktion der aufnehmbaren Querkraft.

In Versuchen an zum Teil vorgespannten Balken aus hochfestem Leichtbeton von *Keller 2005* wurde gezeigt, dass der Ausfall der Dübelwirkung nicht unmittelbar zum Bauteilversagen führt, sondern durch eine weitere Öffnung des Schubrisses eine Lastumlagerung ermöglicht.

### **Zahnbiegung**

Bei Zahnmodellen gilt die Vorstellung, dass die Betonzähne in der Biegedruckzone des Balkens eingespannt sind (Abbildung 2-23). Der Betonzahn wirkt dann wie eine Art Konsole und es entstehen Betonzugspannungen am auflagerseitigen Rand des Betonzahns. Sobald die Betonzugfestigkeit in diesem Bereich überschritten wird, wächst der Biegeschubriss annähernd parallel zum unteren Rand der Druckzone weiter. Der Ausfall der Biegeeinspannung des Betonzahns geht dem Querkraftversagen als Folge des instabilen Risswachstums voraus.

### **Maßstabseffekt**

Bei Versuchen an Balken ohne Querkraftbewehrung wurde festgestellt, dass die Bruchlast nur unterproportional mit der Bauteilhöhe und damit der statischen Höhe  $d$  anstieg. Diese Tatsache ist auf den sogenannten Maßstabseffekt zurückzuführen. Dieser Effekt bezieht sich auf den Einfluss der Bruchprozesszone. Diese bezeichnet die Risspitze des Biegeschubrisses, also den Bereich in dem der Riss entsteht.



Die Bruchprozesszone hat eine definierte Länge. Diese ist mit verschiedenen Materialeigenschaften des Betons verknüpft, jedoch unabhängig von der Bauteilhöhe (Abbildung 2-26). Durch das veränderliche Verhältnis der Bruchprozesszone zur statischen Höhe, ergibt sich ein deutlicher Maßstabseffekt. Der vertikale Anteil der in der Bruchprozesszone übertragenen Spannungen  $V_{BPZ}$  trägt zum Querkraftabtrag bei.

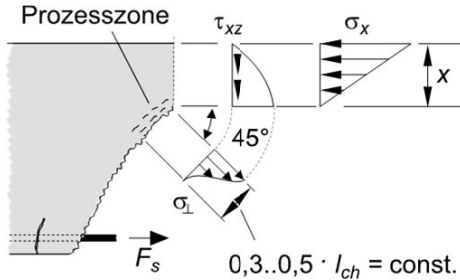


Abbildung 2-26: Maßstabseffekt nach Zink 2000 (Zilch und Zehetmaier 2010)

### Einfluss von Längskräften

Nach Zilch und Zehetmaier 2010 haben Längsdruckkräfte einen positiven Einfluss auf die Querkrafttragfähigkeit, da sie zu einer Vergrößerung der Druckzonenhöhe führen und damit die Übertragung von Querkräften in der ungerissenen Druckzone begünstigen. Darüber hinaus führen Drucknormalkräfte tendenziell zu flacher geneigten Rissen (Zilch und Zehetmaier 2010).

### Zusammenwirken der Tragmechanismen

Zur Aktivierung der Tragmechanismen sind gegenseitige Verformungen der Betonzähne bzw. eine Verformung der Zähne gegenüber der Druckzone erforderlich. Das Fortschreiten der Risse entlang der Längsbewehrung oder der Ausfall der Einspannwirkung der Betonzähne führen zu Umlagerungen von Querkraftanteilen hin zur Rissverzahnung bzw. zur ungerissenen Druckzone. Mit steigender Belastung geht der innere Kräftezustand hin zur Sprengwerk- bzw. Bogen-Zugband-Wirkung. Eine vollständige Umlagerung zu einem Sprengwerk oder Bogen ist von der Schubschlankheit des Bauteils und ggfs. wirkenden Längskräften abhängig. Eine Addition der Anteile zur Gesamttragfähigkeit ist nach Zilch und Zehetmaier 2010 wegen der versetzt wirksamen Tragmechanismen nicht möglich.

### 2.2.4 Bemessung

Das Querkraftversagen eines Bauteils ohne Querkraftbewehrung wird durch die Bildung eines kritischen Schubrisses eingeleitet. Daher muss nachgewiesen werden, dass die Beanspruchung unterhalb der Schubrisslast bleibt.

#### Eurocode 2

Der Bemessungsansatz nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* geht auf den *ModelCode 2010* zurück und stellt einen semi-empirischen Ansatz mit den nachfolgend aufgeführten Einflussgrößen dar.

Tabelle 2-4: Tragmechanismen und ihre Berücksichtigung in Bemessung nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01*

Tragmechanismus	Berücksichtigung in Bemessung
Rissbildung im Steg Zahneinspannung Dübelwirkung	Zugfestigkeit des Betons
Druckzonenhöhe Dübelwirkung Rissverzahnung	Längsbewehrungsgrad
Maßstabseffekt Querschnittsgeometrie	Statische Höhe und Querschnittsbreite
Druckzonenhöhe Rissverzahnung	Längskraftbeanspruchung

Der Bemessungswert des Widerstands von Bauteilen ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung kann nach *DIN EN 1992-1-1:2011-01* wie folgt berechnet werden.

$$V_{Rd,c} = (C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + 0,12 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \quad (2.12)$$

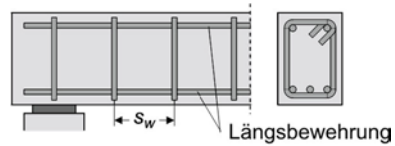
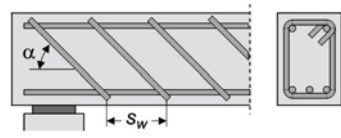
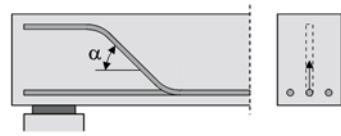
- mit:  $C_{Rd,c} = \frac{0,15}{\gamma_c}$  Kalibrierfaktor  
 $\gamma_c = 1,5$  Teilsicherheitsbeiwert für bewehrten Beton  
 $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$  Maßstabsfaktor  
 $\rho_l = A_{sl} / (b_w \cdot d) \leq 0,02$  Längsbewehrungsgrad  
 $b_w$  kleinste Querschnittsbreite innerhalb der Zugzone  
 $d$  statische Nutzhöhe der Biegebewehrung  
 $f_{ck}$  charakteristische Betondruckfestigkeit  
 $\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c$  Betonlängsspannung in Höhe der Schwerachse

## 2.3 Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen mit Querkraftbewehrung

### 2.3.1 Allgemeines

Zur Sicherstellung eines duktilen Bauteilversagens und zur Steigerung der Querkrafttragfähigkeit wird Querkraftbewehrung eingebaut. Dabei ist es erforderlich, dass die Querkraftbewehrung die schrägen Biegeschubrisse kreuzt. Im Folgenden werden mögliche Bewehrungskonstruktionen für Querkraftbewehrung mit ihren Besonderheiten tabellarisch dargestellt.

Tabelle 2-5: Konstruktionsvarianten zur Querkraftbewehrung (nach Zilch und Zehetmaier 2010)

Bewehrungskonstruktion	Vor- und Nachteile
<p>senkrechte Bügel</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ häufig eingesetzte Variante</li> <li>+ einfacher und schneller Einbau</li> <li>+ gute Tragfähigkeit</li> <li>- Bewehrung nicht optimal an Hauptzugspannungen orientiert</li> </ul>
<p>geneigte Bügel</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Bewehrung kreuzt Schubrisse im Idealfall nahezu senkrecht</li> <li>+ sehr gute Tragfähigkeit</li> <li>- aufwändiger Einbau</li> <li>- Verdichten des Betons wird erschwert</li> </ul>
<p>aufgebogene Längsbewehrung</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Bewehrung an Hauptzugspannungen orientiert</li> <li>- aufwändiger Einbau</li> <li>- aufgebogene Bewehrung muss durch zusätzliche Bügel ergänzt werden</li> </ul>

Querkraftbewehrte Balken unterscheiden sich in ihrem Tragverhalten bei geringer Beanspruchung kaum von Balken ohne Querkraftbewehrung. Erst durch steigende Belastung neigen sich die Risse sichtbar, sie kreuzen die Querkraftbewehrung, wodurch diese aktiviert wird. Die weitere Öffnung der Schubrisse erzeugt eine Dehnung in der Querkraftbewehrung, welche der weiteren Rissöffnung entgegenwirkt. Dadurch können zusätzlich auch Tragmechanismen wie Rissverzahnung bzw. Rissreibung verstärkt werden. Das weitere Öffnen des maßgebenden Schubrisse wird begrenzt und ein Vordringen des Versagensrisses in die Druckzone verlangsamt. Die Eigenschaft, die Öffnung von Biegeschubrisse zu begrenzen, ist dabei ein Indiz für die Wirksamkeit verschiedener Querkraftbewehrungskonstruktionen.

In Abbildung 2-27 wird der Zusammenhang von Querkraftbeanspruchung und Schubrisbreite für verschiedene Konstruktionen der Querkraftbewehrung dargestellt. Dabei zeigen Bügel, die unter einem Winkel von 45-60° geneigt sind und so die Schubrisse nahezu senkrecht kreuzen, die beste Wirksamkeit.

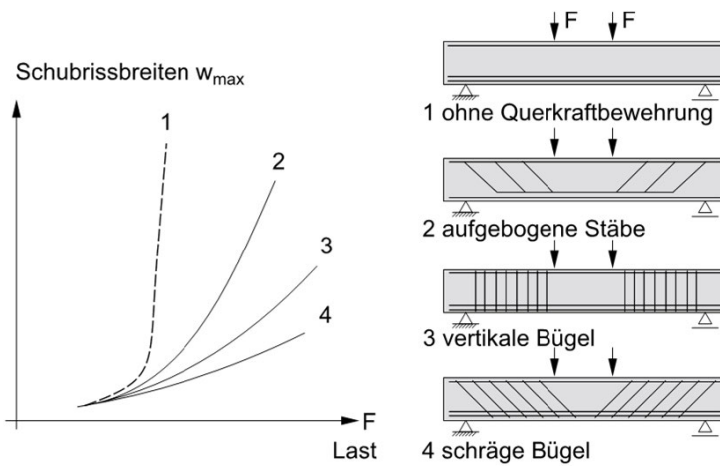


Abbildung 2-27: Wirksamkeit der Querkraftbewehrung in Abhängigkeit von der Schubrissbreite (Zilch und Zehetmaier 2010)

### 2.3.2 Versagensarten

Bei Bauteilen mit Querkraftbewehrung können verschiedene Versagensarten auftreten, die unmittelbar auf eine Querkraftbeanspruchung zurückzuführen sind. Der Inhalt wurde im Wesentlichen aus *Zilch und Zehetmaier 2010* entnommen.

#### Biegeschubversagen

Ähnlich wie bei Bauteilen ohne Querkraftbewehrung dringen beim Biegeschubversagen querkraftbewehrter Bauteile Biegeschubrisse in die Druckzone vor. Bei steigender Belastung wird die Druckzonenhöhe reduziert und der verbleibende Druckzonenquerschnitt reicht nicht mehr aus, um die Biegedruckkraft und den Querkraftanteil aufzunehmen. Das Bauteil versagt in der Druckzone (Abbildung 2-28).

Zur Aktivierung dieses Mechanismus ist eine weite Öffnung des Schubrisses erforderlich, was ein Fließen der Querkraftbewehrung voraussetzt.

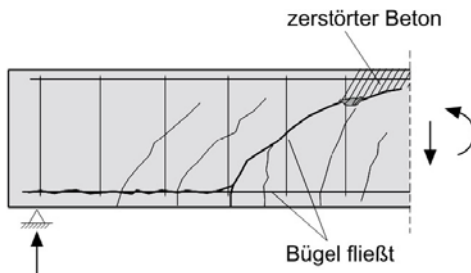


Abbildung 2-28: Biegeschubversagen bei Trägern mit Querkraftbewehrung (Zilch und Zehetmaier 2010)

### Stegzugversagen

Bei geringer Querkraftbewehrung kann ein Zugversagen der Bügel zum Bauteilversagen führen (Abbildung 2-29). Dies ist der Fall, wenn die Zugfestigkeit der Bügel erreicht ist, bevor die Tragfähigkeit der Druckzone ausgenutzt ist.

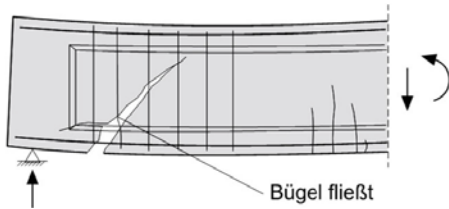


Abbildung 2-29: Stegzugversagen bei Trägern mit Querkraftbewehrung (Zilch und Zehetmaier 2010)

### Stegdruckversagen

Bei profilierten Trägern mit besonders dünnen und daher hochbewehrten Stegen kann es durch schräge Druckstreben zu einem Druckversagen kommen, obwohl Biege- und Querkraftbewehrung noch nicht fließen (Abbildung 2-30). Dieses Versagen kann durch konstruktive Anpassungen des Betonquerschnittes und eine Erhöhung der Betondruckfestigkeit verhindert werden.

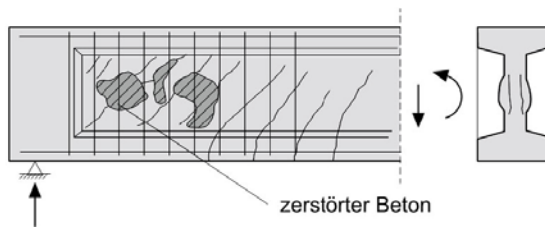


Abbildung 2-30: Stegdruckversagen bei Trägern mit Querkraftbewehrung (Zilch und Zehetmaier 2010)

### Aufspalten des Stags bei Querkraftaufbiegungen

Wie in Abbildung 2-31 schematisch dargestellt, kommt es bei Aufbiegung der Längsbewehrung, durch Konzentration der Spannungen auf einzelne Stäbe, zu Querkraftkräften. Diese können bei Überschreiten der Betonzugspannungen zu Spaltrissen führen. Daher sind Querkraftaufbiegungen grundsätzlich mit Bügeln zu kombinieren.

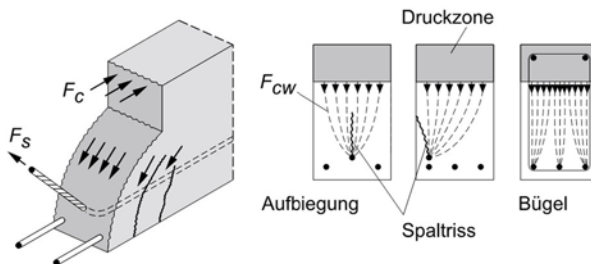


Abbildung 2-31: Aufspalten des Stags bei Querkraftaufbiegungen (Zilch und Zehetmaier 2010)

## Verankerungsversagen

Ein Verankerungsversagen der Biegebewehrung kann auch bei querkräftbewehrten Bauteilen auftreten. Eine schematische Darstellung dieser Versagensart ist in Abbildung 2-19 dargestellt. Außerdem kann in querkräftbewehrten Bauteilen eine nicht ausreichende Verankerung der Querkräftbewehrung bei starker Beanspruchung ein Bauteilversagen herbeiführen. Dies ist durch geeignete Konstruktionsregeln auszuschließen.

### 2.3.3 Tragmechanismen und Modelle

Bei querkräftbewehrten Bauteilen stellt das Fachwerkmodell die zentrale Modellvorstellung für den Kraftfluss dar (Abbildung 2-32).

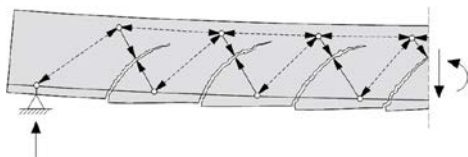


Abbildung 2-32: Idealisierter Kraftfluss bei Balken mit geneigten Rissen (Zilch und Zehetmaier 2010)

Die klassische Fachwerkanalogie nach Mörsch 1908 beruht auf einem Stabwerk mit unter  $45^\circ$  geneigten und Druckstreben, wie in Abbildung 2-33 dargestellt. Die Zugdiagonalen werden mit Querkräftbewehrung in Form von Bügeln im Abstand  $s_w = z$  (innerer Hebelarm) abgedeckt. Bei dieser Anordnung entspricht die Zugkraft im Bügel  $F_{sw}$  gleich der einwirkenden Kraft  $F$ . Bei diesem System können allerdings auch Biegeschubrisse entstehen, die nicht von den Zugdiagonalen gekreuzt werden.

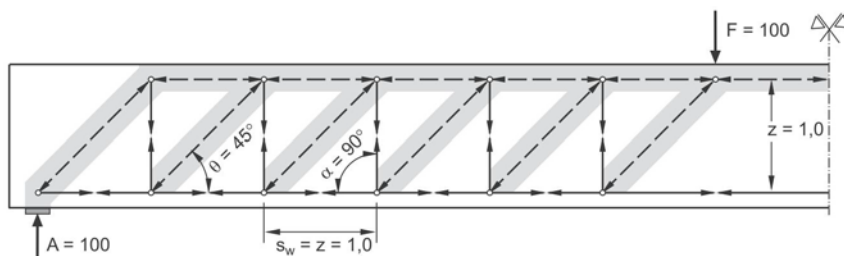


Abbildung 2-33: Tragmodell nach der klassischen Fachwerkanalogie nach Mörsch 1908 (Zilch und Zehetmaier 2010)

Um weitere auftretende Risse zu erfassen, wurden die sogenannten Netzfachwerke umgesetzt, bei denen der Bügelabstand entsprechend verringert wurde. Um das hochgradig statisch unbestimmte Fachwerk berechnen zu können, idealisiert man die Netzfachwerke als eine Überlagerung mehrerer statisch bestimmter und gegeneinander versetzter Fachwerke, denen jeweils ein Teil der Querkräft zugewiesen wird. Bei einem zweifachen Fachwerk entspricht der Bügelabstand  $s_w$  dem halben inneren Hebelarm und die Bügelkraft  $F_{sw}$  entsprechend der halben einwirkenden Kraft  $F$ . Ein zweifaches Fachwerk ist in Abbildung 2-34 dargestellt.

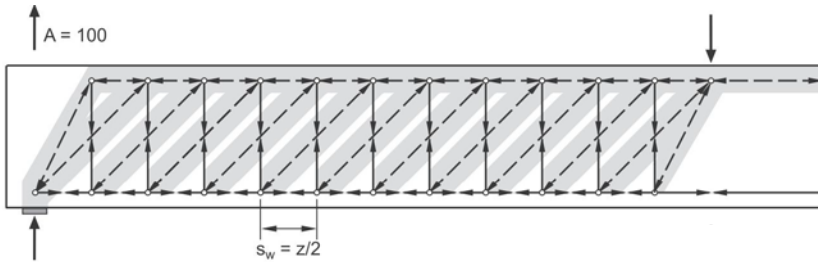


Abbildung 2-34: zweifaches Fachwerk nach der Fachwerkanalogie nach Mörsch 1908 (Zilch und Zehetmaier 2010)

Werden viele versetzte Fachwerke überlagert, spricht man von Schubwand- bzw. Spannungsfeld-Modellen (Zilch und Zehetmaier 2010). Hier werden statt diskreter Zug- und Druckstreben im Stabwerk nun die Kräfte über die Längsrichtung verteilt. Das Betonbauteil wird dabei in Störbereiche (D-Bereiche) und ungestörte Bereiche (B-Bereiche) unterteilt. In den D-Bereichen entstehen fächerartige Spannungsfelder z. B. an Auflagern, Lastenleitungen oder Querschnittsänderungen. Die ungestörten B-Bereiche können weiterhin über Stabwerkmodelle berechnet werden, wobei hier die Druckstrebenneigung veränderlich ist.

In experimentellen Untersuchungen wurde gezeigt, dass die Spannungen in der Querkraftbewehrung deutlich kleiner sind als die Rechenwerte nach dem klassischen Fachwerkmodell nach Mörsch 1908 vermuten lassen. Daraus resultieren in der Praxis rechnerisch zu hohe Bewehrungsmengen. Tatsächlich übernimmt die Querkraftbewehrung nur einen Teil der Beanspruchung, während die übrige Belastung durch weitere Tragmechanismen aufgenommen wird. Dieser Anteil wird Betontraganteil genannt und setzt sich aus den folgenden Tragmechanismen zusammen:

- Traganteil der Druckzone
- Rissverzahnung
- Dübelwirkung der Längsbewehrung

Er ist nicht identisch mit der Querkrafttragfähigkeit eines Bauteils ohne Querkraftbewehrung, da durch die Bügelbewehrung die Schubrisse enger zusammengehalten und daher Tragmechanismen wie Rissreibung und Rissverzahnung verstärkt werden. Der Betontraganteil wird bei der Bemessung in DIN EN 1992-1-1:2011-01 durch einen flacher geneigten Druckstrebenwinkel berücksichtigt und mit den Nachweiskonzepten der Plastizitätstheorie (Muttoni 1990) erweitert.

### 2.3.4 Bemessung

Das in Abbildung 2-35 gezeigte Fachwerk mit variabler Druckstrebenneigung stellt die Grundlage für die Bemessung von Bauteilen mit Querkraftbewehrung in DIN EN 1992-1-1:2011-01 dar.

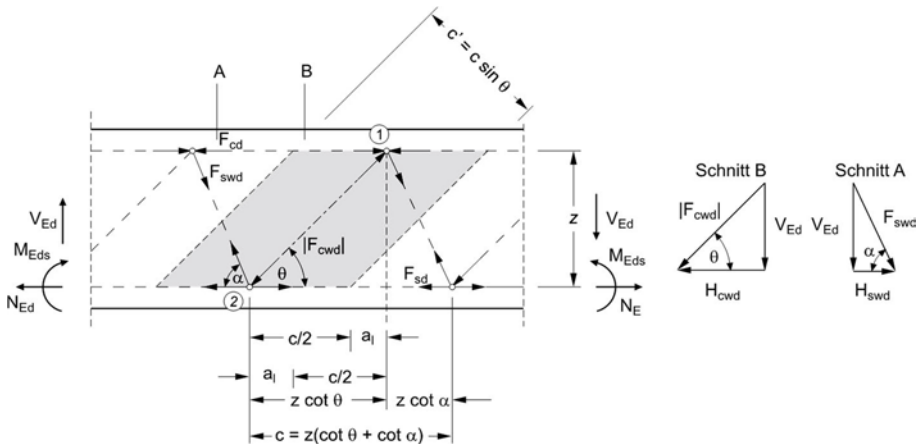


Abbildung 2-35: Strebenkräfte des einfachen Gelenkfachwerks (Zilch und Zehetmaier 2010)

Dabei muss sowohl ein Nachweis für die Querkraftbewehrung (Stahltraganteil) als auch ein Nachweis der Betondruckstrebe (Betontraganteil) geführt werden.

Querkraftbewehrung:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s_w} \cdot f_{ywd} \cdot z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \quad (2.13)$$

Druckstrebentragfähigkeit:

$$V_{Rd,max} = b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \alpha} \quad (2.14)$$

- mit:
- $A_{sw}$  Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung
  - $s_w$  Abstand der Querkraftbewehrung
  - $f_{ywd}$  Bemessungswert der Streckgrenze der Querkraftbewehrung
  - $z$  innerer Hebelarm ( $\approx 0,9 \cdot d$ )
  - $\theta$  Neigungswinkel der Druckstreben
  - $\alpha$  Neigung der Querkraftbewehrung
  - $f_{cd}$  Druckfestigkeit des Betons
  - $v_1$  Abminderungsfaktor für die Betonfestigkeit bei Schubrisen



### 2.3 Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen mit Querkraftbewehrung

Die Festigkeit der Druckstreben ist von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig. Störungen durch Risse oder kreuzende Bewehrung können zu einer deutlichen Reduzierung der Festigkeit im Vergleich zur einachsialen Festigkeit führen.

Die effektive Festigkeit  $\alpha_c \cdot f_{cd}$  wird bei der Bemessung über einen Abminderungsfaktor  $\alpha_c$  (in *DIN EN 1992-1-1:2011-01* wird  $\alpha_c$  mit  $v_1$  bezeichnet) berücksichtigt (*Zilch und Zehetmaier 2010*). In *Abbildung 2-36* wird dieser Zusammenhang durch den Druckstrebenwinkel  $\theta$  ausgedrückt.

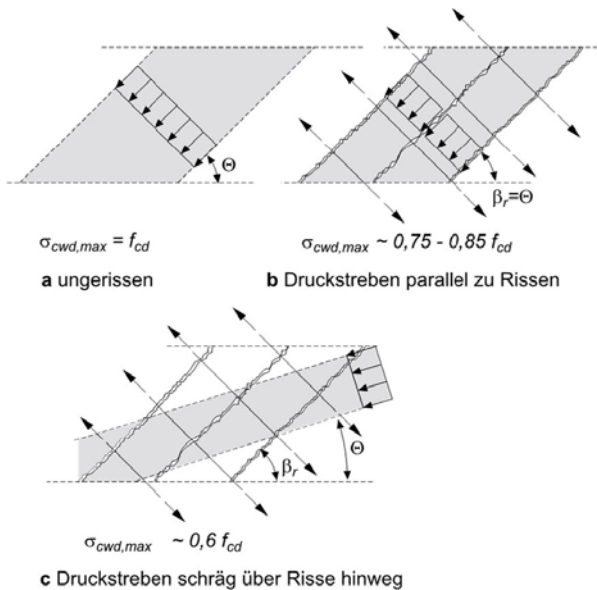


Abbildung 2-36: Bemessungswerte der effektiven Betondruckfestigkeit der Druckstreben (*Zilch und Zehetmaier 2010*)

Um die Plastizitätstheorie anwenden zu können, ist es erforderlich, dass die Bewehrung beim jeweils gewählten Druckstrebenwinkel die Fließgrenze erreicht. Da jeder statisch zulässige Spannungszustand, der diese Bedingung erfüllt, eine untere Grenze der Traglast darstellt, ist die nahezu freie Wahl des Druckstrebenwinkels nach der Plastizitätstheorie möglich.

Die Voraussetzung für die Umlagerungsmöglichkeit der inneren Kräfte im Bruchzustand ist ein ausreichendes Verformungsvermögen des Bauteils, sodass sich ein stabiles Gleichgewicht der Druckstreben im gewählten Druckstrebenwinkel einstellen kann.

Da Bauteile aus Beton nicht uneingeschränkt verformbar sind, wird der Neigungswinkel begrenzt. Außerdem wird eine untere Begrenzung des Druckstrebenwinkels eingeführt, die am mechanisch begründeten Fachwerkmodell mit Rissreibung (*Reineck 1990*) abgeleitet ist.

Die Druckstrebenneigung  $\theta$  ist eng an die Neigung der Biegeschubrisse  $\beta_r$  gekoppelt. Sie sind nur gleich groß, wenn keine Kräfte über Rissverzahnung zwischen zwei Betonzähnen übertragen werden und somit die Druckstreben parallel zu den Biegeschubrisen verlaufen. Werden Kräfte über Rissverzahnung übertragen, entstehen Kraftanteile parallel und senkrecht zur Rissoberfläche, sodass flachere Neigungen der Druckstreben möglich sind. In Abbildung 2-37 wird der Einfluss der Rissverzahnung auf den Druckstrebenwinkel  $\theta$  dargestellt.

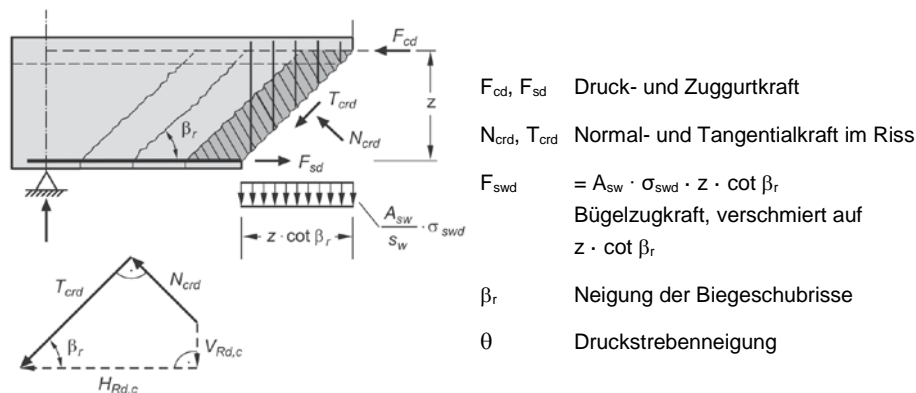


Abbildung 2-37: Endauflagerbereich eines Balkens mit Kräften im Biegeschubriss zur Herleitung der Druckstrebenneigung nach Reineck 1990 (Zilch und Zehetmaier 2010)

Anhand der Abbildung 2-37 kann der Druckstrebenwinkel rechnerisch wie folgt ermittelt werden:

Druckstrebenwinkel:

$$0,58 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2 + 1,4 \cdot \sigma_{cd} / f_{cd}}{1 - V_{Rd,cc} / V_{Ed}} \quad (2.15)$$

$\leq 3,0$  für Normalbeton

$\leq 2,0$  für Leichtbeton

mit:  $\sigma_{cp}$  Betonlängsspannung

$f_{cd}$  Druckfestigkeit des Betons

### 2.3 Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen mit Querkraftbewehrung

Der Betontraganteil  $V_{Rd,cc}$  stellt den Anteil des Betons bei Bauteilen mit Querkraftbewehrung dar. Im Gegensatz dazu gilt für Bauteile ohne Querkraftbewehrung der Betontraganteil  $V_{Rd,c}$ . Diese beiden Traganteile können nicht gleichgesetzt werden.

Bei Bauteilen ohne Querkraftbewehrung kann sich der Biegeschubriss weit öffnen, was letztlich zum Versagen führt. Im Vergleich dazu werden bei querkraftbewehrten Bauteilen Biegeschubrisse enger zusammengehalten und weitere Tragmechanismen können länger zum Tragverhalten beisteuern.

Betontraganteil bei Bauteilen mit Querkraftbewehrung:

$$V_{Rd,cc} = \left[ c \cdot 0,48 \cdot f_{ck}^{\frac{1}{3}} \cdot \left( 1 - 1,2 \cdot \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}} \right) \right] \cdot b_w \cdot z \quad (2.16)$$

mit:  $c$  = 0,5

$\sigma_{cd}$  Betonlängsspannung

$f_{cd}$  Druckfestigkeit des Betons

$b_w$  kleinste Querschnittsbreite innerhalb der Zugzone

$z$  innerer Hebelarm ( $\approx 0,9 \cdot d$ )

Wenn bei einer Bemessung der Neigungswinkel der Biegeschubrisse  $\beta_r$  und der Druckstrebenwinkel  $\theta$  gleich gesetzt werden ( $\cot \theta = 1,2$ ), wird der Betontraganteil  $V_{Rd,cc}$  für die Bemessung vernachlässigt, da theoretisch keine Rissverzahnungskräfte auftreten. Somit liegt die Bemessung auf der sicheren Seite.

## 2.4 Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen aus haufwerksporigem Leichtbeton

### 2.4.1 Allgemeines

Freitragende Wandbauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton ohne Querkraftbewehrung sind in den geltenden Normen nicht vorgesehen. Es ist immer eine Mindestquerkraftbewehrung einzubauen. Für die Querkraftbewehrung von Wandelementen aus LAC werden grundlegend zwei Bewehrungskonstruktionen unterschieden. In Deutschland werden nach *DIN 4213:2015-10* für freitragende Bauteile geschlossene Bügelkörbe vorgeschrieben, während *DIN EN 1520:2011-06* auf europäischer Ebene Schubleitern vorgibt.

Nachfolgend werden in Abbildung 2-38 und Abbildung 2-39 die beiden Bewehrungskonstruktionen exemplarisch dargestellt.

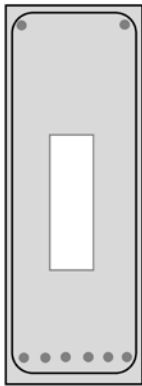


Abbildung 2-38: Geschlossener Bügelkorb nach *DIN 4213:2015-10*

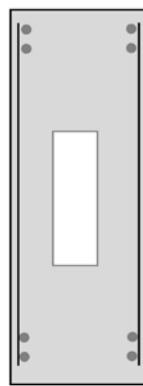
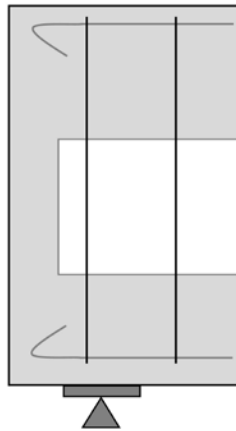


Abbildung 2-39: Schubleiter nach *DIN EN 1520:2011-06*

### 2.4.2 Versagensarten

Bei Bauteilen aus haufwerksporigem Leichtbeton ohne und mit Querkraftbewehrung können verschiedene Versagensarten auftreten, die unmittelbar auf eine Querkraftbeanspruchung zurückzuführen sind. Als Versagensmechanismen können grundsätzlich ähnliche Versagensarten vergleichbar mit den Mechanismen in Normalbeton beobachtet werden (vgl. Kapitel 2.2.2 und 2.3.2).

### 2.4.3 Bemessung

Wie bereits im Kapitel 2.1.1 erläutert, basiert das Bemessungskonzept für Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton auf dem EC 2. Das Sicherheitskonzept sieht die in Tabelle 2-6 aufgelisteten Teilsicherheitsbeiwerte vor.

Tabelle 2-6: Teilsicherheitsbeiwerte für Materialeigenschaften nach *DIN 4213:2015-10* und *DIN EN 1520:2011-06*

Teilsicherheitsbeiwert		Grenzzustand der Tragfähigkeit
Betonstahl	$\gamma_s$	1,15
bewehrte Bauteile	$\gamma_c$	1,40
unbewehrte Bauteile	$\gamma_c$	1,70

#### Bauteile ohne Querkraftbewehrung

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

$$V_{Ed} < V_{Rd1}$$

$$V_{Ed} < V_{Rd2}$$

Der Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft  $V_{Rd1}$  für Bauteile ohne Querkraftbewehrung darf nach Gleichung (2.17) nach *DIN EN 1520:2011-06* wie folgt bestimmt werden.

$$V_{Rd1} = C_{Rd} \cdot k \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d \quad (2.17)$$

mit:  $C_{Rd} = \frac{0,145}{\gamma_c}$                       Kalibrierfaktor

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

$\eta_1 = 0,40 + 0,60 \cdot \rho / 2200$                       Faktor für Rohdichte

$\rho$     Trockenrohddichte von LAC

$\rho_1 = A_{s1} / (b_w \cdot d) \leq 0,02$                       Längsbewehrungsgrad

$b_w$     kleinste Querschnittsbreite

Dabei wird die Querkrafttragfähigkeit auf einen Mindestwert nach Gl. (2.18) festgelegt.

$$V_{Rd1} = v_{mind} \cdot b_w \cdot d \quad (2.18)$$

mit:  $v_{mind} = 0,03 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}}$                       nach *DIN EN 1520:2011-06*                      (2.19)

$v_{mind} = 0$     nach *DIN 4213:2015-10*

Alternativ darf der Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft  $V_{Rd1}$  mit Gleichung (2.20) aus *DIN EN 1520:2011-06* bestimmt werden. Diese Variante der Bemessung ist nach *DIN 4213:2015-10* in Deutschland jedoch nicht zugelassen.

$$V_{Rd1} = \tau_{Rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_1) \cdot b_w \cdot d \quad (2.20)$$

mit:	$\tau_{Rd} = \tau_{Rk} / \gamma_c$	aufnehmbare Schubspannung
	$\tau_{Rk} = 0,125 \cdot f_{t,flk}$	charakteristische Schubspannung
	$f_{t,flk}$	charakteristische Biegezugfestigkeit
	$k = 1,6 - d / 1000 \geq 1$	Faktor für die Schubfestigkeit

Der Bemessungswert der bis zum Versagen der gedachten Druckstreben aufnehmbaren Querkraft  $V_{Rd2}$  darf nach Gleichung (2.21) bestimmt werden.

$$V_{Rd2} = 0,5 \cdot \eta_1 \cdot b_w \cdot z \cdot v \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (2.21)$$

mit:	$v = 0,6$	Wirksamkeitsfaktor
------	-----------	--------------------

### Bauteile mit Querkraftbewehrung

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

$$V_{Ed} < V_{Rd2}$$

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

Der Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft  $V_{Rd3}$  für Bauteile mit Querkraftbewehrung darf nach Gleichung (2.22) nach *DIN EN 1520:2011-06* unter Berücksichtigung von *DIN 4213:2015-10* wie folgt bestimmt werden.

$$V_{Rd3} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta \quad (2.22)$$

mit:	$A_{sw}$	Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung
	$s$	Abstand der Querkraftbewehrung
	$z$	innerer Hebelarm ( $\approx 0,9 \cdot d$ )
	$f_{ywd}$	Bemessungswert der Streckgrenze der Querkraftbewehrung
	$f_{ywk}$	$\leq 400 \text{ N/mm}^2$
	$\cot \theta$	Neigungswinkel der Druckstreben $1 \leq \cot \theta \leq 2,5$ $\cot \theta = 1,2$ für reine Biegung nach <i>DIN 4213:2015-10</i>

Für Balken mit lotrecht angeordneter Querkraftbewehrung darf alternativ der Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft  $V_{Rd3}$  mit Gleichung (2.23) aus *DIN EN 1520:2011-06* bestimmt werden. Dabei wird ein Traganteil der Querkraftbewehrung auf den Betontraganteil für Bauteile ohne Querkraftbewehrung  $V_{Rd1}$  nach Gleichung (2.20) addiert. Diese Variante der Bemessung ist nach *DIN 4213:2015-10* in Deutschland nicht zugelassen.

$$V_{Rd3} = V_{Rd1} + V_{wd} \quad (2.23)$$

mit:  $V_{Rd1}$  Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft für Bauteile ohne Querkraftbewehrung nach Gl. (2.20)  
 $V_{wd}$  Beitrag der Querkraftbewehrung zum Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft nach Gl. (2.24)

Dabei gilt  $V_{wd}$  als Beitrag der Querkraftbewehrung zum Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft. Dieser wird nach Gleichung (2.24) bestimmt.

$$V_{wd} = 0,8 \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \quad (2.24)$$

mit:  $f_{ywk} \leq 400 \text{ N/mm}^2$

## 2.5 Fazit

Aufgrund der aktuell in Deutschland geltenden Vorschriften (*DIN EN 1520:2011-06* und *DIN 4213:2015-10*) dürfen freitragende Wandelemente mit Querkraftbeanspruchung nicht im Walzverfahren hergestellt werden. Die Vorgabe eines geschlossenen Bewehrungskorbes nach *DIN 4213:2015-10* erfordert eine aufwendige Verdichtung von Hand.

Die in Kapitel 2.1.6 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 vorhersagen zu können. Dies spiegelt sich auch in den unterschiedlichen Bemessungsmodellen nach *DIN EN 1520:2011-06* und *DIN 4213:2015-10* wider.

Für die erforderlichen Standsicherheitsnachweise fehlen ein einheitliches Bemessungsmodell und umsetzbare Anwendungs- und Konstruktionsregeln.





### 3 Voruntersuchungen zur Verdichtung von LAC

#### 3.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Wie in Kapitel 2.1.2 bereits beschrieben, werden Wandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton üblicherweise im Walzverfahren hergestellt. Dabei werden zunächst die untersten Betonschichten mit einem Außenrüttler am Schaltisch und im Anschluss die oberen Schichten des Betons mit einer Vibrationswalze verdichtet. Um die Auswirkung dieser speziellen Art der Verdichtung auf das Gefüge und damit die Festigkeit in den einzelnen Schichten des Betons zu untersuchen, werden Versuche an 18 Bohrkernen durchgeführt. Dabei werden 18 Bohrkern aus vorgefertigten Elementen entnommen, in Scheiben geschnitten und der Anteil der Poren und Hohlräume bestimmt. Die Untersuchungen werden in den Prüfhallen der Hochschule Koblenz durchgeführt.

#### 3.2 Versuchsaufbau

Zur Untersuchung des Porenanteils werden die Hohlräume des haufwerksporigen Leichtbetons mit einem hochauflösenden 3D-Digitalmikroskop vermessen und der prozentuale Hohlraumanteil bestimmt.

Die Bohrkern werden aus vorgefertigten Elementen entnommen und in Scheiben geschnitten. Die Bohrkernscheiben werden in ein 3D-Digitalmikroskop eingelegt und die Oberfläche der Scheibe sowie das Volumen der Hohlräume vermessen. Dabei wird von oben nach unten, von Walzseite zur Schalseite, vorgegangen. Der Blick wird stets auf die nach oben zeigende Schnittseite der Bohrkernscheibe gerichtet. In der nachfolgenden Abbildung 3-1 wird ein in Scheiben geschnittener Bohrkern gezeigt. In der Skizze in Abbildung 3-2 wird der Versuchsaufbau schematisch dargestellt.

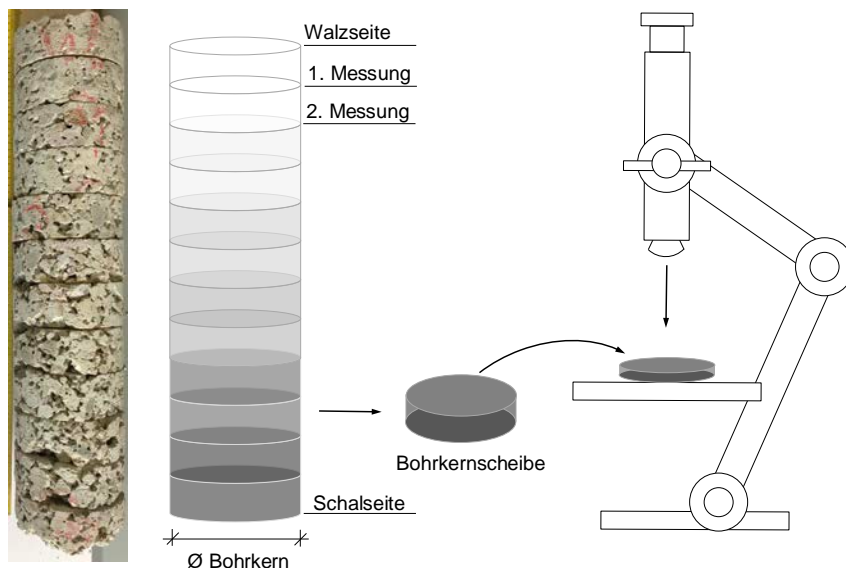


Abbildung 3-1: Bohrkern  
in Scheiben geschnitten

Abbildung 3-2: Skizze Versuchsaufbau

### 3.3 Geometrie der Versuchskörper

Die Bohrkern werden aus vorgefertigten Elementen mit realistischen Dimensionen entnommen. Im Rahmen der Untersuchungen werden Elemente mit 25 cm und 40 cm Dicke gewählt. Diese Elementdicken stellen jeweils die geringste und die größte Bauteildicke von Wandelementen aus LAC mit eingebauten Dämmkernen dar und werden daher als Grenzen für die Bohrkernuntersuchungen gewählt.

Durch die besonders offenporige Struktur des LAC kann es bei der Entnahme von Bohrkernen leicht zu Brüchen und Schäden der Proben kommen. Um Beschädigungen weitgehend zu vermeiden, wird ein Bohrkerndurchmesser von 100 mm gewählt. Jeder Bohrkern wird in 2,5 cm dicke Scheiben geschnitten. Der Verschnitt durch das Sägeblatt beträgt etwa 0,5 cm.

In der folgenden Abbildung 3-3 wird eine Skizze der entnommenen Bohrkern am Beispiel eines 40 cm dicken Elementes dargestellt.

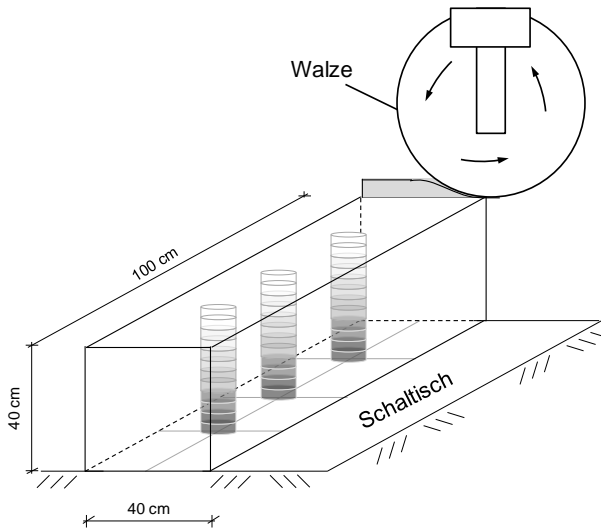


Abbildung 3-3: Skizze der entnommenen Bohrkern am Beispiel eines 40 cm dicken Elementes

### 3.4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Verdichtung von Bauteilen aus LAC dargestellt. Die Messungen der Bohrkernscheiben im Digitalmikroskop liefern hochauflösende Grafiken der Bohrkernscheiben und identifizieren Poren und Hohlräume. Dabei werden Porenräume, die bereits im Leichtzuschlag enthalten sind, und Hohlräume, die zwischen den Zuschlagskörnern entstehen, zu einem prozentualen Hohlraumgehalt zusammengefasst.

Die Messung wird exemplarisch am Beispiel von Versuchskörper Nummer 3 erläutert.

In der nachfolgenden Abbildung 3-4 wird eine erzeugte Grafik aus dem Digitalmikroskop gezeigt. Die Schichthöhe der dargestellten Bohrkernscheibe beträgt 3 cm. Die dazugehörige Messung der Hohlraumfläche wird in Abbildung 3-5 dargestellt und in Rot hervorgehoben. Der Hohlraumanteil beträgt bei diesem Versuch, im Abstand von 3 cm von der Walzseite, 7 %.

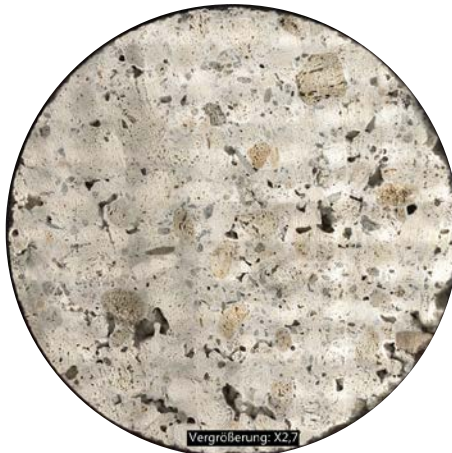


Abbildung 3-4: Versuch Nummer 3,  
Schichthöhe 3 cm

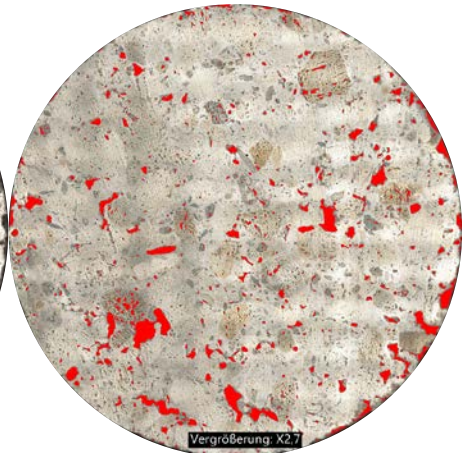


Abbildung 3-5: Markierter Hohlraumanteil  
Versuch Nummer 3, Schichthöhe 3 cm

In den folgenden Abbildungen wird das Messergebnis des zuvor dargestellten Versuchskörpers in einer Schichthöhe von 15 cm dargestellt.

In Abbildung 3-6 ist ein größerer Hohlraumgehalt bereits optisch erkennbar. Die Messung der Hohlraumfläche wird in Abbildung 3-7 dargestellt und mit rot markierten Flächen hervorgehoben. Der prozentuale Hohlraumanteil beträgt in diesem Versuch, im Abstand von 15 cm von der Walzseite, 20 %.



Abbildung 3-6: Versuch Nummer 3, Schichthöhe 15 cm

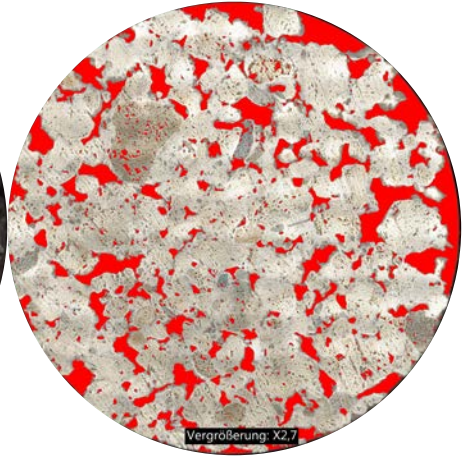


Abbildung 3-7: Markierter Hohlraumanteil Versuch Nummer 3, Schichthöhe 15 cm

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Mikroskopuntersuchung dargestellt. Dabei wird der Hohlraumanteil in Prozent auf die Höhe des Bohrkerns aufgetragen. In Abbildung 3-8 werden die Ergebnisse der 25 cm hohen Bohrkerns dargestellt, während Abbildung 3-9 die Ergebnisse der 40 cm hohen Bohrkerns zeigt.

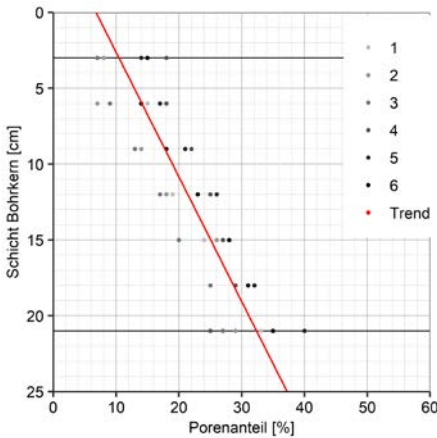


Abbildung 3-8: Porenanteil in Abhängigkeit von der Messhöhe bei Bohrkernen mit 25 cm Höhe

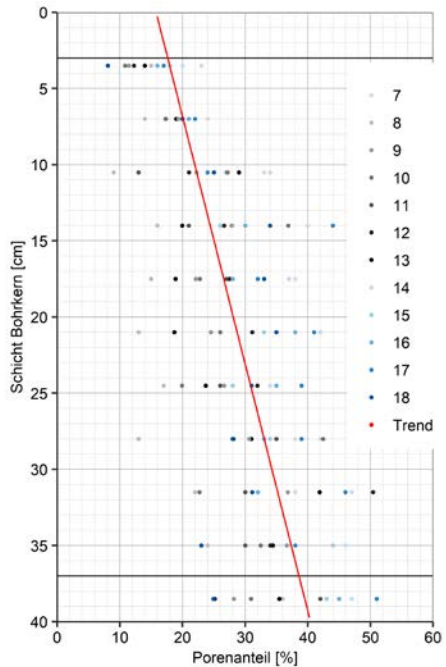


Abbildung 3-9: Porenanteil in Abhängigkeit von der Messhöhe bei Bohrkernen mit 40 cm Höhe

In Tabelle 3-1 und Tabelle 3-2 werden die Ergebnisse der Messungen der einzelnen Schichten der Bohrkerne dargestellt. Dabei werden die oberste und unterste Schicht jeweils hervorgehoben, da diese in etwa den Bereich der Bewehrung markieren.

Tabelle 3-1: Hohlraumanteil in % für Bohrkerne mit 25 cm Höhe (Abbildung 3-8)

Höhe [cm]	Versuchsnummer						Ø
	1	2	3	4	5	6	
3	7	8	7	18	14	15	11,5
6	15	7	9	18	17	14	13,3
9	14	14	13	22	21	18	17,0
12	19	18	17	25	26	23	21,3
15	24	26	20	27	28	28	25,5
18	29	32	25	29	32	31	29,7
21	33	29	27	25	40	35	31,5

Tabelle 3-2: Hohlraumanteil in % für Bohrkerne mit 40 cm Höhe (Abbildung 3-9)

Höhe [cm]	Versuchsnummer												Ø
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
3,5	23	15	17	12	14	20	18	16	17	8	11	11	15,2
7,0	24	14	22	17	19	22	22	21	22	20	19	17	20,0
10,5	33	9	13	21	29	34	25	27	24	25	22	27	24,1
14,0	28	16	21	27	20	40	26	30	44	34	28	37	29,2
17,5	38	15	27	28	19	37	32	28	32	33	22	23	27,8
21,0	33	13	26	31	19	42	33	38	41	35	25	26	30,1
24,5	35	17	26	32	24	34	28	35	39	31	27	20	28,9
28,0	38	13	35	28	31	42	34	33	39	28	31	42	32,8
31,5	38	22	30	50	42	47	32	32	46	31	37	23	35,8
35,0	38	24	30	34	34	46	44	38	38	23	37	32	34,9
38,5	36	36	42	25	35	47	43	45	51	25	28	31	37,1

Bei allen untersuchten Bohrkernen waren die gemessenen Porenräume auf der Schalseite größer als auf der Walzseite. Diese Unterschiede in der Verdichtung lassen sich auch anhand der optischen Aufnahmen der Bohrkernscheiben erkennen. In der nachfolgenden Abbildung 3-10 werden drei Schichten eines Bohrkerns in einer Grafik exemplarisch dargestellt. Dabei ist erkennbar, dass die Schicht an der Walzseite stark verdichtet ist, während die Schichten in der Mitte des Bohrkerns weniger und an der Schalseite des Bohrkerns wesentlich weniger verdichtet sind und größere Hohlräume aufweisen.

Weitere Ergebnisse der Bohrkernuntersuchungen können Anhang A entnommen werden.

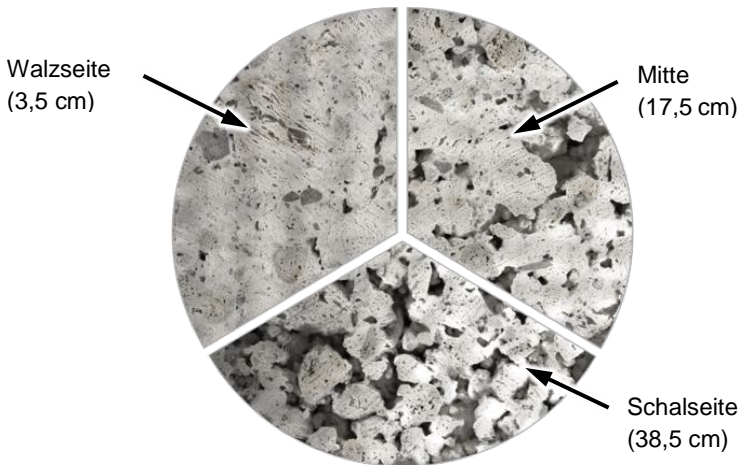


Abbildung 3-10: Beispiel Bohrkernuntersuchung

## 3.5 Auswertung

In den dargestellten Untersuchungen zur Verdichtung werden die Auswirkungen der Walzenverdichtung auf das Gefüge in haufwerksporigem Leichtbeton in verschiedenen Bauteilschichten untersucht.

Durch die optische Messung lassen sich starke Unterschiede zwischen Schal- und Walzseite im Hohlraumgehalt erkennen. Zunächst lässt sich feststellen, dass die Betonschichten auf der Schalseite weniger intensiv verdichtet werden als die oberen Schichten auf der Walzseite. Im Mittel ergibt sich durch die Verdichtung mittels Walze eine Verringerung des Hohlraumgehaltes um 20 % absolut im Vergleich zur Schalseite, unabhängig von der Dicke der Elemente, aus denen die Bohrkern entnommen wurden.

Aus eigenen Versuchen und aus *Hanz 2017* geht ein linearer Zusammenhang zwischen Rohdichte und Druckfestigkeit im haufwerksporigen Leichtbeton hervor. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Schichten der Schalseite eine entsprechend geringere Druckfestigkeit als die Schichten der Walzseite aufweisen. Dabei kann außerdem festgestellt werden, dass die stärkere Verdichtungswirkung der Vibrationswalze lediglich die oberen 5 bis 6 cm des Bauteils beeinflusst.

### Fazit

Durch die experimentell ermittelten Unterschiede im Hohlraumgehalt in den Bohrkernschichten lässt sich auch auf Unterschiede in der Verankerungs- und Verbundwirkung von Bewehrung in den Bereichen der Schal- und Walzseite schließen. Da ein Verankerungsversagen der Bewehrung ein mögliches Versagenskriterium bei Bauteilen aus LAC darstellt, sollte der Einfluss der Verdichtung und der Lage der Bewehrung auf die Tragfähigkeit eines Bauteils untersucht werden. Daher wird in den folgenden Untersuchungen zur Verankerung von Bewehrung in LAC die Lage der Stäbe variiert.



## 4 Experimentelle Untersuchungen zur Verankerung

### 4.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Wie in Kapitel 2.1.7 bereits beschrieben, unterscheidet sich die Verbund- und Verankerungstragfähigkeit von Bewehrungsstäben in LAC grundlegend von der Verbundwirkung von Bewehrung in Normalbeton und gefügedichtem Leichtbeton. Da das Verbund- und Verankerungsverhalten der Bewehrung für die Tragfähigkeit eines Bauteils von besonderer Bedeutung ist, werden Auszugversuche durchgeführt, die Erkenntnisse zur Verankerungstragfähigkeit von Bewehrung in haufwerksporigem Leichtbeton liefern. Die Untersuchungen werden in den Prüfhallen der Hochschule Koblenz durchgeführt.

Ziel der insgesamt 60 Versuche ist die Bewertung der Verbund- und Verankerungstragfähigkeit von gerippter Bewehrung in haufwerksporigem Leichtbeton unter dem Einfluss verschiedener Endverankerungsvarianten.

Untersucht werden zunächst Endhaken nach *DIN EN 1520:2011-06*. In Abbildung 4-1 wird exemplarisch ein Stab mit angeformtem Endhaken gezeigt.

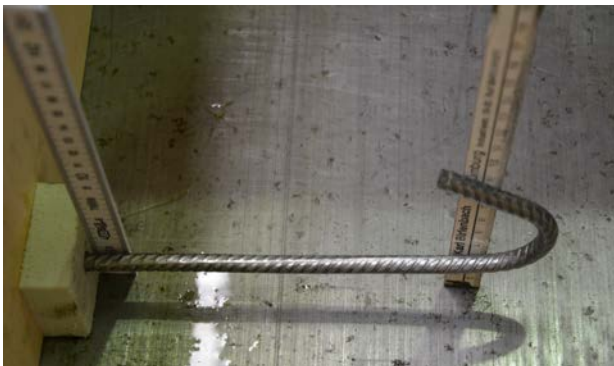


Abbildung 4-1: Bewehrungsstab mit angeformtem Endhaken nach *DIN EN 1520:2011-06*

Außerdem wird die Verankerung mit Endhaken und angeschweißtem Querstab untersucht (Abbildung 4-2). Dabei ist der Querstab in der Spitze des Hakens angeschweißt.



Abbildung 4-2: Bewehrungsstab mit angeformtem Endhaken und angeschweißtem Querstab

#### 4 Experimentelle Untersuchungen zur Verankerung

Weitere Varianten mit angeschweißten Querstäben werden in Abbildung 4-3 und Abbildung 4-4 dargestellt. Dabei werden jeweils ein oder zwei Querstäbe an einen Bewehrungsstab mit geradem Stabende angeschweißt.



Abbildung 4-3: Gerades Stabende mit einem angeschweißten Querstab



Abbildung 4-4: Gerades Stabende mit zwei angeschweißten Querstäben



## 4.2 Versuchsaufbau

In den experimentellen Untersuchungen werden Probekörper aus haufwerksporigem Leichtbeton mit verzinkten, gerippten Bewehrungsstäben mit verschiedenen Verankerungsvarianten in einem modifizierten BeamEndTest (BET) geprüft. In diesem modifizierten Versuchsaufbau wird bewusst auf Bügel und Umschnürungen verzichtet, um den Verankerungsbereich ungestört zu belassen. Die einbetonierten Bewehrungsstäbe werden aus dem Prüfkörper herausgeführt und auf Zug beansprucht. Um einen kegelförmigen Betonausbruch an der Oberseite des Prüfkörpers zu vermeiden, wird nach Empfehlung von *Wildermuth 2013* eine verbundfreie Vorlänge eingehalten, die hier mit 20 mm festgelegt ist.

Zur Durchführung der Versuche ist ein Versuchsrahmen konzipiert worden, der den Einbau der Probekörper im Prüfportal ermöglicht. Der hergestellte Stahlrahmen zur Sicherung des Prüfkörpers in der Prüfmaschine wird in der folgenden Abbildung 4-5 schematisch dargestellt.

Eine Systemskizze des Versuchsaufbaus ist Abbildung 4-6 zu entnehmen.

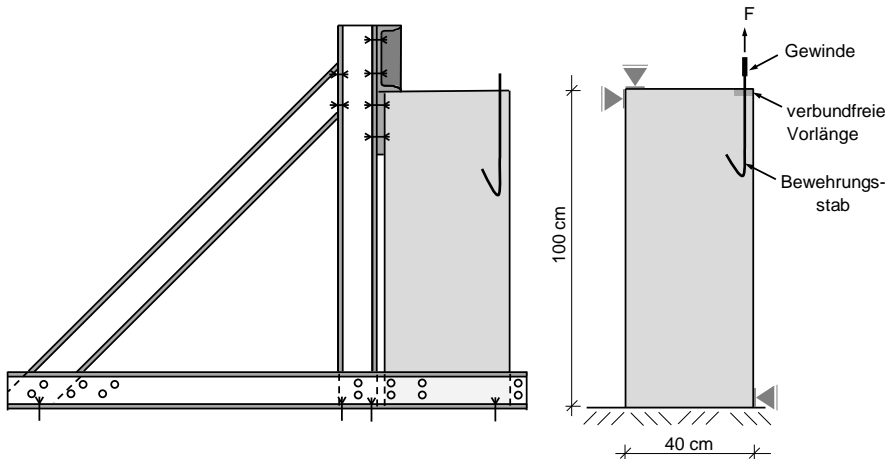


Abbildung 4-5: Stahlrahmen mit eingebautem Versuchskörper

Abbildung 4-6: Systemskizze BET-Versuche

Um die Bewehrungsstäbe in der Prüfmaschine befestigen zu können, wird das freie Ende der Stäbe mit einem Gewinde versehen (Abbildung 4-7).



Abbildung 4-7: Bewehrungsstab mit Gewinde

Ein eingebauter Prüfkörper, der mit dem Stahlrahmen im Prüfportal befestigt ist, wird in Abbildung 4-8 beispielhaft dargestellt.



Abbildung 4-8: Stahlrahmen mit eingebautem Prüfkörper

### 4.3 Versuchsprogramm

Die Versuche aus Kapitel 3 haben gezeigt, dass der Anteil an Hohlräumen in den Schichten eines Bauteils aus LAC aufgrund der Verdichtungsart in Abhängigkeit von der Dicke veränderlich ist. Daher wird vermutet, dass der unterschiedliche Hohlraumgehalt auch einen Einfluss auf die Festigkeit des Betons und somit die Verbund- und Verankerungstragfähigkeit von Bewehrungsstäben in den jeweiligen Schichten hat. Bei allen Varianten wird daher unterschieden, ob der Bewehrungsstab beim Betoniervorgang auf der Schal- oder auf der Walzseite im Beton liegt. Dies wird in den Versuchsbezeichnungen mit dem Index s für Schalseite und w für Walzseite gekennzeichnet. In den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 4-9, Abbildung 4-10) wird die Lage der Stäbe im Herstellungsprozess für beide Varianten schematisch dargestellt.

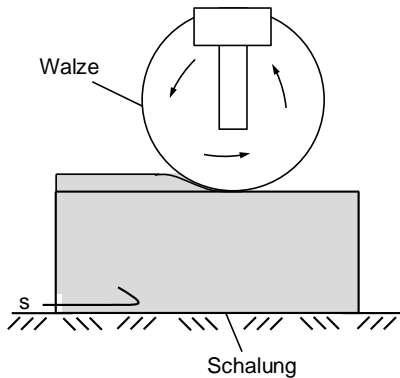


Abbildung 4-9: Bewehrungsstab an der Schalseite während der Herstellung der Prüfkörper, Index s

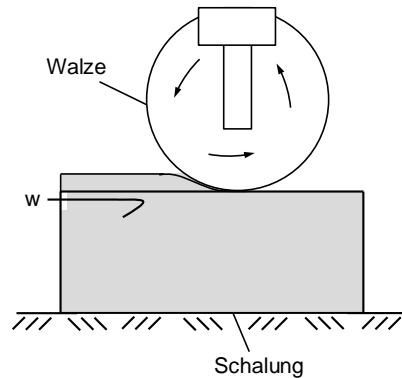


Abbildung 4-10: Bewehrungsstab an der Walzseite während der Herstellung der Prüfkörper, Index w

Um die Versuche eindeutig zuordnen zu können, wird eine eindeutige Versuchsbezeichnung gewählt. Dabei wird eine Langbezeichnung entwickelt, in der alle relevanten Versuchsparameter enthalten sind. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird zusätzlich eine Kurzbezeichnung eingeführt, bei der die Parameter in der Bezeichnung wegfallen. Das nachfolgend gezeigte Beispiel erhält die Kurzbezeichnung BET-12.1s.

Kurzbezeichnung:

BET-12.1s

Langbezeichnung:

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

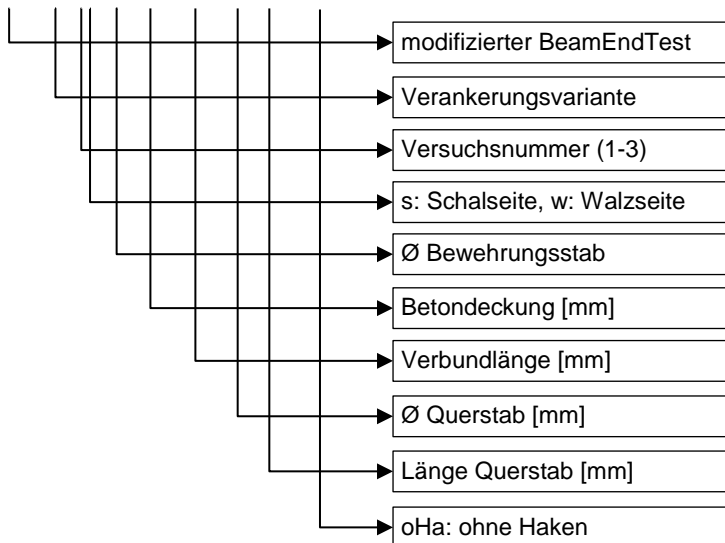


Abbildung 4-11: Bezeichnung der Versuchskörper in den Auszugversuchen

#### 4 Experimentelle Untersuchungen zur Verankerung

Im Folgenden wird das Versuchsprogramm der durchgeführten Auszugversuche dargestellt. Die Versuche werden in drei Serien aufgeteilt.

Während in Serie A lediglich die Verankerung mittels Endhaken (nach Bild A.10 DIN EN 1520:2011-06) unter Variation der Betondeckung und der Verbundlänge untersucht wird, kommen in Serie B verschiedene Verankerungsvarianten mit Endhaken zum Einsatz. In Serie C werden weitere Verankerungsvarianten mit und ohne Haken geprüft und zusätzlich gerade Stäbe ohne Endverankerung auf ihr Verbundverhalten hin getestet.

In der Serie A (Tabelle 4-1) wird der Einfluss der Betondeckung und der Verbundlänge auf die Verankerungstragfähigkeit eines Bewehrungsstabes mit Endhaken untersucht. Dabei wird die Betondeckung  $c_{nom}$  zwischen 20 mm und 30 mm variiert. Die Verbundlänge wird mit 200 mm und 300 mm geprüft. Der Durchmesser der Bewehrungsstäbe ist auf 8 mm festgelegt, da dieser den praxisüblichen Standard darstellt.

Tabelle 4-1: Versuchskörper zur Untersuchung der Verankerung, Serie A

Versuch	Skizze	Variation	$\phi$	$c_{nom}$	Verbundlänge $l_b$	Querstäbe angeschweißt	Länge Querstäbe	Langbezeichnung	
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		
Serie A									
BET-1s		Betondeckung	8	20	200	-	-	BET-1.1s_8_20_200	
								BET-1.2s_8_20_200	
BET-1w									BET-1.3s_8_20_200
				8	20	200	-	-	BET-1.1w_8_20_200
									BET-1.2w_8_20_200
									BET-1.3w_8_20_200
BET-2s		Betondeckung	8	30	200	-	-	BET-2.1s_8_30_200	
								BET-2.2s_8_30_200	
BET-2w									BET-2.3s_8_30_200
				8	30	200	-	-	BET-2.1w_8_30_200
									BET-2.2w_8_30_200
									BET-2.3w_8_30_200
BET-3s		Verbundlänge	8	20	300	-	-	BET-3.1s_8_20_300	
								BET-3.2s_8_20_300	
BET-3w									BET-3.3s_8_20_300
				8	20	300	-	-	BET-3.1w_8_20_300
									BET-3.2w_8_20_300
									BET-3.3w_8_20_300
BET-4s		Verbundlänge	8	30	300	-	-	BET-4.1s_8_30_300	
								BET-4.2s_8_30_300	
BET-4w									BET-4.3s_8_30_300
				8	30	300	-	-	BET-4.1w_8_30_300
									BET-4.2w_8_30_300
									BET-4.3w_8_30_300

In Serie B (Tabelle 4-2) wird eine Variante mit einem angeschweißten Querstab im Haken des Bewehrungsstabes (BET-5) geprüft. Der Querstab, mit einer Länge von 300 mm und einem Durchmesser von 8 mm, ist in der Krümmung des Endhakens angeschweißt. Außerdem werden Versuchskörper mit einem liegenden Haken (BET-6), parallel zur Betonoberfläche, hergestellt, um den Einfluss der Ausrichtung des Hakens zu untersuchen.

Tabelle 4-2: Versuchskörper zur Untersuchung der Verankerung, Serie B

Versuch	Skizze	Variation	$\phi$	$c_{nom}$	Verbundlänge $l_b$	Querstäbe angeschweißt	Länge Querstäbe	Langbezeichnung
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
Serie B								
BET-5s		angeschweißter Querstab	8	20	200	1 $\phi$ 8 mm	300	BET-5.1s_8_20_200_8_300
								BET-5.2s_8_20_200_8_300
								BET-5.3s_8_20_200_8_300
BET-5w		angeschweißter Querstab	8	20	200	1 $\phi$ 8 mm	300	BET-5.1w_8_20_200_8_300
								BET-5.2w_8_20_200_8_300
								BET-5.3w_8_20_200_8_300
BET-6s		liegender Haken parallel zur Betonoberfläche	8	20	200	-	-	BET-6.1s_8_20_200
								BET-6.2s_8_20_200
								BET-6.3s_8_20_200
BET-6w		liegender Haken parallel zur Betonoberfläche	8	20	200	-	-	BET-6.1w_8_20_200
								BET-6.2w_8_20_200
								BET-6.3w_8_20_200

In Serie C (Tabelle 4-3) wird zunächst der Einfluss des Bewehrungsdurchmessers untersucht. Dazu wird in der Variante BET-9 der Durchmesser des Bewehrungsstabes mit Endhaken auf 10 mm erhöht. Außerdem werden einbetonierte Bewehrungsstäbe ohne Haken auf ihr Verbundverhalten hin überprüft (BET-10). Die Varianten BET-12 und BET-13 bestehen aus einem Bewehrungsstab ohne Haken mit jeweils einem bzw. zwei angeschweißten Querstäben. Die Betondeckung  $c_{nom}$  wird auf 20 mm festgelegt und die Verankerungslänge  $l_b$  wird bei 200 mm belassen.

Tabelle 4-3: Versuchskörper zur Untersuchung der Verankerung, Serie C

Versuch	Skizze	Variation	$\phi$	$c_{nom}$	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-9.2s_10_20_200
								BET-9.3s_10_20_200
BET-9w		Stabdurchmesser	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-10.2s_8_20_200_oHa
								BET-10.3s_8_20_200_oHa
BET-10w		gerades Stabende	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 $\phi$ 8 mm	300	BET-12.1s_8_20_200_8_300_oHa
								BET-12.2s_8_20_200_8_300_oHa
								BET-12.3s_8_20_200_8_300_oHa
BET-12w		gerades Stabende + angeschweißter Querstab	8	20	200	1 $\phi$ 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 $\phi$ 8 mm	300	BET-13.1s_8_20_200_8_300_oHa
								BET-13.2s_8_20_200_8_300_oHa
								BET-13.3s_8_20_200_8_300_oHa
BET-13w		gerades Stabende + 2 angeschweißte Querstäbe	8	20	200	2 $\phi$ 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

#### 4.4 Geometrie der Versuchskörper

Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, sind die Herstellung und Verdichtung des hauwerksporigen Leichtbetons von großer Bedeutung für die Materialeigenschaften des LAC. Aus diesem Grund wird bei der Dimensionierung darauf geachtet, dass die Probekörper realitätsnahe Bauteildicken aufweisen. Dadurch kann 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 Verbund- und Verankerungstragfähigkeit führen. Die Probekörper werden in den Abmessungen von 40 cm x 40 cm x 100 cm in einem Fertigteilwerk hergestellt. 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 (vgl. Abbildung 4-18).

#### 4.5 Herstellung und Verdichtung

Wie bei Bauteilen aus Leichtbeton mit hauwerksporigem Gefüge üblich, werden alle Probekörper liegend betoniert und im Walzvorgang verdichtet. Dabei wird zunächst Beton schichtweise in Stahlschalungen gefüllt und mit Tischrüttlern verdichtet. Die oberen Betonschichten werden mit einem Überschuss von etwa 10 % der Elementdicke überhöht aufgebracht und mit einer Vibrationswalze verdichtet.

In der nachfolgenden Abbildung 4-12 wird die Anordnung der Prüfkörper beim Betoniervorgang beispielhaft dargestellt. Alle Prüfkörper einer Versuchsvariante werden auf einem Schaltisch mit der gleichen Betoncharge hergestellt. Zusätzlich werden für jede Variante zwei Prüfkörper ohne Bewehrung hergestellt, die zur Entnahme von Bohrkernen dienen. Jede Variante eines Prüfkörpers wird dreimal identisch hergestellt.

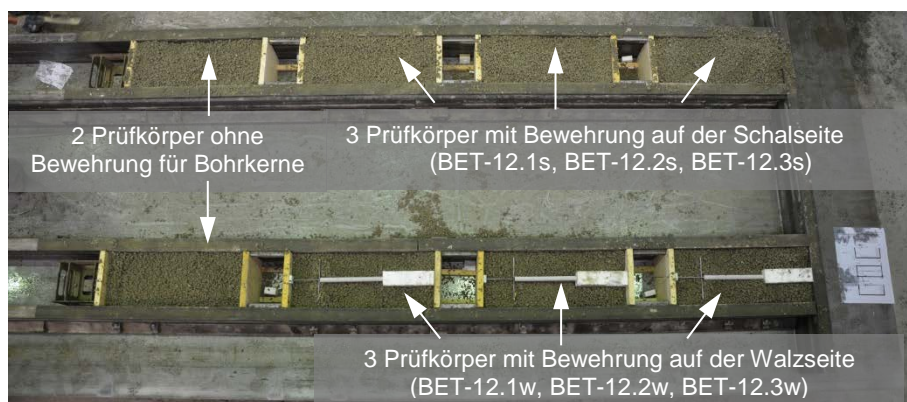


Abbildung 4-12: Anordnung der Prüfkörper während der Betonage (Draufsicht, hier am Beispiel BET-12)

## 4.6 Messtechnik

Um den Schlupf der Bewehrung, also die Differenzverschiebung zwischen Beton und Bewehrungsstab, messen zu können, wird die Bewehrung aus dem Bauteil herausgeführt. Dazu wird bei den Varianten mit Haken ein Hilfsstab angeschweißt (Abbildung 4-13). Bei den Varianten ohne Haken wird der Bewehrungsstab entsprechend verlängert, um ihn aus dem Bauteil herauszuführen. Damit die Hilfsstäbe keine zusätzliche Verbundspannung übertragen, werden Kunststoffrohre über den Stab gezogen (Abbildung 4-14). Um später einen Wegaufnehmer an dem Ende des Hilfsstabes anbringen zu können, wird ein Platzhalter aus expandiertem Polystyrol (EPS) eingebaut (Abbildung 4-15). Dieser wird nach dem Aushärten des Betons entfernt, um die Messtechnik am Hilfsstab applizieren zu können.



Abbildung 4-13: Bewehrungsstab mit Endhaken und angeschweißtem Hilfsstab



Abbildung 4-14: Bewehrungsstab mit Endhaken, angeschweißtem Hilfsstab und Kunststoffrohr



Abbildung 4-15: Bewehrungsstab mit Endhaken, angeschweißtem Hilfsstab, Kunststoffrohr und EPS für Messtechnik

Nach dem Entfernen des EPS-Platzhalters kann der Hilfsstab freigelegt werden. Während der Versuche wird ein Wegaufnehmer so angebracht, dass er gegen das Ende des Hilfsstabes messen kann (Abbildung 4-17).





Abbildung 4-16: Eingebauter Prüfkörper mit Wegaufnehmer



Abbildung 4-17: Freigelegter Bereich mit Wegaufnehmer

#### 4.7 Versuchsdurchführung

Vor Beginn der Versuche werden die Prüfkörper auf mögliche Risse und Fehlstellen, die durch die Herstellung oder den Transport entstehen können, untersucht. Sofern äußerlich Auffälligkeiten vorhanden sind, werden diese fotografiert und dokumentiert. Die Prüfkörper werden mit dem in Kapitel 4.2 dargestellten Stahlrahmen in der Prüfmaschine befestigt und gesichert. Die Zugkraft wird mit Hilfe eines computer-gesteuerten Hydraulikzylinders weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min aufgebracht. Nach einem Kolbenweg von 30 mm werden die Versuche beendet, da größere Verformungen aus baupraktischer Sicht nicht relevant erscheinen. Zeitgleich wird die Verformung des Bewehrungsstabes mithilfe des Wegaufnehmers aufgezeichnet und kontrolliert. Die Rissentwicklung auf der Betonoberfläche wird durch eine Videokamera während der Versuche dokumentiert.



## 4.8 Werkstoffeigenschaften

### Haufwerksporiger Leichtbeton

Im Folgenden werden die Werkstoffeigenschaften der Probekörper dargestellt. Der verwendete Leichtbeton weist ein haufwerksporiges Gefüge auf und wird mit Rohbims aus dem Neuwieder Becken hergestellt. Es werden Bohrkern aus den zusätzlich hergestellten Probekörpern ohne Bewehrung entnommen. Dabei werden sowohl die Rohdichte als auch die Druckfestigkeit bestimmt. Alle Prüfkörper sollen die gleichen Werkstoffeigenschaften erhalten und werden dementsprechend mit der gleichen Rezeptur hergestellt. Die Rezeptur entspricht der verwendeten Zusammensetzung der Versuche aus Kapitel 3.

In der nachfolgenden Tabelle 4-4 werden die Ergebnisse der Prüfungen der Materialeigenschaften gezeigt.

Tabelle 4-4: Messwerte der Druckfestigkeit und der Rohdichte nach *DIN EN 1354:2005-09*

Versuch	Serie A		Serie B		Serie C	
	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Druckfestigkeit $f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Druckfestigkeit $f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Druckfestigkeit $f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	975	2,1	1307	7,2	1034	4,7
2	880	1,7	1229	5,4	1043	4,0
3	918	2,1	1150	3,7	1054	4,7
4	969	2,0	1208	5,5	1098	4,1
5	924	2,1	1147	4,0	1058	4,7
6	1001	3,1	1136	4,2	1061	3,1
7	1018	2,4	1186	4,7	1084	4,7
8	952	1,8	1130	3,7	1045	4,1
9	1061	3,2	1050	2,6	1016	3,0
10	1001	2,6	1292	5,9	1028	4,2
11	1013	2,5	1214	4,3	995	2,7
12	1033	3,1	1083	2,9	1099	5,2
13					1120	4,8
14					1113	4,8
<b>Mittelwert</b>	<b>979</b>	<b>2,4</b>	<b>1178</b>	<b>4,5</b>	<b>1061</b>	<b>4,2</b>

### Betonstahl

Um den Korrosionsschutz sicherzustellen, werden in haufwerksporigem Leichtbeton üblicherweise Bewehrungsstäbe aus verzinktem Betonstahl eingesetzt. Daher wird für alle Versuche verzinkter Stabstahl B500B nach *DIN 488-1:2009-08* verwendet.

## 4.9 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Messergebnisse der Versuchsreihen der Auszugversuche dargestellt, wobei nur die relevanten Ergebnisse ausführlich dargestellt werden. Darüber hinausgehende Messergebnisse können dem Anhang B entnommen werden.

Die Ergebnisse werden nach ihrer Verankerungsart wie folgt gegliedert:

- Endhaken
- Ausrichtung des Hakens
- Stabdurchmesser
- ohne Endverankerung
- mit angeschweißten Querstäben

### Endhaken

In Abbildung 4-18 wird beispielhaft das Kraft-Weg-Diagramm der Versuchsvariante BET-1 gezeigt. Dabei stellen die durchgezogenen Linien die Ergebnisse an der Schalseite und die gestrichelten Linien die Ergebnisse an der Walzseite dar. In den Versuchen mit Endhaken senkrecht zum gewalzten Betonrand (BET-1) können durchschnittlich 5,8 kN an der Schalseite und 7,1 kN an der Walzseite aufgenommen werden. Das Verankerungsverhalten unterscheidet sich grundlegend in den Bereichen der Schal- und der Walzseite.

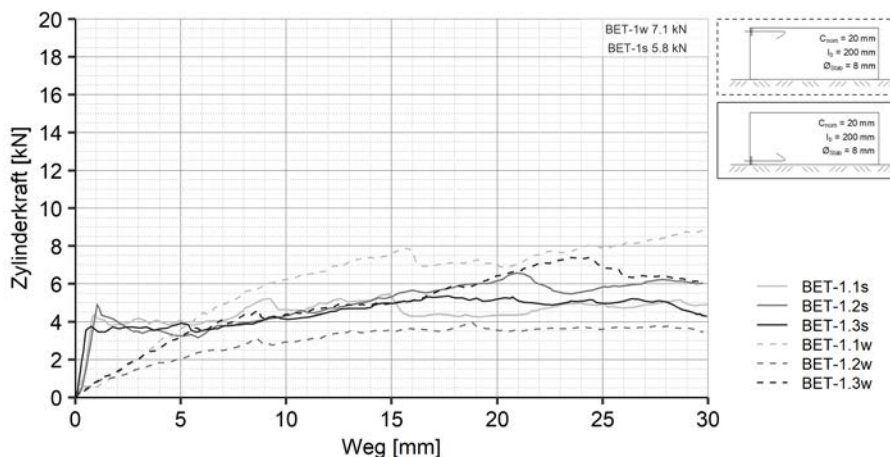


Abbildung 4-18: Kraft-Weg-Diagramm BET-1

Zu Beginn zeigen die durchgezogenen Kurven der Schalseite einen Kraftanstieg auf durchschnittlich 5 kN bei einem Schlupf von etwa 1 mm. Ab diesem Zeitpunkt wird der Bewehrungsstab gleichmäßig aus dem Beton gezogen, wobei die Kurven auf einem gleichmäßigen Niveau von durchschnittlich 5,8 kN bleiben. Im Vergleich dazu zeigt sich bei den Versuchen der Walzseite ein wesentlich flacherer Kraftanstieg zum Belastungsbeginn. Die Kurven erreichen erst nach einer Verformung zwischen 15 und 30 mm ihre Maximalwerte, die im Mittel bei 7,1 kN liegen. Bei kleineren Verformungen bis etwa 5 mm zeigen sich im Verlauf der Kraft-Weg-Kurven gute Übereinstimmungen unter den jeweils drei gleich hergestellten Prüfkörpern.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird in den folgenden Grafiken jeweils der Mittelwert aus drei Versuchen je Versuchsvariante dargestellt. Im Folgenden werden die Last-Verformungskurven der Versuche aus Serie A dargestellt. Die Prüfkörper sind mit Bewehrungsstäben und Endhaken ausgestattet. Dabei werden jeweils nur die Betondeckung und die Verbundlänge variiert (s. Tabelle 4-1).

In Abbildung 4-19 werden die Kraft-Weg-Kurven der Schalseite und in Abbildung 4-20 die Ergebnisse der Walzseite gezeigt. Aus den Ergebnissen der Serie A ist zu erkennen, dass weder eine Vergrößerung der Betondeckung (BET-2) noch eine vergrößerte Verbundlänge (BET-3) einen positiven Effekt auf die Verankerungstragfähigkeit bei Bewehrungsstäben mit Endhaken hat. Lediglich bei gleichzeitiger Vergrößerung von Betondeckung (30 mm) und Verankerungslänge (300 mm) zeigt sich bei Stäben auf der Walzseite ein steilerer Kraftanstieg (BET-4w, Abbildung 4-20).

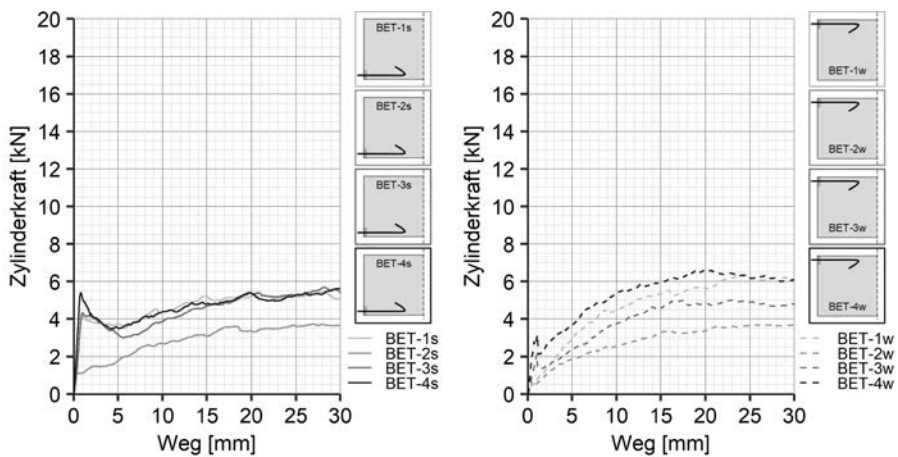


Abbildung 4-19: Kraft-Weg-Diagramm Serie A Schalseite      Abbildung 4-20: Kraft-Weg-Diagramm Serie A Walzseite

Durch Hohlräume im Gefüge des LAC sind vereinzelt Schwankungen in den Kurven zu beobachten. Äußerlich sind nach Beenden der Versuche der Serie A keine Risse erkennbar.

Die Vorgänge im Inneren des Probekörpers lassen sich wie folgt erklären: Im Bereich des Hakens kommt es zu einem örtlichen Betonversagen und daher zu einer Verdichtung des Betongefüges mit zerkleinerten Bimskörnern, wodurch die Auszugskraft gleichmäßiger auf den Haken verteilt werden kann. Demnach verlagert sich die Resultierende der Betondruckspannungen weiter zum Stabende hin. Der Hebelarm vergrößert sich und es kommt zu einer erhöhten Biegebeanspruchung im Haken, was zu einem gleichmäßigen Aufbiegen der Hakenform führt. Der Bewehrungsstab wird dabei gleichmäßig aus dem Beton gezogen, ohne dass ein plötzliches Stahlzug- oder Betonversagen erkennbar ist.

#### 4 Experimentelle Untersuchungen zur Verankerung

---

Durch nachträgliches Aufschneiden der Prüfkörper wird festgestellt, dass die Haken durch eine Biegebeanspruchung aufgebogen sind. Darüber hinaus sind Spuren im Gefüge des LAC erkennbar, was auf ein „Durchziehen“ der Haken und örtliches Betonversagen hinweist.

In Abbildung 4-21 und Abbildung 4-22 werden beispielhaft aufgebogene Haken (in rot dargestellt) eines Bewehrungsstabes mit  $\varnothing$  8 mm an Schal- und Walzseite gezeigt, wobei die ursprüngliche Form des Hakens mit weißen Linien unter einem Winkel von  $60^\circ$  angedeutet wird. Die Haken weisen nach Versuchsende einen Winkel von etwa 80 bis  $90^\circ$  auf.

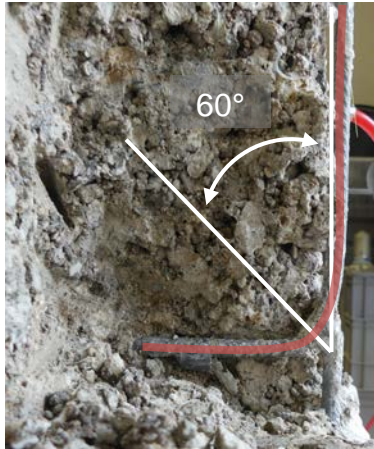


Abbildung 4-21: Aufgebogener Haken  
Schalseite

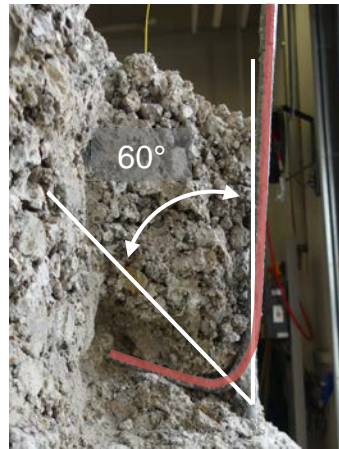


Abbildung 4-22: Aufgebogener Haken  
Walzseite

### Ausrichtung des Hakens

Die Ergebnisse der Versuche mit liegendem Haken (BET-6) werden in den folgenden Abbildungen dargestellt und mit denen der Variante BET-1 mit senkrecht angeordnetem Haken verglichen (Abbildung 4-23, Abbildung 4-24).

Die Orientierung des Hakens senkrecht oder parallel zur Betonoberfläche führt bei Stäben auf der Schalseite zu keiner bedeutenden Veränderung in der Tragfähigkeit. Bei Haken auf der Walseite führt das aufwendige Ausrichten der Haken senkrecht zur Betonoberfläche eher zu einer Verschlechterung der Verankerungstragfähigkeit.

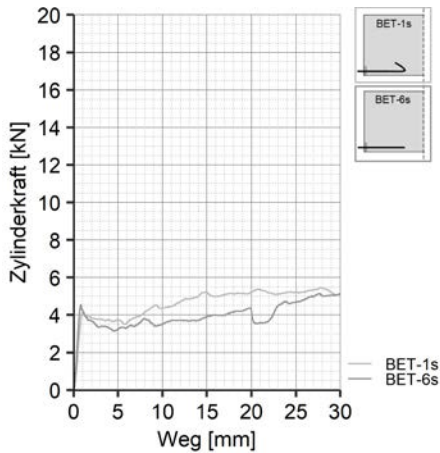


Abbildung 4-23: Kraft-Weg-Diagramm, Schalseite, Vergleich BET-1s mit BET-6s

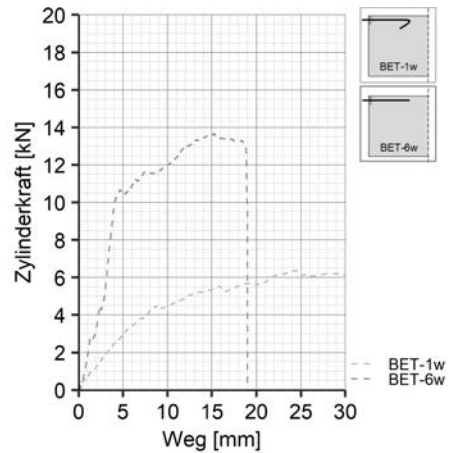


Abbildung 4-24: Kraft-Weg-Diagramm, Walseite, Vergleich BET-1w mit BET-6w

Eine ausführliche Auswertung dieser Versuchsvariante kann *Zeitler und Schwetz et al 2020* entnommen werden.

### Stabdurchmesser

Die Ergebnisse der Versuchsvariante mit größerem Stabdurchmesser (BET-9) werden in den folgenden Abbildungen (Abbildung 4-25, Abbildung 4-26) dargestellt.

Die Vergrößerung des Stabdurchmessers von 8 mm (BET-1) auf 10 mm (BET-9) führt erst bei Verschiebungen > 10 mm zu einer Verbesserung der Verankerungskraft eines Endhakens. Im Vergleich aller Versuche der Varianten BET-1 und BET-9 ergibt sich eine mittlere Steigerung der maximalen Auszugskräfte von 45 % auf der Schalseite und 21 % auf der Walzseite durch den größeren Stabdurchmesser (vgl. Anhang B).

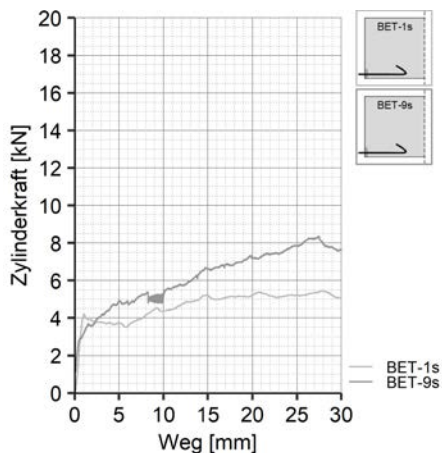


Abbildung 4-25: Kraft-Weg-Diagramm, Schalseite, Vergleich BET-1s mit BET-9s

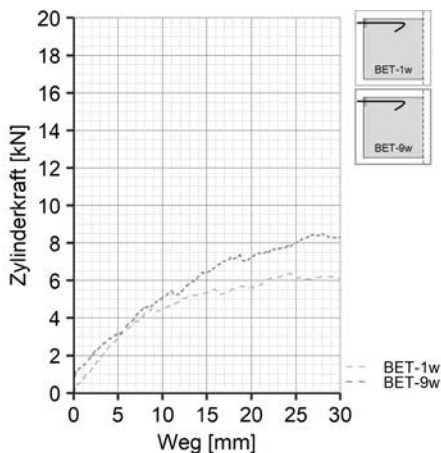


Abbildung 4-26: Kraft-Weg-Diagramm, Walzseite, Vergleich BET-1w mit BET-9w

Entsprechend der Versuche der Serie A können auch in der Variante BET-9 äußerlich keine Risse nach Erreichen der Maximallast festgestellt werden. An den geöffneten Prüfkörpern werden aufgebogene Haken sichtbar, die einen Öffnungswinkel von etwa 75° aufweisen. Die geringere Öffnung der Haken mit Ø 10 mm (BET-9) im Vergleich zur Variante mit Ø 8 mm (vgl. BET-1, Abbildung 4-21) ist auf den höheren Biege widerstand des größeren Stabdurchmessers zurückzuführen.

### ohne Endverankerung

Die Versuche der Variante BET-10 sind mit Bewehrungsstäben ohne Endverankerung ausgestattet und dienen der Bewertung des Verbundverhaltens eines geraden Stabes. Von sechs hergestellten Prüfkörpern reicht lediglich bei zweien die Verbundspannung aus, um die Anfahrlast der Prüfmaschine von 1 kN aufzunehmen. Daher werden in der nachfolgenden Abbildung 4-27 lediglich die Kraft-Weg-Kurven der Prüfkörper BET-10.2s und BET-10.3s dargestellt.

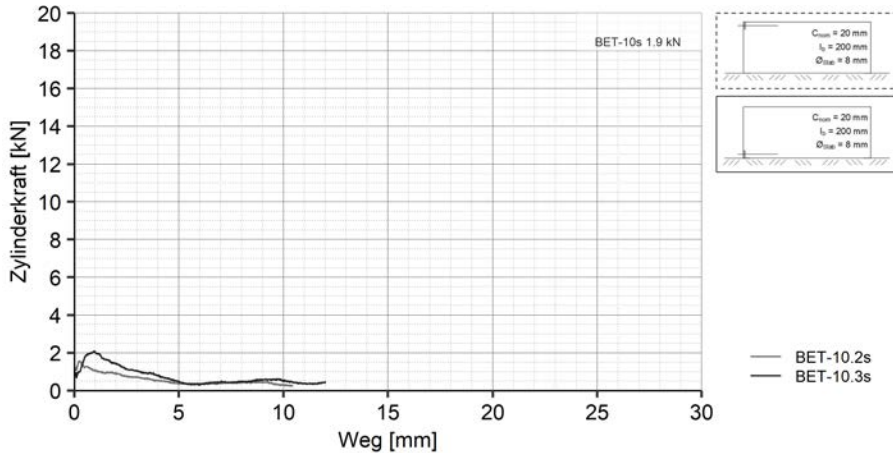


Abbildung 4-27: Kraft-Weg-Diagramm BET-10

Anhand der Ergebnisse in den Versuchen der Reihe BET-10 kann ein nicht ausreichender Verbund zwischen gerippten Bewehrungsstäben und LAC festgestellt werden. Der maximale Wert der Auszugkraft lag bei 2 kN im Versuch BET-10.3s bis ein Verbundversagen auftrat. Äußerlich sind nach dem Versuchsende keine Risse erkennbar.

### mit angeschweißten Querstäben

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Varianten mit angeschweißten Querstäben dargestellt und mit den Ergebnissen der Versuche mit Endhaken (BET-1) verglichen. In Abbildung 4-28 werden die Ergebnisse der Schalseite gezeigt und Abbildung 4-29 die Ergebnisse der Walzseite.

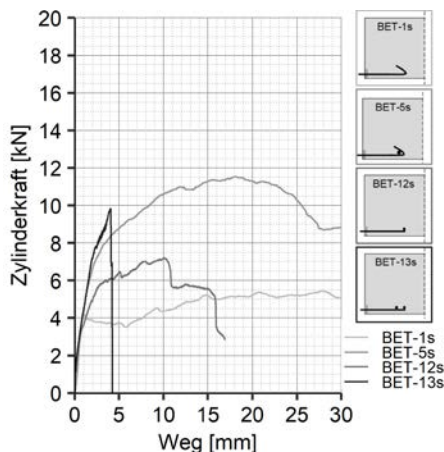


Abbildung 4-28: Kraft-Weg-Diagramm, Vergleich BET-1s mit Varianten mit angeschweißten Querstäben, Schalseite

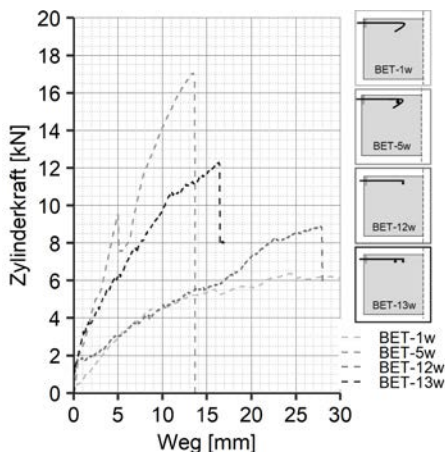


Abbildung 4-29: Kraft-Weg-Diagramm, Vergleich BET-1w mit Varianten mit angeschweißten Querstäben, Walzseite

Die Variante BET-5, Haken mit angeschweißtem Querstab, führt in den Auszugversuchen zu den maximalen Auszugkräften. Durchschnittlich kann auf der Schalseite 11,9 kN und auf der Walzseite 17,7 kN verankert werden (vgl. Anhang B). Dabei zeigt sich im Kraft-Weg-Diagramm bei den Versuchen der Schalseite zu Beginn ein starker Kraftanstieg mit anschließend leicht ansteigendem Plateau. Im Vergleich dazu steigt die Kurve der Versuche der Walzseite BET-5w zu Beginn stark an, knickt bei etwa 9 kN Belastung ab (Abbildung 4-29, blau) und steigt gleichmäßig an bis sie nach Erreichen der maximalen Zugkraft schlagartig auf Null abfällt. Bei den Varianten mit angeschweißten Querstäben (BET-5, BET-12, BET-13) ist ein vergleichbarer Anstieg der Kraft-Weg-Kurven der Versuche der Schalseite erkennbar (Abbildung 4-28), wobei die Variante mit angeschweißtem Querstab im Haken die maximale Verankerungstragfähigkeit aufweist. Im Unterschied dazu sind in Abbildung 4-29 unmittelbar zu Belastungsbeginn Unterschiede im Kraftanstieg der verschiedenen Varianten zu erkennen. Es zeigt sich, dass die Variante BET-5 mit Haken und angeschweißtem Querstab bereits bei geringeren Verformungen eine große Verankerungstragfähigkeit aufweist. Dahingegen sind bei den Varianten mit geraden Stabenden (BET-12 und BET-13) größere Verformungen nötig, um entsprechend größere Auszugkräfte aufnehmen zu können.

Auffällig erscheint bei den Versuchen mit angeschweißten Querstäben BET-5, BET-12 und BET-13, dass es auf der Walzseite zu einem schlagartigen Versagen der Verankerung kommt, wie Abbildung 4-29 zeigt. Während die Varianten BET-5 und



BET-12 durch einen klaffenden, horizontalen Riss ohne Vorankündigung versagen (Abbildung 4-31, Abbildung 4-33), zeigen die Versuche BET-13 erst dünne Risse, die das Versagen ankündigen (Abbildung 4-35). Bei den Versuchen mit Verankerung im Bereich der Schalseite kommt es nur bei den Varianten ohne Endhaken (BET-12, BET-13) zu einem plötzlichen Abfall in der Kraft-Weg-Kurve, wobei zuvor dünne Risse das Versagen ankündigen. Im Vergleich dazu kann bei dieser Verankerungsvariante mit Anordnung auf der Schalseite eine gleichmäßige Rissentwicklung in Form von Spaltrissen beobachtet werden (Abbildung 4-30).



Abbildung 4-30: Rissbild nach Versuchsende  
BET-5s (Haken + Querstab)



Abbildung 4-31: Rissbild nach Versuchsende  
BET-5w (Haken + Querstab)

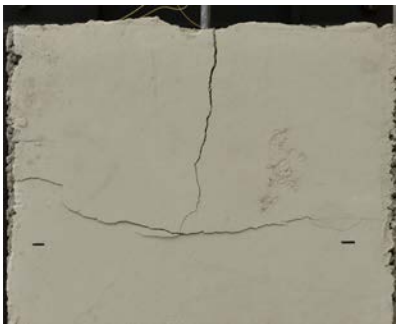


Abbildung 4-32: Rissbild nach Versuchsende  
BET-12s (gerader Stab + Querstab)

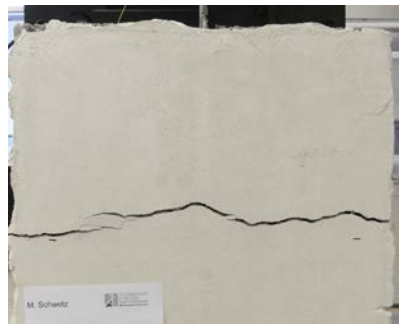


Abbildung 4-33: Rissbild nach Versuchsende  
BET-12w (gerader Stab + Querstab)



Abbildung 4-34: Rissbild nach Versuchsende  
BET-13s (gerader Stab + 2 Querstäbe)



Abbildung 4-35: Rissbild nach Versuchsende  
BET-13w (gerader Stab + 2 Querstäbe)

### Zusammenstellung der erreichten Auszugtragfähigkeiten

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Auszugversuche zusammengefasst und tabellarisch dargestellt. In den zuvor dargestellten Versuchen erweisen sich, neben der Verankerung mit Endhaken, die Varianten mit angeschweißten Querstäben als geeignete Verankerungskonstruktionen für Bewehrung in haufwerksporigem Leichtbeton. Diese werden im Folgenden ausgewertet.

Da zum Teil große Streuungen in den Traglasten der Versuche beobachtet werden können, wird ein Variationskoeffizient eingeführt, der sich am Europäischen Bewertungsdokument zur Bewertung der Verankerung von Befestigungsmitteln in Mauerwerk *EAD 3300762017* orientiert.

Dort wird die Verankerung von Befestigungsmitteln in Mauerwerk bewertet. Beurteilt werden darin neben der Befestigung von Injektionsankern und Gewindestangen auch gebogene Bewehrungsstäbe. Dieses Europäische Bewertungsdokument regelt unter anderem auch die Verankerung in Mauerwerk aus haufwerksporigem Leichtbeton. Die darin enthaltenen Erkenntnisse lassen sich daher auf die Auszugversuche übertragen.

Bei der Bewertung der Verankerungsfähigkeit wird für große Streuungen ein Variationskoeffizient  $\alpha_V$  empfohlen, der bei großen Streuungen zu einer Abminderung der zulässigen Tragkraft des Befestigungsmittels führt.

In Anlehnung an das Vorgehen in *EAD 3300762017* wird im Folgenden ein Abminderungsbeiwert für Streuungen  $\geq 15\%$ , wie sie im Betonbau üblich sind, bestimmt.

Der Variationskoeffizient  $\alpha_V$  setzt sich wie folgt zusammen:

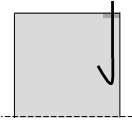
$$\alpha_V = \frac{1}{1 + 0,03 \cdot (sd[\%] - 15)} \leq 1,0 \quad (4.1)$$

mit:  $\alpha_V$  Variationskoeffizient  
 $sd[\%]$  Standardabweichung [%]

In den folgenden Tabellen (Tabelle 4-5, Tabelle 4-6, Tabelle 4-7) werden die maximal erreichten Auszugkräfte  $F_u$  und die zugehörigen Stahlspannungen  $\sigma_{\max}$  für jeden Versuch aufgelistet. Die zurückgelegte Verschiebung der Stäbe, also der Schlupf zum Zeitpunkt der maximalen Kraft, wird mit  $s_{\max}$  bezeichnet. Aus den Einzelwerten der Versuche wird die mittlere Tragfähigkeit und die mittlere Stahlspannung für die jeweilige Versuchsvariante angegeben.

Zur statistischen Auswertung wird der 5%-Fraktilwert der aufnehmbaren Stahlspannung  $\sigma_{5\%}$ , die Standardabweichung  $sd$ , der Variationskoeffizient  $\alpha_V$  nach Gleichung (4.1) und die abgeminderte Stahlspannung  $\alpha_V \cdot \sigma_{5\%}$  für Streuungen  $\geq 15\%$  bestimmt.

Tabelle 4-5: Ergebnisse der Auszugversuche, Endhaken

Variation		Versuch	max. Kraft im Versuch	Schlupf bei $F_u$	max. Stahlspannung
			$F_u$ [kN]	$s_{\max}$ [mm]	$\sigma_{\max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
BET-1s	$c_{\text{nom}} = 20 \text{ mm}$ $l_b = 200 \text{ mm}$ $\varnothing_{\text{Stab}} = 8 \text{ mm}$	BET-1.1s	5,4	14,9	108,2
		BET-1.2s	6,6	20,9	130,7
		BET-1.3s	5,4	17,7	106,6
BET-1w		BET-1.1w	10,0	34,9	199,5
		BET-1.2w	4,0	18,8	79,2
		BET-1.3w	7,4	24,4	147,4
BET-2s	$c_{\text{nom}} = 30 \text{ mm}$ $l_b = 200 \text{ mm}$ $\varnothing_{\text{Stab}} = 8 \text{ mm}$	BET-2.1s	4,2	27,9	82,8
		BET-2.2s	4,3	16,9	85,9
		BET-2.3s	3,6	28,9	70,6
BET-2w		BET-2.1w	3,3	30,8	65,5
		BET-2.2w	4,2	22,0	83,2
		BET-2.3w	4,6	36,8	91,3
BET-3s	$c_{\text{nom}} = 20 \text{ mm}$ $l_b = 300 \text{ mm}$ $\varnothing_{\text{Stab}} = 8 \text{ mm}$	BET-3.1s	5,2	32,6	102,5
		BET-3.2s	5,5	20,9	109,4
		BET-3.3s	7,0	28,3	139,3
BET-3w		BET-3.1w	5,4	24,5	107,0
		BET-3.2w	6,1	16,4	120,6
		BET-3.3w	6,2	36,3	124,1
BET-4s	$c_{\text{nom}} = 30 \text{ mm}$ $l_b = 300 \text{ mm}$ $\varnothing_{\text{Stab}} = 8 \text{ mm}$	BET-4.1s	6,1	29,5	120,8
		BET-4.2s	6,8	20,6	134,7
		BET-4.3s	5,5	36,5	109,2
BET-4w		BET-4.1w	9,1	39,3	180,6
		BET-4.2w	6,7	19,9	133,3
		BET-4.3w	6,0	12,6	119,0
<b>Mittelwert:</b>			<b>5,8</b>	<b>25,5</b>	<b>114,6</b>
Endhaken		5%-Fraktil	Standardabweichung	Variationskoeffizient	5%-Fraktil mit Abminderung
		$\sigma_{5\%}$	$sd$	$\alpha_V$	$\alpha_V \cdot \sigma_{5\%}$
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]
		61,7	28,1	0,72	<b>44,4</b>

#### 4 Experimentelle Untersuchungen zur Verankerung

Tabelle 4-6: Ergebnisse der Auszugversuche, Endhaken mit angeschweißtem Querstab

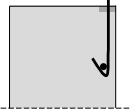
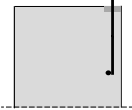
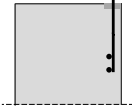
Variation		Versuch	max. Kraft im Versuch	Schlupf bei $F_u$	max. Stahlspannung
			$F_u$	$s_{max}$	$\sigma_{max}$
			[kN]	[mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]
BET-5s	Haken + angeschweißter Querstab	BET-5.1s	13,0	16,8	258,6
		BET-5.2s	12,1	17,9	241,5
		BET-5.3s	10,7	9,7	211,9
BET-5w	Haken + angeschweißter Querstab	BET-5.1w	16,8	15,0	334,8
		BET-5.2w	18,0	15,1	357,9
		BET-5.3w	18,3	13,2	364,1
<b>Mittelwert:</b>			<b>14,8</b>	<b>14,6</b>	<b>294,8</b>
Endhaken mit angeschweißtem Querstab		5%-Fraktile	Standard- abweichung	Variations- koeffizient	5%-Fraktile mit Abminderung
		$\sigma_{5\%}$	sd	$\alpha_V$	$\alpha_V \cdot \sigma_{5\%}$
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]
		142,0	22,2	0,82	<b>116,8</b>

Tabelle 4-7: Ergebnisse der Auszugversuche, gerades Stabende mit angeschweißten Querstäben

Variation		Versuch	max. Kraft im Versuch	Schlupf bei $F_u$	max. Stahlspannung
			$F_u$	$s_{max}$	$\sigma_{max}$
			[kN]	[mm]	[N/mm <sup>2</sup> ]
BET-12s	gerades Stabende + angeschweißter Querstab	BET-12.1s	7,9	7,8	156,2
		BET-12.2s	7,5	12,4	148,8
		BET-12.3s	8,6	14,9	170,7
BET-12w	gerades Stabende + angeschweißter Querstab	BET-12.1w	10,3	27,9	204,9
		BET-12.2w	8,2	29,7	162,9
		BET-12.3w	8,5	27,7	169,9
<b>Mittelwert:</b>			<b>8,5</b>	<b>20,1</b>	<b>168,9</b>
gerades Stabende mit angeschweißtem Querstab		5%-Fraktile	Standard- abweichung	Variations- koeffizient	5%-Fraktile mit Abminderung
		$\sigma_{5\%}$	sd	$\alpha_V$	$\alpha_V \cdot \sigma_{5\%}$
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]
		123,3	11,5	1,00	<b>123,3</b>
BET-13s	gerades Stabende + 2 angeschweißte Querstäbe	BET-13.1s	11,3	5,4	224,6
		BET-13.2s	12,2	5,6	241,7
		BET-13.3s	10,7	3,8	211,9
BET-13w	gerades Stabende + 2 angeschweißte Querstäbe	BET-13.1w	13,2	22,7	261,8
		BET-13.2w	13,1	16,8	261,0
		BET-13.3w	13,0	16,2	259,0
<b>Mittelwert:</b>			<b>12,2</b>	<b>11,8</b>	<b>243,3</b>
gerades Stabende mit 2 angeschweißten Querstäben		5%-Fraktile	Standard- abweichung	Variations- koeffizient	5%-Fraktile mit Abminderung
		$\sigma_{5\%}$	sd	$\alpha_V$	$\alpha_V \cdot \sigma_{5\%}$
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]
		193,9	8,7	1,00	<b>193,9</b>

## 4.10 Auswertung

Die dargestellten Auszugversuche dienen der Beurteilung der Verbund- und Verankerungstragfähigkeit von Bewehrung in haufwerksporigem Leichtbeton.

Während *Hanz 2017* 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 dieser Arbeit dargestellten Auszugversuchen kaum Verbundspannungen festgestellt werden. In den Ergebnissen der Versuchsreihe BET-10 wird deutlich, dass ohne Querdruck und über eine Verbundlänge von 20 cm nahezu keine Verbundspannungen zwischen gerippten Bewehrungsstäben und LAC übertragen werden können. Die auftretende Auflagerpressung und die bedeutend größere Verbundlänge in großen Bauteilversuchen, wie vermutlich auch in den Versuchen von *Hanz 2017*, können zu erheblicher Steigerung der Verbund- und Verankerungstragfähigkeit führen. Allerdings kann die zusätzliche Druckspannung am Auflager nur auf die Verankerung der Längsbewehrung einen positiven Einfluss haben. Für die Verankerung der Schubbewehrung in der Zugzone eines Balkens kann kein Querdruck angesetzt werden.

Ähnlich der Definition eines guten und mäßigen Verbundes im Normalbeton, können auch im haufwerksporigen Leichtbeton Unterschiede im Verbund- und Verankerungsverhalten in Abhängigkeit von der Lage im Betonierprozess festgestellt werden. Während auf der unten liegenden Schalseite die maximalen Auszugkräfte früher erreicht werden, ergeben sich bei den Versuchen mit Stäben an der Walzseite die Maximalkräfte erst nach größeren Verformungen (vgl. BET-12 und BET-13, Tabelle 4-7). Die bestehenden Verbundgesetze für die Verankerung von Bewehrung in Normalbeton gehen von einem Schlupf zwischen 0,1 und 3,0 mm zum Zeitpunkt der maximalen Verbundspannung aus. Diese Verbundgesetze gehen im Wesentlichen auf die Vorgaben in *ModelCode 1990* zurück. Dabei wird die Betondruckfestigkeit als maßgebende Einflussgröße definiert. 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 aus beiden Bereichen bestimmt.

Aus den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zur Verankerung geht hervor, dass nach einer Verschiebung von etwa 1 mm durchschnittlich erst 50 % der maximalen Auszugkraft von Bewehrungsstäben mit Endhaken erreicht wird (vgl. Kraft-Weg-Diagramme in Anhang B). Bei Versuchen mit Endverankerung mit angeschweißten Querstäben können nach einer Verschiebung von 1 mm lediglich 30 % der Maximalkraft übertragen werden. Daraus folgt, dass mit größeren Verformungen und Rissbreiten zu rechnen ist. Diese Erkenntnisse sollten insbesondere bei der Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit berücksichtigt werden. Gegenstand dieser Arbeit ist die Querkraftbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit, weshalb für weitere Versuche im Folgenden die maximalen Verankerungskräfte betrachtet werden.

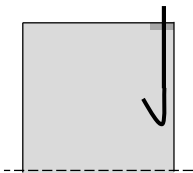
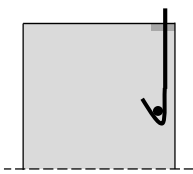
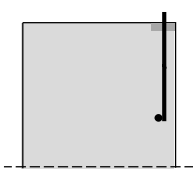
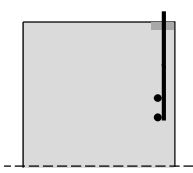
#### 4 Experimentelle Untersuchungen zur Verankerung

Es wird festgestellt, dass es im Rahmen der Auszugversuche in keiner Verankerungsvariante möglich ist, einen Bewehrungsstab mit  $\varnothing 8$  oder  $\varnothing 10$  mm bis zu seiner Fließgrenze zu beanspruchen. Es erscheint daher sinnvoll, die in der Bemessung anzusetzende 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 Kapitels erweisen sich, neben der Verankerung mit Endhaken, die Varianten mit angeschweißten Querstäben als aussichtsreiche Verankerungsmöglichkeiten. Diese Varianten werden im Weiteren für große Bauteilversuche eingesetzt.

In Tabelle 4-8 wird die abgeminderte und für die Bemessung ansetzbare Stahlspannung  $\alpha_V \cdot \sigma_{5\%}$  aus Tabelle 4-5, Tabelle 4-6 und Tabelle 4-7 für jede Variante auf der sicheren Seite gerundet und als reduzierte, ansetzbare Spannung angegeben.

Tabelle 4-8: Ansetzbare Spannungen nach Verankerungsart

Verankerungsart	ansetzbare Spannung (5 %-Fraktilwert)
 <p>Haken nach <i>DIN EN 1520:2011-06</i></p>	40 N/mm <sup>2</sup>
 <p>Haken mit angeschweißtem Querstab</p>	115 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>

## 5 Experimentelle Untersuchungen an Wandelementen

### 5.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Ziel der Untersuchungen ist es, grundlegende Erkenntnisse zum Querkrafttragverhalten von Wandelementen aus LAC zu erlangen und eine sinnvolle konstruktive Durchbildung der Querkraftbewehrung zu finden, die keinen Widerspruch zum Herstellungsverfahren darstellt. Um die Querkrafttragfähigkeit zu beurteilen, werden Dreipunktbiegeversuche an Bauteilen mit und ohne Querkraftbewehrung durchgeführt. Die Untersuchungen finden in den Prüfhallen der Hochschule Koblenz und der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern statt.

### 5.2 Versuchsaufbau

In den experimentellen Untersuchungen werden Wandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton auf ihre Querkrafttragfähigkeit getestet. Der Versuchsaufbau entspricht einem Dreipunktbiegeversuch (BV) mit einer Stützweite von 4,00 m. Versuche aus *Leonhardt und Mönnig 1984* haben gezeigt, dass die ungünstigste Lastanordnung für Balken ohne Querkraftbewehrung die Belastung durch eine Einzellast darstellt. Bei Bauteilen mit Querkraftbewehrung können Bügel zu einer Schwächung des Betongefüges und somit zu einem vorzeitigen Versagen auf der Seite der geringeren Querkraft führen. Daher werden die Untersuchungen für alle Versuchsvarianten mit einer mittig angreifenden Einzellast durchgeführt. Die Prüfkörper werden auf zwei Rollenlagern über die gesamte Wanddicke gelagert und in ihrer Lage gesichert. Um eine zwängungsfreie Lagerung zu gewährleisten, wird ein Auflager als verschieblich und ein Auflager als unverschieblich eingestellt. Stahlplatten mit Hartgummimatten zwischen Prüfkörper und Rollenlager dienen der gleichmäßigen Lastverteilung über eine Breite von 10 cm. Die Krafteinleitung erfolgt über einen Hydraulikzylinder, an den eine Kalotte angebracht ist. Diese soll eine Verdrehung des Prüfkörpers und der Lasteinleitungsstruktur ermöglichen. Ein Halbzylinder unterhalb der Kalotte verteilt die Last über die Bauteildicke. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5-1 schematisch dargestellt.

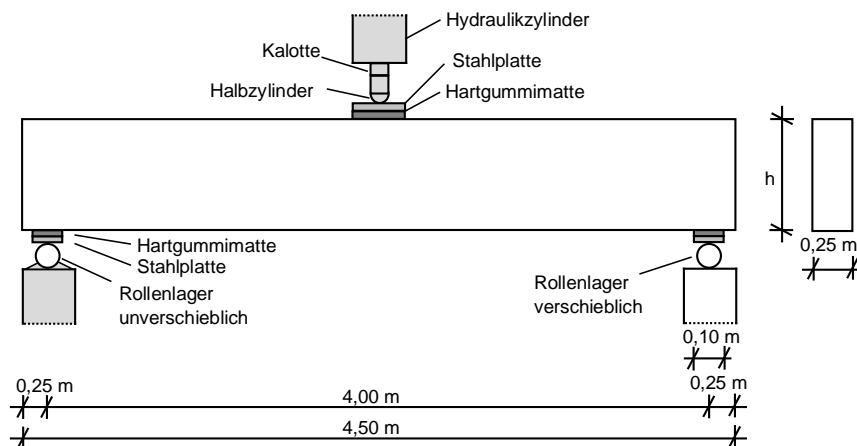


Abbildung 5-1: Schematischer Versuchsaufbau (BV), Ansicht Schalseite

### 5.3 Versuchsprogramm

Insgesamt werden 24 Versuche an Wandelementen mit und ohne Querkraftbewehrung durchgeführt.

Entsprechend der Bezeichnungen der Versuche in Kapitel 4, erhalten auch die Versuche an Wandbauteilen eine eindeutige Versuchsbezeichnung. Dabei wird eine Langbezeichnung gewählt, in der alle relevanten Versuchsparameter enthalten sind, und zusätzlich eine Kurzbezeichnung eingeführt.

#### Kurzbezeichnung:

BV-1.1

#### Langbezeichnung:

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

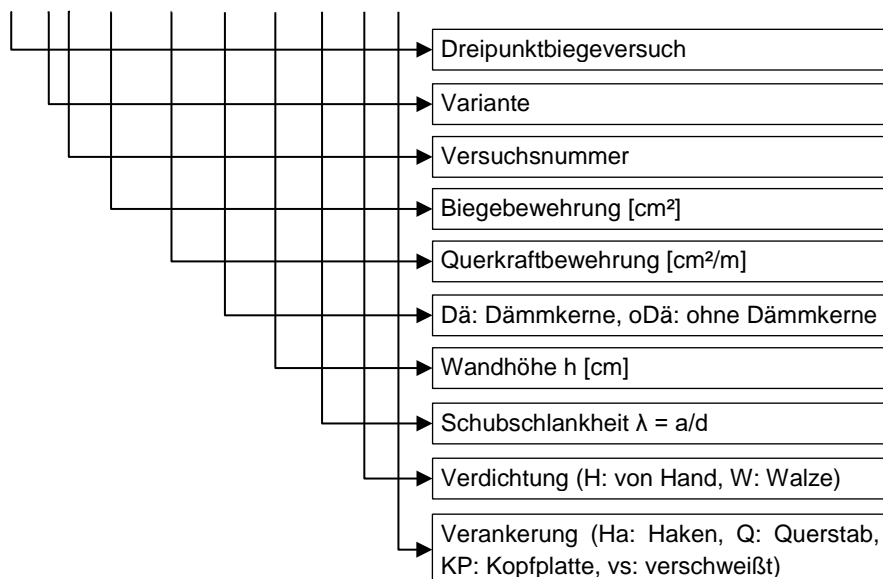


Abbildung 5-2: Bezeichnung der Versuchskörper im Dreipunktbiegeversuch

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

Darüber hinaus werden Versuche an Wandelementen mit Querkraftbewehrung durchgeführt, wobei unterschiedliche Konstruktionen der Querkraftbewehrung untersucht werden. Dabei wird sowohl der nach *DIN 4213:2015-10* vorgeschriebene geschlossene Bügelkorb getestet als auch die europäische Variante der Schubleiter (*DIN EN 1520:2011-06*). Zusätzlich werden Varianten mit Einzelstäben und Endhaken geprüft.

Das gesamte Versuchsprogramm ist in der nachfolgenden Tabelle 5-1 dargestellt.



Tabelle 5-1: Versuchsprogramm Dreipunktbiegeversuche

Versuch	Variante	Biege- bewehrung	Querkraft- bewehrung	Dämm- kerne	Höhe	Schub- schlankheit	Verdichtung	Verankerung Längsbew.	Langbezeichnung
		[cm <sup>2</sup> ]	[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	DIN 4213	3,14	1,57	Ja	100	2,1	Hand	verschweißt	BV-1.1_3,14_1,57_Dä_100_2,1_H
BV-1.2									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	Bügelkorb mit Walze verdichtet	3,14	1,57	Ja	100	2,1	Walze	verschweißt	BV-2.1_3,14_1,57_Dä_100_2,1_W
BV-2.2									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	Bügelkorb mit Walze verdichtet	3,14	1,57	Ja	100	2,1	Walze	verschweißt	BV-3.1_3,14_1,57_Dä_100_2,1_W
BV-3.2									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	Schubleiter	3,14	1,57	Ja	100	2,1	Walze	verschweißt	BV-4.1_3,14_1,57_Dä_100_2,1_W
BV-4.2									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	Einzelstäbe	3,14	1,57	Ja	100	2,1	Walze	Haken	BV-5.1_3,14_1,57_Dä_100_2,1_W
BV-5.2									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>

## 5.4 Geometrie der Versuchskörper

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

### Wanddicke

Die Wanddicke wird für alle Prüfkörper auf 25 cm festgelegt. Dies entspricht der Mindestdicke der praxisüblichen Wandelemente mit Dämmkernen. Bei diesen geringen Bauteilbreiten führen die eingesetzten Dämmkerne zu einer anteilmäßig großen Schwächung des Querschnittes. Außerdem ist von einer größtmöglichen Gleichmäßigkeit in der Verdichtung über die Dicke des Bauteils auszugehen, sodass die aufgebrachte Kraft möglichst gleichmäßig in das Bauteil eingeleitet werden kann.

### Schubslankheit

Der Einfluss der Belastungsart und der Lastposition ist bei Versuchen zur Querkrafttragfähigkeit besonders hoch. Die Erkenntnisse zur Schubslankheit aus *Kani 1966* beruhen auf Untersuchungen an Normalbetonbauteilen und sind daher nicht direkt auf Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton übertragbar. Ein Einfluss der Schubslankheit erscheint aber als wahrscheinlich. Daher wird auch die Schubslankheit  $\lambda$  nach *Kani 1966* als Parameter in den Versuchen berücksichtigt. Nach *Leonhardt und Mönnig 1984* erwies sich in Versuchen mit und ohne Querkraftbewehrung eine Schubslankheit zwischen 2,5 und 3,5 als ungünstigstes Momenten-Querkraft-Verhältnis für einen Schubbruch bei Balken ohne Querkraftbewehrung. Auch in *Keller 2005* konnte ein Einfluss der Schubslankheit auf die Querkrafttragfähigkeit nicht vorgespannter Balken aus Leichtbeton festgestellt werden.

In den Versuchen dieser Arbeit wird die Geometrie der Versuchskörper und damit die Schubslankheit in Anlehnung an das Schubtal von Kani (*Kani 1964*) zwischen  $\lambda = 2,1$  und  $\lambda = 3,0$  variiert, um den Einfluss der Schubslankheit zu untersuchen und die Wahrscheinlichkeit für ein Querkraftversagen zu erhöhen. Dazu wird die Höhe des Bauteils angepasst und die Stützweite bei 4,00 m belassen. Bei Bauteilen mit einer Höhe 100 cm ergibt sich die Schubslankheit zu etwa 2,1 und bei reduzierter Bauteilhöhe von 70 cm ergibt sich die Schubslankheit zu 3,0.

### Längsbewehrungsgrad

Der Längsbewehrungsgrad hat bei Bauteilen ohne Querkraftbewehrung einen großen Einfluss auf die Querkrafttragfähigkeit. Die Längsbewehrung kann sowohl zu einer Vergrößerung der ungerissenen Druckzone beitragen, als auch eine Verdübelung der Rissufer begünstigen (*Hegger und Görtz 2002*). Nach *Hegger und Görtz 2002* ist daher ein Schubversagen von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung grundsätzlich an den Längsbewehrungsgrad gekoppelt.

In Anlehnung an praxisübliche Bewehrungsmengen wird für die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche der Längsbewehrungsgrad variiert (2 ‰, 3 ‰ und 4 ‰). Die Längsbewehrung wird mit 3 Ø 10 mm, 4 Ø 10 mm und 6 Ø 10 mm ausgeführt, wobei letztere für eine Bauteilbreite von 25 cm dem praxisüblichen Maximum entspricht. In Kombination mit den gewählten Schubslankheiten und den variierten Längsbewehrungsgraden soll in den Versuchen ein Querkraftversagen angestrebt werden.

**Bewehrungskonstruktionen**

Im Folgenden werden die Bewehrungsskizzen der Versuchskörper dargestellt.

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

Bügelkorb <i>DIN 4213:2015-10</i> :	
<p>100 cm</p> <p>4 Ø 10</p> <p>25 cm</p> <p>Ø 5 - 25 cm</p>	
<p>Abbildung 5-7: BV-1, BV-2, BV-3</p>	
<p>70 cm</p> <p>6 Ø 10</p> <p>25 cm</p> <p>Ø 6 - 25 cm</p>	<p>70 cm</p> <p>6 Ø 10</p> <p>25 cm</p> <p>Ø 6 - 25 cm</p>
<p>Abbildung 5-8: BV-14 (Bügelkorb)</p>	<p>Abbildung 5-9: BV-15 (Bügelkorb + zusätzliche Längsstäbe)</p>

**Schubleiter DIN EN 1520:2011-06:**

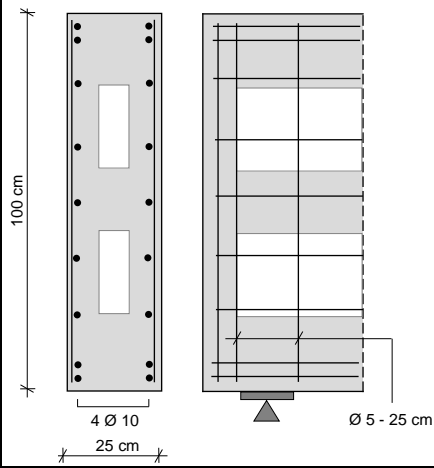


Abbildung 5-10: BV-4

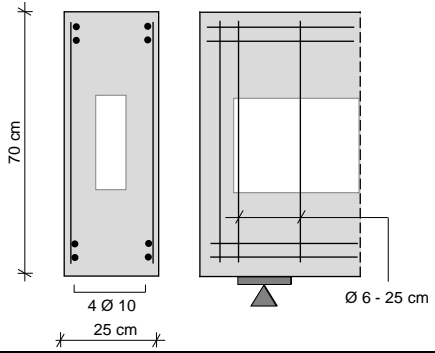


Abbildung 5-11: BV-13

**Einzelstäbe mit Endhaken:**

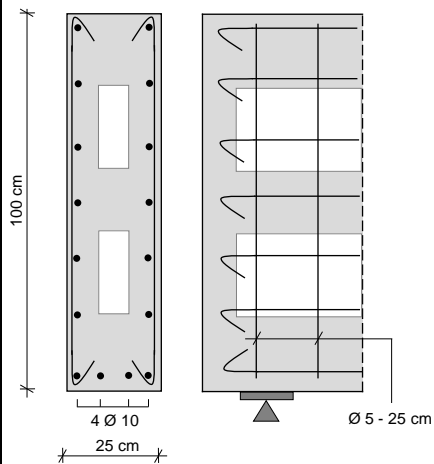


Abbildung 5-12: BV-5

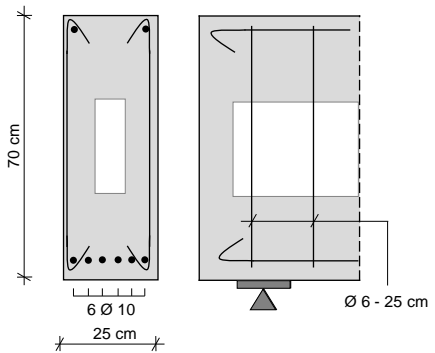


Abbildung 5-13: BV-12.1

## 5.5 Herstellung und Verdichtung

Alle Prüfkörper werden in einem Fertigteilwerk hergestellt. Die Verdichtung im Walzverfahren mittels Rüttelwalze (Abbildung 2-3) wird üblicherweise zur Herstellung von Wandelementen aus LAC verwendet (Kapitel 2.1.2) und wird bei allen Varianten eingesetzt. Lediglich die Versuchsvariante mit Bügelkorb nach *DIN 4213:2015-10* wird von Hand verdichtet (Abbildung 2-4), da hier die Walzenverdichtung für freitragende Wandelemente mit geschlossenem Bewehrungskorb nicht zulässig ist. Die Versuchskörper mit Bügelkorb werden zusätzlich als Variante mit Verdichtung im Walzverfahren hergestellt, um die einschränkende Vorgabe aus *DIN 4213:2015-10* zu überprüfen (vgl. Kapitel 2.1.2). 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 (vgl. Abbildung 5-2, Tabelle 5-1).

Zur Unterscheidung der Walzseite von der Schalseite wird die im Verdichtungsprozess oben liegende Walzseite nachträglich mit Gipsputz verputzt. Die Putzschicht ist dünn mit einer Dicke von etwa 1 mm aufgetragen und hat somit keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit des Elementes. Die verputzte Oberfläche dient auch dem frühzeitigen Erkennen und der Dokumentation der Rissbildung. Die Schalseite wird in ihrer rauen Oberflächenstruktur belassen und kann zur Applikation der Wegaufnehmer genutzt werden.

## 5.6 Messtechnik

Die Versuche werden mit einem Messverstärker MGCplus (Hottinger Baldwin Messtechnik) und der Software Catman aufgenommen. Dabei wird die Messung kontinuierlich mit einer Messrate von 10 Hz aufgezeichnet. Die Prüfgeschwindigkeit wird auf 1 mm/min festgelegt.

Um den Versuchsablauf und die Rissentwicklung nachvollziehen zu können, werden die Versuche mit Fotos und Videos dokumentiert. In der folgenden Abbildung 5-14 wird die Anordnung der Messtechnik dargestellt.

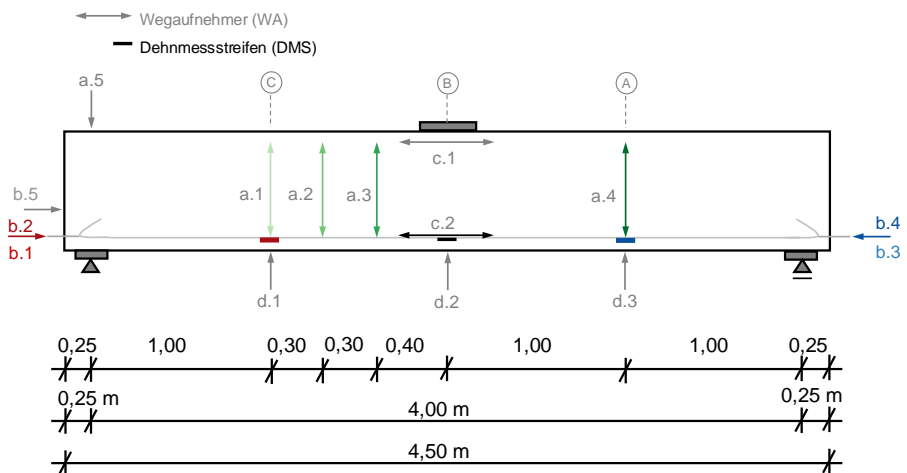


Abbildung 5-14: Messtechnik Anordnung, Ansicht Schalseite

### Wegaufnehmer (WA)

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

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

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

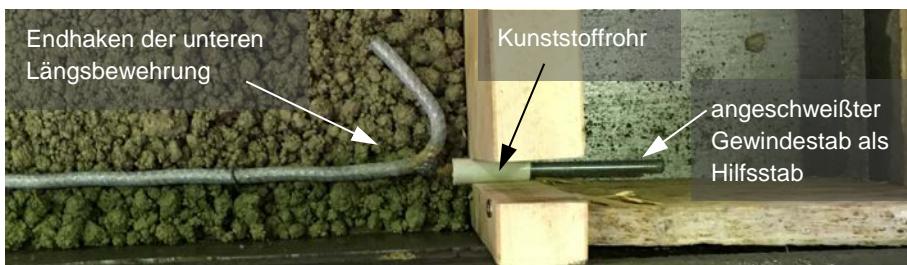


Abbildung 5-15: Bewehrungsstab mit Endhaken und angeschweißtem Hilfsstab

In der Mitte der Wandelemente sind 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 Versuchskörpers wird mit Hilfe von Wegaufnehmern in den Viertelpunkten unterhalb des Prüfkörpers erfasst (d.1 bis d.3).

### Dehnungsmessung am Bewehrungsstab (DMS)

Mit Hilfe von Dehnmessstreifen des Typs LY41 (DMS) werden die Dehnungen der Längsbewehrung aufgenommen. Dies soll Aufschluss über die Beanspruchung der Längsbewehrung und einen Hinweis auf ein Fließen der Längsbewehrung und damit ein vorzeitiges Biegeversagen geben. Die Anordnung der Dehnmessstreifen kann der Abbildung 5-14 entnommen werden.

## **Photogrammetrie**

Bei fünf Prüfkörpern werden die Verformungen der Versuchskörper anstelle der Wegaufnehmer auf der Betonoberfläche mit einem 3D-Kamerasystem der Firma GOM aufgezeichnet. Dazu ist der gesamte Prüfkörper mit einem stochastischen Punkte- und Fleckenmuster versehen. Zwei fest installierte Kameras zeichnen kontinuierlich Änderungen der Messpunkte auf. Für die Auswertung wird die zugehörige Software GOM Correlate genutzt. Die Messungen mittels Photogrammetrie werden in den Prüfhallen der Hochschule Koblenz durchgeführt.

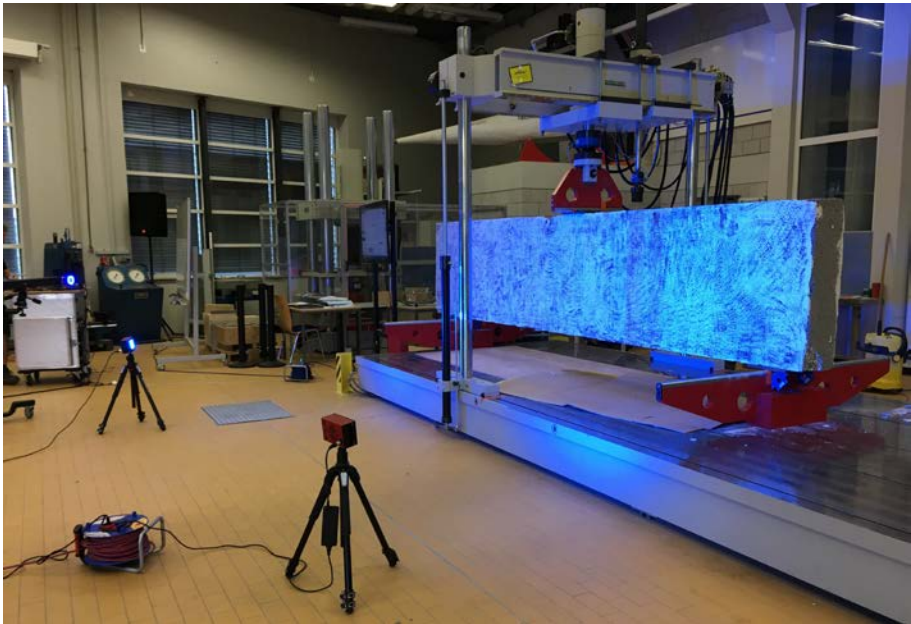


Abbildung 5-16: Versuchsaufbau mit Photogrammetrie, Hochschule Koblenz



## 5.7 Versuchsdurchführung

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

Die Kraft wird weggesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 1 mm/min aufgebracht. Dabei werden Laststufen im Abstand von anfangs 10 kN und später 5 kN angefahren und für wenige Minuten gehalten. In dieser Zeit werden auftretende Risse auf der weiß verputzten Walzseite angezeichnet. Ein typischer Verlauf der Zylinderkraft in Abhängigkeit von der Zeit ist in der nachfolgenden Abbildung 5-17 am Beispiel des Versuchs BV-7.1 dargestellt. In der Grafik sind die angefahrenen Laststufen durch Zacken in der Kurve sichtbar.

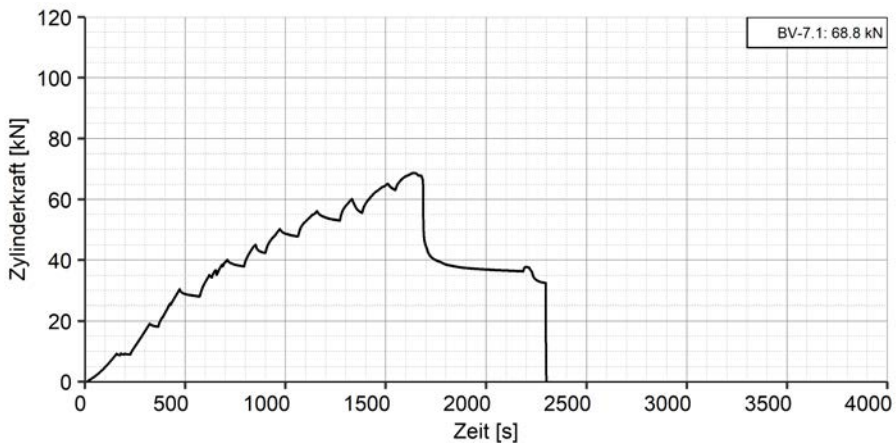


Abbildung 5-17: Kraft-Zeit-Diagramm, BV-7.1

## 5.8 Werkstoffeigenschaften

### Haufwerksporiger Leichtbeton

Der verwendete Leichtbeton weist ein haufwerksporiges Gefüge auf und ist mit Rohbims aus dem Neuwieder Becken hergestellt.

Zu jeder Versuchsvariante und jeder Betoncharge werden zusätzlich Elemente mit den Abmessungen 25 cm x 100 cm x 100 cm zur Entnahme von Bohrkernen hergestellt. Anhand der Bohrkerns werden die Druckfestigkeit und die Rohdichte des hergestellten Leichtbetons bestimmt.

Alle Prüfkörper werden mit der gleichen Rezeptur hergestellt. Die Rezeptur entspricht der verwendeten Zusammensetzung der Versuche aus Kapitel 3 und 4.

Die Ergebnisse der Materialprüfungen sind in Tabelle 5-2 dargestellt.

Tabelle 5-2: Messung der Druckfestigkeit und der Rohdichte nach *DIN EN 1354:2005-09*

Versuch	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Druckfestigkeit $f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]
ohne Querkraftbewehrung		
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
Bügelkorb DIN 4213		
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
Schubleiter DIN EN 1520		
BV-4.1	1103	4,2
BV-4.2	1103	4,2
BV-13.1	1237	6,1
Einzelstäbe mit Endhaken		
BV-5.1	1097	4,2
BV-5.2	1097	4,2
BV-5.3	1097	4,2
BV-12.1	1128	5,0

### Betonstahl B500

Für die Bewehrung wird verzinkter Betonstahl B500 verwendet. Dieser entspricht dem zuvor in Kapitel 4.8 beschriebenen Material aus den vorausgegangenen Versuchen.

## 5.9 Ergebnisse Bauteile ohne Querkraftbewehrung

Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse dargestellt, wobei diese nur exemplarisch aufgeführt werden. Darüber hinausgehende Ergebnisse und Rissbilder können Anhang C entnommen werden.

Zunächst werden die Ergebnisse der Versuche an Bauteilen ohne Querkraftbewehrung beschrieben. Die Interpretation der Ergebnisse und ein Vorschlag zur Anpassung des bestehenden Bemessungsmodells folgen in Kapitel 6.1.

### 5.9.1 Messergebnisse

Im Folgenden werden exemplarisch die Messergebnisse des Versuchs BV-7.3 dargestellt. Bei dieser Variante ist die Längsbewehrung mit Endhaken verankert (vgl. Abbildung 5-3, Tabelle 5-1).

Zunächst wird ein Kraft-Verformungs-Diagramm in Abbildung 5-18 abgebildet, wobei die Zylinderkraft über der Mittendurchbiegung aufgetragen wird. In der Grafik sind die angefahrenen Laststufen durch Zacken in der Kurve sichtbar. Aus diesem Diagramm ist außerdem der Übergang von Zustand I in Zustand II anhand der Steifigkeitsänderung bei etwa 30 kN Belastung erkennbar. Das Versagen tritt bei 68,7 kN und nach 7,5 mm Durchbiegung ohne Vorankündigung auf. Die maximale Zylinderkraft und eine Skizze des Prüfkörpers werden rechts im Diagramm dargestellt.

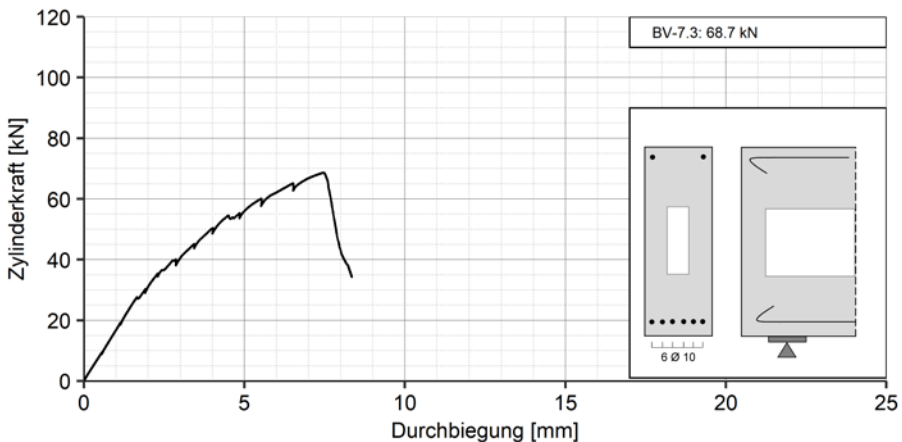


Abbildung 5-18: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-7.3

Im Folgenden werden die Messergebnisse der Wegaufnehmer und Dehnmessstreifen dargestellt. Die Anordnung der Messtechnik kann Abbildung 5-14 entnommen werden.

In der nachfolgenden Abbildung 5-19 wird der am Hilfsstab der Längsbewehrung gemessene Schlupf in Abhängigkeit von der Zylinderkraft aufgetragen. Die Messung der horizontalen Wegaufnehmer bildet aufgrund der Anordnung der Messtechnik grundsätzlich drei verschiedene Effekte ab. Zum einen wird die Verdrehung des Balkens erfasst. Zum anderen wird auf der Seite des horizontal verschieblichen Lagers die Verschiebung des Auflagers mit gemessen. Daher steigen die Kurven der WA auf

der Seite des verschieblichen Lagers (b.3 und b.4, blau) stärker an als die der Festlagerseite (b.1 und b.2, rot). Der dritte Effekt, der durch die Messung abgebildet wird, ist die Schlupfmessung, also die horizontale Verschiebung der Längsstäbe. Diese ergibt sich aus der Differenzverschiebung zwischen dem Wegaufnehmer an einem Bewehrungsstab (b.1 bis b.4) mit dem Wegaufnehmer auf der Betonoberfläche (b.5, grau). Im Diagramm in Abbildung 5-19 wird deutlich, dass die Wegaufnehmer an den Längsstäben den Übergang von Zustand I in Zustand II bei einer Belastung von etwa 30 kN erfassen. Die Steigung der Kurven wird flacher. Die Verschiebung der Längsstäbe nimmt stärker zu als die Beanspruchung.

Die horizontal angeordneten Wegaufnehmer c.1 und c.2 zeichnen während des Versuchs die Dehnungen bzw. Stauchungen der Zug- und Druckzone auf. Die Messung dieser Wegaufnehmer wird in Abbildung 5-20 dargestellt. Ab einer Belastung von 30 kN zeichnen die Wegaufnehmer eine stärkere Stauchung der Druckzone und eine größere Dehnung der Zugzone auf, welche bis zum Zeitpunkt des Versagens gleichmäßig anwachsen.

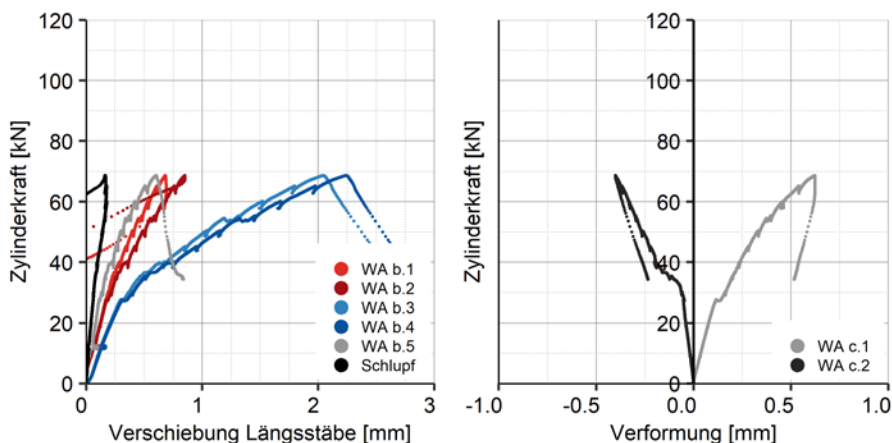


Abbildung 5-19: Kraft-Verformungs-Diagramm der Längsbewehrung, BV-7.3

Abbildung 5-20: Kraft-Verformungs-Diagramm Druck- und Zugzone, BV-7.3

Die vertikal angeordneten Wegaufnehmer a.1 bis 1.4 sollen die Entstehung von Schubrisen dokumentieren. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 5-21 dargestellt. Dabei wird die vertikale Rissöffnung in Abhängigkeit von der Beanspruchung gezeigt. Bei einer Belastung von etwa 55 kN öffnet sich ein Schubriss, der durch die Wegaufnehmer a.2 und a.3 erfasst wird. Die Wegaufnehmer a.1 und a.4 liegen außerhalb des Schubrisses und messen daher in diesem Versuch keine Rissöffnungen. Während sich der Schubriss öffnet, kann die Belastung weiter gesteigert werden. Bei einer Belastung von 68,7 kN öffnet sich der Schubriss sprunghaft und ein klaffender Riss entsteht.

Da der Prüfkörper BV-7.3 ohne Dehnmessstreifen ausgestattet war, wird hier die DMS-Messung des entsprechenden Referenzversuchs BV-7.1 dargestellt (Abbildung 5-22), wobei die Belastung über die Dehnung der Längsstäbe abgebildet wird.

Die schwarze Kurve zeigt die Dehnungsmessung in der Mitte der Längsstäbe, wobei aus mehreren DMS der Mittelwert gebildet wird. Die rote Linie zeigt hier die Messung von DMS 3.3.C, der im Viertelpunkt auf der Seite des unverschieblichen Auflagers angebracht war. Es ist erkennbar, dass mit zunehmender Belastung bei etwa 30 kN zunächst die Dehnung in der Mitte der Längsstäbe ansteigt, was auf eine Rissbildung hinweist. Die Dehnung in den Viertelpunkten der Längsbewehrung steigt erst bei einer Belastung von 55 kN stärker an. Bei dieser Beanspruchung öffnet sich der erste Schubriss, was von den Wegaufnehmern in Abbildung 5-21 erfasst wird.

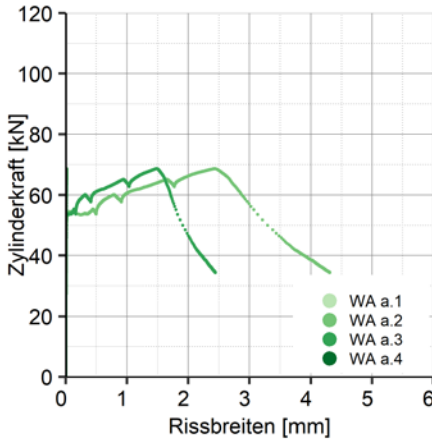


Abbildung 5-21: Kraft-Rissbreiten-Diagramm, BV-7.3

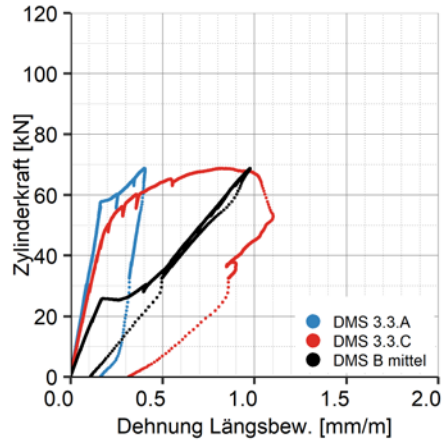


Abbildung 5-22: DMS-Messung der Längsstäbe, BV-7.1

Zum Zeitpunkt des Versagens, bei einer Belastung von 68,7 kN, kann am DMS 3.3.C auf der Seite des maßgebenden Schubrisses die maximale Dehnung von 1,1 mm/m gemessen werden.

### 5.9.2 Rissbildung und Versagen

In Abbildung 5-23 wird beispielhaft das Rissbild des zuvor dargestellten Prüfkörpers BV-7.3 gezeigt. Dabei wird der am stärksten ausgeprägte Riss mit einer roten Linie dargestellt. In Abbildung 5-24 wird das Rissbild mit den zugehörigen Laststufen gezeigt.

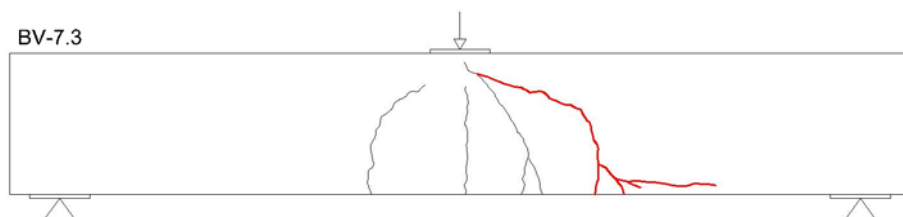


Abbildung 5-23: Rissbild BV-7.3, Verankerung der Längsstäbe mit Endhaken

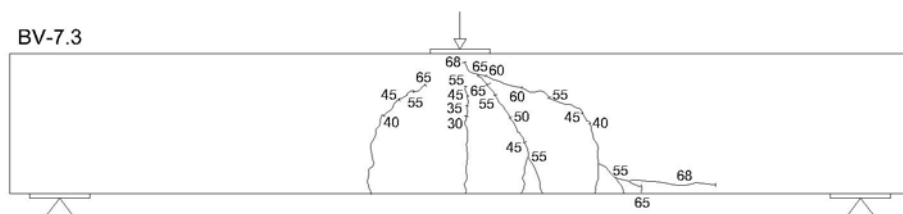


Abbildung 5-24: Rissbild BV-7.3 mit Laststufen

Zunächst bildet sich bei 30 kN Belastung ein erster Biegeriss in der Mitte des Wandelementes. Zu diesem Zeitpunkt erfolgt der Übergang von Zustand I in Zustand II (Abbildung 5-18). Erwartungsgemäß steigt die gemessene Dehnung der Längsstäbe in Bauteilmitte sprunghaft an (Abbildung 5-22). Mit steigender Belastung bilden sich weitere Risse zwischen Kräfteinleitung und Auflager, von denen sich einer maßgeblich öffnet (Abbildung 5-23, rot dargestellt). Bei einer Belastung von 55 kN ändert der maßgebende Riss die Richtung zur Lasteinleitung hin. Ab diesem Belastungszeitpunkt wird der Riss zum Schubriss oder auch Schrägriss genannt (vgl. u.a. *Empelmann und Oettel et al 2018*) und von den vertikalen Wegaufnehmern a.2 und a.3 erfasst (Abbildung 5-21).

Zeitgleich setzt sich ein horizontaler Riss, auch Dübelriss genannt, auf Höhe der Längsbewehrung fort und entwickelt sich in Richtung des Auflagers. Aufgrund der Rissuferverschiebung im Schubriss setzt sich der Bauteilbereich unterhalb der Lasteinleitung auf der Längsbewehrung ab und aktiviert die Dübelwirkung. Dadurch werden der Längsbewehrung vertikale Kräfte zugewiesen. Damit einher geht das Abplatzen der Betondeckung unterhalb der Biegezugbewehrung und unterhalb des Horizontalrisses. Folglich kommt es zu einem Anstieg der Stahlspannungen im Bereich des Schubrisses durch eine zusätzliche Beanspruchung des Längsstabes, was durch einen Dehnmessstreifen im Viertelpunkt der Längsbewehrung auf der Seite des Schubrisses (Abbildung 5-22, DMS 3.3.C) messbar ist. Es kommt zu einer Trennung von Druck- und Zuggurt. Begrenzt wird die Bauteiltragfähigkeit in diesem Stadium von

der Tragfähigkeit der Druckzone und der Verankerung bzw. der Zugfestigkeit der Längsbewehrung.

Die Versagensursache kann in diesem Versuch auf eine nicht ausreichende Verankerung der Längsbewehrung zurückgeführt werden. Zum Zeitpunkt der maximalen Traglast kommt es zu einem schlagartigen Verankerungsversagen, was aus der Schlupfmessung durch die Wegaufnehmer b.1 und b.2 (Abbildung 5-19) erfasst wird. Der Ausfall der Verankerung des Zugbandes kann nicht kompensiert werden und es kommt zum Bauteilversagen.

In Abbildung 5-25 wird ein exemplarisches Versagensbild und eine schematische Darstellung eines Verankerungsversagens bei Bauteilen ohne Querkraftbewehrung gezeigt. Im Sinne der einheitlichen Darstellung wird der maßgebende Schubriss in der schematischen Grafik immer auf der linken Seite des Bauteils gezeigt.

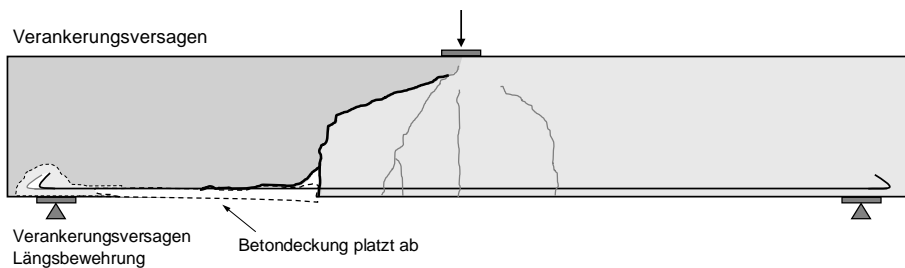


Abbildung 5-25: Verankerungsversagen, Bauteil ohne Querkraftbewehrung

Das Versagen kann mit dem in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Verankerungsversagen aus der Literatur (u.a. *Zilch und Zehetmaier 2010*) verglichen werden. Dabei resultiert das Verankerungsversagen in den Untersuchungen in dieser Arbeit aus dem Aufbiegen des Endhakens und einem örtlichen Betonversagen.

In nahezu allen Versuchen an Bauteilen ohne Querkraftbewehrung zeigte sich ein ähnliches Verhalten. Das maßgebende Versagenskriterium war ein Verankerungsversagen der Längsbewehrung.

## 5 Experimentelle Untersuchungen an Wandelementen

Lediglich bei Versuchen mit angeschraubter Kopfplatte (BV-7.2 und BV-8.1), bei denen die Verankerung konstruktiv sichergestellt ist, konnten weitere Versagensursachen beobachtet werden, die im Folgenden gezeigt werden.

In Abbildung 5-26 wird das Rissbild eines Versuchs mit angeschraubter Kopfplatte (BV-8.1) dargestellt. Abbildung 5-27 zeigt das Rissbild mit den zugehörigen Laststufen.

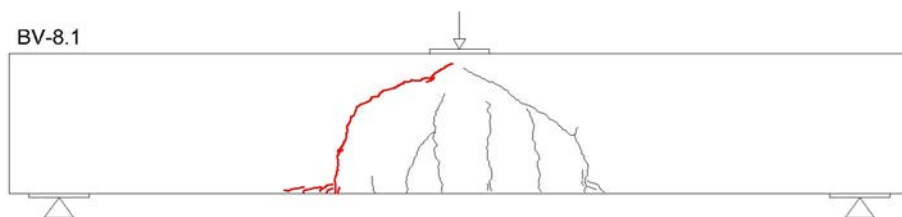


Abbildung 5-26: Rissbild BV-8.1, Verankerung der Längsstäbe mit Kopfplatte

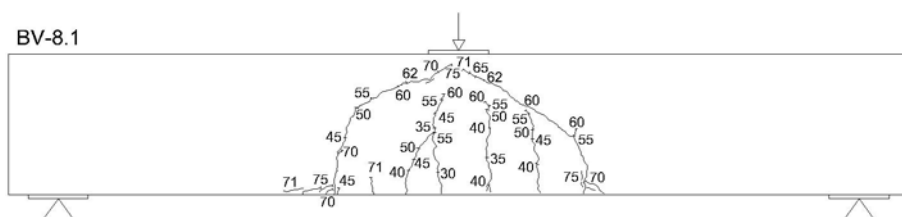


Abbildung 5-27: Rissbild BV-8.1 mit Laststufen

Bis zur Bildung des Schubrisses bei einer Belastung von etwa 55 kN ist die Rissentwicklung vergleichbar mit der Rissbildung des zuvor dargestellten Versuchs (vgl. Abbildung 5-23, Abbildung 5-24). Es ist erkennbar, dass nach Bildung des Schubrisses eine Ausbreitung des horizontalen Dübelrisses durch die Verankerung mittels Kopfplatte verhindert wird. Der Schubriss kann sich demnach nicht ungehindert in Richtung Auflager öffnen. Es kommt zu einer verstärkten Beanspruchung in der Druckzone, die durch das Fortschreiten des Schubrisses zur Lasteinleitung eingeschnürt wird. Bei einer Belastung von 77 kN kommt es zu einem Versagen der Druckzone. Das Druckzonenversagen wird durch den horizontalen Wegaufnehmer c.1 im Bereich der oberen Längsbewehrung erfasst, was in der folgenden Abbildung 5-28 gezeigt wird.



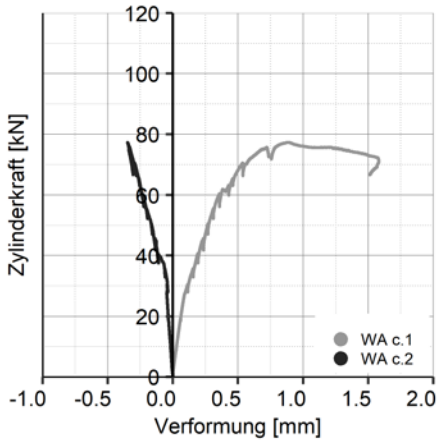


Abbildung 5-28: Kraft-Verformungs-Diagramm Druck- und Zugzone, BV-8.1

Das Versagen kann mit dem in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Biegeschubversagen aus der Literatur (u.a. *Zilch und Zehetmaier 2010*) verglichen werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass durch das Vordringen des Schubrisses in die Druckzone das stabile Risswachstum beendet ist und das instabile Risswachstum das primäre Versagenskriterium darstellt. Die Einschnürung und das Versagen der Biegedruckzone gelten als Folge daraus.

Eine schematische Darstellung eines Biegeschubversagens in den Versuchen dieser Arbeit ist in Abbildung 5-29 exemplarisch gezeigt.

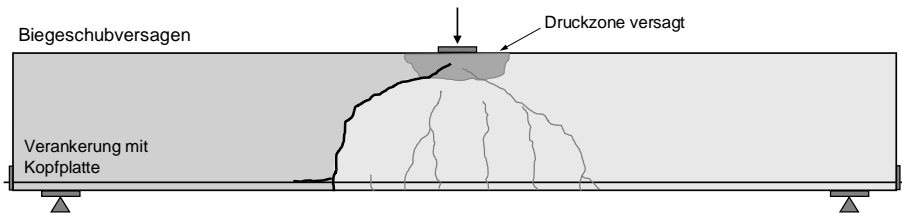


Abbildung 5-29: Biegeschubversagen, Bauteil ohne Querkraftbewehrung

### 5.9.3 Vergleich der Kraft-Verformungskurven

In der folgenden Abbildung 5-30 werden die Kraft-Verformungskurven der getesteten Prüfkörpervarianten ohne Querkraftbewehrung im Vergleich dargestellt. Dabei wird jeweils nur eine Kurve pro Variante exemplarisch gezeigt.

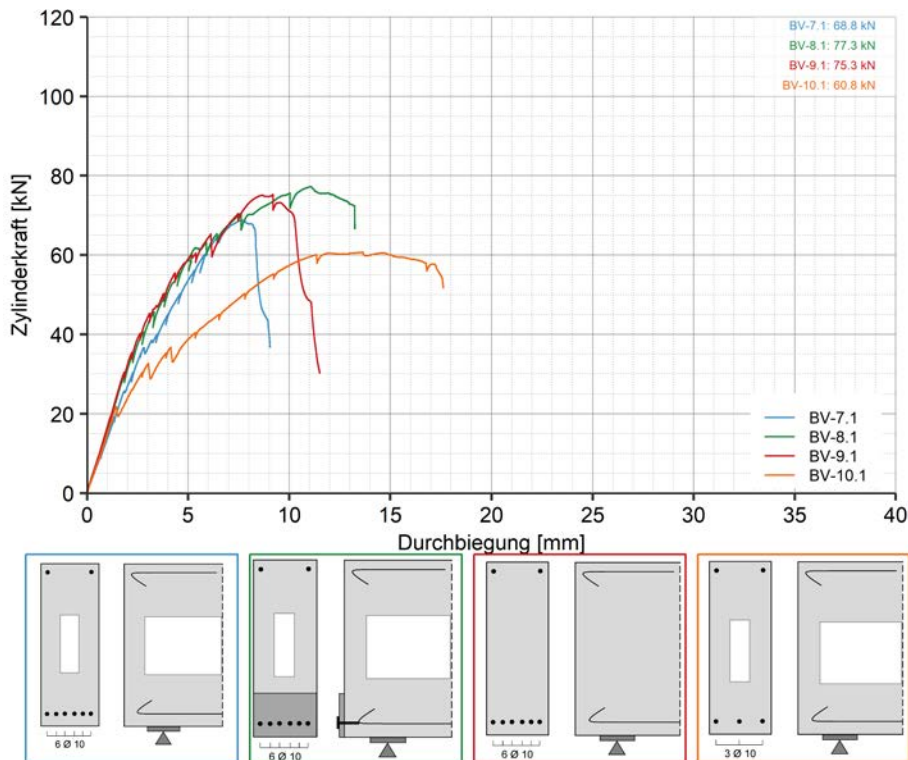


Abbildung 5-30: Kraft-Verformungs-Diagramm, Bauteile ohne Querkraftbewehrung

Im Vergleich der Prüfkörpervarianten zeigt sich, dass die Variante mit Kopfplatte BV-8 die größte Zylinderkraft von 77,3 kN erreicht. Ausschließlich diese Variante versagt aufgrund eines Biegeschubversagens (Abbildung 5-29). Auffällig sind die große Anfangssteifigkeit und das Versagen nach einer vergleichsweise großen Durchbiegung.

Im Vergleich dazu versagen die Prüfkörper mit Verankerung mittels Endhaken (BV-7, BV-9 und BV-10) durch ein Verankerungsversagen der Längsbewehrung. Aus dem Vergleich der Varianten BV-7 und BV-9 (ohne Dämmkerne) kann der Einfluss der Dämmkerne abgelesen 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 gleich (Zustand I). 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. Dies kann aus den Rissbildern im Anhang C entnommen werden. Die Traglast wird durch die Dämmkerne von 75,3 kN (BV-9) auf 68,8 kN (BV-7) reduziert.

Der Einfluss des Längsbewehrungsgrades wird aus dem Vergleich der Varianten BV-7 und BV-10 (reduzierte Längsbewehrung) 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 erkennbar. Während bei BV-7 die Erstrissbildung bei etwa 30 kN auftritt, kommt es bei BV-10 bereits bei etwa 20 kN Belastung zum Übergang von Zustand I in Zustand II.

Der ausgeprägte Knick in der Kraft-Verformungskurve von BV-10 weist auf ein frühzeitiges Verankerungsversagen des Zugbandes hin. In der Folge kommt es zu größeren Durchbiegungen bei gleicher Kraftsteigerung im Vergleich zu den anderen Varianten. Dies zeigt deutlich, dass eine geringere Anzahl an Längsstäben auch mit einer reduzierten Tragfähigkeit der Verankerung des Zugbandes einhergeht. Daraus ergibt sich ein entsprechend frühzeitiges Verankerungsversagen. Nach der frühen Erstrissbildung ist bei BV-10 lediglich eine Kraftsteigerung bis 60,8 kN möglich, was die geringste Traglast im Vergleich darstellt.

#### 5.9.4 Traglasten und Vergleich mit Rechenwerten

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuche an Bauteilen ohne Querkraftbewehrung mit rechnerischen Traglasten verglichen. Als Vergleichswert wird der Widerstandswert  $V_{Rd1}$  mit Gleichung (2.17) nach *DIN EN 1520:2011-06* unter Berücksichtigung von *DIN 4213:2015-10* angesetzt. Vorhandene Dämmkerne werden von der kleinsten Bauteilbreite  $b_w$  abgezogen.

$$V_{Rd1} = C_{Rd} \cdot k \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d \quad (2.17)$$

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

Die Ermittlung des Kalibrierfaktors  $C_{Rm}$  erfolgt dabei auf Erfahrungswerten, die auf Versuchserkenntnissen beruhen (*DIN EN 1992-1-1:2011-01*, Keller 2005). Auf Mittelwertniveau liegt der Faktor  $C_{Rm}$  bei 0,18.

$$V_{Rm1} = C_{Rm} \cdot k \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d \quad (5.1)$$

mit:  $C_{Rm} = 0,18$  Kalibrierfaktor auf Mittelwertniveau (Keller 2005)

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

$$F_{VRm1} = 2 \cdot V_{Rm1} - G \quad (5.2)$$

mit:  $G$  Eigenlast des Versuchskörpers

Zur Auswertung werden die erzielten Traglasten im Versuch  $F_U$  auf die rechnerische Traglast  $F_R$  nach Gleichung (5.2) bezogen. In Anlehnung an *DAfStb-Heft 597* wird das Verhältnis als Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  bezeichnet.

$$\gamma_{mod} = \frac{F_U}{F_R} = \frac{F_U}{F_{VRm1}} \quad (5.3)$$

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

In Tabelle 5-3 werden die im Versuch erzielten Traglasten  $F_U$  und die zugehörige, rechnerisch aufnehmbare Last  $F_{VRm1}$ , die Materialkennwerte, Bewehrungsgehalte und die Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  der untersuchten Prüfkörper dargestellt. Alle Versuchsergebnisse übertreffen die rechnerisch vorhergesagte Traglast.

Tabelle 5-3: 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 große Streuungen mit einer Standardabweichung von 0,27 ergibt sich der 5 %-Fraktilwert zu 0,93 (nach *DIN ISO 16269-6:2009-10*). Die Bemessung liegt damit auf der unsicheren Seite.

In Abbildung 5-31 wird die Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  für die jeweiligen Prüfkörpervarianten dargestellt. Dabei wird der 5 %-Fraktilwert als untere Grenze mit einer gestrichelten, grauen Linie angezeigt.

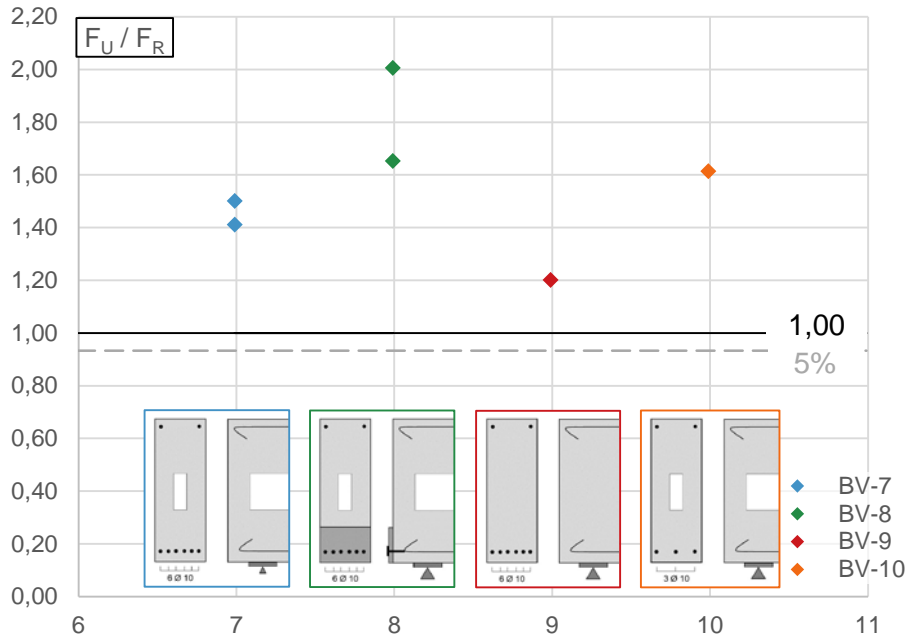


Abbildung 5-31: Vergleich der Versuchsergebnisse mit rechnerischen Traglasten nach Gleichung (5.2) für Bauteile ohne Querkraftbewehrung

### **5.9.5 Fazit**

Die Versuche an Bauteilen ohne Querkraftbewehrung haben gezeigt, dass die Querkrafttragfähigkeit mit der Bemessungsgleichung für  $V_{Rd1}$  (Gl. (2.17)) nach *DIN EN 1520:2011-06* und *DIN 4213:2015-10* nicht mit ausreichender Zuverlässigkeit vorhergesagt werden kann.

Für die in dieser Arbeit getesteten Prüfkörper ohne Querkraftbewehrung mit einer Schubschlankheit von 3,0, Druckfestigkeiten zwischen 3,1 und 5,2 N/mm<sup>2</sup> und Längsbewehrungsgraden zwischen 2 und 4 ‰ wird die Querkrafttragfähigkeit mit der Bemessungsgleichung (2.17) überschätzt.

Auch die alternativ in *DIN EN 1520:2011-06* angegebene und für Deutschland ausgeschlossene Bemessungsgleichung für  $V_{Rd1}$  (Gl. (2.20)) liefert keine zielsichere Vorhersage der Querkrafttragfähigkeit. Der 5 %-Fraktilwert der Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  liegt zwar bei 1,04, allerdings ergibt sich eine sehr große Standardabweichung von 0,73. Ein Ansatz zur Anpassung der Bemessung wird in Kapitel 6.1 vorgestellt.

## 5.10 Ergebnisse Bauteile mit Querkraftbewehrung

Im Folgenden werden die Messergebnisse der Versuche an Bauteilen mit Querkraftbewehrung dargestellt, wobei die Ergebnisse nur exemplarisch aufgeführt werden.

Darüberhinausgehende Ergebnisse und Rissbilder können Anhang C entnommen werden. Die Interpretation der Ergebnisse und ein Vorschlag zur Anpassung des bestehenden Bemessungsmodells folgen in Kapitel 6.2.

### 5.10.1 Messergebnisse

Im Folgenden werden exemplarisch die Messergebnisse des Versuchs BV-12.1 gezeigt. Der Versuchskörper BV-12.1 war mit einer Querkraftbewehrung, bestehend aus Einzelstäben mit Endhaken, ausgestattet (vgl. Abbildung 5-13, Tabelle 5-1).

Zunächst wird das Kraft-Verformungs-Diagramm (Abbildung 5-32) abgebildet. Aus diesem Diagramm ist der Übergang von Zustand I in Zustand II anhand der Steifigkeitsänderung bei 30 kN erkennbar. Das Versagen tritt bei einer Belastung von 89,1 kN und nach 11,5 mm Durchbiegung ohne Vorankündigung auf.

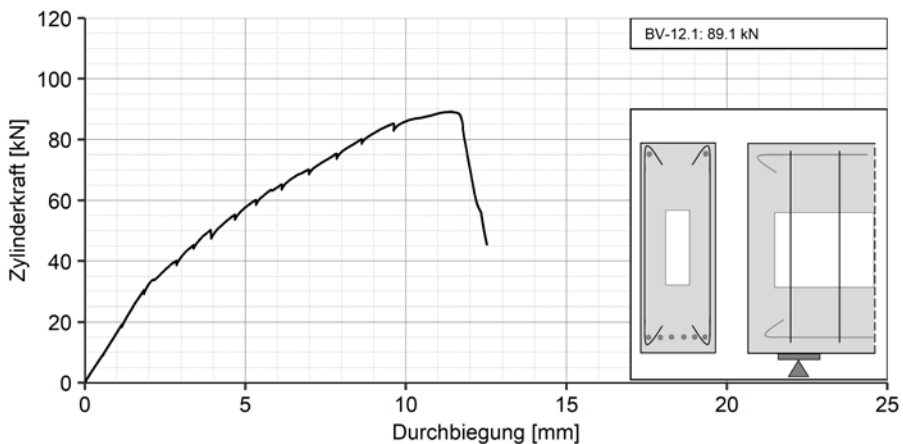


Abbildung 5-32: Kraft-Verformungs-Diagramm, BV-12.1

Im Folgenden werden die Messergebnisse der Wegaufnehmer und Dehnmessstreifen dargestellt. Die Anordnung der Messtechnik kann Abbildung 5-14 entnommen werden.

In der nachfolgenden Abbildung 5-33 wird der am Hilfsstab der Längsbewehrung gemessene Schlupf in Abhängigkeit von der Zylinderkraft aufgetragen. Wie in Kapitel 5.9 bereits beschrieben, werden durch die Messung der Wegaufnehmer b.1 bis b.5 verschiedene Effekte abgebildet. Im Diagramm wird deutlich, dass die Wegaufnehmer an den Längsstäben den Übergang zwischen Zustand I und Zustand II bei einer Belastung von etwa 30 kN erfassen. Die Steigung der Kurven (b.3 und b.4) werden flacher. Die Verschiebung der Längsstäbe nimmt stärker zu als die Belastung.

Die horizontal angeordneten Wegaufnehmer c.1 und c.2 zeichnen während des Versuchs die Stauchungen bzw. Dehnungen der Druck- und Zugzone auf. Die Messung dieser Wegaufnehmer wird in Abbildung 5-34 dargestellt. Die Wegaufnehmer zeichnen bis zum Erreichen der Traglast eine gleichmäßige Stauchung der Druckzone und eine gleichmäßige Dehnung der Zugzone auf.

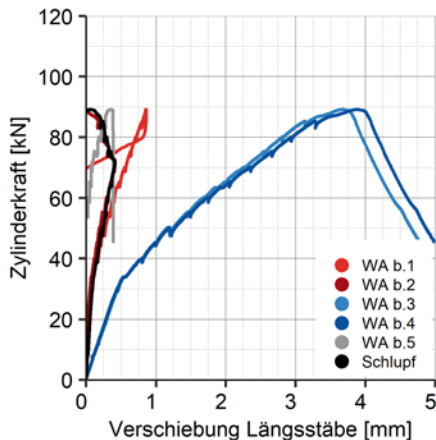


Abbildung 5-33: Kraft-Verformungs-Diagramm der Längsbewehrung, BV-12.1

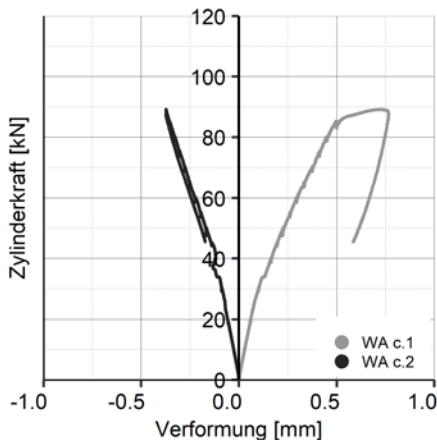


Abbildung 5-34: Kraft-Verformungs-Diagramm Druck- und Zugzone, BV-12.1

In Abbildung 5-35 wird die Messung der vertikalen Wegaufnehmer gezeigt, die der Dokumentation der Schubrissöffnungen dient. Dabei wird die vertikale Rissöffnung in Abhängigkeit von der Beanspruchung gezeigt.

Bei einer Belastung von 55 kN öffnet sich der maßgebende Schubriss, der durch die Wegaufnehmer a.2 und a.3 erfasst wird. Der Wegaufnehmer a.1 befindet sich außerhalb des Schubrisses und erfasst daher keine Rissöffnung. WA a.4 ist auf der anderen Seite des Trägers angeordnet und bildet einen weiteren Schubriss ab. Während die Breite des Schubrisses zunimmt, kann die Belastung weiter gesteigert werden. Bei einer Belastung von 89 kN versagt das Bauteil und der Schubriss öffnet sich sprunghaft.

In Abbildung 5-36 wird die Messung der DMS in den Viertelpunkten der Längsbewehrung dargestellt.

Die schwarze Kurve zeigt die Dehnungsmessung in der Mitte der Längsstäbe. Die rote Linie zeigt hier DMS 3.7.A, welcher im Viertelpunkt auf der Seite des maßgebenden Schubrisses angebracht ist. Es ist erkennbar, dass mit zunehmender Belastung sowohl die Dehnung in der Mitte der Längsstäbe als auch im Viertelpunkt ansteigt.

Zum Zeitpunkt des Versagens, bei einer Belastung von 89,1 kN, kann am DMS 3.7.B in der Mitte des Bauteils die maximale Dehnung von 1,7 mm/m gemessen werden.



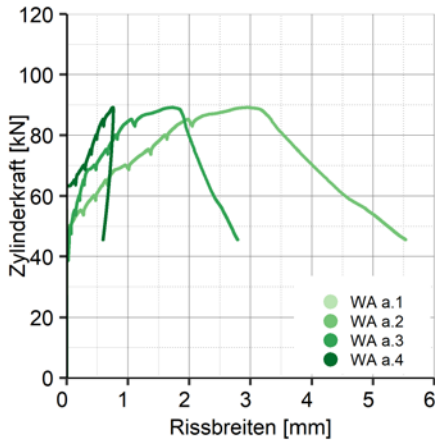


Abbildung 5-35: Kraft-Rissbreiten-Diagramm, BV-12.1

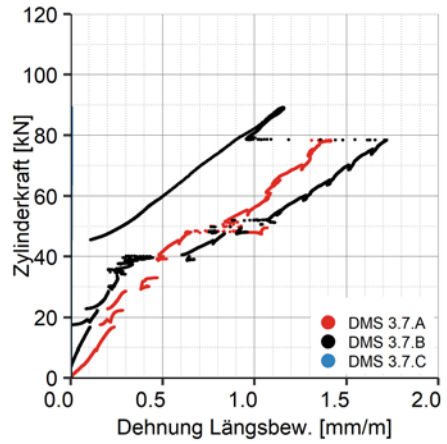


Abbildung 5-36: DMS-Messung der Längsstäbe, BV-12.1

### 5.10.2 Rissbildung und Versagen

In Abbildung 5-37 wird beispielhaft das Rissbild des zuvor dargestellten Prüfkörpers gezeigt. In Abbildung 5-38 wird das Rissbild mit den zugehörigen Laststufen dargestellt.

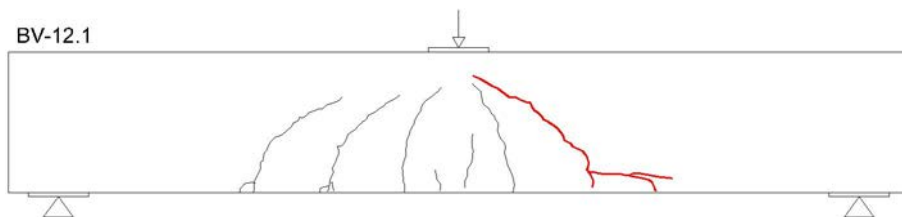


Abbildung 5-37: Rissbild BV-12.1, Einzelstäbe mit Endhaken

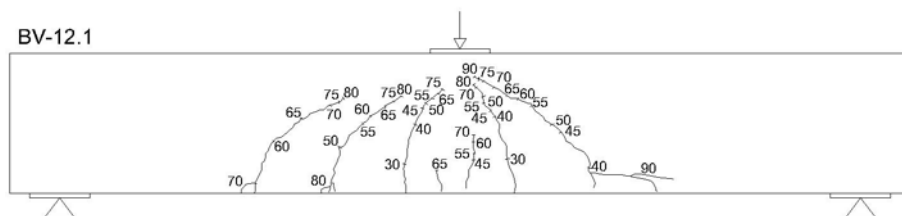


Abbildung 5-38: Rissbild BV-12.1 mit Laststufen

Im Versuch zeigen sich zunächst bei einer Belastung von 30 kN erste Biegerisse in der Mitte des Wandelementes. Zu diesem Zeitpunkt erfolgt der Übergang von Zustand I in Zustand II (Abbildung 5-32). Mit steigender Beanspruchung bilden sich weitere, breit verteilte Risse, wovon sich einer maßgeblich öffnet (Abbildung 5-37, rot markiert). Bei einer Belastung von 55 kN ändert der rot markierte Schubriss die Richtung und wandert zur Lasteinleitung hin. Bis zu diesem Belastungszeitpunkt ist die Rissentwicklung vergleichbar mit der Rissbildung der Versuche ohne Querkraftbewehrung (BV-7.3, Kapitel 5.9, Abbildung 5-23).

Im Unterschied zu den Versuchen ohne Querkraftbewehrung ist jedoch im Versuch mit Querkraftbewehrung (BV-12.1) eine deutliche Kraftsteigerung nach Einsetzen des Schubrisses erkennbar (vgl. Abbildung 5-21 mit Abbildung 5-35). Die vertikale Öffnung des Schubrisses bleibt über eine Belastungszunahme von 30 kN unter 2 mm (Abbildung 5-35). Es zeigt sich, dass die vertikalen Einzelstäbe mit Endhaken einen Beitrag zum Querkraftabtrag leisten. Der Schubriss wird über eine größere Kraftsteigerung zusammengehalten und Rissreibungskräfte können aktiviert werden. Die Belastung kann so weit gesteigert werden bis die Verankerung der vertikalen Querkraftbewehrung so weit nachgibt, dass die Schubrissbreite die Übertragung von Rissreibungskräften nicht mehr zulässt. Es kommt zu einer vollständigen Trennung der Rissufer, was die Aktivierung der Dübelwirkung der Längsbewehrung zur Folge hat. Bei einer Belastung von 89,1 kN kommt es zu einem plötzlichen Verankerungsversagen der Querkraftbewehrung und in der Folge zum Versagen der Verankerung der Längsbewehrung (Abbildung 5-33).

Das Versagen der Verankerung der Querkraftbewehrung ist die primäre Versagensursache. Das Verankerungsversagen der Längsbewehrung ist die Folge daraus.

In Abbildung 5-39 wird ein exemplarisches Versagensbild für ein Verankerungsversagen eines Bauteils mit Querkraftbewehrung dargestellt. Im Sinne der einheitlichen Darstellung wird der maßgebende Schubriss in der schematischen Grafik immer auf der linken Seite des Bauteils gezeigt.

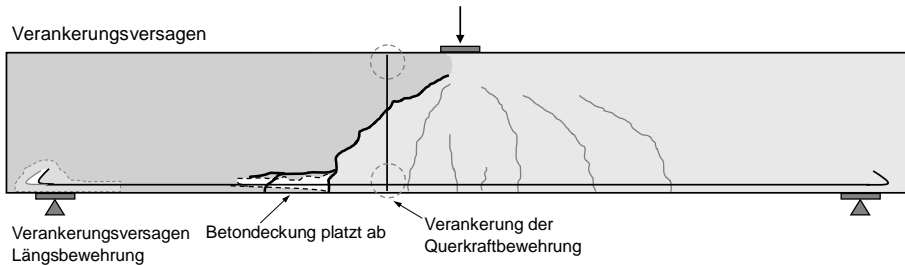


Abbildung 5-39: Verankerungsversagen, Bauteil mit Querkraftbewehrung

Ein Verankerungsversagen der Längsbewehrung kann auch in den Versuchen mit geschlossenem Bügelkorb (BV-14.1 und BV-15.1) festgestellt werden, wobei sich in diesen Versuchen das Versagen nicht plötzlich einstellt.

Lediglich bei Versuchen mit Schubleiter (BV-13.1) werden andere Versagensursachen festgestellt, die in Abbildung 5-40 schematisch dargestellt werden.

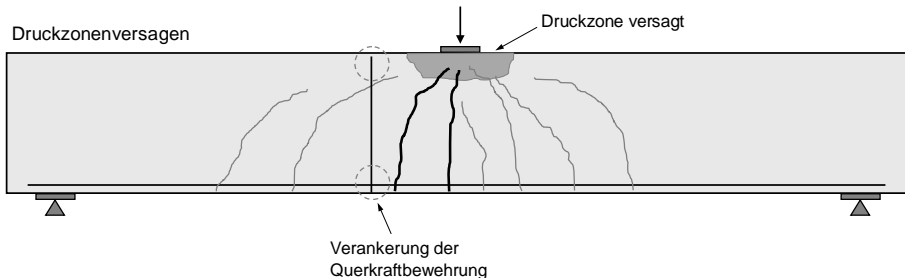


Abbildung 5-40: Druckzonenversagen, Bauteil mit Querkraftbewehrung

Im Versuch mit Schubleiter BV-13.1 zeigt sich zu Beginn eine ähnliche Rissentwicklung wie im zuvor dargestellten Versuch BV-12.1. Bei 30 kN zeigen sich erste Biegerisse und bei etwa 55 kN entsteht ein Schubriss aus dessen Folge die Stahlspannung im Viertelpunkt der Längsbewehrung ansteigt. Allerdings öffnen sich die Biegerisse in der Mitte des Bauteils maßgeblich, während die Schubrisse kaum an Rissbreite zunehmen. Es ist eine deutliche Stauchung der Biegedruckzone und eine Dehnung der Zugzone erkennbar. Bei 104 kN kommt es zum Versagen in der Druckzone. Bis zu diesem Zeitpunkt ist kein Dübelriss und auch kein Verankerungsversagen der Längsbewehrung erkennbar. Da bei einer Schubleiter die Längsstäbe mit den vertikalen Bewehrungsstäben verschweißt sind, kann von einer besseren Verankerung der Längsbewehrung als bei einer Verankerung mit Endhaken ausgegangen werden. Dies geht auch aus den Auszugversuchen in Kapitel 4 hervor.

### 5.10.3 Photogrammetrie

In Abbildung 5-41 bis Abbildung 5-45 werden exemplarisch Aufnahmen der photogrammetrischen Untersuchung des Prüfkörpers BV-5.1 (Einzelstäbe mit Endhaken) gezeigt. Die dargestellte Legende verweist auf die prozentuale Abstandsänderung der Messpunkte. Anhand der photogrammetrischen Untersuchungen wird die Rissentwicklung erkennbar.

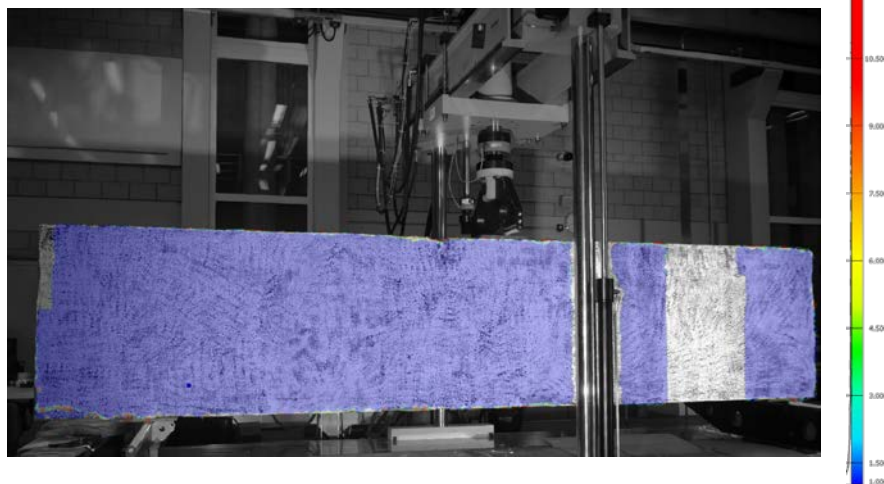


Abbildung 5-41: Rissbild BV-5.1, Einzelstäbe mit Endhaken, 100 kN

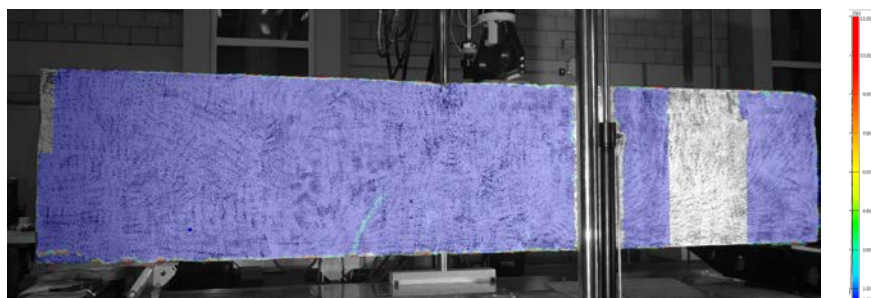


Abbildung 5-42: Rissbild BV-5.1, Einzelstäbe mit Endhaken, 125 kN

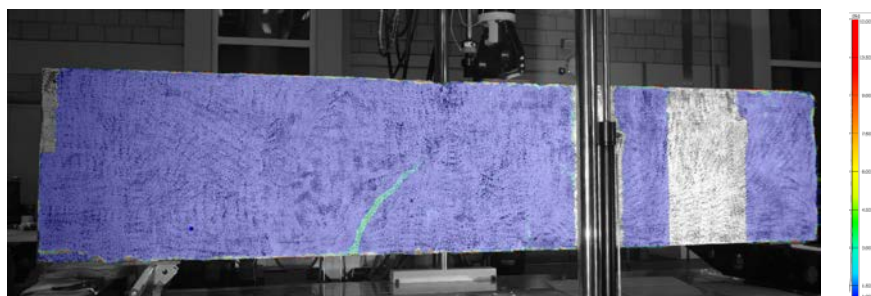


Abbildung 5-43: Rissbild BV-5.1, Einzelstäbe mit Endhaken, 150 kN

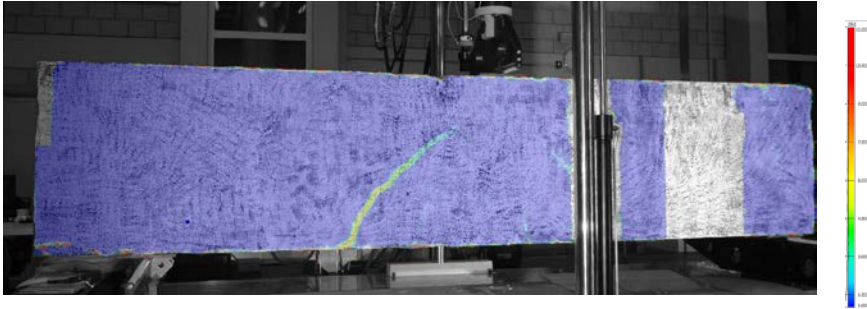


Abbildung 5-44: Rissbild BV-5.1, Einzelstäbe mit Endhaken, 160 kN, maximale Belastung

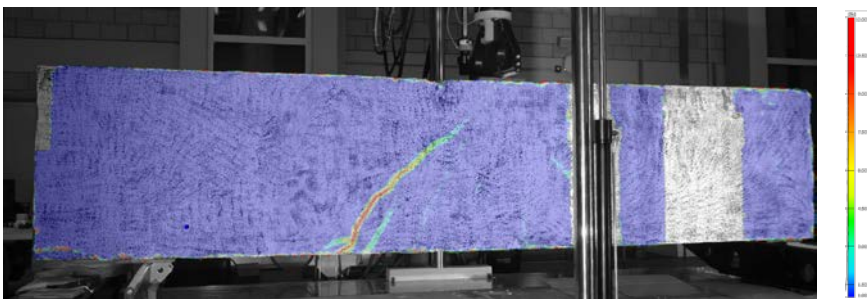


Abbildung 5-45: Rissbild BV-5.1, Einzelstäbe mit Endhaken, 155 kN

In Abbildung 5-45 wird erkennbar, dass das Rissbild des Versuchskörpers BV-5.1 im Versagenszustand dem zuvor beschriebenen und in Abbildung 5-39 schematisch dargestellten Verankerungsversagen gleicht.

### 5.10.4 Vergleich der Kraft-Verformungskurven

Ein Vergleich der Kraft-Verformungskurven der Versuche mit Querkraftbewehrung kann Abbildung 5-46 entnommen werden. Hier werden die Kraft-Verformungskurven aller Prüfkörpervarianten mit Querkraftbewehrung und einer Bauteilhöhe von 70 cm dargestellt. Dabei wird jeweils nur eine Kurve pro Variante exemplarisch gezeigt.

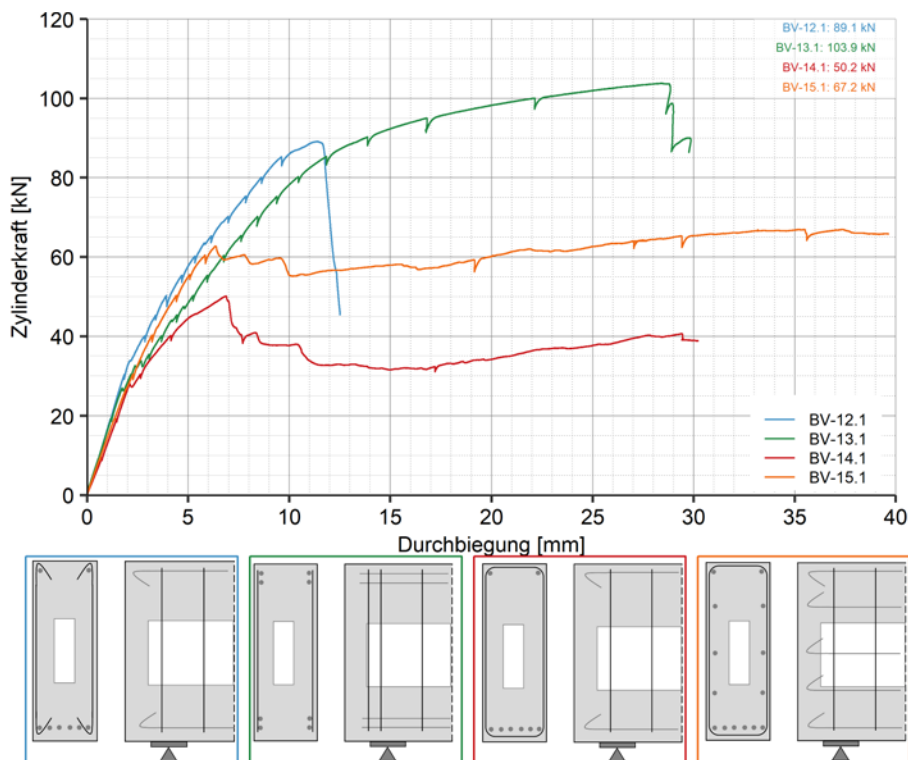


Abbildung 5-46: Kraft-Verformungs-Diagramm, Bauteile mit Querkraftbewehrung,  $h = 70$  cm

Es zeigt sich, dass die Bewehrungsvariante BV-14 mit geschlossenem Bügelkorb nach *DIN 4213:2015-10* die geringste Tragfähigkeit in den Untersuchungen erzielt hat. Dies könnte mit der erschwerten Verdichtung von Hand und daraus resultierenden Verdichtungsfehlern in Verbindung mit dem geschlossenen Bügelkorb zusammenhängen (Kapitel 2.1.6). Die Bewehrungsvariante BV-15 mit geschlossenem Bügelkorb und zusätzlich eingebauter konstruktiver Längsbewehrung zeigt im Vergleich zu BV-14 eine um 34 % verbesserte Tragfähigkeit. Bei beiden Varianten mit geschlossenem Bügelkorb kann 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 oder Einzelstäben BV-12 um bis zu 50 % geringer.

Die Bewehrungsvariante mit Einzelstäben und Endhaken (BV-12) zeigt in den Versuchen die größte Steifigkeit, die sich durch die große Steigung der Kraft-

Verformungskurve darstellt. Die maximal erreichte Traglast liegt 77 % über der des Normprüfkörpers BV-14.

Die Variante BV-13 mit Schubleiter 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 der Biegebeanspruchung. Die Verankerung der Längsstäbe durch angeschweißte vertikale Stäbe ist bis zu dieser Belastung ausreichend.

In der nachfolgenden Abbildung 5-47 wird ein Vergleich der Kraft-Verformungskurven der Versuche mit Querkraftbewehrung und Bauteilhöhe von 100 cm dargestellt. Dabei wird jeweils nur eine Kurve pro Variante exemplarisch gezeigt.

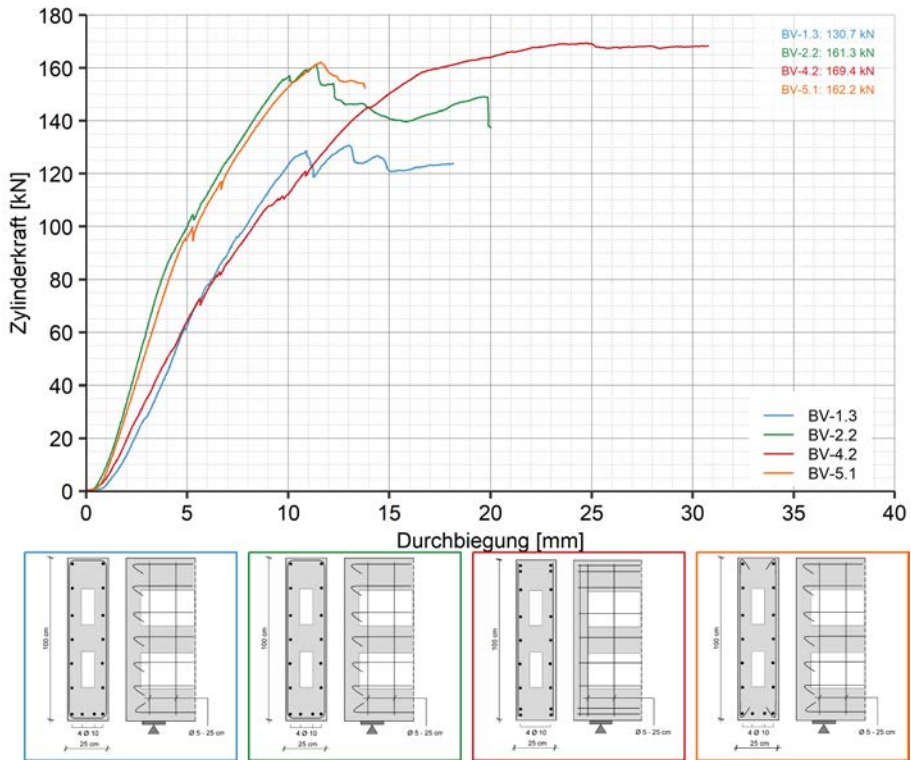


Abbildung 5-47: Kraft-Verformungs-Diagramm, Bauteile mit Querkraftbewehrung,  $h = 100$  cm

Es bestätigt sich, dass auch bei höheren Bauteilen die Varianten mit geschlossenem Bügelkorb nach *DIN 4213:2015-10* (BV-1 und BV-2) die geringsten Traglasten erreichen. Dahingegen erzielen die Varianten mit Schubleiter (BV-4) und mit Einzelstäben und Endhaken (BV-5) die größten Traglasten.

### 5.10.5 Traglasten und Vergleich mit Rechenwerten

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuche an Bauteilen mit Querkraftbewehrung mit den rechnerischen Traglasten verglichen. Als Vergleichswert wird der Widerstandswert  $V_{Rm3}$  nach Gleichung (2.22) aus *DIN EN 1520:2011-06* unter Berücksichtigung von *DIN 4213:2015-10* angesetzt. Dabei wird in Anlehnung an *DIN 4213:2015-10* die Streckgrenze der Querkraftbewehrung  $f_{ywk}$  auf  $400 \text{ N/mm}^2$  und der Einfluss des Druckstrebenwinkels auf  $\cot \theta = 1,2$  festgelegt.

$$V_{Rm3} = a_{sw} \cdot z \cdot f_{ywk} \cdot \cot \theta \quad (2.22)$$

mit:  $f_{ywk} \leq 400 \text{ N/mm}^2$

$\cot \theta \quad \cot \theta = 1,2$  für reine Biegung nach *DIN 4213:2015-10*

Der Widerstandswert  $V_{Rm3}$  wird mit Gleichung (5.4) in die rechnerisch aufnehmbare Traglast  $F_{VRm3}$  unter Berücksichtigung des Eigengewichts umgerechnet.

$$F_{VRm3} = 2 \cdot V_{Rm3} - G \quad (5.4)$$

mit:  $G$  Eigenlast 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 (5.5) bestimmt.

$$\gamma_{mod} = \frac{F_U}{F_R} = \frac{F_U}{F_{VRm3}} \quad (5.5)$$

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

In Tabelle 5-4 werden die im Versuch erzielten Traglasten  $F_U$  und die zugehörige, rechnerisch aufnehmbare Last  $F_{VRm3}$ , die Materialkennwerte, Bewehrungsgehalte und die Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  der untersuchten Prüfkörper, sortiert nach ihrer Bewehrungskonstruktion, dargestellt.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass der Mittelwert der Modellsicherheit  $\gamma_{mod} = 1,09$  beträgt, was einer Traglastreserve von 9 % entspricht. Bedingt durch große Streuungen mit einer Standardabweichung von 0,30 ergibt sich der 5 %-Fraktilwert zu 0,51 (nach *DIN ISO 16269-6:2009-10*).

Die Bemessung befindet sich damit auf der unsicheren Seite.

In Abbildung 5-48 wird die Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  für die jeweiligen Bewehrungsvarianten, sortiert nach Bügelkorb, Schubleiter und Einzelstäbe, dargestellt. Dabei wird der 5 %-Fraktilwert als untere Grenze mit einer gestrichelten, grauen Linie angezeigt.



Tabelle 5-4: Ergebnisse Bauteile mit Querkraftbewehrung

Versuch	Druckfestigkeit	Rohdichte	Bewehrungsgrad	Längsbewehrung	Querkraftbewehrung	Streckgrenze für Querkraftbewehrung	DIN 4213 Gl. (5.5)	Maximallast im Versuch	$\gamma_{mod}$ Gl. (5.6)
	$f_c$	$\rho$	$\rho_t$	$A_{sl}$	$a_{sw}$	$f_{yw}$	$F_{VRm3}$	$F_u$	$F_u / F_{VRm3}$
	[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]	[-]
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>

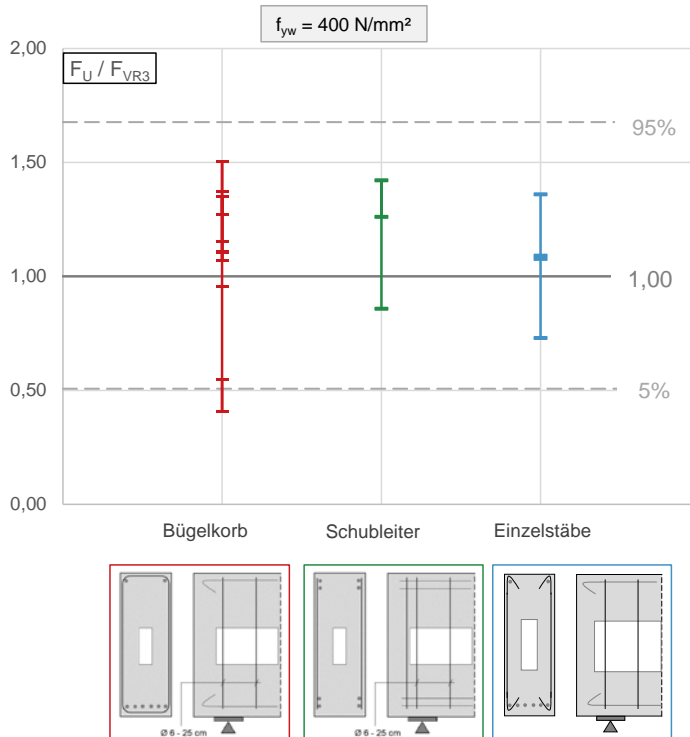


Abbildung 5-48: Vergleich der Versuchsergebnisse mit rechnerischen Traglasten nach Gleichung (5.4) für Bauteile mit Querkraftbewehrung,  $f_{yk} = 400 \text{ N/mm}^2$

## 5 Experimentelle Untersuchungen an Wandelementen

In Abbildung 5-49 wird die Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  für die jeweiligen Bewehrungsvarianten bezogen auf die Schubschlankheit der Prüfkörper, sortiert nach Bügelkorb, Schubleiter und Einzelstäbe, dargestellt. Daran wird deutlich, dass die größere Schubschlankheit von  $\lambda = 3,0$  zu einer deutlichen Reduzierung der Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  führt. Die Querkrafttragfähigkeit wird insbesondere für die größere Schubschlankheit überschätzt.

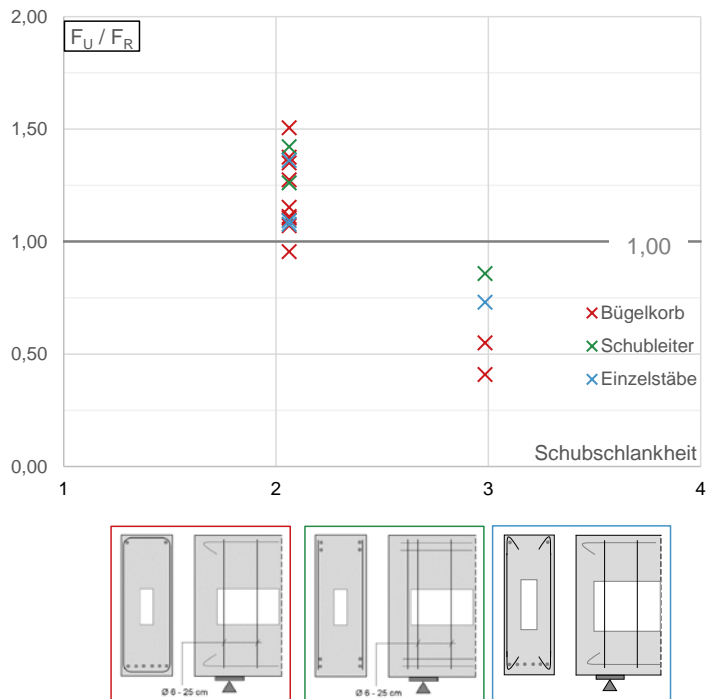


Abbildung 5-49: Vergleich der Versuchsergebnisse mit rechnerischen Traglasten nach Gleichung (5.4) für Bauteile mit Querkraftbewehrung bezogen auf die Schubschlankheit der Prüfkörper

### 5.10.6 Fazit

Bauteile mit Querkraftbewehrung können nach der Bemessungsformel für  $V_{Rd3}$  aus Gleichung (2.22) nach *DIN EN 1520:2011-06* und *DIN 4213:2015-10* nicht mit ausreichender Sicherheit bemessen werden.

Für die in dieser Arbeit getesteten Prüfkörper mit Querkraftbewehrung mit Schubslankheiten von 2,1 und 3,0, Druckfestigkeiten zwischen 3,5 und 6,5 N/mm<sup>2</sup> und Längsbewehrungsgraden zwischen 2 und 4 ‰ wird die Querkrafttragfähigkeit mit der Bemessungsgleichung (2.22) überschätzt.

Ein Ansatz zur Anpassung der Bemessung wird in Kapitel 6.2 vorgestellt.

## 6 Bemessungsmodell

In diesem Kapitel werden Vorschläge zur Anpassung der Bemessungsgleichungen für Bauteile ohne und mit Querkraftbewehrung vorgestellt.

### 6.1 Bauteile ohne Querkraftbewehrung

Aus den Untersuchungen in Kapitel 5.9 geht hervor, dass die Bemessungsgleichung für Bauteile ohne Querkraftbewehrung (Gl. (2.17) nach *DIN EN 1520:2011-06* und *DIN 4213:2015-10*) den Betontraganteil zum Querkraftabtrag überschätzt.

Daher wird im Folgenden ein Abminderungsbeiwert  $k_{LAC}$  vorgeschlagen, der sich aus dem Vergleich der Versuchsergebnisse mit rechnerischen Traglasten aus Kapitel 5.9 ableitet. Der 5%-Fraktilwert der Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  ergibt sich zu 0,93 (vgl. Abbildung 5-31), weshalb der Abminderungsbeiwert  $k_{LAC}$  auf der sicheren Seite gerundet mit 0,90 angesetzt wird.

$$k_{LAC} = 0,90 \text{ Abminderungsbeiwert für } f_{ck} \leq 6 \text{ N/mm}^2$$

In Anlehnung an die aktuell in Deutschland gültige Bemessungsgleichung (2.17) wird die nachfolgende Gleichung (6.1) vorgeschlagen. Entsprechend der Bezeichnung im Eurocode 2 wird der Index „c“ für „concrete“ gewählt und entsprechend Betontraganteil genannt.

$$V_{Rm,c} = k_{LAC} \cdot C_{Rm} \cdot k \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d \quad (6.1)$$

mit:  $k_{LAC} = 0,90$  Abminderungsbeiwert für  $f_{ck} \leq 6 \text{ N/mm}^2$

$C_{Rm} = 0,18$  Kalibrierfaktor auf Mittelwertniveau (*Keller 2005*)

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

$$b_w = b - b_k \quad (6.2)$$

mit:  $b$  Breite des Bauteils

$b_k$  Dicke des Dämmkerns

Der Widerstandswert  $V_{Rm,c}$  wird mit Gleichung (6.3) in die rechnerisch aufnehmbare Traglast  $F_{VRm,c}$  unter Berücksichtigung des Eigengewichts umgerechnet.

$$F_{VRm,c} = 2 \cdot V_{Rm,c} - G \quad (6.3)$$

mit:  $G$  Eigenlast des Versuchskörpers

Mit Gleichung (6.4) werden die experimentellen Traglasten mit den rechnerisch aufnehmbaren Traglasten nach Gleichung (6.3) ins Verhältnis gesetzt und so die Modellsicherheit  $\gamma_{mod}$  bestimmt.

$$\gamma_{\text{mod}} = \frac{F_U}{F_R} = \frac{F_U}{F_{\text{VRm,c}}} \quad (6.4)$$

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

Unter Anwendung des hier vorgestellten Abminderungsfaktors mit der Bemessungsgleichung (6.1) ergeben sich für die Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  die in Abbildung 6-1 dargestellten Ergebnisse. Der 5 %-Fraktilwert ergibt sich zu 1,04 bei einer Standardabweichung von 0,30. Damit liegt die Bemessung auf der sicheren Seite.

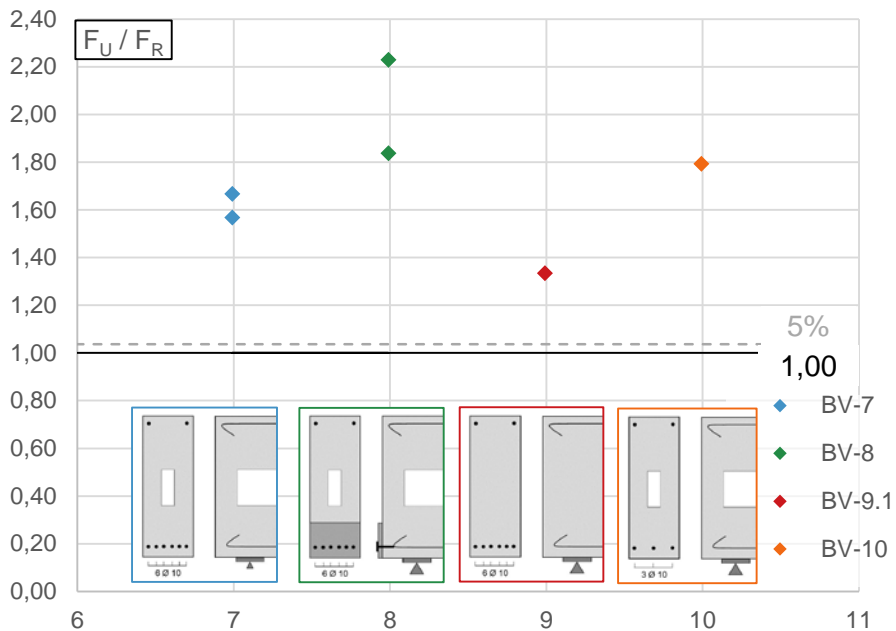


Abbildung 6-1: Vergleich der Versuchsergebnisse mit rechnerischen Traglasten nach Gleichung (6.3) für Bauteile ohne Querkraftbewehrung

In den Untersuchungen in Kapitel 5.9 wird in nahezu allen Bewehrungsvarianten ein Verankerungsversagen der Längsbewehrung festgestellt.

Lediglich die angeschraubten Kopfplatten in BV-8 führten zu einer vollen Verankerung des Zugbandes und in der Folge zu einem Biegeschubversagen. Die Verankerung mittels Kopfplatte stellt einen Grenzfall dar, der in der baupraktischen Umsetzung nur selten zur Anwendung kommt.

## 6.2 Bauteile mit Querkraftbewehrung

In den experimentellen Untersuchungen aus Kapitel 5 hat sich gezeigt, dass die Bemessungsgleichung für Bauteile mit Querkraftbewehrung  $V_{Rd3}$  aus Gl. (2.22) nach *DIN EN 1520:2011-06* und *DIN 4213:2015-10* keine zuverlässige Vorhersage der Querkrafttragfähigkeit ermöglicht. Daher wird eine Anpassung der Bemessung vorgeschlagen.

Die bestehenden Modelle zur Querkrafttragfähigkeit setzen eine vollständige Verankerung der Bewehrung voraus. Ein Verankerungsversagen der Längs- und Querkraftbewehrung ist nach den aktuellen Regelwerken durch konstruktive Maßnahmen grundsätzlich auszuschließen. In Kapitel 4 wurde gezeigt, dass die Verankerung von Bewehrung in haufwerksporigem Leichtbeton nachgiebig ist und nicht von einer vollen Verankerung ausgegangen werden kann. Je nach Verankerungsvariante kann sich die aufnehmbare Stahlspannung stark unterscheiden. Eine volle Ausnutzung eines Betonstahls mit einer Streckgrenze von  $500 \text{ N/mm}^2$  ist in den Auszugversuchen nicht erreicht worden.

Aus den experimentellen Untersuchungen an Wandbauteilen in Kapitel 5 geht ebenfalls hervor, dass bei den in dieser Arbeit untersuchten querkraftbewehrten Bauteilen aus LAC kein Stahlzugversagen der Querkraftbewehrung maßgebend für das Bauteilversagen wird. Es wird erkannt, dass das Verankerungsversagen der Längs- bzw. Querkraftbewehrung bei Verankerung mittels Endhaken die maßgebende Versagensursache darstellt. Lediglich in der Bewehrungsvariante der Schubleiter konnte ein Verankerungsversagen der Längsbewehrung verhindert werden, sodass ein Druckzonenversagen zum Bauteilversagen führt.

Durch Analyse der Rissentwicklung und des Versagensablaufs ist erkennbar, dass ein querkraftbewehrtes Bauteil bei einem auftretenden Verankerungsversagen der Längsbewehrung einen vergleichbaren Versagenshergang aufweist wie ein Bauteil ohne Querkraftbewehrung. Dies geht aus dem Vergleich der in Kapitel 5.9.2 und 5.10.2 dargestellten Beschreibungen des Verankerungsversagens hervor. Daher liegt es nahe, die Tragmechanismen eines Bauteils ohne Querkraftbewehrung auf das Bauteilverhalten von querkraftbewehrten Wandelementen zu übertragen. Die Tragmechanismen eines Bauteils ohne Querkraftbewehrung sind aus Kapitel 5.9 (vgl. Abbildung 5-25) bekannt und werden in Abbildung 6-2 schematisch dargestellt.

Gezeigt wird der maßgebende Schubriss, der sich vorrangig öffnet und in etwa der halben Bauteilhöhe seine Richtung ändert und zur Lasteinleitung hin ausbreitet. Zeitgleich entwickelt sich ein horizontaler Riss auf Höhe der Längsbewehrung, auch Düberriss genannt, in Richtung des Auflagers. Aufgrund der Rissuferverschiebung im Schubriss, setzt sich der Bauteilbereich unterhalb der Lasteinleitung auf der Längsbewehrung ab und aktiviert die Dübelwirkung. Damit einher geht das Abplatzen der Betondeckung unterhalb der Biegezugbewehrung. Zum Zeitpunkt der maximalen Traglast kommt es zu einem schlagartigen Verankerungsversagen der Längsbewehrung.

Der Ausfall der Verankerung des Zugbandes kann nicht kompensiert werden und es kommt zum Bauteilversagen, das auch das Durchtrennen der Druckzone zur Folge haben kann.

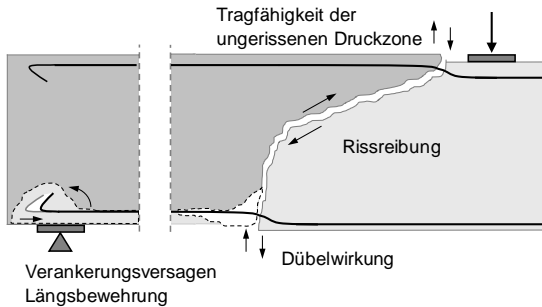


Abbildung 6-2: Schematische Darstellung der Tragmechanismen bei Verankerungsversagen von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung

Aus den Versuchen an Bauteilen mit Querkraftbewehrung zeigt sich, dass die Querkraftbewehrung dazu beiträgt, dass Schubrisse über eine größere Belastung hinweg enger zusammengehalten werden. Bestätigt wird dies durch den Vergleich der Schubrissbreiten aus den Versuchen BV-7.3 und BV-12.1, was in Abbildung 5-21 und Abbildung 5-35 in Kapitel 5 zu erkennen ist. Dadurch können Rissreibungskräfte über eine größere Laststeigerung hinweg übertragen werden. Damit einher geht ein verlangsamtes Fortschreiten des Schubrisses und eine spätere Einschnürung der Druckzone. Eine Kraftübertragung durch Rissverzahnung aufgrund herausstehender Zuschlagkörner kann bei Leichtbeton nicht in Ansatz gebracht werden, da Risse grundsätzlich durch die weicheren Leichtzuschläge verlaufen. Dies konnte in den Versuchen beobachtet werden und bestätigt die Aussage von *Walraven 1980*, dass bei Leichtbeton keine Kornverzahnung angerechnet werden kann.

Die Belastung kann so weit gesteigert werden bis die Verankerung der Querkraftbewehrung so weit nachgibt, dass die Schubrissbreite die Übertragung von Rissreibungskräften nicht mehr zulässt und es zu einer vollständigen Trennung der Rissufer kommt. Damit einher geht die Aktivierung der Dübelwirkung und das Abplatzen der Betondeckung unterhalb der Biegezugbewehrung. In der Folge kommt es zum Verankerungsversagen der Längsbewehrung und zum Bauteilversagen.

Das Versagen der Verankerung der Querkraftbewehrung ist die primäre Versagensursache, das Verankerungsversagen der Längsbewehrung die Folge daraus.

Eine schematische Darstellung der Tragmechanismen und der beobachteten Rissbildung findet sich in Abbildung 6-3. Es zeigt sich, dass zusätzlich zu den zuvor dargestellten Tragmechanismen die Tragfähigkeit der Querkraftbewehrung und deren Verankerung hinzukommt.

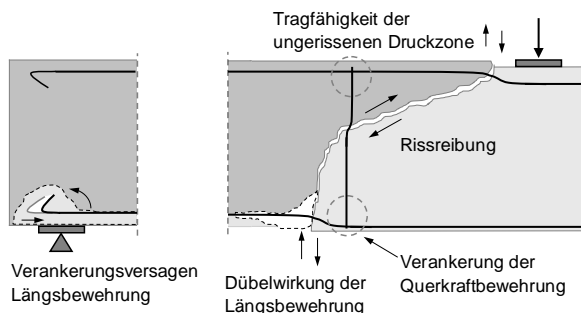


Abbildung 6-3: Schematische Darstellung der Tragmechanismen bei Verankerungsversagen von Bauteilen mit Querkraftbewehrung

Eine Querkraftbewehrung in Bauteilen aus LAC liefert demnach zusätzlich zu den bekannten Tragmechanismen eines Bauteils ohne Querkraftbewehrung einen Beitrag zur Querkrafttragfähigkeit. Die Größe des Anteils an der Tragfähigkeit ist abhängig von der Verankerungskonstruktion der Querkraftbewehrung.

### Berücksichtigung der Verankerung der Querkraftbewehrung

Wie in der Auswertung der Auszugversuche in Kapitel 4.10 dargestellt, ist die aufnehmbare Stahlspannung in Abhängigkeit von der Verankerungskonstruktion veränderlich (Tabelle 4-8). Daher erscheint es sinnvoll, die maximale Stahlspannung der Querkraftbewehrung  $f_{yw}$  für verschiedene Querkraftbewehrungskonstruktionen in der Bemessung zu berücksichtigen. Zur Reduzierung der ansetzbaren Spannungen wird im Folgenden ein Zusammenhang zwischen den untersuchten Konstruktionen der Querkraftbewehrung aus Kapitel 5 und den Ergebnissen der Auszugversuche aus Kapitel 4 hergestellt.

Zunächst wird die Verankerung der Querkraftbewehrung für die untersuchten Konstruktionen Bügelkorb, Schubleiter und Einzelstäbe mit Endhaken schematisch dargestellt und auf die vergleichbare Variante der Auszugversuche aus Kapitel 4 verwiesen. Die Rissbilder sind jeweils exemplarisch dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird exemplarisch nur ein Querkraftbewehrungsstab dargestellt.



In Abbildung 6-4 wird die Verankerung der Querkraftbewehrung bei einem Bügelkorb nach *DIN 4213:2015-10* gezeigt. Die Bügel sind an den Längsstäben angeschweißt oder angebunden. Die Verankerungstragfähigkeit aus BET-12 mit einem geraden Stabende und einem angeschweißten Querstab kann mit der Verankerung des Bügels verglichen werden. Der horizontale Schenkel des Bügelkorbes wird in diesem Fall vernachlässigt.

Die Auszugversuche ergeben für diese Verankerungsvariante eine ansetzbare Stahlspannung von  $120 \text{ N/mm}^2$  (Kapitel 4.10).

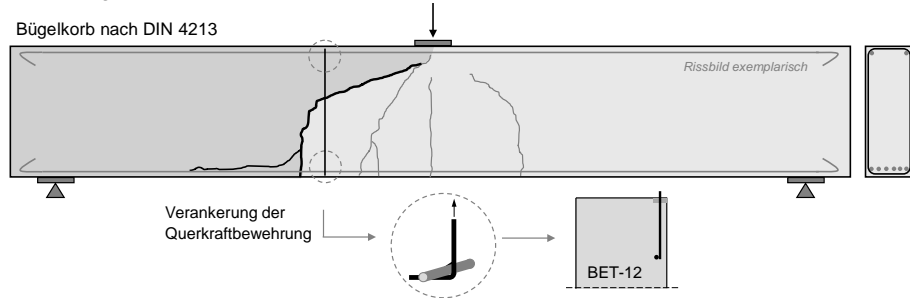


Abbildung 6-4: Verankerung der Querkraftbewehrung, Bügelkorb nach *DIN 4213:2015-10*

Bei Ausbildung der Querkraftbewehrung mit Einzelstäben und Endhaken werden die Haken der vertikalen Stäbe in die Längsbewehrung eingehakt (Abbildung 6-5). Die Längsbewehrung verläuft somit durch die Spitze des Hakens, ohne mit den Stäben verschweißt oder angebunden zu sein. Für diese Bewehrungskonstruktion wird die Verankerungsvariante BET-5, Haken mit angeschweißtem Querstab, angenommen. Bei dieser Variante der Auszugversuche war ein Querstab in der Hakenspitze angeschweißt, da herstellungstechnisch eine feste Verbindung notwendig war, um den Querstab im Betonierprozess in seiner Lage zu sichern.

Die ansetzbare Spannung beträgt  $115 \text{ N/mm}^2$  für die Variante mit Einzelstäben und Endhaken (Kapitel 4.10).

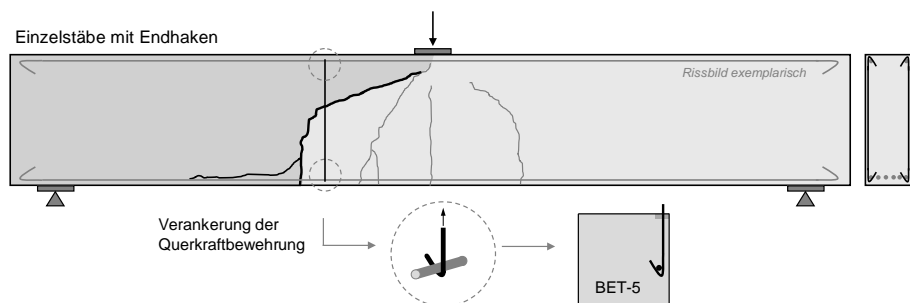


Abbildung 6-5: Verankerung der Querkraftbewehrung, Einzelstäben mit Endhaken

In der nachfolgenden Abbildung 6-6 wird die Variante der Schubleiter dargestellt. Nach der Definition in *DIN EN 1520:2011-06* müssen zwei Längsstäbe übereinander angeordnet und mit den vertikalen Stäben verschweißt werden, wie hier exemplarisch dargestellt. Die Verankerung der vertikalen Stäbe entspricht demnach der Variante BET-13, gerades Stabende und zwei angeschweißten Querstäben.

Die aufnehmbare Spannung beträgt 190 N/mm<sup>2</sup> für die Variante der Schubleiter (Kapitel 4.10).

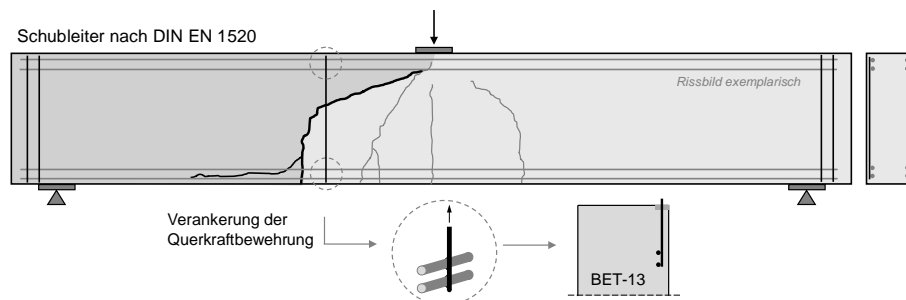


Abbildung 6-6: Verankerung der Querkraftbewehrung, Schubleiter nach *DIN EN 1520:2011-06*

Je nach gewählter Konstruktion der Querkraftbewehrung wird die rechnerisch ansetzbare Spannung angepasst (vgl. Tabelle 4-8 in Kapitel 4.10). Der Druckstrebenwinkel wird zu 45°, also der  $\cot \theta$  zu 1,0, angenommen und entfällt daher in der Bemessungsgleichung. Der Vorfaktor aus *DIN EN 1520:2011-06* von 0,8 in Gleichung (2.24), der zur Berücksichtigung des eingeschränkten Verankerungsverhaltens der Querkraftbewehrung dient (*Hegger und Roeser 2004*), kann durch die Erkenntnisse zur Bestimmung der ansetzbaren Stahlspannungen aus Kapitel 4.10 entfallen. Der Anteil der Querkraftbewehrung an der Querkrafttragfähigkeit eines Bauteils erhält die Bezeichnung  $V_{R,s}$ , auf Mittelwertniveau  $V_{Rm,s}$ , und wird nach Gleichung (6.5) wie folgt modifiziert:

$$V_{Rm,s} = a_{sw} \cdot z \cdot f_{ywk} \quad (6.5)$$

mit: $f_{ywk}$	$\leq 120 \text{ N/mm}^2$	Bügelkorb
	$\leq 115 \text{ N/mm}^2$	Einzelstäbe mit Endhaken
	$\leq 190 \text{ N/mm}^2$	Schubleiter

### Berücksichtigung der Schubschlankheit

Weiterhin soll zur Berücksichtigung der Lastanordnung und der Geometrie eines Bauteils die Schubschlankheit als Einflussgröße einbezogen werden. In den Untersuchungen ist ein Einfluss der Bauteilgeometrie auf das Querkrafttragverhalten bei querkraftbewehrten Bauteilen aus LAC erkennbar. Insbesondere in Abbildung 5-49 wird deutlich, dass die Querkrafttragfähigkeit nach *DIN EN 1520:2011-06* für die größere Schubschlankheit von  $\lambda = 3,0$  überschätzt wird. Aus diesem Grund wird ein Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Schubschlankheit vorgeschlagen, der hier  $a_l$  genannt wird. Durch einen Abminderungsbeiwert von 0,85 für Schubschlankheiten  $2,1 \leq \lambda \leq 3,0$  können die Versuchsergebnisse mit dem neuen Bemessungsmodell abgebildet werden (Abbildung 6-8).

$$a_l = 1,0 \quad \text{für } \lambda < 2,1$$

$$a_l = 0,85 \quad \text{für } 2,1 \leq \lambda \leq 3,0$$

Dies bestätigt die Aussage von *Leonhardt und Mönning 1984*, dass ein Abstand von einem 2,5 bis 3,5-fachen der statischen Höhe die maßgebende Lastposition für Bauteile mit und ohne Querkraftbewehrung darstellt.

**Bemessungsmodell für Bauteile mit Querkraftbewehrung**

In Anlehnung an die auf europäischer Ebene gültige Gleichung (2.23) aus *DIN EN 1520:2011-06* wird vorgeschlagen, in der Bemessung für querkraftbewehrte Bauteile sowohl einen Betontraganteil als auch einen Stahltraganteil zu berücksichtigen. Der Bemessungswert wird hier  $V_{R,c+s}$  genannt und wird aus dem Betontraganteil  $V_{R,c}$  und dem Stahltraganteil  $V_{R,s}$  zusammengesetzt. Dabei werden die zuvor dargestellten Einflussgrößen Verankerung der Querkraftbewehrung und die Schubschlankheit der Bauteile mit einbezogen. Der Betontraganteil ist aus den Erkenntnissen aus Kapitel 6.1 (Gleichung (6.1)) bekannt.

Auf Mittelwertniveau ergeben sich die Bemessungsgleichungen wie folgt:

Betontraganteil:

$$V_{Rm,c} = k_{LAC} \cdot C_{Rm} \cdot k \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d \quad (6.1)$$

mit:  $k_{LAC} = 0,90$  Abminderungsbeiwert für  $f_{ck} \leq 6 \text{ N/mm}^2$   
 $C_{Rm} = 0,18$  Kalibrierfaktor auf Mittelwertniveau (*Keller 2005*)

Stahltraganteil:

$$V_{Rm,s} = a_{sw} \cdot Z \cdot f_{ywk} \quad (6.5)$$

mit:  $f_{ywk} \leq 120 \text{ N/mm}^2$  Bügelkorb  
 $\leq 115 \text{ N/mm}^2$  Einzelstäbe mit Endhaken  
 $\leq 190 \text{ N/mm}^2$  Schubleiter

Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen mit Querkraftbewehrung:

Die mittlere Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen mit Querkraftbewehrung  $V_{Rm,c+s}$  wird unter Berücksichtigung der reduzierten Stahlspannungen und der Schubschlankheit nach Gleichung (6.6) wie folgt bestimmt:

$$V_{Rm,c+s} = a_l \cdot (V_{Rm,c} + V_{Rm,s}) \quad (6.6)$$

mit:  $a_l = 1,0$  für  $\lambda < 2,1$   
 $= 0,85$  für  $2,1 \leq \lambda \leq 3,0$

$V_{Rm,c}$  Betontraganteil nach Gl. (6.1)

$V_{Rm,s}$  Stahltraganteil, Beitrag der Querkraftbewehrung zum Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft nach Gl. (6.5)

Der Widerstandswert  $V_{Rm,c+s}$  wird mit Gleichung (6.7) in die rechnerisch aufnehmbare Traglast  $F_{VRm,c+s}$  unter Berücksichtigung des Eigengewichts umgerechnet.

$$F_{VRm,c+s} = 2 \cdot V_{Rm,c+s} - G \quad (6.7)$$

mit:  $G$  Eigenlast des Versuchskörpers

## 6 Bemessungsmodell

Mit Gleichung (6.8) werden die experimentellen Traglasten mit den rechnerisch aufnehmbaren Traglasten nach Gleichung (6.7) ins Verhältnis gesetzt und so die Modellsicherheit  $\gamma_{\text{mod}}$  bestimmt.

$$\gamma_{\text{mod}} = \frac{F_U}{F_R} = \frac{F_U}{F_{VRm,c+s}} \quad (6.8)$$

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

In Tabelle 6-1 werden die experimentellen und rechnerischen Traglasten nach Gleichung (6.7), die zugehörigen Materialkennwerte, Bewehrungsgehalte und die Modellsicherheit unter Verwendung von Gleichung (6.8) dargestellt. Die Ergebnisse sind nach der jeweiligen Bewehrungskonstruktion Bügelkorb, Schubleiter und Einzelstäbe sortiert.

Tabelle 6-1: Ergebnisse Bauteile mit Querkraftbewehrung

Versuch	Druckfestigkeit	Rohdichte	Bewehrungsgrad	Längsbewehrung	Querkraftbewehrung	Streckgrenze der Querkraftbewehrung	Maximallast im Versuch	Schub-schlankheit	$a_i$	Traglast Gl. (6.7)	$\gamma_{\text{mod}}$ Gl. (6.8)	
	$f_c$	$\rho$	$\rho_1$	$A_{sl}$	$a_{sw}$	$f_{ywd}$	$F_U$	$\lambda = a/d$		$F_{VRm,c+s}$	$F_U / F_{VRm,c+s}$	
	[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]	[-]	
<b>Bügelkorb DIN 4213</b>												
BV-1.1	4,6	1240	0,0019	3,14	1,57	120	149,8	2,1	1,00	73,82	2,03	
BV-1.2	4,6	1240	0,0019	3,14	1,57	120	158,7	2,1	1,00	73,82	2,15	
BV-1.3	4,6	1240	0,0019	3,14	1,57	120	130,7	2,1	1,00	73,82	1,77	
BV-2.1	6,5	1264	0,0019	3,14	1,57	120	135,2	2,1	1,00	80,79	1,67	
BV-2.2	6,5	1264	0,0019	3,14	1,57	120	161,3	2,1	1,00	80,79	2,00	
BV-2.3	6,5	1264	0,0019	3,14	1,57	120	176,7	2,1	1,00	80,79	2,19	
BV-3.1	4,4	1144	0,0019	3,14	1,57	120	127,1	2,1	1,00	72,17	1,76	
BV-3.2	4,4	1144	0,0019	3,14	1,57	120	131,0	2,1	1,00	72,17	1,82	
BV-3.3	4,4	1144	0,0019	3,14	1,57	120	113,4	2,1	1,00	72,17	1,57	
BV-14.1	3,5	1043	0,0041	4,71	2,26	120	50,2	3,0	0,85	58,37	0,86	
BV-15.1	4,1	1078	0,0041	4,71	2,26	120	67,2	3,0	0,85	60,73	1,11	
<b>Schubleiter DIN EN 1520</b>												
BV-4.1	4,2	1103	0,0019	3,14	1,57	190	150,3	2,1	1,00	90,21	1,67	
BV-4.2	4,2	1103	0,0019	3,14	1,57	190	169,4	2,1	1,00	90,21	1,88	
BV-13.1	6,1	1237	0,0028	3,14	2,26	190	103,9	3,0	0,85	78,27	1,33	
<b>Einzelstäbe</b>												
BV-5.1	4,2	1097	0,0019	3,14	1,57	115	162,2	2,1	1,00	69,60	2,33	
BV-5.2	4,2	1097	0,0019	3,14	1,57	115	128,4	2,1	1,00	69,60	1,84	
BV-5.3	4,2	1097	0,0019	3,14	1,57	115	130,2	2,1	1,00	69,60	1,87	
BV-12.1	5,0	1128	0,0041	4,71	2,26	115	89,1	3,0	0,85	62,82	1,42	
										<b>Mittelwert:</b>	<b>1,74</b>	
<b>Standardabweichung sd:</b>										<b>0,38</b>	<b>5%-Fraktil:</b>	<b>1,00</b>

Der 5 %-Fraktilwert ergibt sich zu 1,00 bei einer Standardabweichung von 0,38. Die Bemessung liegt damit auf der sicheren Seite.

In Abbildung 6-7 werden die Ergebnisse unter Anwendung des vorgestellten Bemessungskonzepts nach Gleichung (6.6) graphisch dargestellt. Die Ergebnisse sind nach der jeweiligen Bewehrungskonstruktion sortiert. In Abbildung 6-8 werden die zuvor dargestellten Ergebnisse bezogen auf die Schubslankheit  $\lambda = a/d$  gezeigt, um den Einfluss der Bauteilgeometrie und der Lastanordnung deutlich zu machen.

Der 5%-Fraktilwert von 1,0 wird jeweils zur Abgrenzung der sicheren Seite dargestellt.

## 6.2 Bauteile mit Querkraftbewehrung

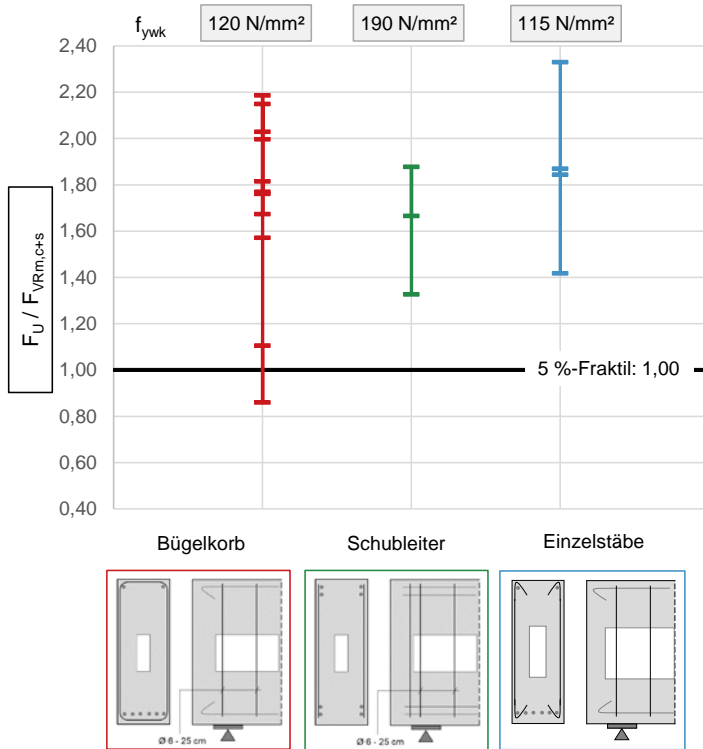


Abbildung 6-7: Vergleich der Versuchsergebnisse mit rechnerischen Traglasten nach Gleichung (6.7) für Bauteile mit Querkraftbewehrung

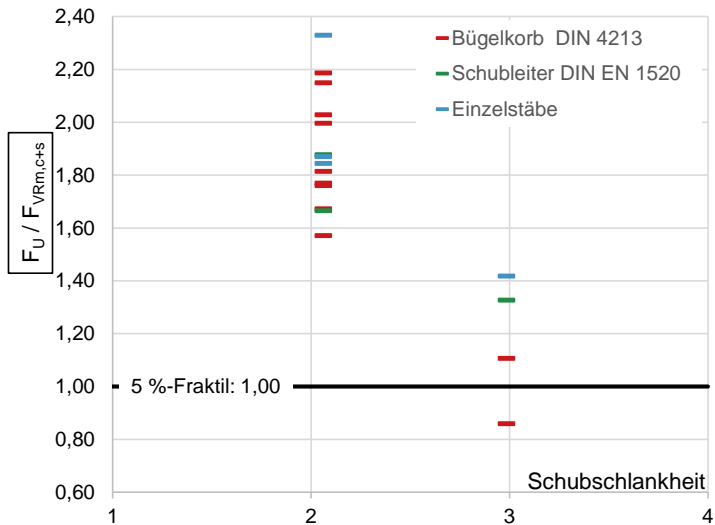


Abbildung 6-8: Vergleich der Versuchsergebnisse mit rechnerischen Traglasten nach Gleichung (6.7) für Bauteile mit Querkraftbewehrung bezogen auf die Schubslankheit

### 6.3 Anwendung und Umsetzbarkeit der Erkenntnisse

Das in Kapitel 6.1 und 6.2 vorgeschlagene Bemessungskonzept wird in diesem Kapitel zusammengefasst und anhand eines paxisnahen Bemessungsbeispiels mit den bestehenden Modellen nach *DIN 4213:2015-10* und *DIN EN 1520:2011-06* verglichen. Anschließend werden Hinweise zur Umsetzbarkeit und den Anwendungsgrenzen des Modells gegeben.

#### Bauteile ohne Querkraftbewehrung

Für den Querkraftnachweis für Bauteile aus LAC ohne Querkraftbewehrung gilt die folgende Bedingung:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,c}$$

Die Querkrafttragfähigkeit eines Bauteils ohne Querkraftbewehrung ergibt sich nach dem hier vorgeschlagenen Bemessungskonzept wie folgt:

$$V_{Rd,c} = k_{LAC} \cdot C_{Rd} \cdot k \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d \quad (6.9)$$

mit:  $k_{LAC} = 0,90$  Abminderungsbeiwert für  $f_{ck} \leq 6 \text{ N/mm}^2$

$C_{Rd} = \frac{0,145}{\gamma_c}$  Kalibrierfaktor

$\gamma_c = 1,7$  Teilsicherheitsbeiwert für unbewehrte Bauteile

Der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_c$  wird nach *DIN 4213:2015-10* und *DIN EN 1520:2011-06* (vgl. Tabelle 2-6 aus Kapitel 2.4) zu 1,7 für unbewehrte Bauteile angesetzt.

#### Bauteile mit Querkraftbewehrung

Für den Querkraftnachweis für Bauteile aus LAC mit Querkraftbewehrung gilt die folgende Bedingung:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,c+s}$$

Für den Anteil der Querkraftbewehrung an der Querkrafttragfähigkeit gilt die folgende Gleichung:

$$V_{Rd,s} = a_{sw} \cdot z \cdot f_{ywd} \quad (6.10)$$

mit:  $f_{ywd} = \frac{f_{ywk}}{\gamma_c}$

$\gamma_c = 1,4$  Teilsicherheitsbeiwert für bewehrte Bauteile

$f_{ywk} \leq 120 \text{ N/mm}^2$  Bügelkorb

$\leq 115 \text{ N/mm}^2$  Einzelstäbe mit Endhaken

$\leq 190 \text{ N/mm}^2$  Schubleiter

Dabei ist die ansetzbare Stahlspannung in Abhängigkeit von der gewählten Querkraftbewehrungskonstruktion zu verwenden. Die Konstruktion der Querkraftbewehrung kann entsprechend der statischen Anforderungen gewählt werden, wobei die Variante

der Bügelkörbe aufgrund der Verdichtungsprobleme (vgl. Kapitel 2.1.6) nicht empfohlen wird.

Die reduzierten Stahlspannungen  $f_{yk}$  werden im Rahmen der Auszugversuche in Kapitel 4 ermittelt und beruhen auf einem Verankerungsversagen der Bewehrungsstäbe im haufwerksporigen Leichtbeton. Demzufolge kann der üblicherweise angegebene Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_s$  für den Bemessungswert der Streckgrenze der Querkraftbewehrung nicht angewendet werden, da dieser ein Stahlzugversagen der Bewehrung voraussetzt. Daher wird in der Bemessungsgleichung (6.10) für den Anteil der Querkraftbewehrung an der Querkrafttragfähigkeit der Teilsicherheitsbeiwert für bewehrte Bauteile aus LAC  $\gamma_c$  zu 1,4 nach *DIN 4213:2015-10* und *DIN EN 1520:2011-06* angesetzt (vgl. Tabelle 2-6 aus Kapitel 2.4).

Die Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen mit Querkraftbewehrung wird unter Berücksichtigung der reduzierten Stahlspannungen und der Schubslankheit nach Gleichung (6.11) wie folgt bestimmt:

$$V_{Rd,c+s} = a_1 \cdot (V_{Rd,c} + V_{Rd,s}) \quad (6.11)$$

mit:  $a_1 = 1,0$  für  $\lambda < 2,1$   
 $a_1 = 0,85$  für  $2,1 \leq \lambda \leq 3,0$

$V_{Rd,c}$  Betontraganteil nach Gl. (6.9)

$V_{Rd,s}$  Stahltraganteil, Beitrag der Querkraftbewehrung zu  
Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft nach Gl. (6.10)

Da in den Versuchen dieser Arbeit kein Druckstrebenversagen festgestellt wurde, kann über den Bemessungswert der bis zum Versagen der gedachten Druckstreben aufnehmbaren Querkraft  $V_{Rd2}$  (Gleichung (2.21)) keine Aussage getroffen werden. Der Nachweis der Betondruckstrebe bleibt demnach wie in *DIN EN 1520:2011-06* und *DIN 4213:2015-10* beschrieben und muss sowohl für Bauteile mit als auch ohne Querkraftbewehrung geführt werden.

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

$$V_{Rd2} = 0,5 \cdot \eta_1 \cdot b_w \cdot z \cdot v \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (2.21)$$

### Bemessungsbeispiel

Im Folgenden wird eine Vergleichsberechnung für ein praxisübliches Bauteil vorgestellt. Dabei wird unterschieden zwischen den in *DIN 4213:2015-10* und *DIN EN 1520:2011-06* gültigen Vorschriften und dem in dieser Arbeit vorgeschlagenen Bemessungskonzept.

Es wird ein freitragendes, querkraftbewehrtes Wandbauteil aus LAC mit den folgenden Parametern bemessen:

Beispiel:

$l_{\text{eff}}$	= 4,00 m	$f_{\text{ck}}$	= 6 N/mm <sup>2</sup>
$h$	= 0,70 m	$\rho$	= 1000 kg/m <sup>3</sup>
$d$	= 0,67 m	$A_{\text{s}1}$	= 4,71 cm <sup>2</sup>
$b$	= 0,25 m	$a_{\text{sw}}$	= $\frac{A_{\text{sw}}}{s} = 2,26 \text{ cm}^2/\text{m}$
$b_{\text{w}}$	= 0,17 m	$k$	= $1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1,546$

Demnach ergibt sich der Beiwert zur Berücksichtigung der Rohdichte  $\eta_1$  und der Bewehrungsgrad  $\rho_1$  wie folgt:

$$\eta_1 = 0,40 + 0,60 \cdot \rho/2200 = 0,40 + 0,60 \cdot 1000/2200 = 0,67$$
$$\rho_1 = A_{\text{s}1} / (b_{\text{w}} \cdot d) = 4,71 / (17 \cdot 67) = 4,14 \cdot 10^{-3}$$



**DIN 4213:2015-10**

Nach *DIN 4213:2015-10* gelten für querkraftbewehrte Bauteile die nachfolgenden Bedingungen.

$$V_{Ed} < V_{Rd2}$$

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

Demnach muss die einwirkende Querkraft  $V_{Ed}$  kleiner sein als die Bemessungswerte der bis zum Versagen der gedachten Druckstreben aufnehmbaren Querkraft  $V_{Rd2}$  und der aufnehmbaren Querkraft  $V_{Rd3}$  für Bauteile mit Querkraftbewehrung. Zum Vergleich der Bemessungsgleichungen wird zusätzlich der Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft  $V_{Rd1}$  für Bauteile ohne Querkraftbewehrung bestimmt. Der Teilsicherheitsbeiwert für LAC  $\gamma_c$  wird zu 1,4 gewählt.

$$\begin{aligned} V_{Rd1} &= C_{Rd} \cdot k \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d \\ &= \frac{0,145}{1,4} \cdot 1,546 \cdot 0,67 \cdot (100 \cdot 4,14 \cdot 10^{-3} \cdot 6)^{1/3} \cdot 0,17 \cdot 0,67 \cdot 1000 \end{aligned}$$

$$\mathbf{V_{Rd1} = 16,6 \text{ kN}}$$

Für querkraftbewehrte Bauteile aus LAC wird der Bemessungswert  $V_{Rd1}$  nach *DIN 4213:2015-10* nicht maßgebend und wird daher vernachlässigt.

Der Bemessungswert der bis zum Versagen der gedachten Druckstreben aufnehmbaren Querkraft  $V_{Rd2}$  wird nach der folgenden Gleichung bestimmt. Der Wirksamkeitsfaktor  $v$  ist nach *DIN 4213:2015-10* und *DIN EN 1520:2011-06* mit 0,6 anzunehmen.

$$\begin{aligned} V_{Rd2} &= 0,5 \cdot \eta_1 \cdot b_w \cdot z \cdot v \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \\ &= 0,5 \cdot 0,67 \cdot 0,17 \cdot (0,9 \cdot 0,67) \cdot 0,6 \cdot \frac{6}{1,4} \cdot 1000 \end{aligned}$$

$$\mathbf{V_{Rd2} = 88,3 \text{ kN}}$$

Der Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft  $V_{Rd3}$  für Bauteile mit Querkraftbewehrung ergibt sich nach *DIN 4213:2015-10* wie folgt:

$$V_{Rd3} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta$$

mit:  $f_{ywk} \leq 400 \text{ N/mm}^2$   
 $\cot \theta = 1,2$

$$= 2,26 \cdot (0,9 \cdot 0,67) \cdot \frac{400}{1,15} \cdot 1,2 \cdot \frac{10^2}{1000}$$

$$\mathbf{V_{Rd3} = 56,9 \text{ kN}}$$

Nach *DIN 4213:2015-10* beträgt der Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft 56,9 kN.

**DIN EN 1520:2011-06**

Nach *DIN EN 1520:2011-06* darf alternativ zu den zuvor beschriebenen Bemessungsregeln der Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft mit den nachfolgenden Gleichungen bestimmt werden. Entsprechend der Vorgaben aus *DIN 4213:2015-10* gelten auch hier die folgenden Grenzwerte für den Bemessungswert der einwirkenden Querkraft  $V_{Ed}$ :

$$V_{Ed} < V_{Rd2}$$

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

Zur Bestimmung der aufnehmbaren Querkraft  $V_{Rd1}$  wird nach dieser Variante zunächst die charakteristische Schubspannung  $\tau_{Rk}$  aus der charakteristischen Biegezugfestigkeit  $f_{t,flk}$  abgeleitet. Zur Berechnung der Biegezugfestigkeit erhält der Beiwert  $\eta_1$  eine untere Grenze von 0,78 für eine Rohdichte  $\leq 1400 \text{ kg/m}^3$ . Der Faktor  $k$  zur Berücksichtigung der Schubfestigkeit wird bei dieser Bemessungsvariante neu definiert und darf nicht mit dem zuvor dargestellten Faktor  $k$  verwechselt werden.

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

mit:  $\tau_{Rd} = \tau_{Rk} / \gamma_c$

$$\tau_{Rk} = 0,125 \cdot f_{t,flk} = 0,125 \cdot 1,08 = 0,135 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{t,flk} = 0,42 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \cdot \eta_1 = 0,42 \cdot 6^{\frac{2}{3}} \cdot 0,78 = 1,08 \text{ N/mm}^2$$

$$\eta_1 = 0,78 \quad \text{für } \rho \leq 1400 \text{ kg/m}^3$$

$$\eta_1 = 0,40 + 0,60 \cdot \rho / 2200 \quad \text{für } \rho > 1400 \text{ kg/m}^3$$

$$k = 1,6 - d / 1000 \geq 1,0 = 0,93 \geq 1,0! = 1,0$$

$$= \frac{0,135}{1,4} \cdot 1,0 \cdot (1,2 + 40 \cdot 4,14 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,17 \cdot 0,67 \cdot 1000$$

$$\mathbf{V_{Rd1} = 15,0 \text{ kN}}$$

Der Beitrag der Querkraftbewehrung zum Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft wird nach der alternativen Berechnung nach *DIN EN 1520:2011-06* mit  $V_{wd}$  wie folgt berechnet:

$$V_{wd} = 0,8 \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd}$$

mit:  $f_{ywk} \leq 400 \text{ N/mm}^2$

$$= 0,8 \cdot 2,26 \cdot (0,9 \cdot 0,67) \cdot \frac{400}{1,15} \cdot \frac{10^2}{1000}$$

$$\mathbf{V_{wd} = 37,9 \text{ kN}}$$

Zur Berechnung der aufnehmbaren Querkraft bei Bauteilen mit Querkraftbewehrung wird nach *DIN EN 1520:2011-06* der Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft  $V_{Rd1}$  mit dem Bemessungswert zum Beitrag der Querkraftbewehrung  $V_{wd}$  addiert.

Der Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit  $V_{Rd3}$  ergibt sich für dieses Beispiel wie folgt:

$$\begin{aligned} V_{Rd3} &= V_{Rd1} + V_{wd} \\ &= 15,0 + 37,9 \end{aligned}$$

$$\mathbf{V_{Rd3} = 52,9 \text{ kN}}$$

Zusätzlich ist auch hier der Nachweis der gedachten Druckstrebe  $V_{Rd2}$  erforderlich. Dieser entspricht dem unter *DIN 4213:2015-10* dargestellten Nachweis und wird nicht maßgebend.

$$V_{Rd2} = 0,5 \cdot \eta_1 \cdot b_w \cdot z \cdot v \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

$$\mathbf{V_{Rd2} = 88,3 \text{ kN}}$$

Nach *DIN EN 1520:2011-06* beträgt der Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft 52,9 kN.

### neuer Bemessungsvorschlag

Nach dem in dieser Arbeit vorgestellten Bemessungsvorschlag ergibt sich der Bemessungswert zur aufnehmbaren Querkraft aus einem Betontraganteil  $V_{Rd,c}$  und einem Stahltraganteil  $V_{Rd,s}$ . Für den Bemessungswert der einwirkenden Querkraft  $V_{Ed}$  gilt die nachfolgende Bedingung:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,c+s}$$

Zur Bestimmung des Betontraganteils  $V_{Rd,c}$  wird der in *DIN 4213:2015-10* und *DIN EN 1520:2011-06* vorgeschriebene Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft mit dem neuen Beiwert  $k_{LAC}$  abgemindert. Der Teilsicherheitsbeiwert wird zu 1,4 gewählt, da es sich um ein querkraftbewehrtes Bauteil aus LAC handelt.

$$\begin{aligned} V_{Rd,c} &= k_{LAC} \cdot C_{Rd} \cdot k \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d \\ &= 0,9 \cdot \frac{0,145}{1,4} \cdot 1,546 \cdot 0,67 \cdot (100 \cdot 4,14 \cdot 10^{-3} \cdot 6)^{1/3} \cdot 0,17 \cdot 0,67 \cdot 1000 \end{aligned}$$

$$V_{Rd,c} = 14,9 \text{ kN}$$

Der Stahltraganteil  $V_{Rd,s}$  wird mit der nachfolgenden Gleichung bestimmt. Dabei wird die Konstruktion der Querkraftbewehrung mit Hilfe der reduzierten Spannungen aus Kapitel 4.10 berücksichtigt. Da die reduzierten Spannungen in Versuchen bestimmt wurden, bei denen kein Stahlzugversagen maßgebend war (vgl. Kapitel 4), wird auch hier der Teilsicherheitsbeiwert für LAC mit 1,4 angenommen.

$$V_{Rd,s} = a_{sw} \cdot z \cdot f_{ywd}$$

mit:	$f_{ywk} \leq 120 \text{ N/mm}^2$	Bügelkorb
	$\leq 115 \text{ N/mm}^2$	Einzelstäbe mit Endhaken
	$\leq 190 \text{ N/mm}^2$	Schubleiter

$$\begin{aligned} V_{Rd,s} &= 2,26 \cdot (0,9 \cdot 0,67) \cdot \frac{120}{1,4} \cdot \frac{10^2}{1000} = 11,7 \text{ kN} && \text{Bügelkorb} \\ &= 2,26 \cdot (0,9 \cdot 0,67) \cdot \frac{115}{1,4} \cdot \frac{10^2}{1000} = 11,2 \text{ kN} && \text{Einzelstäbe mit Endhaken} \\ &= 2,26 \cdot (0,9 \cdot 0,67) \cdot \frac{190}{1,4} \cdot \frac{10^2}{1000} = 18,5 \text{ kN} && \text{Schubleiter} \end{aligned}$$

Der Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft  $V_{Rd,c+s}$  ergibt sich aus der abgeminderten Addition des Betontraganteils  $V_{Rd,c}$  und dem Stahltraganteil  $V_{Rd,s}$ . Zur Berücksichtigung der Schubslankheit wird die Summe aus Beton- und Stahltraganteil mit  $a_l$  abgemindert.

$$V_{Rd,c+s} = a_l \cdot (V_{Rd,c} + V_{Rd,s})$$

mit:  $a_l = 0,85$  für  $\lambda > 2,1$

$$\begin{aligned} V_{Rd,c+s} &= 0,85 \cdot (14,9 + 11,7) && = 22,6 \text{ kN} && \text{Bügelkorb} \\ &= 0,85 \cdot (14,9 + 11,2) && = 22,2 \text{ kN} && \text{Einzelstäbe mit Endhaken} \\ &= 0,85 \cdot (14,9 + 18,5) && = 28,4 \text{ kN} && \text{Schubleiter} \end{aligned}$$

Zusätzlich ist auch hier der Nachweis der gedachten Druckstrebe  $V_{Rd2}$  erforderlich. Dieser entspricht dem unter *DIN 4213:2015-10* dargestellten Nachweis und wird nicht maßgebend.

$$V_{Rd2} = 0,5 \cdot \eta_1 \cdot b_w \cdot z \cdot v \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

**$V_{Rd2} = 88,3 \text{ kN}$**

Nach dem vorgeschlagenen Bemessungskonzept liegt der Bemessungswert der aufnehmbaren Querkraft zwischen 22,2 und 28,4 kN, je nach Wahl der Querkraftbewehrungskonstruktion.

In der nachfolgenden Tabelle 6-2 wird eine Übersicht der aus den verglichenen Modellen ermittelten Bemessungswerten dargestellt.

Tabelle 6-2: Ergebnisübersicht der Bemessungsmodelle

<i>DIN 4213:2015-10</i>	<i>DIN EN 1520:2011-06</i>	Bemessungsvorschlag
$V_{Rd1} = 16,6 \text{ kN}$	$V_{Rd1} = 15,0 \text{ kN}$	$V_{Rd,c} = 14,9 \text{ kN}$
	$V_{wd} = 37,9 \text{ kN}$	$V_{Rd,s} = 11,7 \text{ kN}$ $V_{Rd,s} = 11,2 \text{ kN}$ $V_{Rd,s} = 18,5 \text{ kN}$
$V_{Rd3} = 56,9 \text{ kN}$	$V_{Rd3} = 52,9 \text{ kN}$	$V_{Rd,c+s} = 22,6 \text{ kN}$ $V_{Rd,c+s} = 22,2 \text{ kN}$ $V_{Rd,c+s} = 28,4 \text{ kN}$
$V_{Rd2} = 88,3 \text{ kN}$	$V_{Rd2} = 88,3 \text{ kN}$	$V_{Rd2} = 88,3 \text{ kN}$

Durch den Vergleich der Ergebnisse in Tabelle 6-2 zeigt sich, dass der vorgeschlagene Bemessungsansatz wesentlich konservativer ist, als die bestehenden Konzepte in *DIN 4213:2015-10* und *DIN EN 1520:2011-06*.

Wie in den Untersuchungen in Kapitel 5 bereits gezeigt, wird die Querkrafttragfähigkeit querkraftbewehrter und -unbewehrter Bauteile nach aktuellen Ansätzen teilweise weit überschätzt. Daher sollte die Bemessung entsprechend dem hier vorgestellten Bemessungsvorschlag angepasst werden. Der Nachweis der gedachten Druckstrebe wird in keinem der vorgestellten Modelle maßgebend.

### Anwendungsgrenzen

Für das dargestellte Bemessungsmodell ergeben sich aus den in dieser Arbeit getesteten Prüfkörpern die nachfolgend dargestellten Anwendungsgrenzen:

#### Anwendungsgrenzen:

Druckfestigkeit	$f_{ck}$	$\leq 6,0 \text{ N/mm}^2$
Rohdichte	$\rho$	$1000 \leq \rho \leq 1300 \text{ kg/m}^3$
Stabdurchmesser	$\emptyset$	8 mm und 10 mm, längs
	$\emptyset$	5 mm und 6 mm, quer
Längsbewehrungsgrad	$\rho_1$	2 bis 4 ‰
Zuschlagstoff		Rohbims
statisches System		Einfeldträger

Das hier vorgestellte Bemessungsmodell beruht auf Bauteilversuchen mit einer mittig angreifenden Einzellast. Dies stellt die ungünstigste Lastanordnung für querkraftbeanspruchte Balken dar (*Leonhardt und Mönnig 1984*). Die Beanspruchung mittels Gleichstreckenlast ist für das Querkrafttragverhalten demnach günstiger. Darüber hinaus werden bei einer Gleichlast auflagernahe Lasten über eine direkte Druckstrebe in das Auflager geleitet, was zu einer Reduzierung der für die Bemessung anzusetzenden Querkraft führt. Demnach sind auch Gleichstreckenlasten in dem hier vorgestellten Bemessungsvorschlag erfasst.

Die in dieser Arbeit untersuchten Versuchskörper weisen Schubschlankheiten von 2,1 und 3,0 auf. Unter der hier getroffenen Annahme, dass das Schubtal nach Kani (*Kani 1966*) auch bei LAC angewendet werden kann, wird für kleinere und größere Schubschlankheiten kein Querkraftversagen maßgebend. Bei einer sehr kleinen Schubschlankheit werden Einzellasten direkt über Druckstreben in das Auflager geleitet. Bei sehr großen Schubschlankheiten wird ein Biegeversagen maßgebend.

## Fazit

Durch die in Kapitel 5 vorgestellten Untersuchungen kann festgestellt werden, dass die Bemessungsgleichungen für die Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen ohne und mit Querkraftbewehrung nach *DIN 4213:2015-10* und *DIN EN 1520:2011-06* keine zielsichere Vorhersage der Querkrafttragfähigkeit von Wandelementen aus LAC bieten. Die in dieser Arbeit dokumentierten und ausgewerteten Versuche können nur einen Ausschnitt der vielzähligen Möglichkeiten an Materialeigenschaften, Bauteilgeometrien und Konstruktionsvarianten abbilden. Bei der Dimensionierung der Versuchskörper wurde stets auf eine realitätsnahe Größenordnung der verwendeten Parameter geachtet. Die vorgeschlagenen Anpassungen des Bemessungskonzepts in Kapitel 6.1 und 6.2 zeigen gute Übereinstimmungen mit den experimentellen Untersuchungen. In dem vorgeschlagenen Bemessungsmodell wird für querkraftbeanspruchte Bauteile zunächst der Querkraftwiderstand des Betons  $V_{Rd,c}$  bestimmt. Dieser wird auch für Bauteile mit zusätzlich eingebauter Querkraftbewehrung verwendet. Der Beitrag der Querkraftbewehrung am Tragverhalten wird über eine zusätzliche Komponente  $V_{Rd,s}$  hinzu addiert. Dabei wird der Ansatz der reduzierten Stahlspannungen aus Kapitel 4 berücksichtigt. Die Auszugversuche in Kapitel 4 haben gezeigt, dass durch keine der untersuchten, praxisüblichen Verankerungsvarianten die in den Regelwerken angesetzte Stahlspannung  $f_{yk} \leq 400 \text{ N/mm}^2$  oder gar die Fließgrenze der Bewehrung erreicht wird, da ein vorzeitiges Verankerungsversagen eintritt. Während es bei querkraftbewehrten Normalbetonbauteilen erst beim Fließen der Bügelbewehrung zu einem Querkraftversagen kommt, wird bei Bauteilen aus LAC ein Verankerungsversagen der Bewehrung maßgebend. Bei Bauteilen ohne Querkraftbewehrung leitet das Verankerungsversagen der Längsstäbe das Bauteilversagen ein. Bei querkraftbewehrten Bauteilen aus LAC ist das Verankerungsversagen der Querkraftbewehrung die primäre Versagensursache, das Verankerungsversagen der Längsbewehrung die Folge daraus. Die Begrenzung der ansetzbaren Stahlspannungen, in Abhängigkeit von der Querkraftbewehrungskonstruktion, ist daher erforderlich. Dabei kann zwischen Einzelstäben mit Endhaken oder einer Schubleiter entsprechend *DIN EN 1520:2011-06* gewählt werden. Für den nach *DIN 4213:2015-10* in Deutschland geforderten Bügelkorb wird ebenfalls eine ansetzbare Stahlspannung angegeben. Diese Variante wird jedoch aufgrund der Herausforderungen im Einbau des Bügelkorbes und der Verdichtung der Elemente nicht empfohlen (vgl. *Schnell und Hanz 2014*). Für Bauteile mit einer Schubschlankheit größer 2,1 wird ein Abminderungsbeiwert  $\alpha$  angegeben, wodurch die Bauteilgeometrie und die Belastungsart berücksichtigt wird. Die Bewehrungsgrade der Längsbewehrung wurden in den Versuchen zwischen 2 ‰ und 4 ‰ variiert und decken damit die praxisüblichen Bewehrungsmengen ab. In den Untersuchungen wurden jeweils nur geringe, realitätsnahe Querkraftbewehrungsmengen eingesetzt. Dabei wurden sowohl  $\varnothing 5\text{-}25 \text{ cm}$ , als auch  $\varnothing 6\text{-}25 \text{ cm}$  verwendet.

Das vorgestellte Bemessungskonzept beruht auf Untersuchungen, in denen mehrheitlich Konstruktionen mit dem nach *DIN 4213:2015-10* geforderten Bügelkorb geprüft wurden. Eine Datenbank wie im Bereich des Normalbetons (*DAfStb-Heft 597*) gibt es für Leichtbeton und im Besonderen für den haufwerksporigen Leichtbeton nicht. Daher dienen die Ergebnisse dieser Arbeit als Orientierung für ein zukünftiges Modell zur Querkraftbemessung von Bauteilen aus haufwerksporigem Leichtbeton.





## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

Unzureichende Erkenntnisse zum Querkrafttragverhalten freitragender Wandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton und die normativen Einschränkungen in der Herstellung und Konstruktion der Bauteile waren Ausgangspunkte dieser Arbeit.

Das Ziel war die Gewinnung neuer Erkenntnisse zum Querkrafttragverhalten, die eine einwandfreie Herstellung im Walzverfahren ermöglichen und gleichzeitig die Tragfähigkeit der Elemente sicherstellen sollten. Mit Hilfe von modifizierten Bemessungsmodellen wurden umsetzbare Anwendungs- und Konstruktionsregeln erarbeitet.

Zunächst wurden Untersuchungen zur Verdichtung von Elementen aus LAC mit einem 3D-Digitalmikroskop durchgeführt. Die erkannten Unterschiede in der Verdichtung der einzelnen Schichten im Bauteil wurden in der Konzeption der Versuche zum Verankerungsverhalten von Bewehrungsstäben in LAC berücksichtigt. In insgesamt 60 Versuchen zur Verbund- und Verankerungstragfähigkeit von Bewehrung in LAC wurde festgestellt, dass es ohne zusätzliche Querdruckbeanspruchung, zum Beispiel durch Auflagerpressungen, nahezu keinen Verbund zwischen gerippten Betonstäben und LAC gibt. Bei Verankerung mittels Endhaken hat sich gezeigt, dass weder durch Vergrößerung der Betondeckung noch durch eine Anpassung der Verbundlänge größere Auszugkräfte erreicht werden konnten. In den Untersuchungen erwiesen sich, neben der Verankerung mit Endhaken, die Varianten mit angeschweißten Querstäben als aussichtsreiche Verankerungsmöglichkeiten. Für diese Varianten wurden reduzierte Stahlspannungen berechnet, die bei der Bemessung berücksichtigt werden sollten.

Mit den Erkenntnissen der Auszugversuche wurden Großversuche an Wandbauteilen konzipiert und durchgeführt, die eine Beurteilung der Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen ohne und mit Querkraftbewehrung zulassen. Aus insgesamt 24 Dreipunktbiegeversuchen geht hervor, dass die Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen aus LAC mit den gültigen Vorschriften nach *DIN EN 1520:2011-06* und *DIN 4213:2015-10* nicht mit ausreichender Zuverlässigkeit bestimmt werden kann. Bei der Bemessung von Bauteilen ohne und mit Querkraftbewehrung werden die Tragfähigkeiten nach den aktuellen Bemessungsregeln überschätzt.

Daher wurde ein Bemessungskonzept entwickelt, bei dem zunächst der Querkraftwiderstand ausschließlich unter Berücksichtigung eines reinen Betontraganteils bestimmt wird. Für Bauteile mit Querkraftbewehrung zeigte sich, dass die zusätzlich eingebaute Querkraftbewehrung einen Beitrag zum Querkrafttragverhalten leistet. Für den Beitrag der Querkraftbewehrung werden die aus den Auszugversuchen ermittelten, reduzierten Stahlspannungen für die jeweilige Konstruktion der Querkraftbewehrung angesetzt. Der Anteil der Querkraftbewehrung am Querkraftabtrag wird zu dem Betontraganteil hinzu addiert. Zusätzlich werden die Geometrie der Bauteile und die Lastanordnung mit Hilfe eines Abminderungsbeiwertes für größere Schubslankheiten berücksichtigt. Für freitragende Bauteile mit einer Schubslankheit  $> 2,1$  wird die Tragfähigkeit abgemindert. Das Bemessungskonzept stimmt gut mit den Ergebnissen der Bauteilversuche überein.

In Abbildung 7-1 werden die Traganteile des Bemessungsmodells dieser Arbeit schematisch dargestellt.

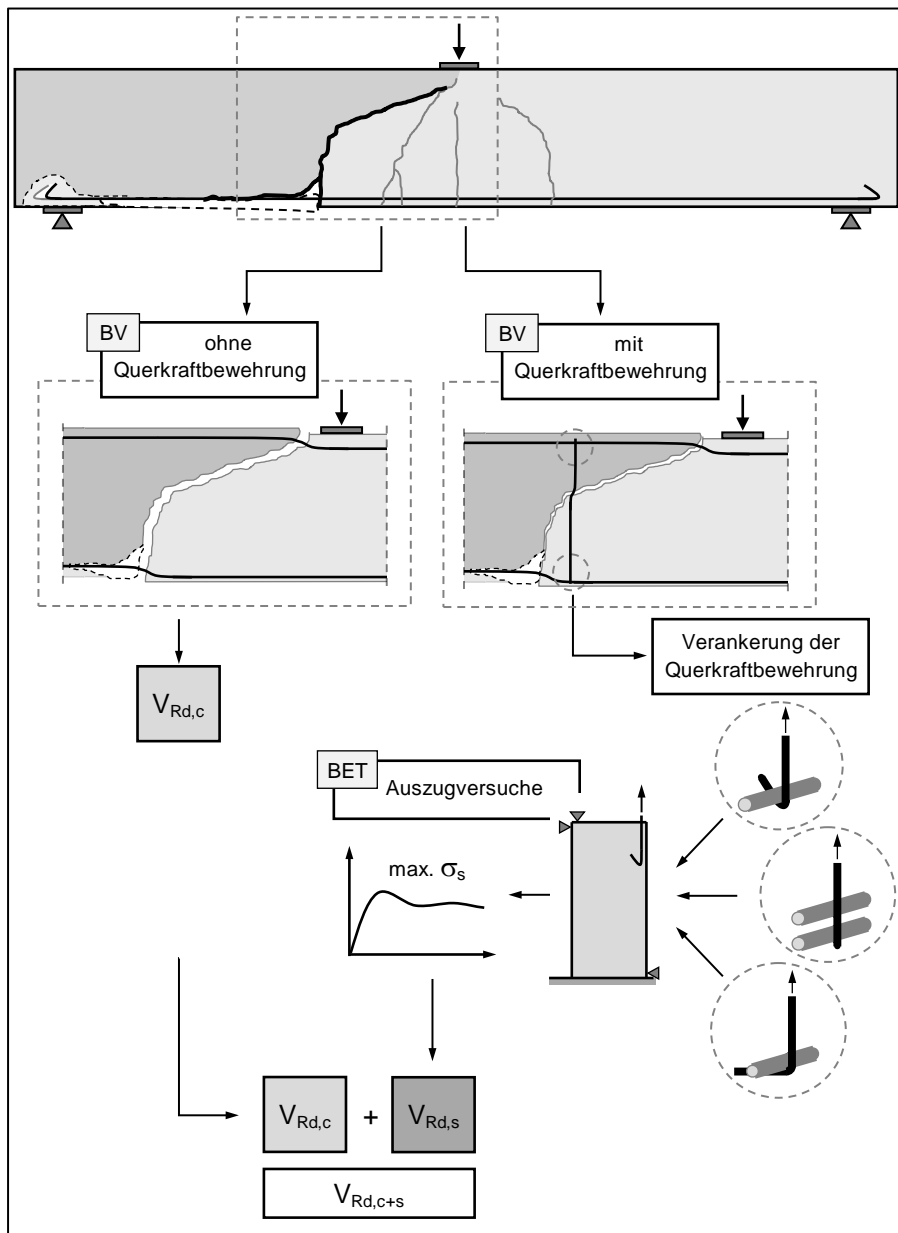


Abbildung 7-1: Schematische Darstellung der Traganteile des Bemessungsmodells

## 7.2 Ausblick

Anhand der experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit konnten einige offene Fragen zum Querkrafttragverhalten von Wandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton geklärt werden. Trotzdem ergeben sich aus den neuen Erkenntnissen auch weitere 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.

Darüber hinaus könnten weitere Bewehrungskonstruktionen untersucht werden, die sich an den Hauptspannungen orientieren (vgl. *Polónyi 2014*). Eine an den Auflagerseiten aufgebogene Längsbewehrung könnte verstärkt zum Querkraftabtrag beitragen und möglicherweise Querkraftbewehrung einsparen helfen. Gerade durch die liegende Herstellung der Wandelemente aus LAC entsteht durch eine aufgebogene Längsbewehrung kaum Mehraufwand beim Einbau der Bewehrung. Hier sollte allerdings besonders auf die Verankerung am Ende der Längsstäbe und auf die Umlenkkräfte an den gebogenen Stellen der Bewehrung geachtet werden. Aufgrund der Erkenntnisse in dieser Arbeit wird empfohlen an den Umlenkstellen und an den Verankerungsstellen Querstäbe anzuordnen, um ein Herausziehen der Bewehrung zu vermeiden.

In dieser Arbeit 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 aufgebrachten Querdruckspannungen von Interesse, um die Situation am Auflager genauer abbilden zu können.

Interessant wäre außerdem eine Überprüfung des Bauteilverhaltens bei höheren Druckfestigkeiten durch Anpassung der Rezeptur des LAC. In dieser Arbeit wurden Versuchskörper mit Betondruckfestigkeiten bis  $6,0 \text{ N/mm}^2$  untersucht. Um eine Allgemeingültigkeit des hier vorgestellten Bemessungsmodells zu erzielen, ist es erforderlich, Untersuchungen an Bauteilen mit größeren Betondruckfestigkeiten durchzuführen. Insbesondere der Anteil der Druckzonentragfähigkeit könnte durch eine Anpassung der Betondruckfestigkeit weiter an Bedeutung gewinnen. Im Zuge weiterer Materialuntersuchungen wäre es sinnvoll, den Anteil der Dübelwirkung und die Einflussparameter auf die Dübelwirkung der Längsbewehrung zu untersuchen. Durch Erhöhung der Querkraftbewehrungsmenge, z. B. durch enger verlegte Stäbe oder eine Vergrößerung des gewählten Stabdurchmessers, wächst die Wahrscheinlichkeit eines Biegeversagens, sodass ein Querkraftversagen unwahrscheinlicher und damit nicht maßgebend wird. Dies müsste mittels weiterer Versuche überprüft werden.

Im Hinblick auf den regional begrenzt vorhandenen Rohbims als Zuschlagstoff sollte der Einsatz von Recyclingmaterial untersucht werden. Rezyklierte Zuschlagstoffe, die aus mineralischen Bau- und Abbruchabfällen im Drehrohfen aufbereitet werden, können zukünftig von Interesse sein. Hier wäre zu untersuchen, welchen Einfluss die alternativen Zuschlagstoffe auf die Materialeigenschaften, die Verarbeitbarkeit und die Tragfähigkeit von Wandbauteilen haben.

## Literatur

- Albrecht 2014** Bemessung von Stahlbetondecken mit abgeflachten rotationssymmetrischen Hohlkörpern und ein Beitrag zum besseren Verständnis der Querkrafttragfähigkeit, Dissertation, 2014.
- ACI 318:2008-01** American Concrete Institute 318-08 Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) And Commentary, Januar 2008.
- Bentz und Vecchio et al 2006** Simplified Modified Compression Field Theory for Calculating Shear Strength of Reinforced Concrete Elements. ACI Structural Journal, Heft 103, Nr. 4, 2006.
- DAfStb-Heft 597** Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 597 Erweiterte Datenbanken zur Überprüfung der Querkraftbemessung für Konstruktionsbetonbauteile mit und ohne Bügel. Berlin, Wien, Zürich, 2012.
- DIBt:2005-03** Deutsches Institut für Bautechnik Technische Regeln für vorgefertigte bewehrte tragende Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton, 2005-03.
- DIN 4028:1982-01** Deutsches Institut für Normung e.V. Stahlbetondielen aus Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge - Anforderungen, Prüfung, Bemessung, Ausführung, Einbau - zurückgezogen, Januar 1982.
- DIN 4232:1987-09** Deutsches Institut für Normung e.V. Wände aus Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge - Bemessung und Ausführung - zurückgezogen, September 1987.
- DIN EN 992:1995-09** Deutsches Institut für Normung e.V. Bestimmung der Trockenrohdichte von haufwerksporigem Leichtbeton, September 1995.
- DIN EN 1521:1996-12** Deutsches Institut für Normung e.V. Bestimmung der Biegezugfestigkeit von haufwerksporigem Leichtbeton, Dezember 1996.
- DIN EN 1352:1997-02** Deutsches Institut für Normung e.V. Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls unter Druckbeanspruchung von dampfgehärtetem Porenbeton und von haufwerksporigem Leichtbeton, Februar 1997.
- DIN EN 1354:2005-09** Deutsches Institut für Normung e.V. Bestimmung der Druckfestigkeit von haufwerksporigem Leichtbeton, September 2005.
- DIN 488-1:2009-08** Deutsches Institut für Normung e.V. Betonstahl, August 2009.
- DIN ISO 16269-6:2009-10** Deutsches Institut für Normung e.V. Statistische Auswertung von Daten – Teil 6: Ermittlung von statistischen Anteilsbereichen - zurückgezogen, Oktober 2009.
- DIN EN 1991-1-1:2010-12** Deutsches Institut für Normung e.V. Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke, Dezember 2010.

- DIN EN 1991-1-1/NA:2010-12** Deutsches Institut für Normung e.V. Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke, Dezember 2010.
- DIN EN 1992-1-1:2011-01** Deutsches Institut für Normung e.V. Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Januar 2011.
- DIN EN 1520:2011-06** Deutsches Institut für Normung e.V. Vorgefertigte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton und mit statisch anrechenbarer oder nicht anrechenbarer Bewehrung, Juni 2011.
- DIN 4213:2015-10** Deutsches Institut für Normung e.V. Anwendung von vorgefertigten Bauteilen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit statisch anrechenbarer oder nicht anrechenbarer Bewehrung in Bauwerken, Oktober 2015.
- Empelmann und Oettel et al Juni 2018** Schrägrissbildung von Stahlbetonbalken unter Querkraftbeanspruchung. *Der Bauingenieur*, Band 93, Juni 2018.
- EAD 3300762017** EOTA Metal Injection Anchors for use in Masonry, 2017.
- ModelCode 1990** Euro-International Committee for Concrete CEB-FIP model code 1990. London.
- Faust 2003** Leichtbeton im konstruktiven Ingenieurbau. *Bauingenieur-Praxis*. Ernst. Berlin, 2003.
- ModelCode 2010** Fédération internationale du béton Fib model code for concrete structures 2010. Lausanne.
- Fischer 1997** Versagensmodell für schubslanke Balken. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*. Beuth Verlag. Berlin, Germany, 1997.
- Goltermann 2009** Load-carrying capacity of lightly reinforced, prefabricated walls of lightweight aggregate concrete with open structure. *Materials and Structures*, Nr. 5, 2009, S. 581–591.
- Goltermann 2014** Prefabricated elements and structures: Developments, tests and experiences, Technical University of Denmark, 2014.
- Goltermann und Ingholt et al 1997** Lightweight Aggregate Concrete Beams, Load Bearing Capacity. Oslo, Nordic Concrete Research, 1997.
- Görtz 2004** Zum Schubrissverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbalken aus Normal- und Hochleistungsбетон, Dissertation, RWTH Aachen, 2004.
- Grübl und Karl et al 2001** Beton, Arten, Herstellung und Eigenschaften. *Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau*. Ernst. Berlin, 2001.
- Hanz 2017** Beitrag zur Bemessung von dreischichtigen Wandtafeln aus haufwerksporigem Leichtbeton, Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern FG Massivbau, 2017.

- Hegger und Görtz 2002** Querkraftbemessung nach DIN 1045-1. Beton- und Stahlbetonbau, Heft 97, Nr. 9, 2002, S. 460–470.
- Hegger und Roeser 2004** Gutachten zur DIN EN 1520: 2002 Fassung Juli 2003, H+P Ingenieure GmbH & Co. KG, 2004.
- Kani 1964** The Riddle of Shear Failure and its Solution. ACI Journal Proceedings, Heft 61, Nr. 4, 1964.
- Kani 1966** Basic Facts Concerning Shear Failure. ACI Journal Proceedings, Heft 63, Nr. 6, 1966.
- Keller 2005** Querkrafttragverhalten von Biegebauteilen, Dissertation, 14.08.2020, Universität Leipzig, 2005.
- König und Zink 1999** Zum Biegeschubversagen schlanker Stahlbetonbauteile. Bautechnik, Heft 76, Nr. 11, 1999, S. 959–969.
- Kordina und Blume 1985** Empirische Zusammenhänge zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit stabförmiger Stahlbetonelemente. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*. Ernst & Sohn. Berlin, 1985.
- Leonhardt und Mönning 1984** Grundlagen zur Bemessung im Stahlbetonbau. *Vorlesungen über Massivbau*. Springer-Verlag. Berlin [etc.], 1984.
- Leufgens 2010** Mechanische und thermische Untersuchungen zur Entwicklung eines Wärmedämmsteines aus Leichtbeton, Dissertation, Université du Luxembourg, 2010.
- Mörsch 1908** Der Eisenbetonbau, seine Theorie und Anwendung. Konrad Wittwer. Stuttgart, 1908.
- Muttoni 1990** Die Anwendbarkeit der Plastizitätstheorie in der Bemessung von Stahlbeton, 24.03.2020, 1990.
- Muttoni 2003** Schubfestigkeit und Durchstanzen von Platten ohne Querkraftbewehrung. Beton- und Stahlbetonbau, Heft 98, Nr. 2, 2003, S. 74–84.
- Nguyen 2008** Entwicklung einer Konstruktion für zweischichtige Wandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton, Experimentelle und theoretische Untersuchungen, Technische Universität Kaiserslautern FG Massivbau, 2008. Diplomarbeit.
- Polónyi 2014** Zuviel Stahl im Beton?, Stahlbeton – 120 Jahre Welterfolg auf der Basis eines falschen Ansatzes. Beton- und Stahlbetonbau, Heft 109, Nr. 9, 2014, S. 628–636.
- Reineck 1990** Ein mechanisches Modell für den Querkraftbereich von Stahlbetonbauteilen, Dissertation, Universität Stuttgart, 1990.
- Reißen 2016** Zum Querkrafttragverhalten von einachsig gespannten Stahlbetonplatten ohne Querkraftbewehrung unter Einzellasten, Dissertation, RWTH Aachen, 2016.

- Remmel 1994** Zum Zug- und Schubtragverhalten von Bauteilen aus hochfestem Beton. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*. Beuth, 1994.
- Roeser 2008** Stellungnahme zu ausgewählten Punkten der E-DIN 4213/A1, G07/52, H+P Ingenieure GmbH & Co. KG, 2008.
- Roeser 2013a** Stellungnahme zu ausgewählten Punkten aus DIN EN 1520:2011 und E DIN 4213:2012, G13-035, 29.05.2018, H+P Ingenieure GmbH & Co. KG, 2013.
- Roeser 2013b** Stellungnahme zu Versuchen an Thermodur Wandelementen (Versuchsbericht 08017 Ab/537 der TU Kaiserslautern), G12/99, 29.05.2018, H+P Ingenieure GmbH & Co. KG, 2013.
- Roeser und Wittig Dezember 2004** Erläuterungen zu den Technischen Regeln für vorgefertigte bewehrte tragende Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton, Deutsches Institut für Bautechnik, Dezember 2004.
- Ruiz und Muttoni et al 2015** Shear strength of concrete members without transverse reinforcement, A mechanical approach to consistently account for size and strain effects. *Engineering Structures*, Heft 99, 2015, S. 360–372.
- Sagmeister 1999** Rezeptoptimierung von haufwerksporigem Leichtbeton. Sonderdruck des BFT, 1999, S. 70–77.
- Schnell und Hanz 2014** Ergebnisse zu Verdichtungsversuchen an Wandelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton (LAC). Kaiserslautern, Technische Universität Kaiserslautern FG Massivbau, 2014.
- Schwing 2006** Neue Normen zu haufwerksporigem Leichtbeton, Hintergründe - praktische Umsetzung. In: BFT international (Hrsg.): Kongressunterlagen 50. BetonTage, 2006, S. 134–135.
- Thermodur 2013** Produktdatenblatt Wandelemente Bauphysik, Thermodur Wandelemente GmbH, 2013.
- Thiele 2010** Tragverhalten von Stahlbetonplatten ohne Querkraftbewehrung mit integrierten Leitungsführungen, Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern FG Massivbau, 2010.
- Thienel 2005** Vergleich der Festlegungen für die Eigenschaften des Leichtbetons in DIN EN 1520 mit den Regelungen in DIN 4028, DIN 4232 und DIN 1045-1, Gutachten im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik, Universität der Bundeswehr München, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, 2005.
- Thienel 2006** Werkstoffe des Bauwesens - Leichtbeton, Universität der Bundeswehr München, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, 2006.
- Thienel 2013** Gutachterliche Stellungnahme G2013-1, Vergleich gemessener Biegezugfestigkeitswerte mit den rechnerischen Annahmen der DIN EN 1520, Universität der Bundeswehr München, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, 2013.

- Thienel 2014** Vorgefertigte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton – Die deutsche Anwendungsnorm DIN 4213. In: BFT international (Hrsg.): Kongressunterlagen 58. BetonTage, 2014, S. 120–121.
- Thienel 2015** Sonderbetone, Gefügedichter und haufwerksporiger Leichtbeton. München, Universität der Bundeswehr München, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, 2015.
- Vecchio und Collins 1986** The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear. ACI Journal Proceedings, Heft 83, Nr. 2, 1986.
- Walraven 1980** AGGREGATE INTERLOCK - A theoretical and experimental analysis, Dissertation, Technische Universität Delft, 1980.
- Wildermuth 2013** Untersuchungen zum Verbundverhalten von Bewehrungsstäben mittels vereinfachter Versuchskörper. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*. Beuth. Berlin, 2013.
- Wischers und Lusche 1972** Einfluß der inneren Spannungsverteilung das Tragverhalten von druckbeanspruchtem Normal- und Leichtbeton. *beton* 22, 1972.
- Zeitler und Schwetz et al 2017** Haufwerksporiger Leichtbeton, Verankerungsverhalten von Bewehrungsstäben in Haufwerksporigem Leichtbeton (LAC). In: Technische Universität Kaiserslautern FG Massivbau (Hrsg.): Beiträge zur 5. DAfStb-Jahrestagung mit 58. Forschungskolloquium, 2017, S. 152–161.
- Zeitler und Schwetz et al 2020** Untersuchungen zur Verankerung von Bewehrungsstäben mit Endhaken in LAC. *BWI - BetonWerk International*, 2020, S. 12–18.
- Zilch und Zehetmaier 2010** Bemessung im konstruktiven betonbau // Bemessung im konstruktiven Betonbau, Nach DIN 1045-1 (Fassung 2008) und EN 1992-1-1 (Eurocode 2). Springer. Berlin, 2010.
- Zink 2000** Zum Biegeschubversagen schlanker Bauteile aus Hochleistungsbeton mit und ohne Vorspannung. *Forschung für die Praxis*. Vieweg+Teubner Verlag. Wiesbaden, 2000.



## Anhang A Versuchsprotokolle Verdichtungsversuche

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Ergebnisse der optischen Untersuchung aus Kapitel 3 dargestellt. In Abbildung A-1 wird beispielhaft dargestellt aus welchen Schichten die optischen Messungen gezeigt werden.

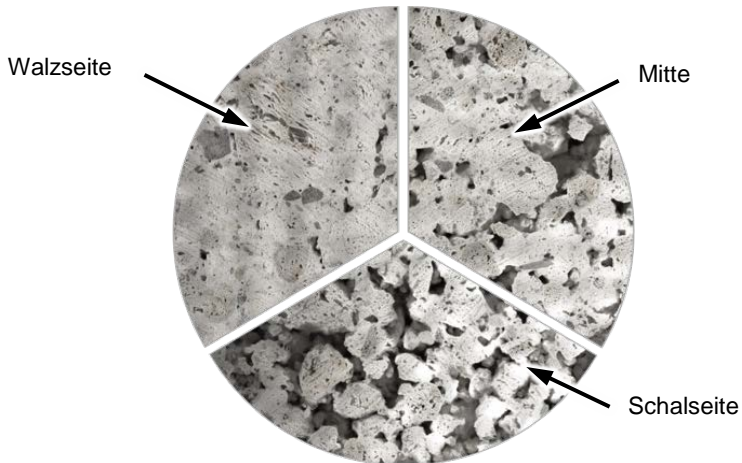


Abbildung A-1: Beispiel Bohrkernuntersuchung

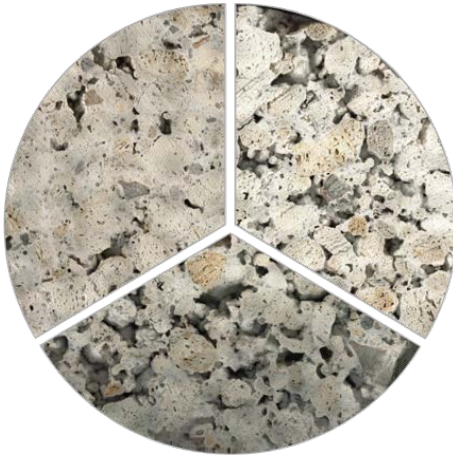


Abbildung A-2: Bohrkernuntersuchung BV-7.1    Abbildung A-3: Bohrkernuntersuchung BV 7.2

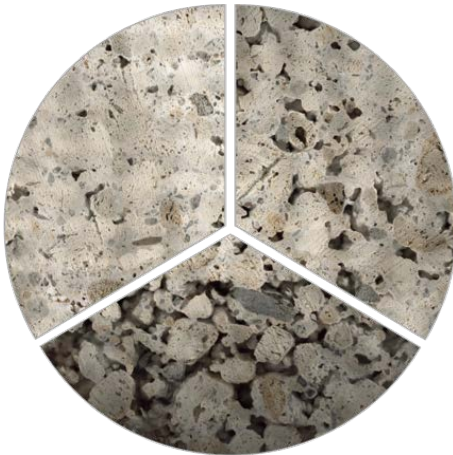


Abbildung A-4: Bohrkernuntersuchung BV-7.3

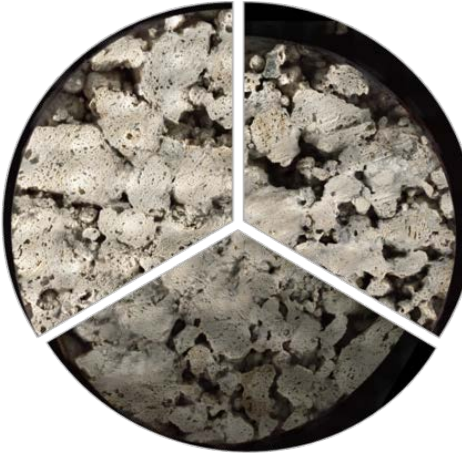


Abbildung A-5: Bohrkernuntersuchung BV-8.1

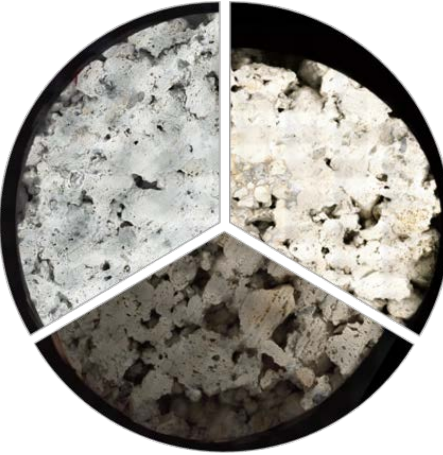


Abbildung A-6: Bohrkernuntersuchung BV 8.2

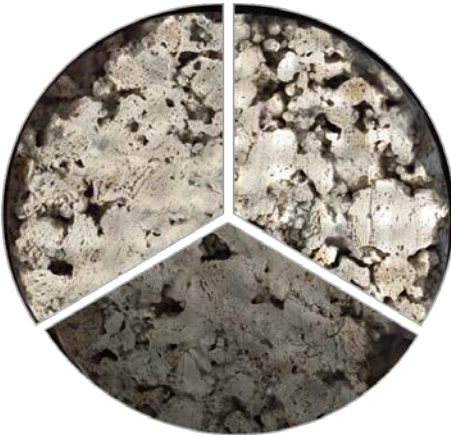


Abbildung A-7: Bohrkernuntersuchung BV-8.3

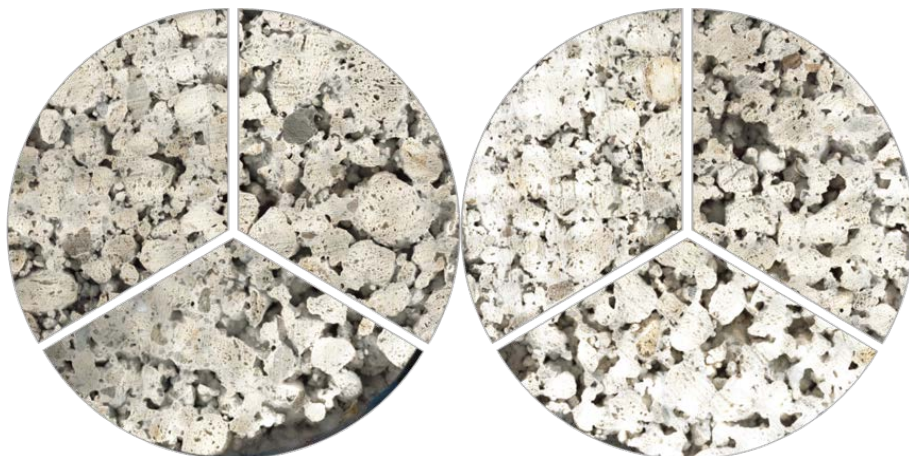


Abbildung A-8: Bohrkernuntersuchung BV-13.1    Abbildung A-9: Bohrkernuntersuchung BV-13.2

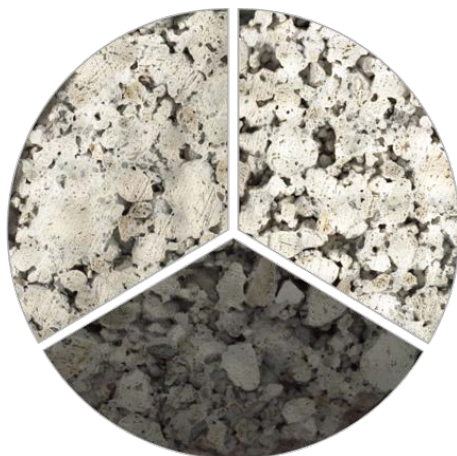


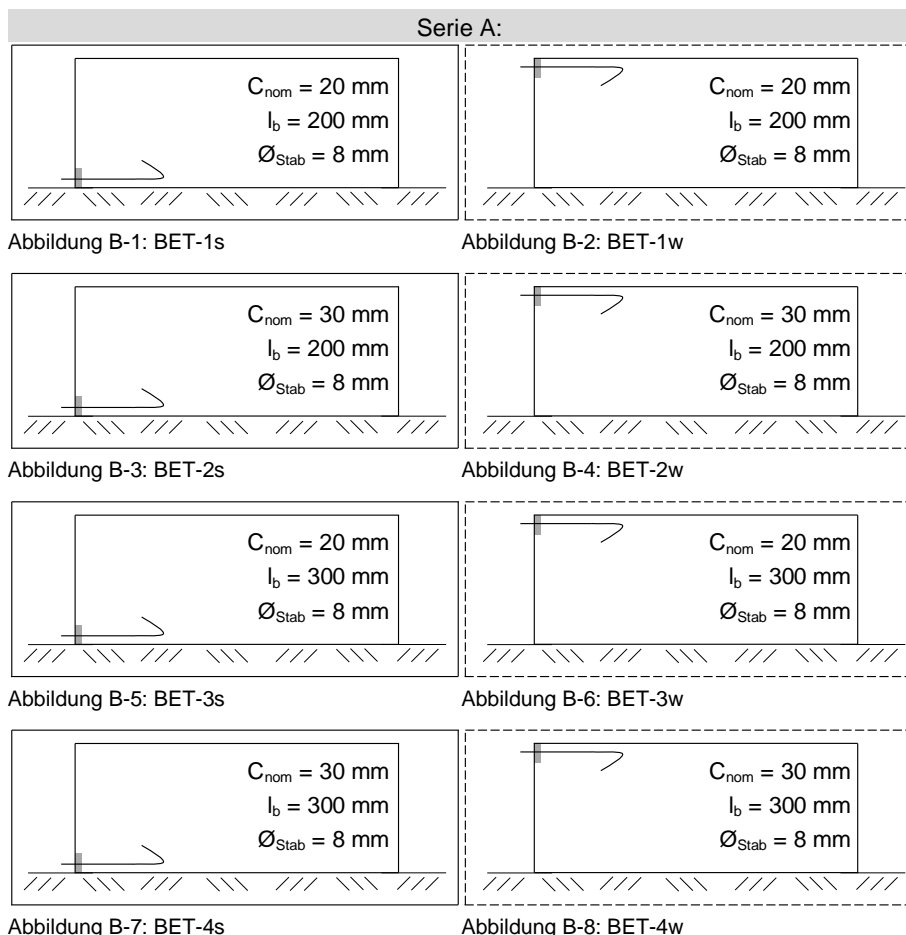
Abbildung A-10: Bohrkernuntersuchung  
BV-13.3

## Anhang B Versuchsprotokolle Auszugversuche

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuche aus Kapitel 4 dargestellt.

Dabei wird zunächst die Geometrie der Versuchskörper und im Weiteren die Ergebnisse der Druckfestigkeits- und Rohdichtemessung dargestellt. Nachfolgend werden die Kraft-Weg-Diagramme gezeigt. Dabei wird der Kolbenweg der Prüfmaschine in mm auf der x-Achse und die aufgebrachte Zugkraft in kN auf der y-Achse abgebildet. Außerdem werden die Versagensbilder nach Beenden des Versuchs dokumentiert. Abschließend werden die maximal erreichten Auszugkräfte in den verschiedenen Versuchsvarianten verglichen. Weitere Auswertungen finden sich auch in *Zeitler und Schwetz et al 2017* und *Zeitler und Schwetz et al 2020*.

### Geometrie der Versuchskörper



Serie B:

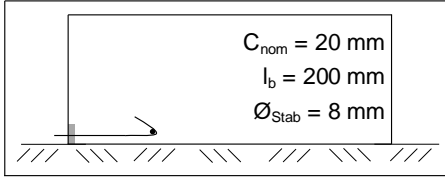


Abbildung B-9: BET-5s

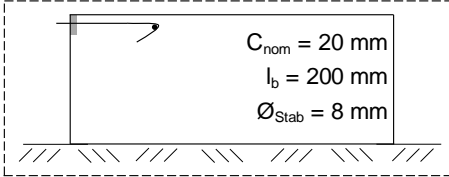


Abbildung B-10: BET-5w

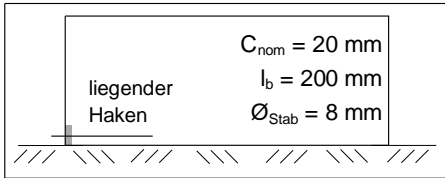


Abbildung B-11: BET-6s

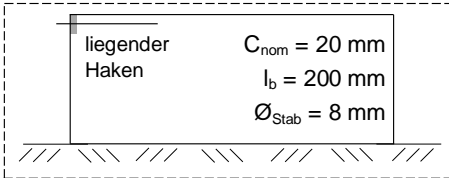


Abbildung B-12: BET-6w

Serie C:

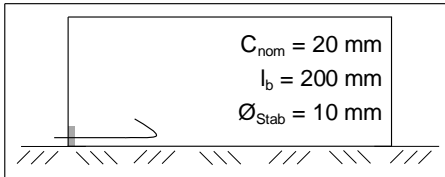


Abbildung B-13: BET-9s

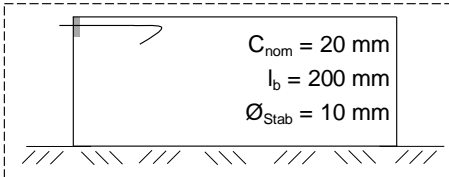


Abbildung B-14: BET-9w

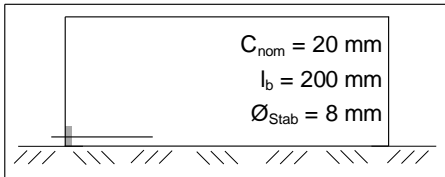


Abbildung B-15: BET-10s

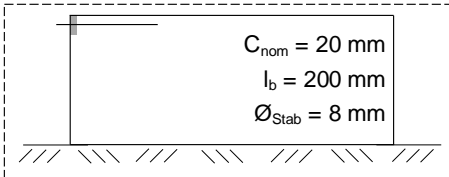


Abbildung B-16: BET-10w

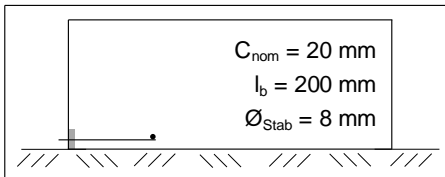


Abbildung B-17: BET-12s

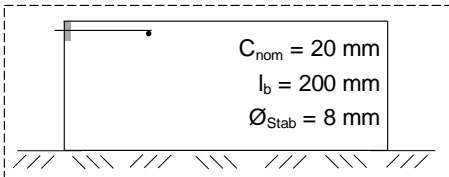


Abbildung B-18: BET-12w

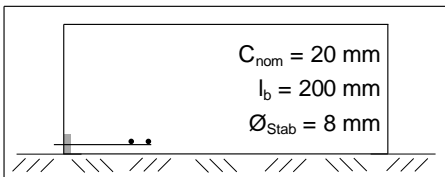


Abbildung B-19: BET-13s

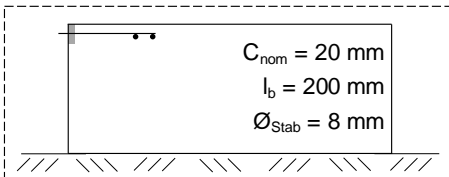


Abbildung B-20: BET-13w

## Messung Druckfestigkeit und Rohdichte

Tabelle B-1: Messung der Druckfestigkeit und der Rohdichte mit Bohrkernen Serie A

BET - Serie A							
Höhe h [mm]	Durchmesser Ø [mm]	Druckfläche Ac [mm <sup>2</sup> ]	Volumen V [mm <sup>3</sup> ]	Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	Kraft F [kN]	Druckfestigkeit fc [N/mm <sup>2</sup> ]
100	94	6866	687301	0,670	975	14,3	2,1
98	94	6866	672882	0,592	880	11,5	1,7
99	94	6866	679749	0,624	918	14,6	2,1
100	94	6866	687301	0,666	969	13,4	2,0
100	94	6866	685928	0,634	924	14,2	2,1
100	94	6866	689361	0,690	1001	21,6	3,1
100	94	6866	687713	0,700	1018	16,2	2,4
100	94	6866	689361	0,656	952	12,7	1,8
101	94	6866	693481	0,736	1061	22,2	3,2
101	94	6866	691421	0,692	1001	17,7	2,6
100	94	6866	687301	0,696	1013	17,4	2,5
100	94	6866	685241	0,708	1033	21,6	3,1
<b>Mittelwert</b>					<b>979</b>		<b>2,4</b>

Tabelle B-2: Messung der Druckfestigkeit und der Rohdichte mit Bohrkernen Serie B

BET - Serie B							
Höhe h [mm]	Durchmesser Ø [mm]	Druckfläche Ac [mm <sup>2</sup> ]	Volumen V [mm <sup>3</sup> ]	Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	Kraft F [kN]	Druckfestigkeit fc [N/mm <sup>2</sup> ]
94	94	6866	646379	0,845	1307	49,2	7,2
92	94	6866	633745	0,779	1229	37,1	5,4
94	94	6866	643358	0,740	1150	25,3	3,7
95	94	6866	648851	0,784	1208	37,8	5,5
93	94	6866	637178	0,731	1147	27,5	4,0
93	94	6866	639925	0,727	1136	29,1	4,2
93	94	6866	640612	0,760	1186	32,2	4,7
92	94	6866	633745	0,716	1130	25,2	3,7
92	94	6866	634432	0,666	1050	17,6	2,6
91	94	6866	621386	0,803	1292	40,6	5,9
94	94	6866	642671	0,780	1214	29,5	4,3
93	94	6866	637865	0,691	1083	19,9	2,9
<b>Mittelwert</b>					<b>1178</b>		<b>4,5</b>

Tabelle B-3: Messung der Druckfestigkeit und der Rohdichte mit Bohrkernen Serie C

BET - Serie C							
Höhe h [mm]	Durchmesser Ø [mm]	Druckfläche Ac [mm <sup>2</sup> ]	Volumen V [mm <sup>3</sup> ]	Masse m [kg]	Rohdichte ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	Kraft F [kN]	Druckfestigkeit fc [N/mm <sup>2</sup> ]
94	95	7088	666293	0,689	1034	33	4,7
94	95	7088	666293	0,695	1043	28	4,0
93	95	7088	659204	0,695	1054	33	4,7
93	95	7088	659204	0,724	1098	29	4,1
94	95	7088	666293	0,705	1058	33	4,7
94	95	7088	666293	0,707	1061	22	3,1
95	95	7088	673381	0,730	1084	33	4,7
93	95	7088	659204	0,689	1045	29	4,1
93	95	7088	659204	0,670	1016	21	3,0
94	95	7088	666293	0,685	1028	30	4,2
93	95	7088	659204	0,656	995	19	2,7
94	95	7088	666293	0,732	1099	37	5,2
93	95	7088	659204	0,738	1120	34	4,8
92	95	7088	652116	0,726	1113	34	4,8
<b>Mittelwert</b>					<b>1061</b>		<b>4,2</b>



**BET-1**

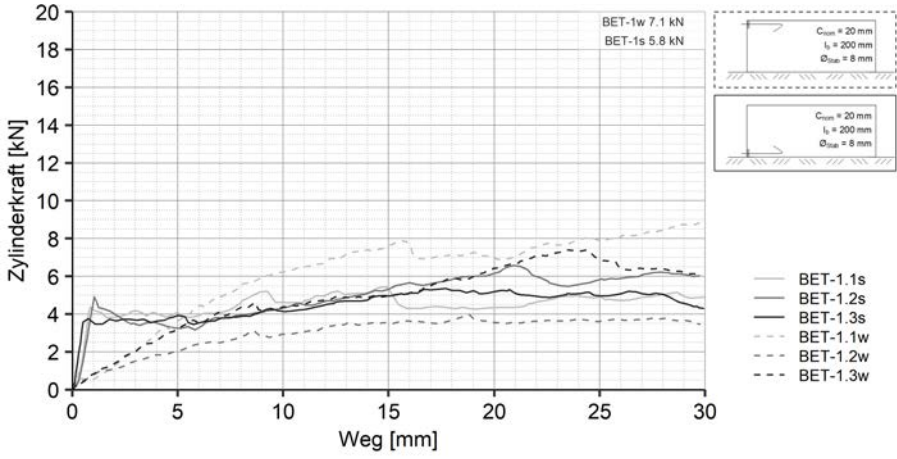


Abbildung B-21: Kraft-Weg-Diagramm, BET-1

**BET-2**

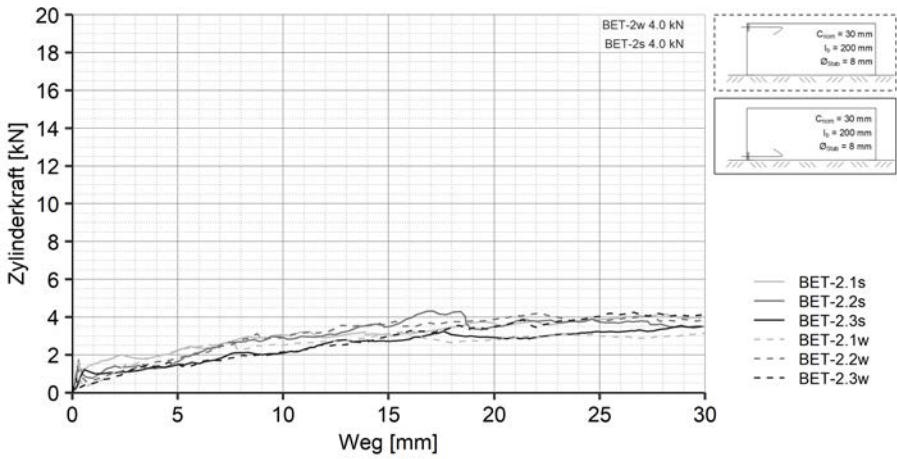


Abbildung B-22: Kraft-Weg-Diagramm, BET-2



**BET-3**

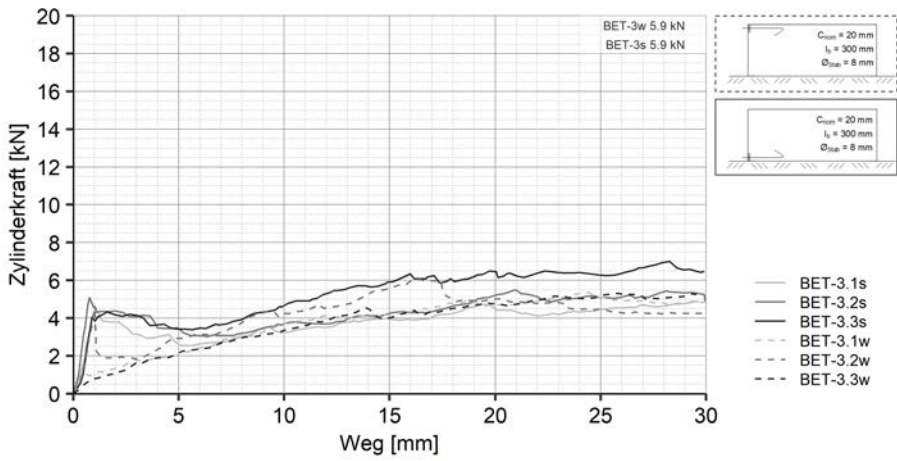


Abbildung B-23: Kraft-Weg-Diagramm, BET-3

**BET-4**

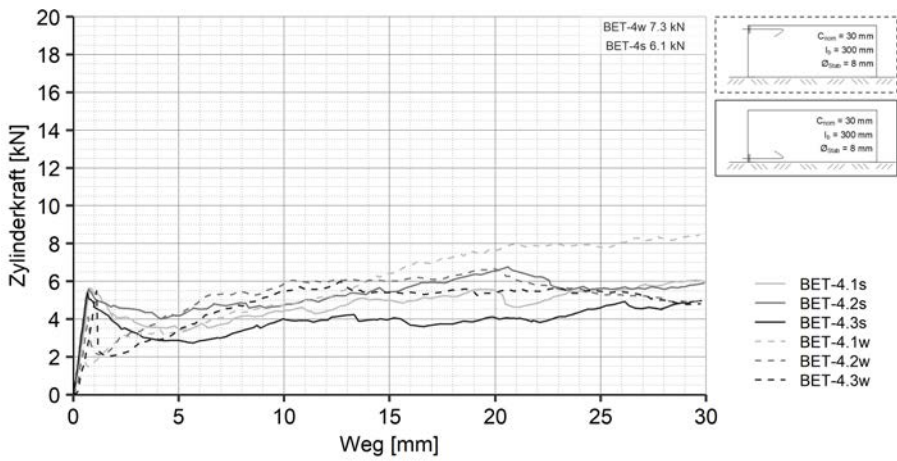


Abbildung B-24: Kraft-Weg-Diagramm, BET-4

**BET-5**

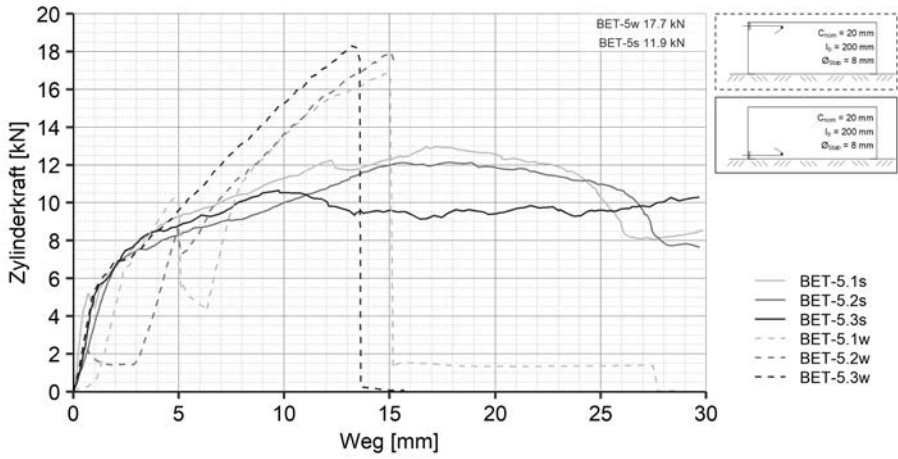


Abbildung B-25: Kraft-Weg-Diagramm, BET-5

**BET-6**

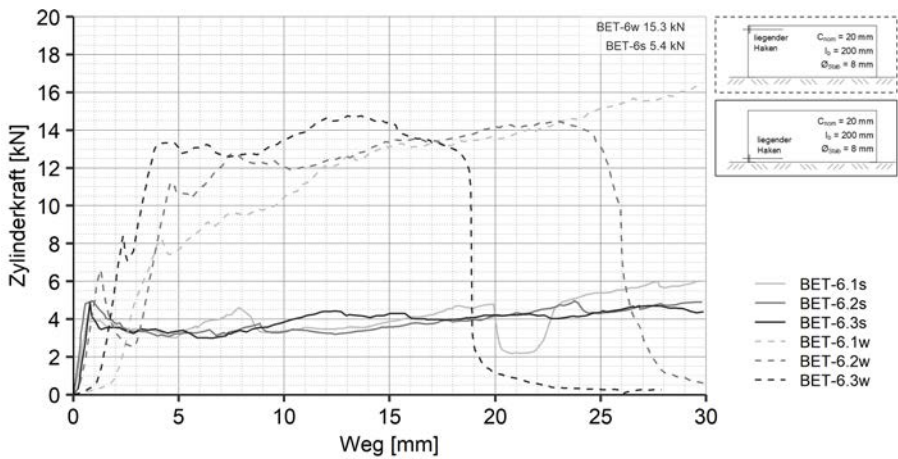


Abbildung B-26: Kraft-Weg-Diagramm, BET-6

**BET-9**

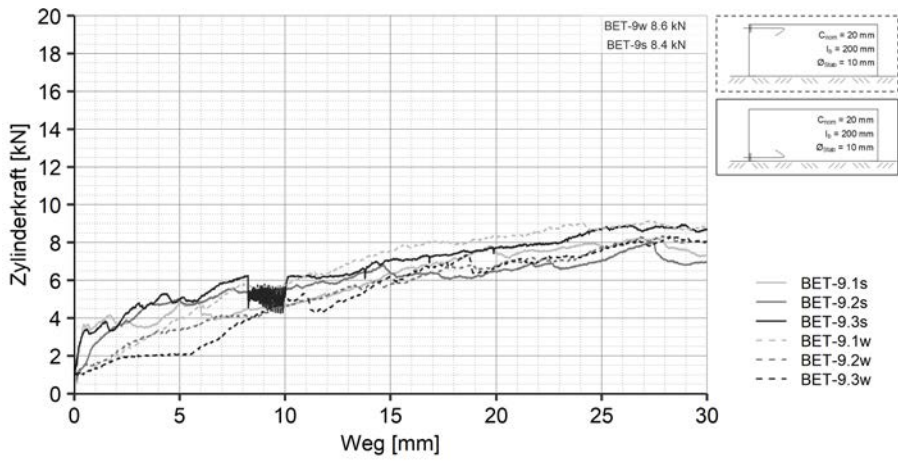


Abbildung B-27: Kraft-Weg-Diagramm, BET-9

**BET-10**

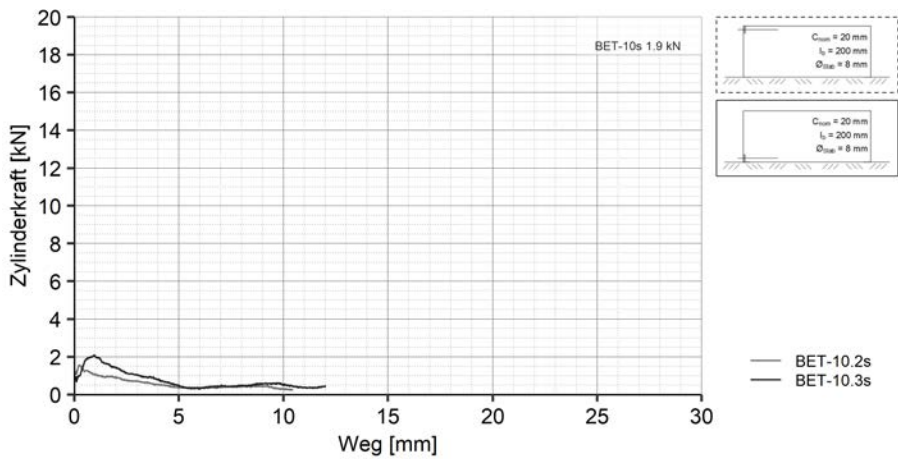


Abbildung B-28: Kraft-Weg-Diagramm, BET-10

**BET-12**

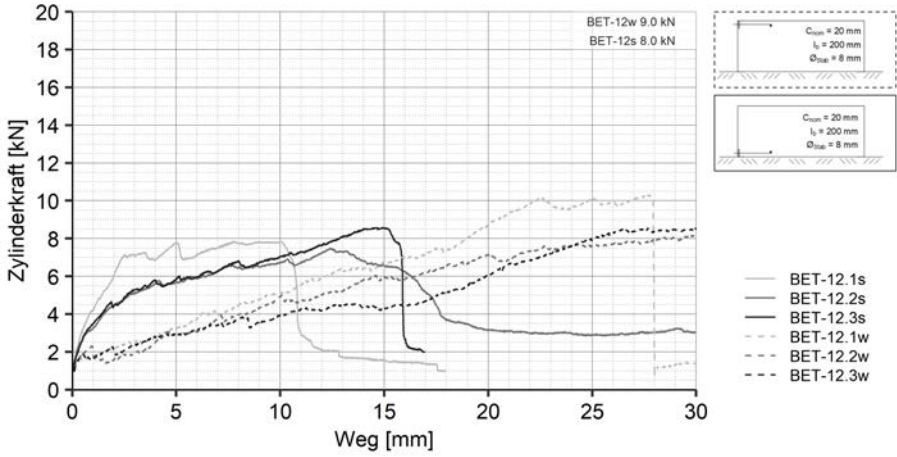


Abbildung B-29: Kraft-Weg-Diagramm, BET-12

**BET-13**

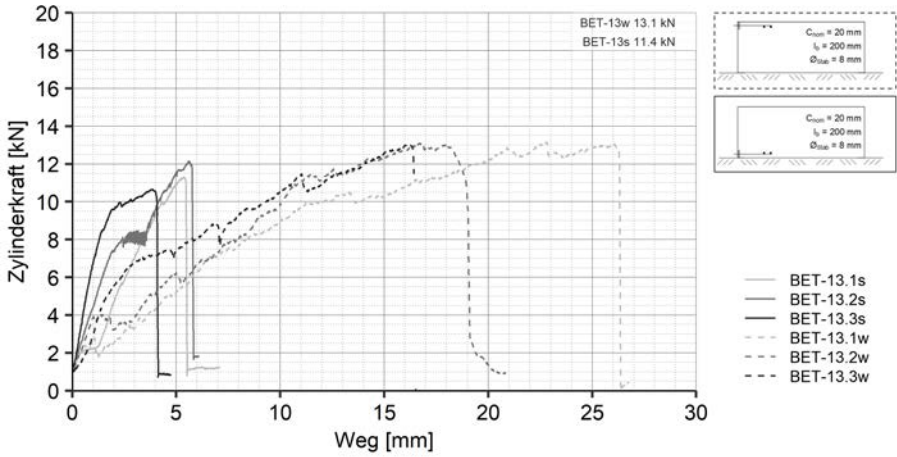


Abbildung B-30: Kraft-Weg-Diagramm, BET-13

geöffnete Versuchskörper (mit Haken)



Abbildung B-31: Geöffneter Versuchskörper  
BET-1s



Abbildung B-32: Geöffneter Versuchskörper  
BET-1w



Abbildung B-33: Geöffneter Versuchskörper  
BET-9s



Abbildung B-34: Geöffneter Versuchskörper  
BET-9w



**geöffnete Versuchskörper (mit Querstäben)**



Abbildung B-35: Geöffneter Versuchskörper  
BET-5s



Abbildung B-36: Geöffneter Versuchskörper  
BET-5w



Abbildung B-37: Geöffneter Versuchskörper  
BET-12s



Abbildung B-38: Geöffneter Versuchskörper  
BET-12w



Abbildung B-39: Geöffneter Versuchskörper  
BET-13s



Abbildung B-40: Geöffneter Versuchskörper  
BET-13w

Vergleich der maximal erreichten Auszugkräfte

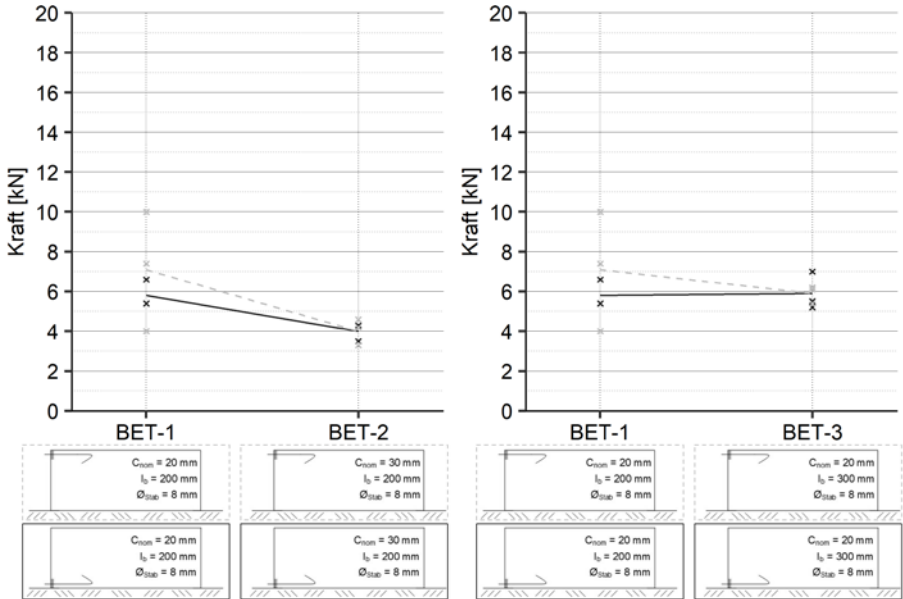


Abbildung B-41: Vergleich maximale Auszugkräfte BET-1 und BET-2

Abbildung B-42: Vergleich maximale Auszugkräfte BET-1 und BET-3

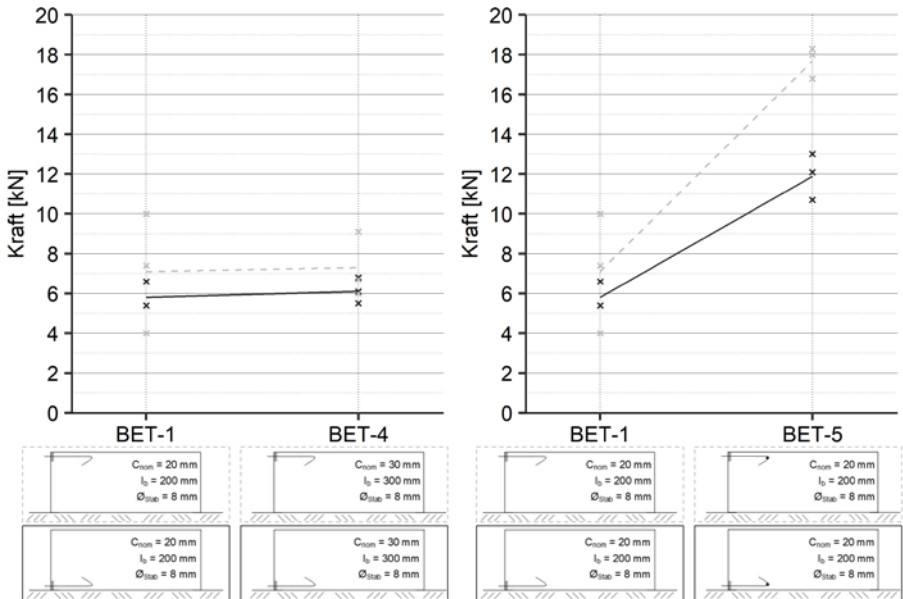


Abbildung B-43: Vergleich maximale Auszugkräfte BET-1 und BET-4

Abbildung B-44: Vergleich maximale Auszugkräfte BET-1 und BET-5

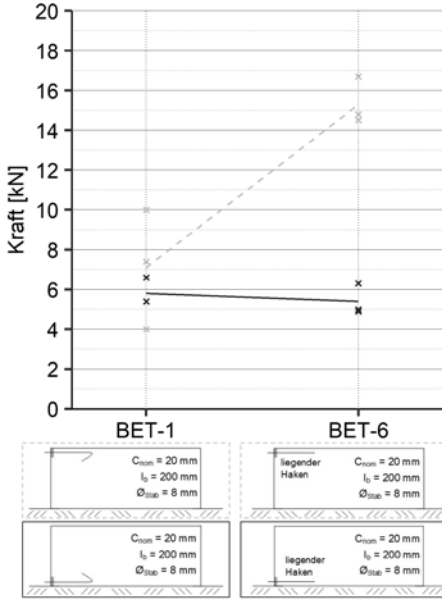


Abbildung B-45: Vergleich maximale Auszugkräfte BET-1 und BET-6

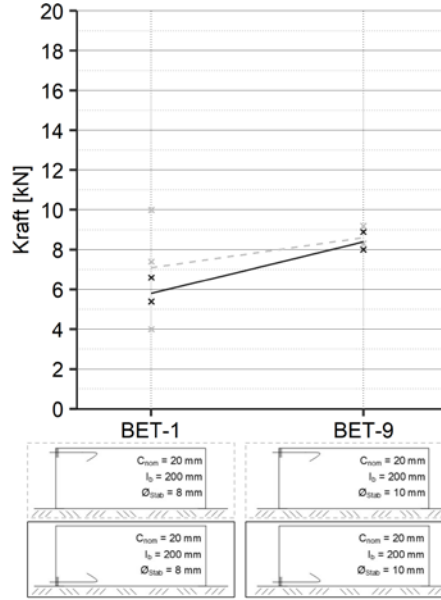


Abbildung B-46: Vergleich maximale Auszugkräfte BET-1 und BET-9

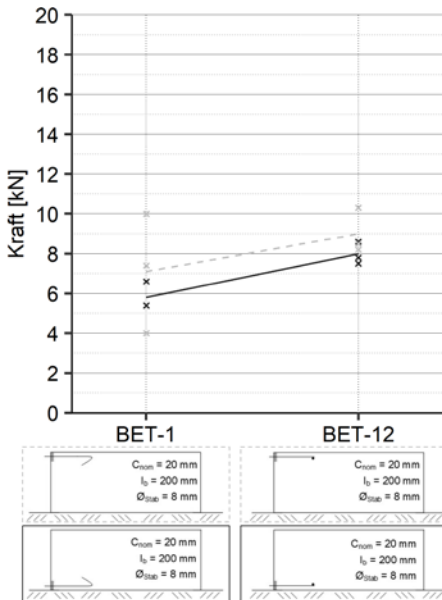


Abbildung B-47: Vergleich maximale Auszugkräfte BET-1 und BET-12

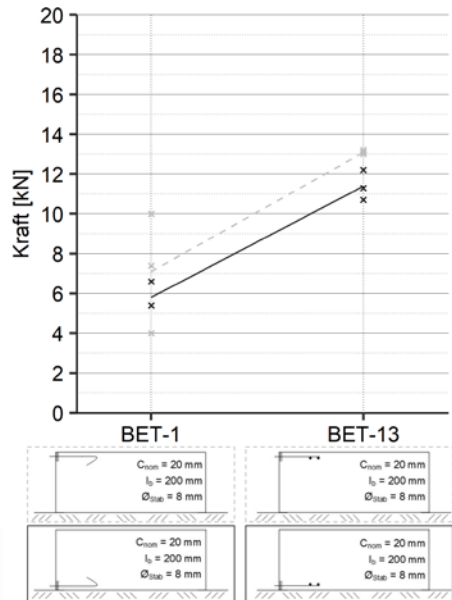


Abbildung B-48: Vergleich maximale Auszugkräfte BET-1 und BET-13



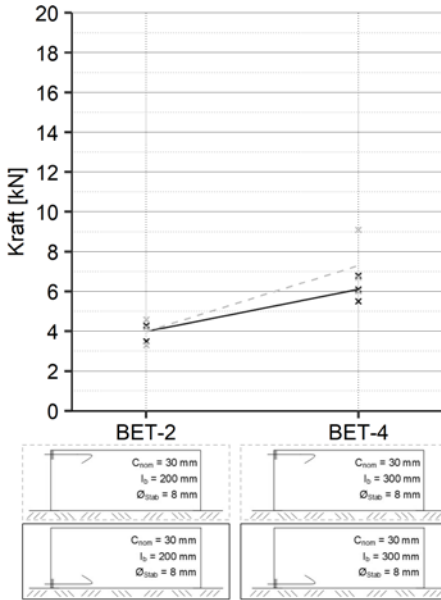


Abbildung B-49: Vergleich maximale Auszugkräfte BET-2 und BET-4

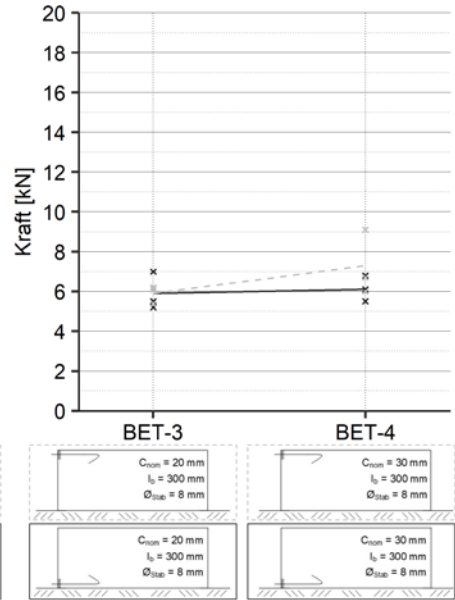


Abbildung B-50: Vergleich maximale Auszugkräfte BET-3 und BET-4

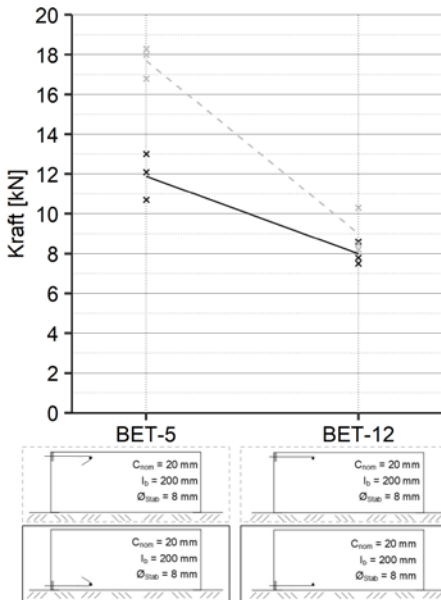


Abbildung B-51: Vergleich maximale Auszugkräfte BET-5 und BET-12

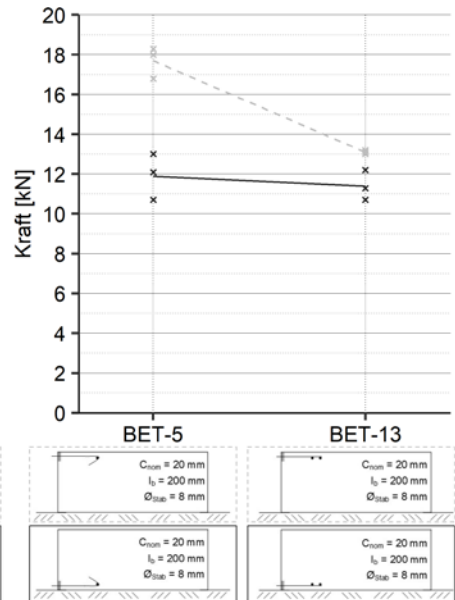


Abbildung B-52: Vergleich maximale Auszugkräfte BET-5 und BET-13

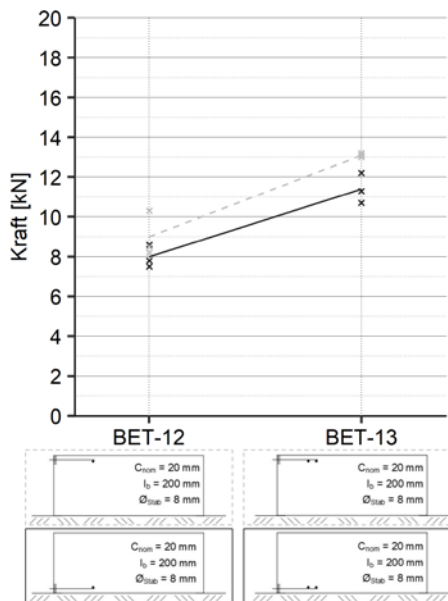


Abbildung B-53: Vergleich maximale Auszugkräfte BET-12 und BET-13

## **Anhang C    Versuchsprotokolle Großversuche**

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuche aus Kapitel 5 dargestellt.

Dabei werden zunächst die Kraft-Weg-Diagramme der Versuchsvarianten und die zugehörigen Rissbilder dargestellt. Dabei wird der Kolbenweg der Prüfmaschine in mm auf der x-Achse und die aufgebrachte Kraft in kN auf der y-Achse abgebildet.

**BV-1**

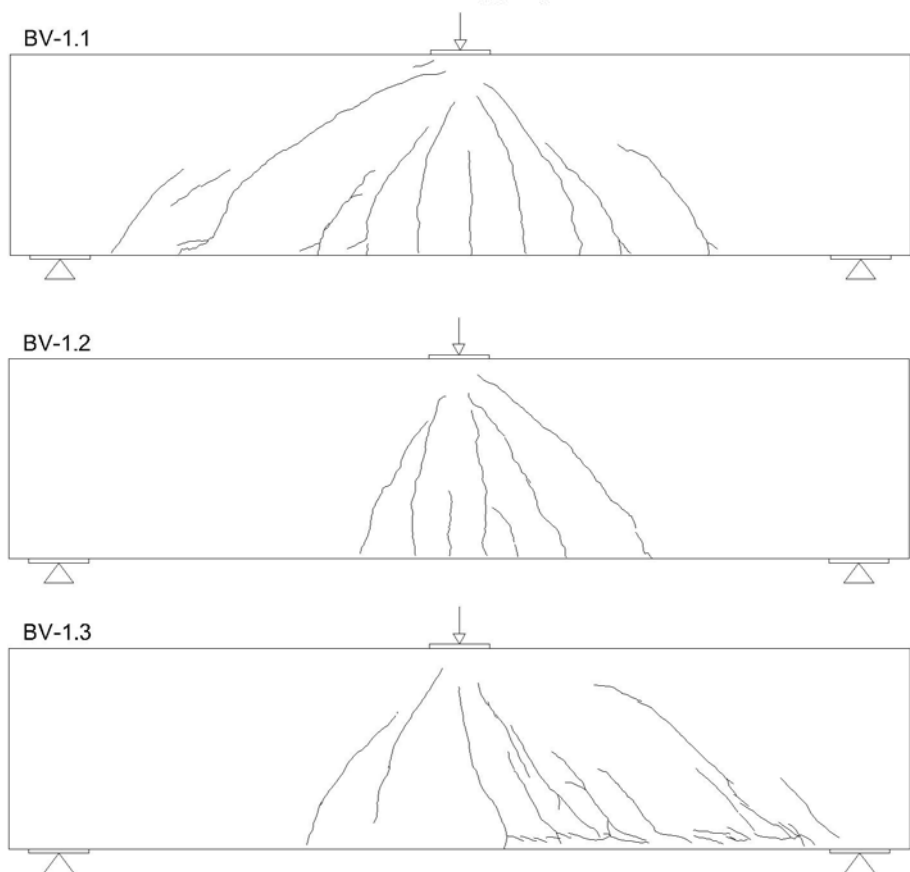
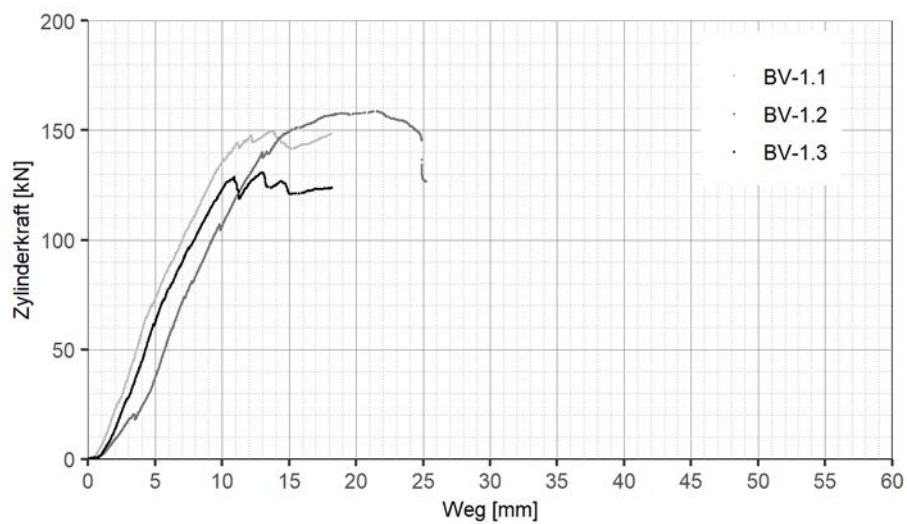
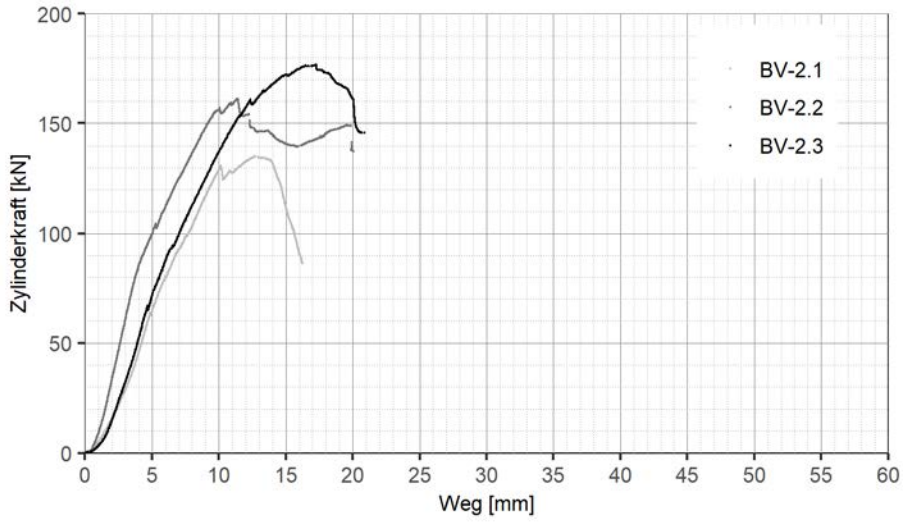
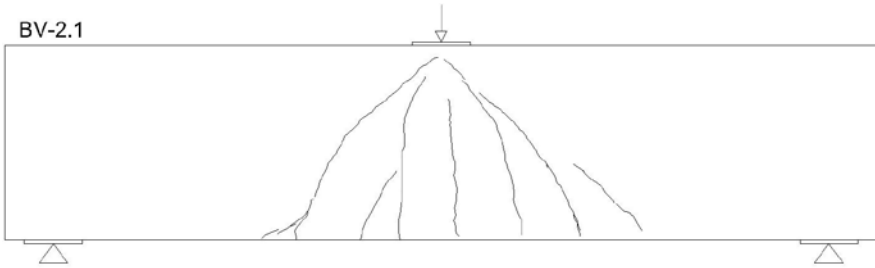


Abbildung C-1: Kraft-Weg-Diagramm und Rissbilder Versuchsreihe BV-1

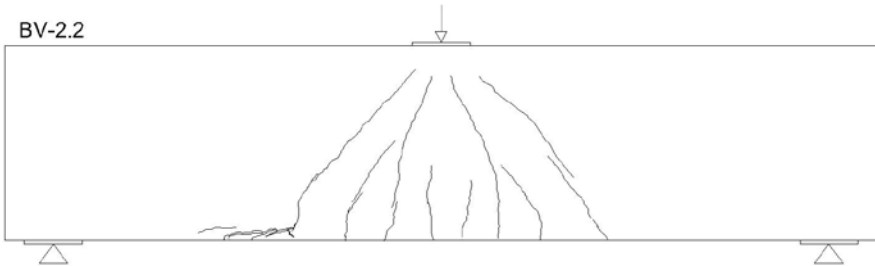
**BV-2**



BV-2.1



BV-2.2



BV-2.3

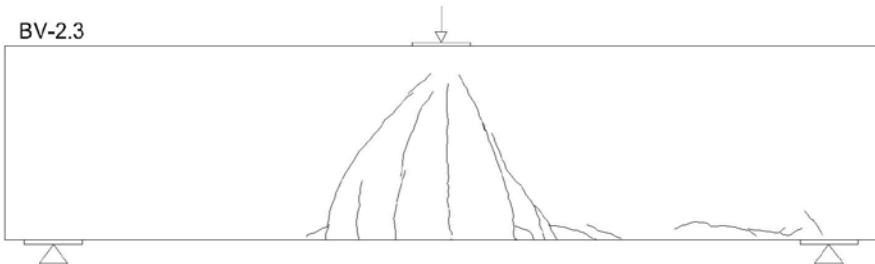


Abbildung C-2: Kraft-Weg-Diagramm und Rissbilder Versuchsreihe BV-2

**BV-3**

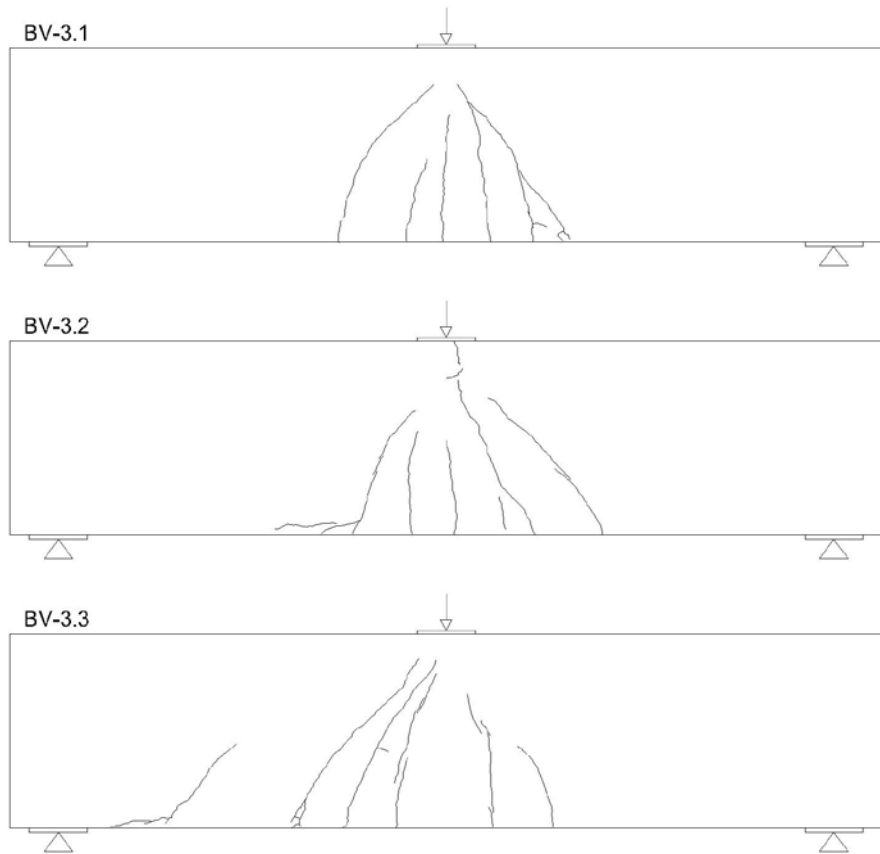
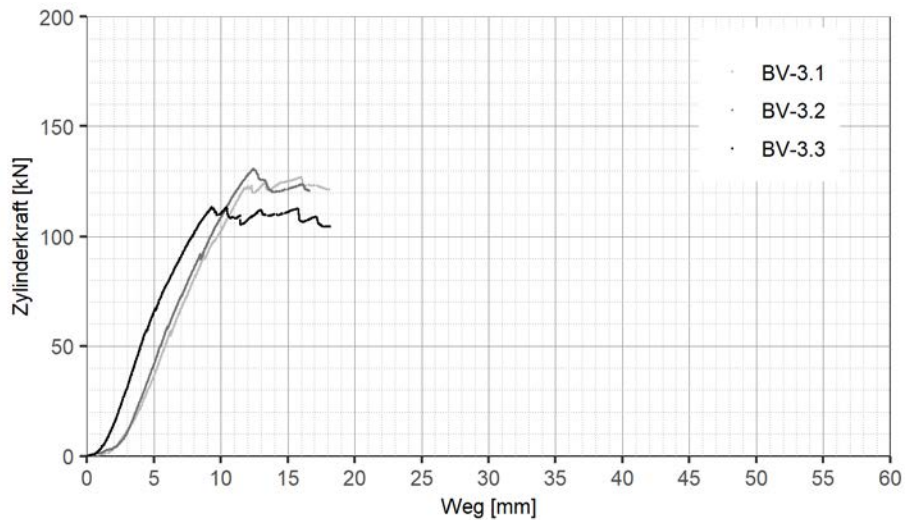
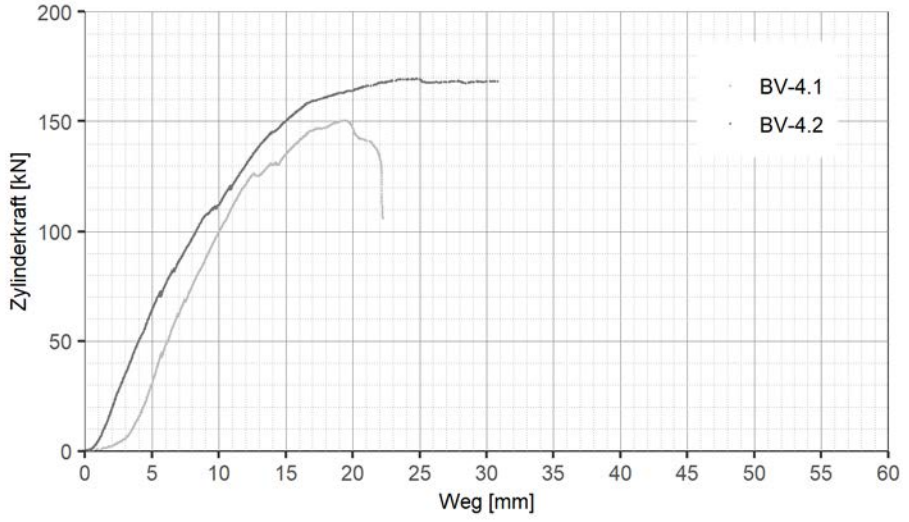
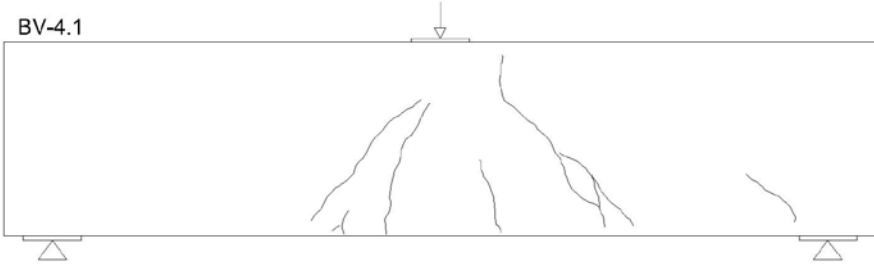


Abbildung C-3: Kraft-Weg-Diagramm und Rissbilder Versuchsreihe BV-3

**BV-4**



BV-4.1



BV-4.2

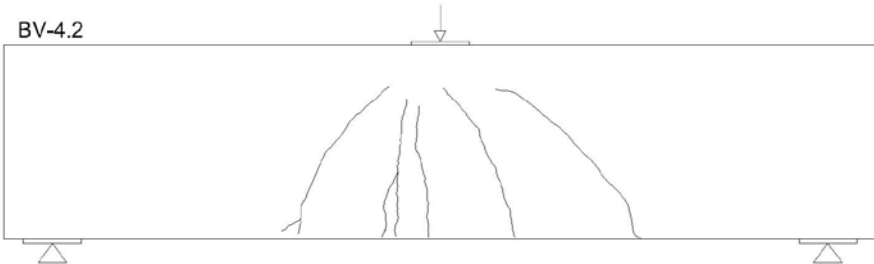
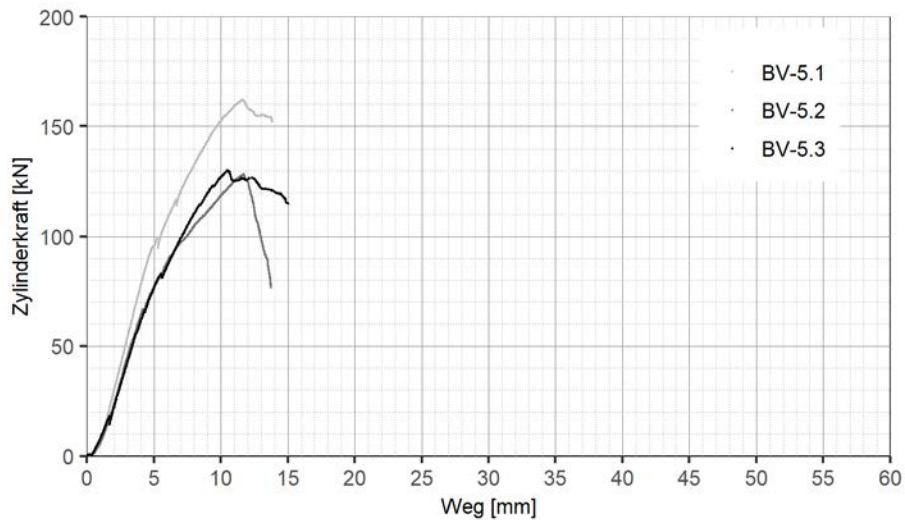
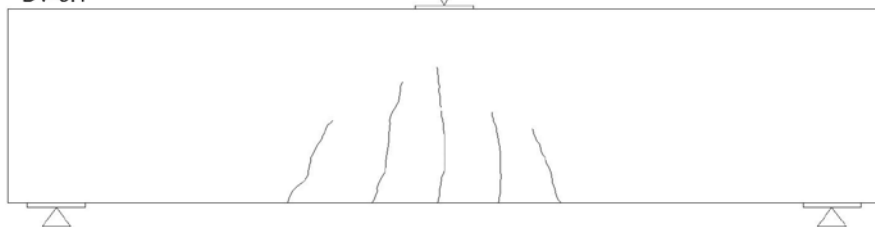


Abbildung C-4: Kraft-Weg-Diagramm und Rissbilder Versuchsreihe BV-4

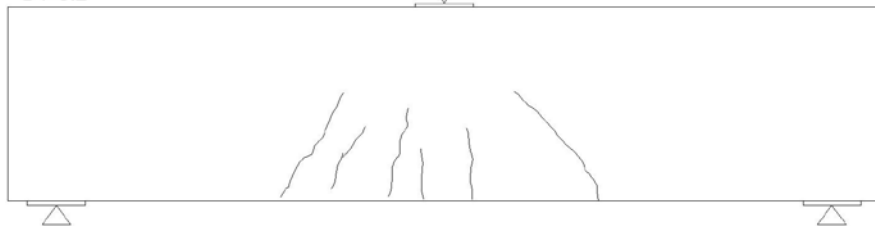
**BV-5**



BV-5.1



BV-5.2



BV-5.3

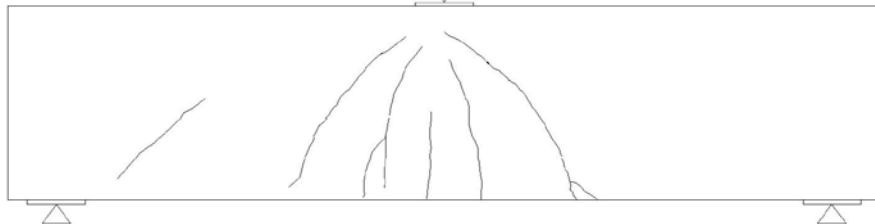
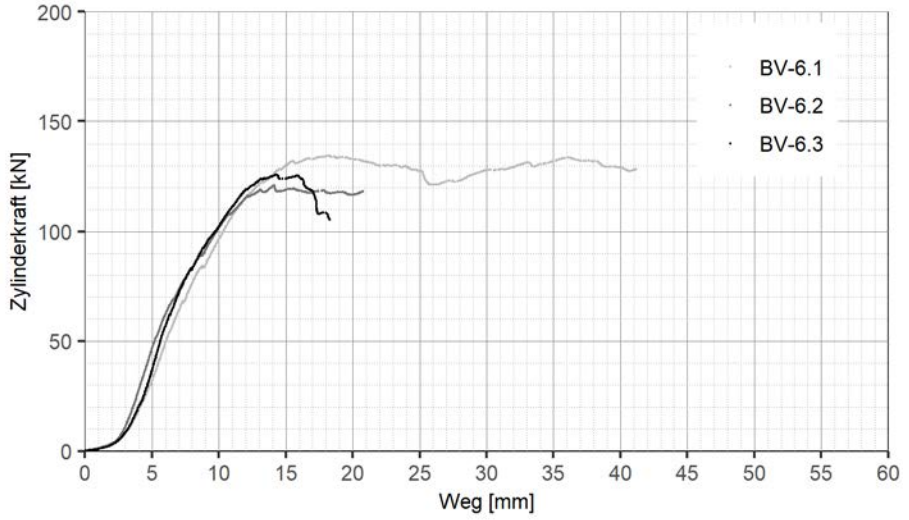


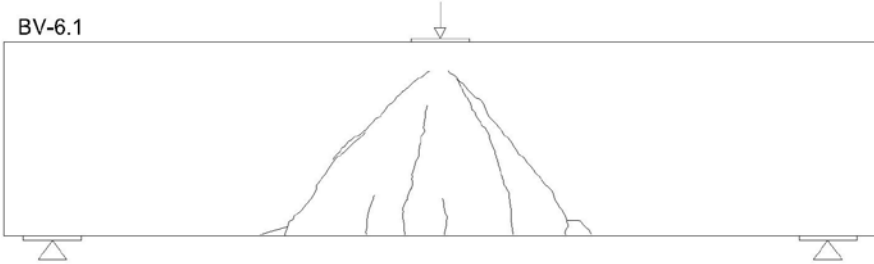
Abbildung C-5: Kraft-Weg-Diagramm und Rissbilder Versuchsreihe BV-5



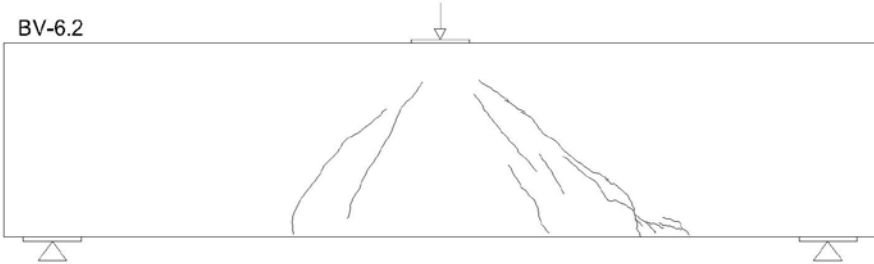
**BV-6**



BV-6.1



BV-6.2



BV-6.3

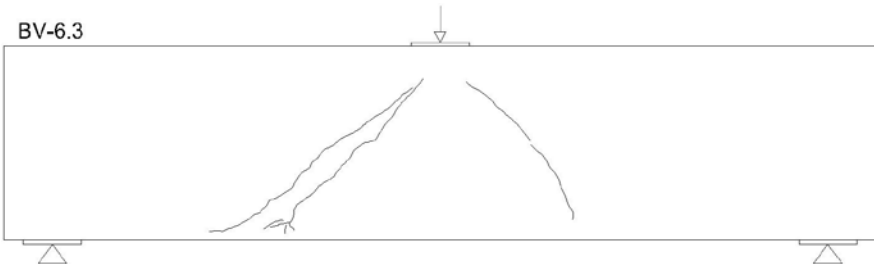


Abbildung C-6: Kraft-Weg-Diagramm und Rissbilder Versuchsreihe BV-6

**BV-7**

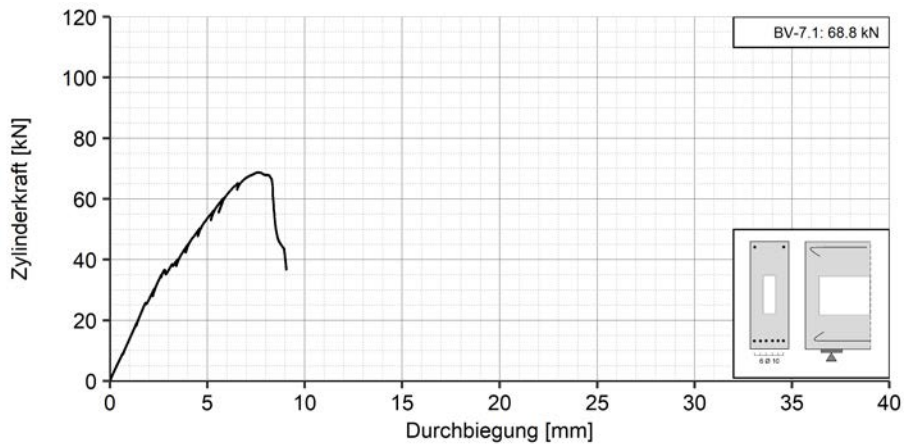


Abbildung C-7: Kraft-Durchbiegungs-Diagramm BV-7.1

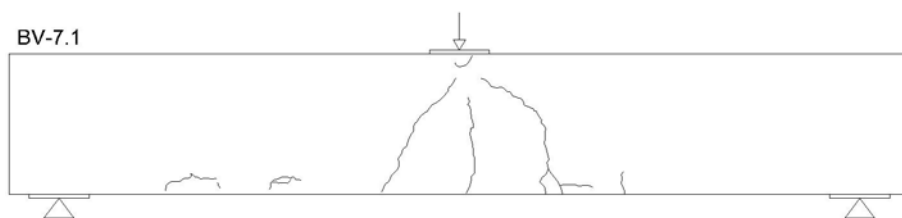


Abbildung C-8: Rissbild des Prüfkörpers am Versuchsende



Abbildung C-9: Geöffneter Prüfkörper, Haken wurden nicht aufgebogen



Abbildung C-10: Geöffneter Prüfkörper, Haken wurden nicht aufgebogen

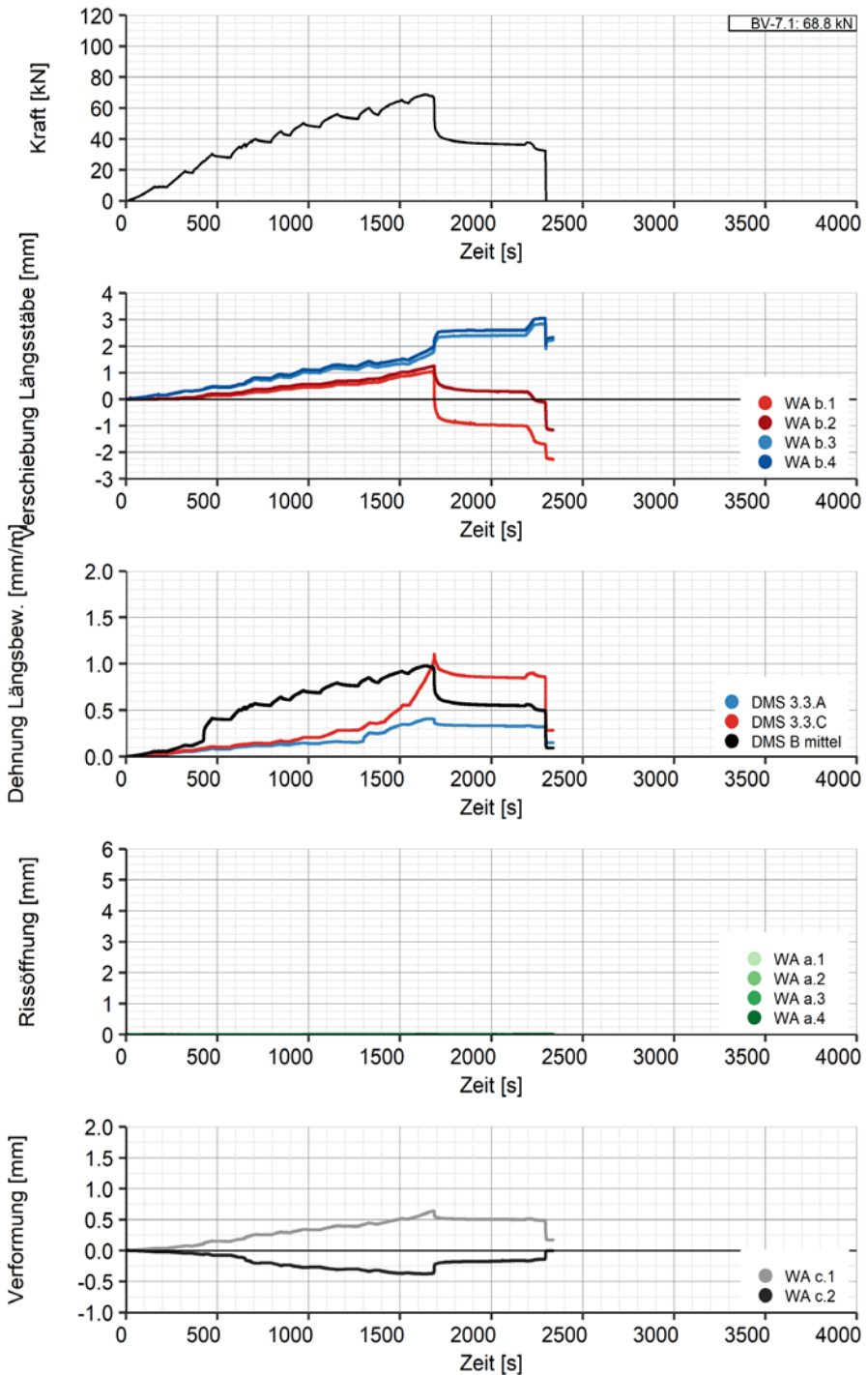


Abbildung C-11: Messergebnisse Wegaufnehmer und Dehnmessstreifen BV-7.1

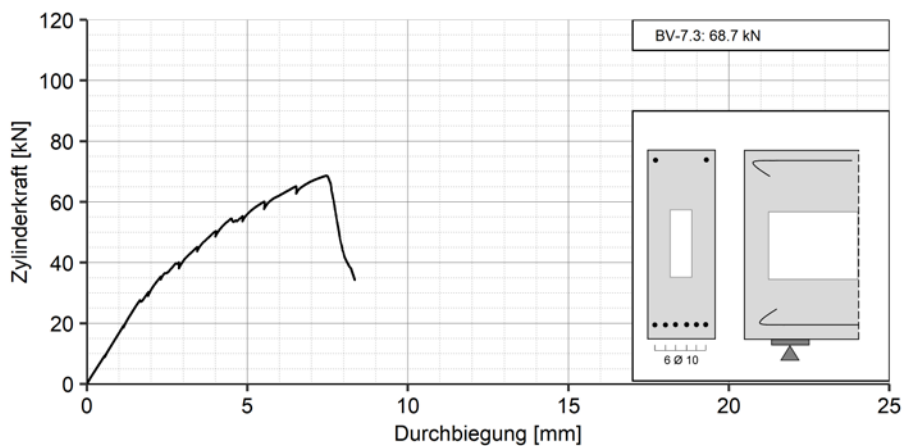


Abbildung C-12: Kraft-Durchbiegungs-Diagramm BV-7.3

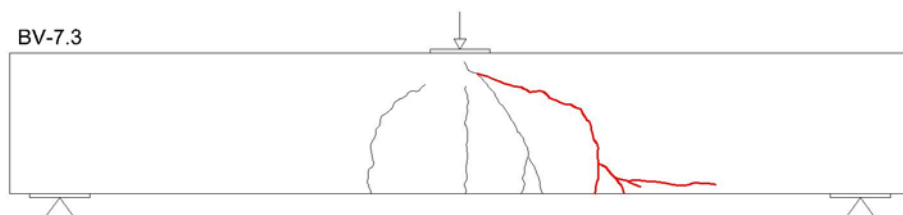


Abbildung C-13: Rissbild des Prüfkörpers am Versuchsende



Abbildung C-14: Geöffneter Prüfkörper,  
Haken wurden nicht aufgebogen

Abbildung C-15: Geöffneter Prüfkörper,  
Haken wurden nicht aufgebogen

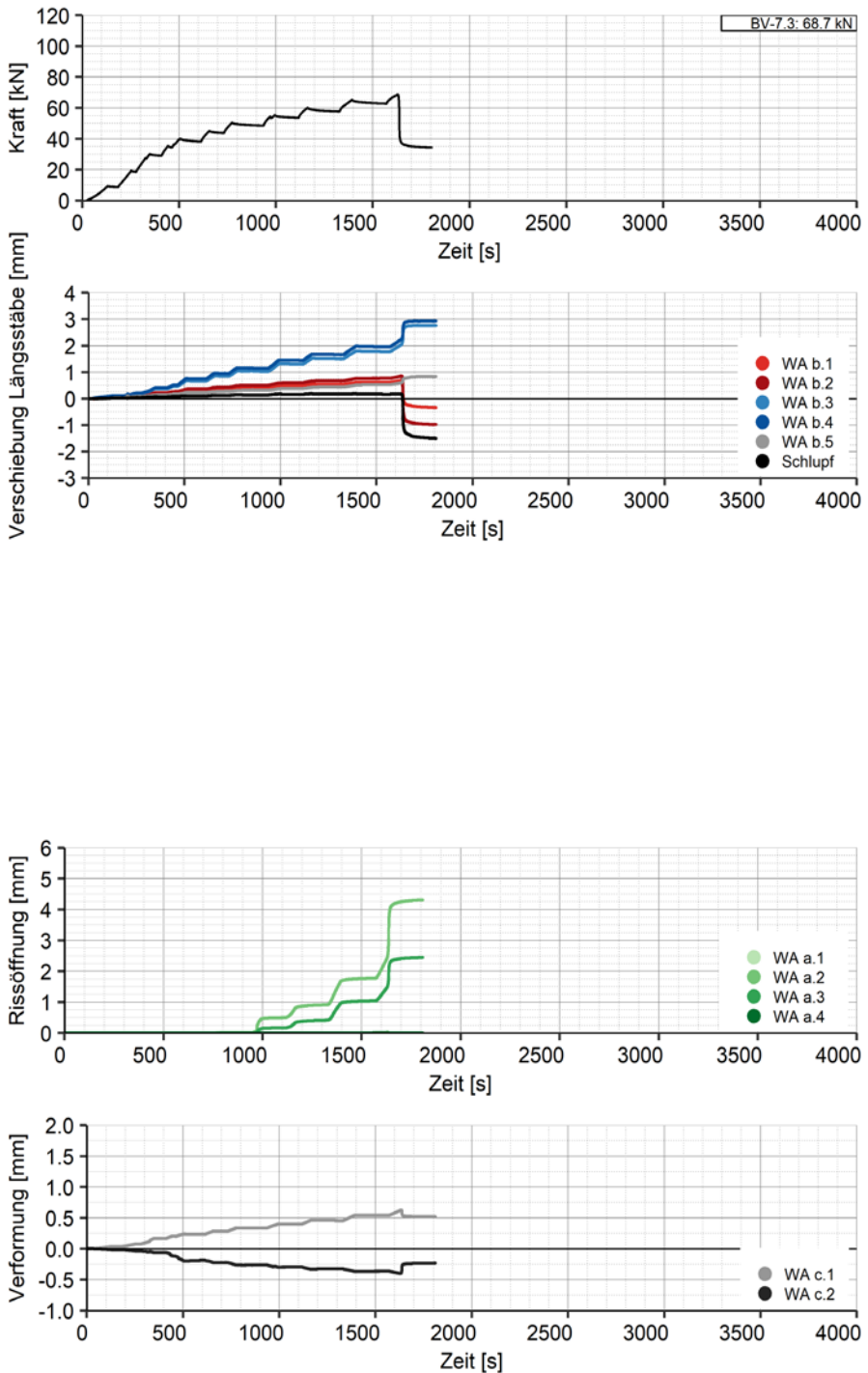


Abbildung C-16: Messergebnisse Wegaufnehmer und Dehnmessstreifen BV-7.3

**BV-8**

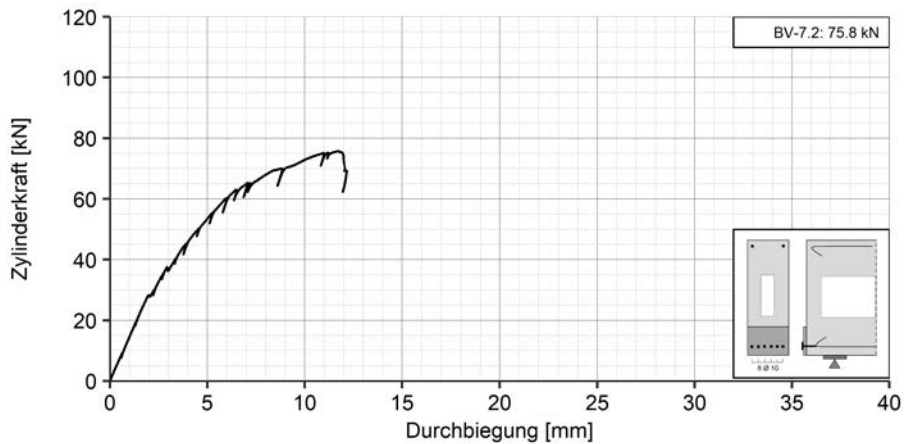


Abbildung C-17: Kraft-Durchbiegungs-Diagramm BV-7.2

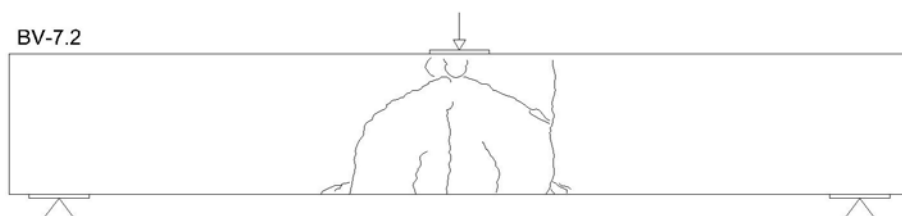


Abbildung C-18: Rissbild des Prüfkörpers am Versuchsende



Abbildung C-19: Geöffneter Prüfkörper, Haken wurden nicht aufgebogen

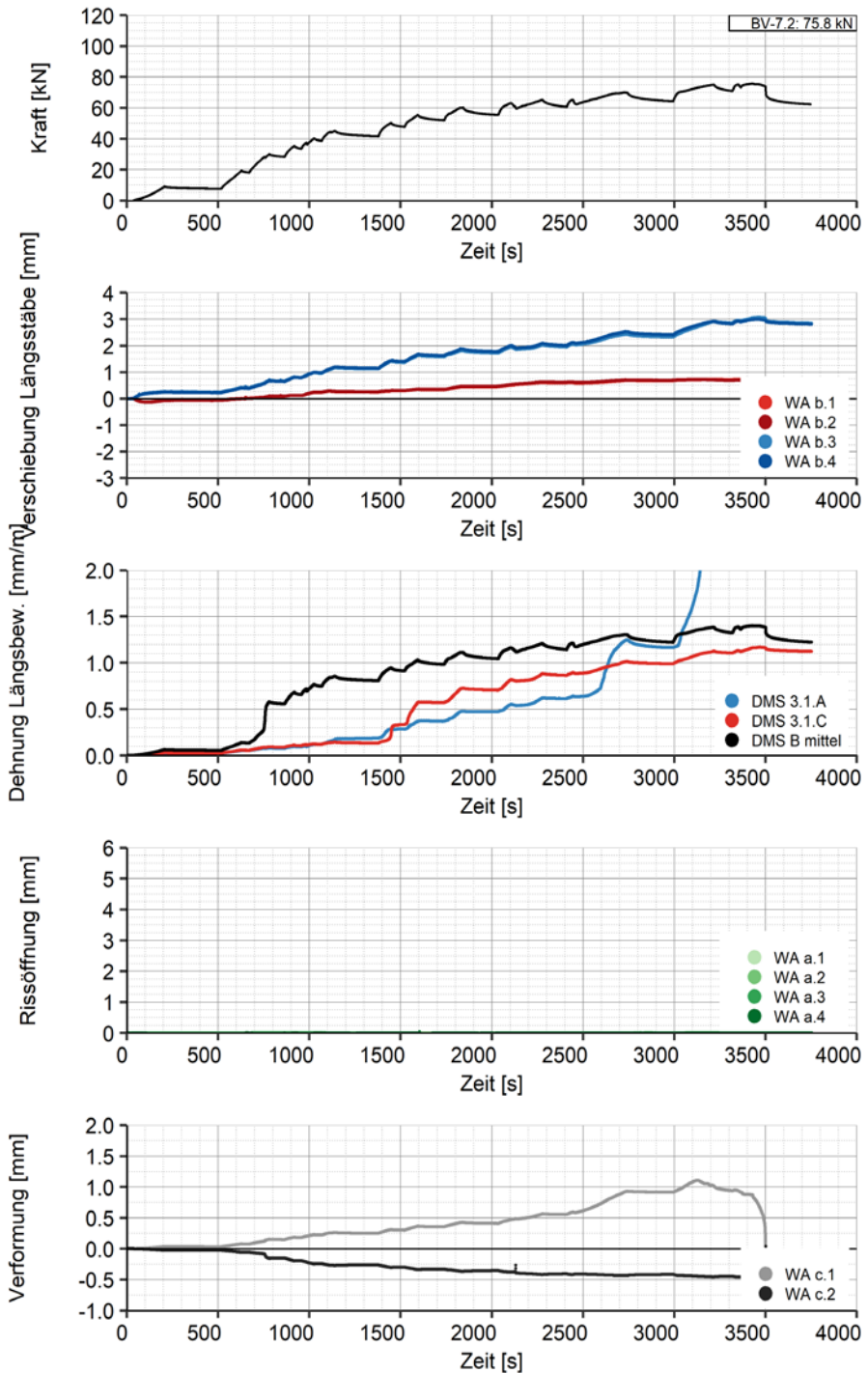


Abbildung C-20: Messergebnisse Wegaufnehmer und Dehnmessstreifen BV-7.2

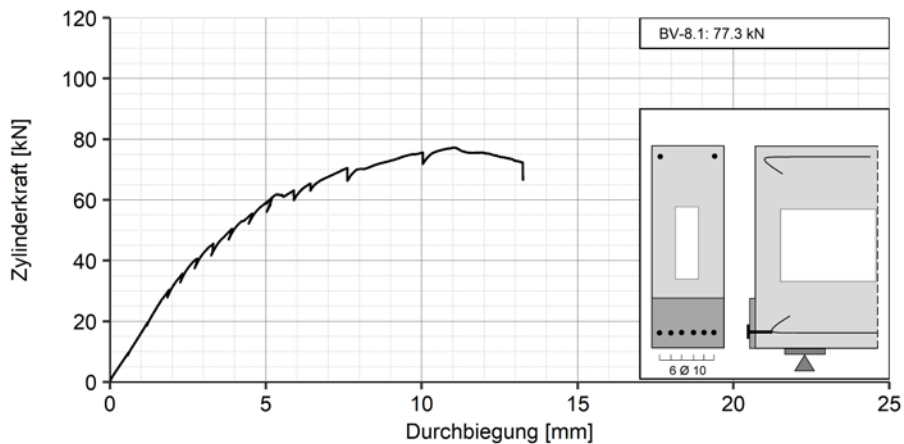


Abbildung C-21: Kraft-Durchbiegungs-Diagramm BV-8.1

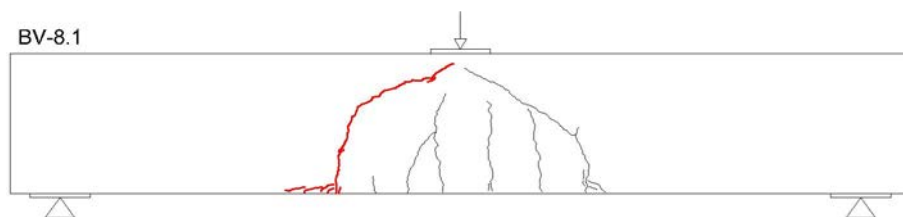


Abbildung C-22: Rissbild des Prüfkörpers am Versuchsende



Abbildung C-23: Geöffneter Prüfkörper,  
Haken wurden nicht aufgebogen

Abbildung C-24: Geöffneter Prüfkörper,  
Haken wurden nicht aufgebogen



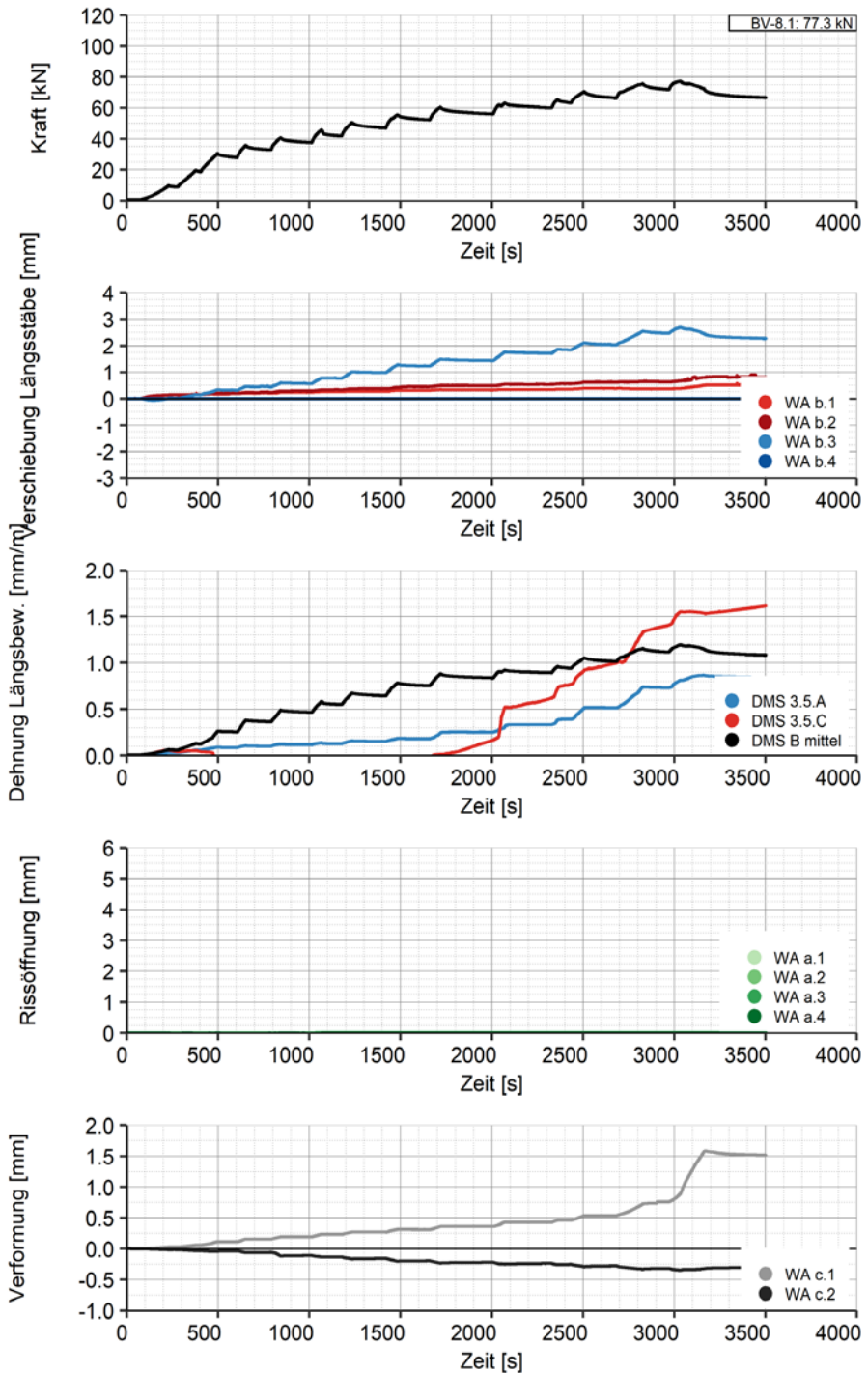


Abbildung C-25: Messergebnisse Wegaufnehmer und Dehnmessstreifen BV-8.1

**BV-9**

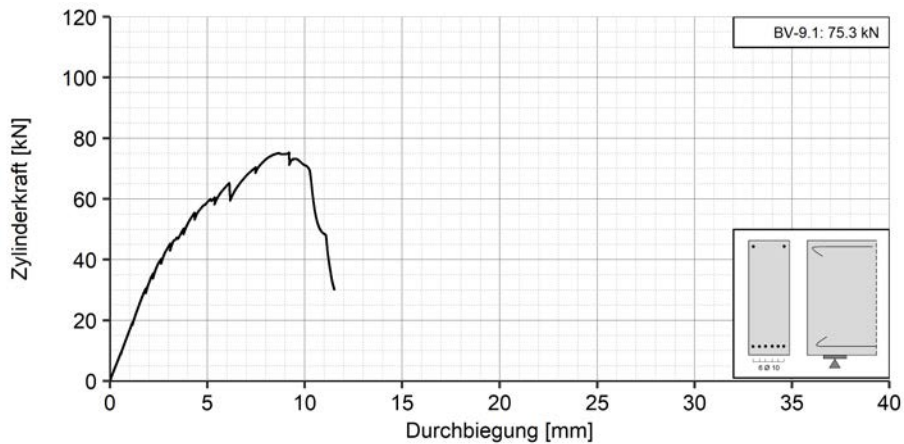


Abbildung C-26: Kraft-Durchbiegungs-Diagramm BV-9.1

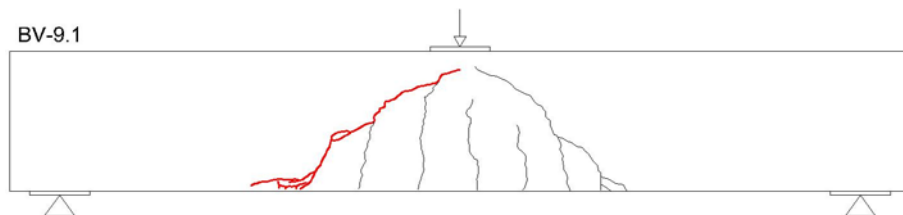


Abbildung C-27: Rissbild des Prüfkörpers am Versuchsende

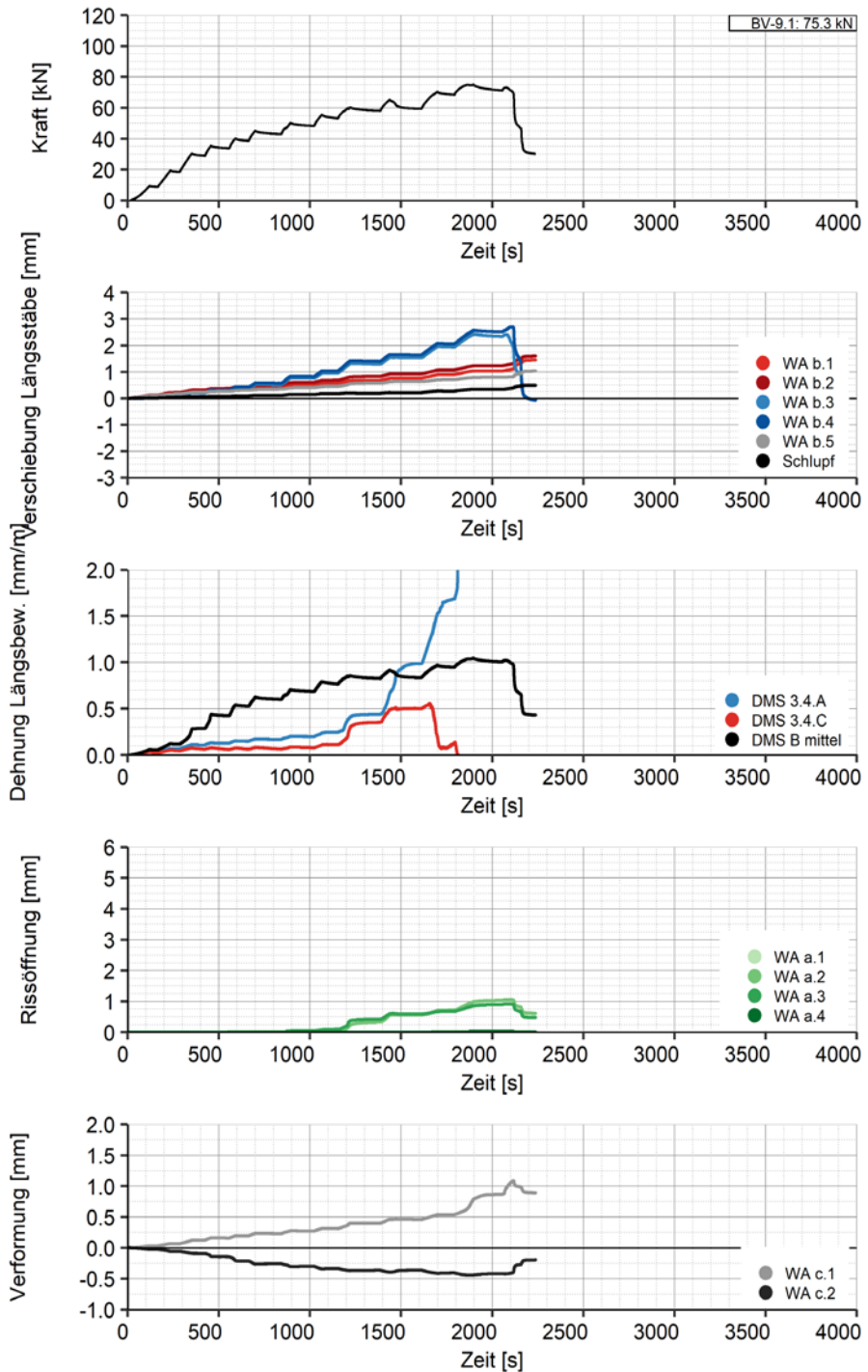


Abbildung C-28: Messergebnisse Wegaufnehmer und Dehnmessstreifen BV-9.1

**BV-10**

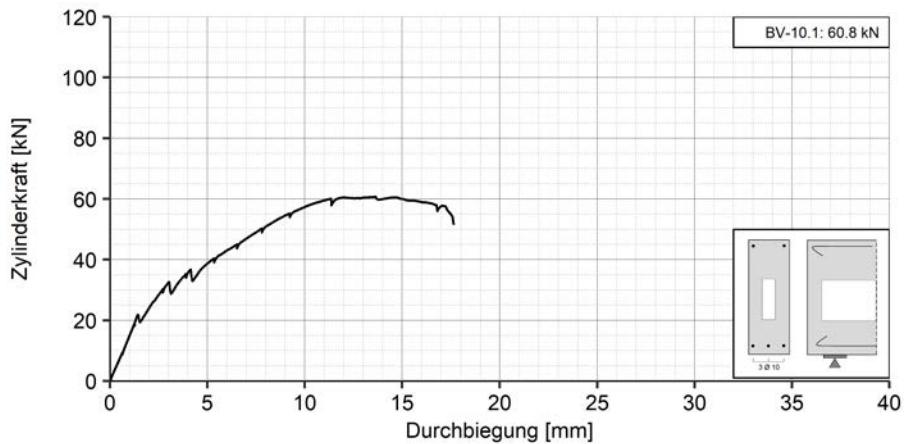


Abbildung C-29: Kraft-Durchbiegungs-Diagramm BV-10.1

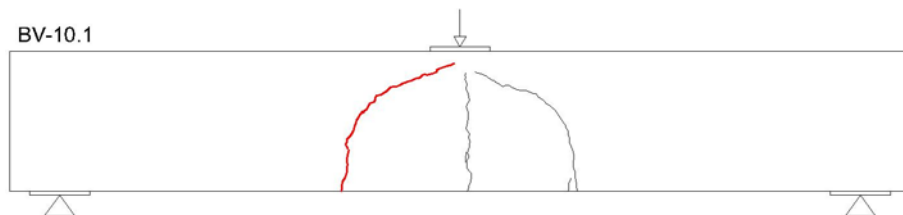


Abbildung C-30: Rissbild des Prüfkörpers am Versuchsende



Abbildung C-31: Geöffneter Prüfkörper, Haken wurden nicht aufgebogen

Abbildung C-32: Geöffneter Prüfkörper, Haken wurden nicht aufgebogen

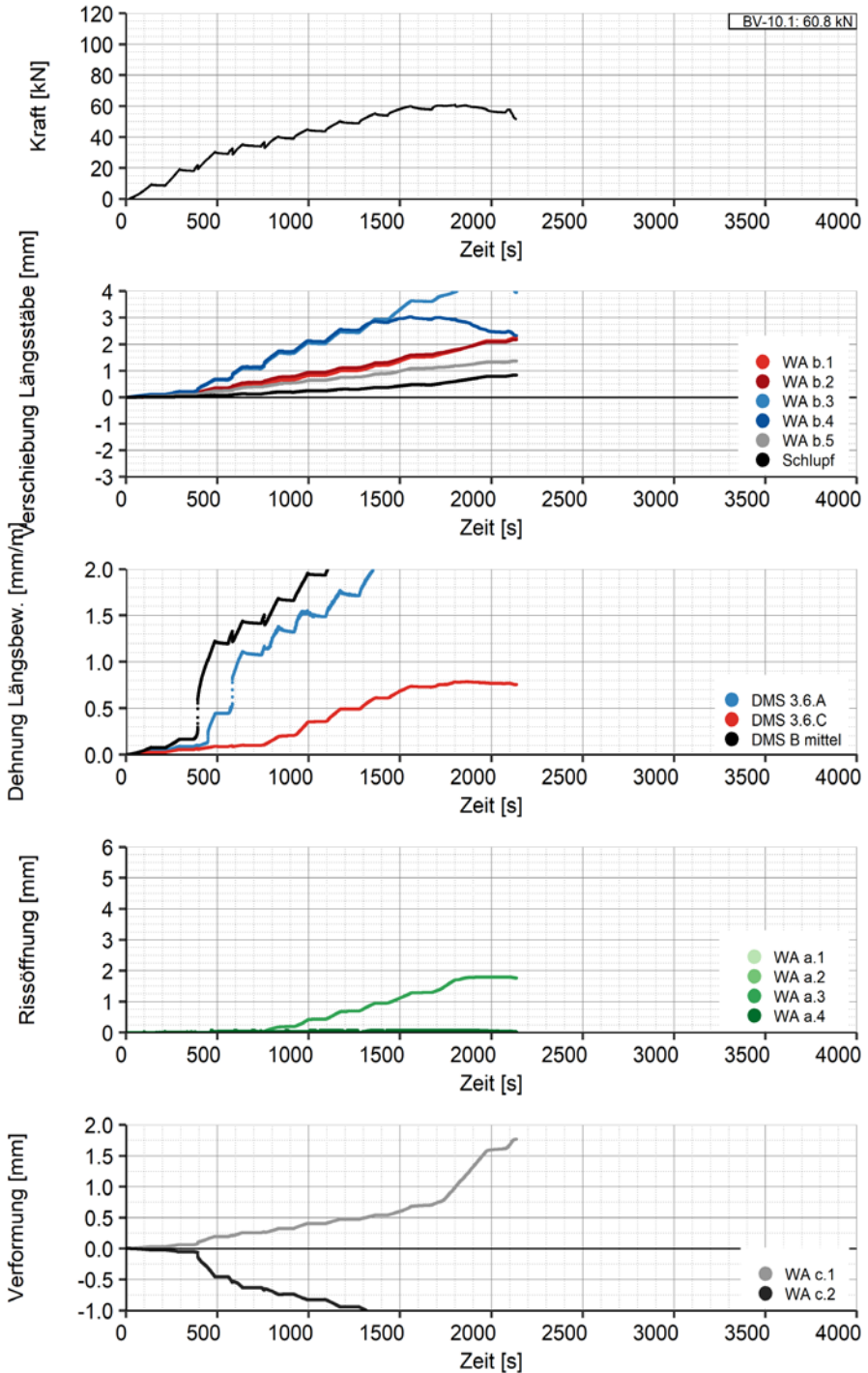


Abbildung C-33: Messergebnisse Wegaufnehmer und Dehnmessstreifen BV-10.1

**BV-12**

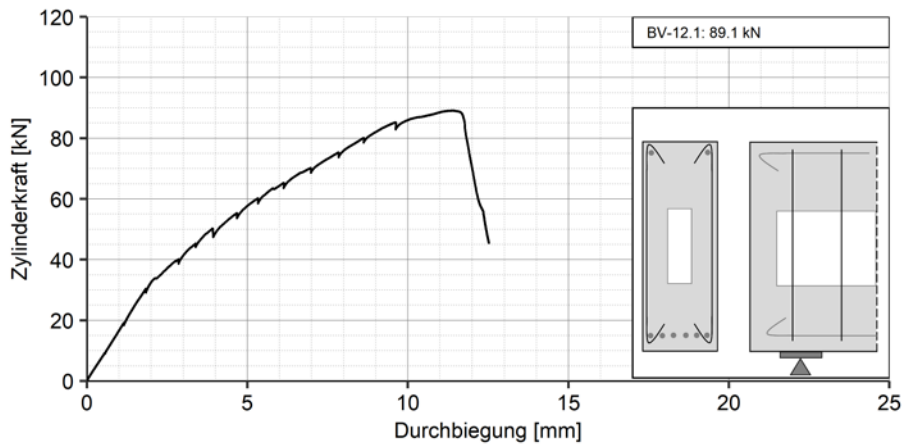


Abbildung C-34: Kraft-Durchbiegungs-Diagramm BV-12.1

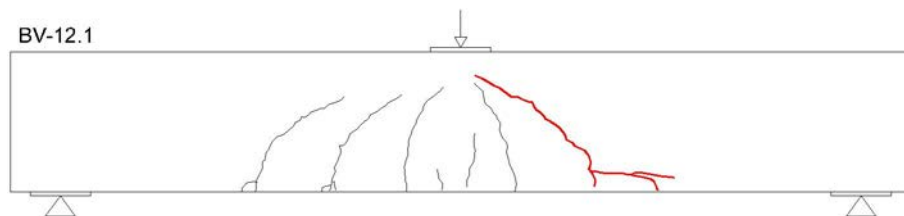


Abbildung C-35: Rissbild des Prüfkörpers am Versuchsende



Abbildung C-36: Geöffneter Prüfkörper, Haken wurden nicht aufgebogen

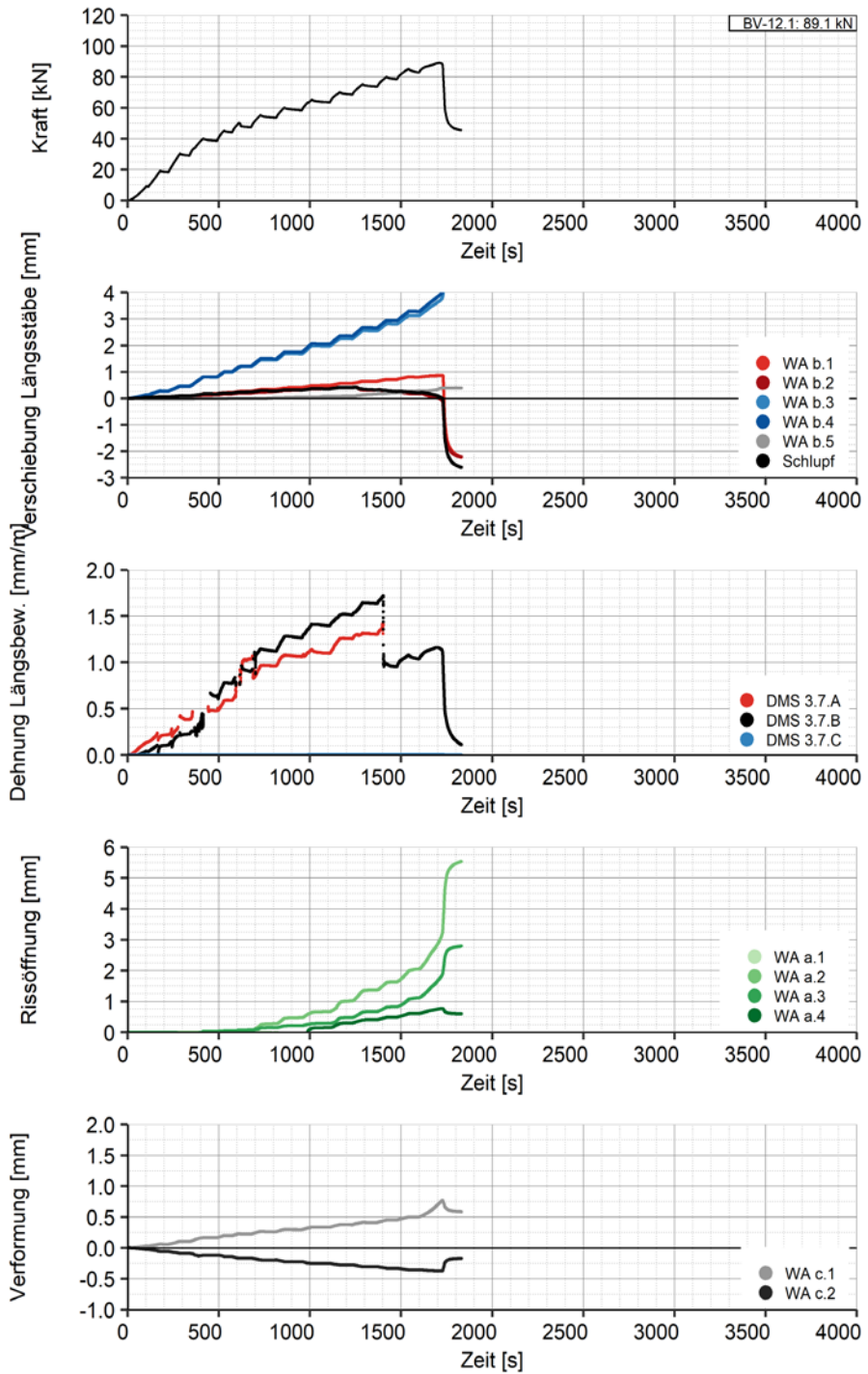


Abbildung C-38: Messergebnisse Wegaufnehmer und Dehnmessstreifen BV-12.1



**BV-13**

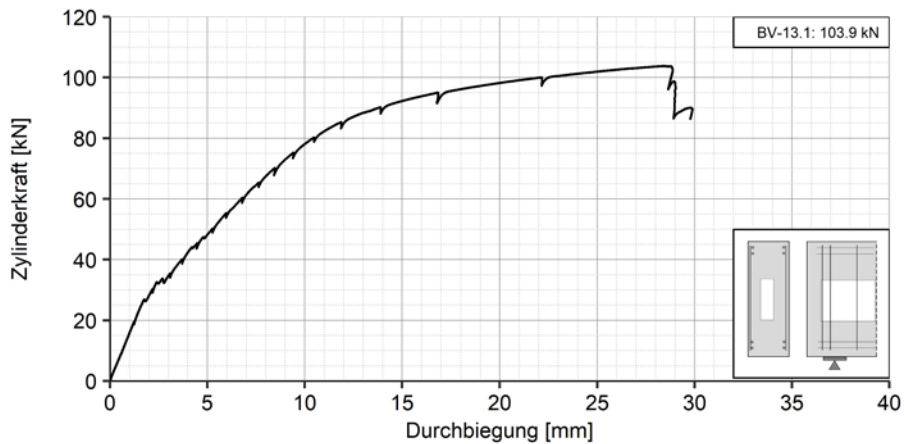


Abbildung C-39: Kraft-Durchbiegungs-Diagramm BV-13.1

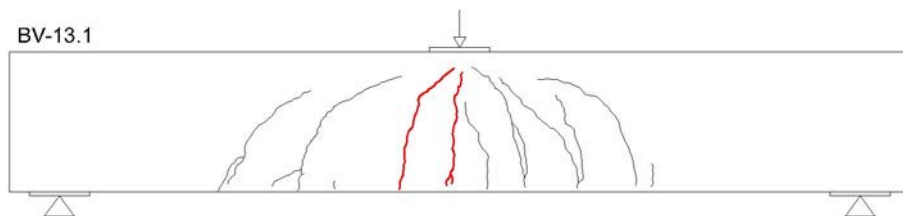


Abbildung C-40: Rissbild des Prüfkörpers am Versuchsende



Abbildung C-41: Geöffneter Prüfkörper



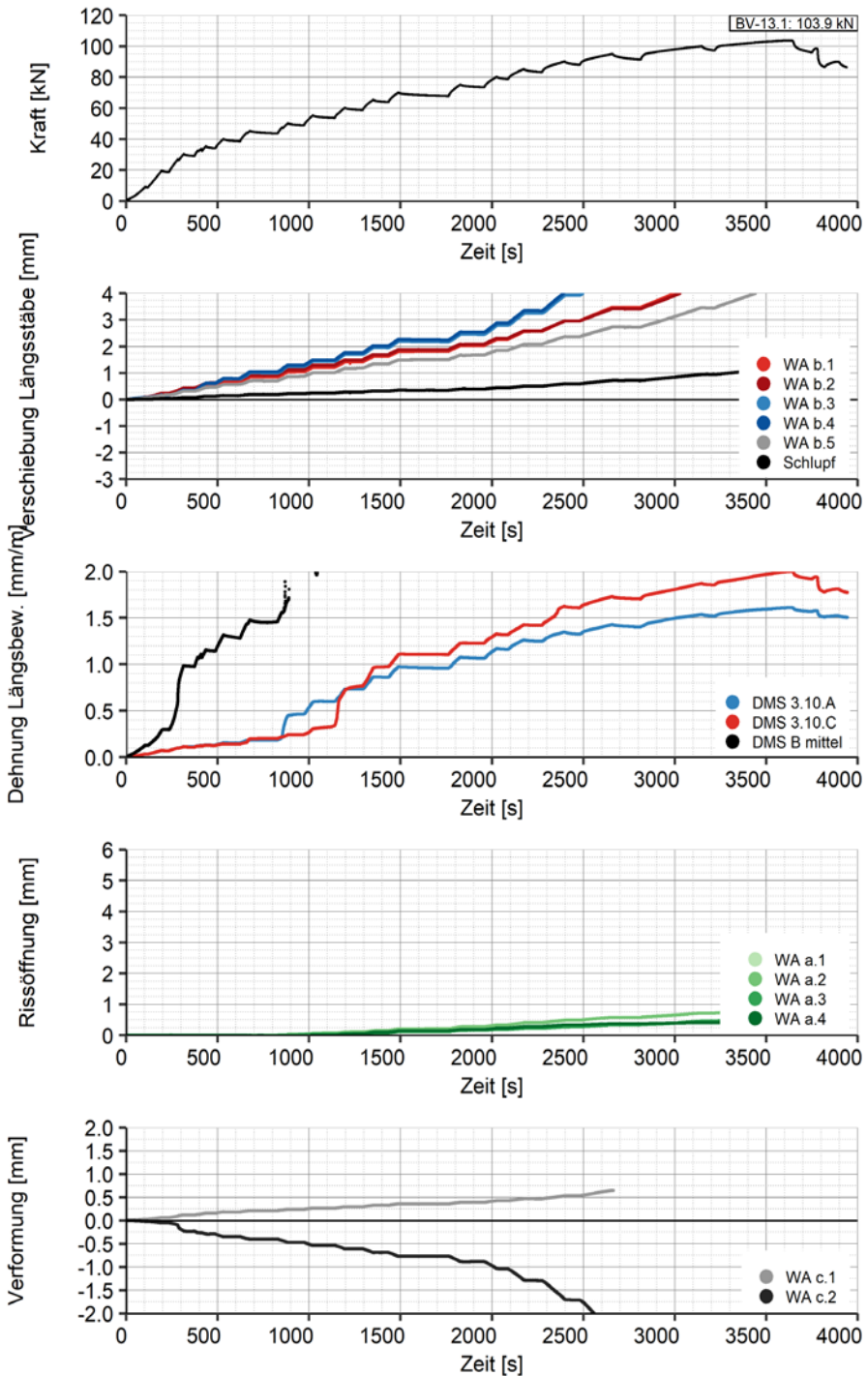


Abbildung C-42: Messergebnisse Wegaufnehmer und Dehnmessstreifen BV-13.1

**BV-14**

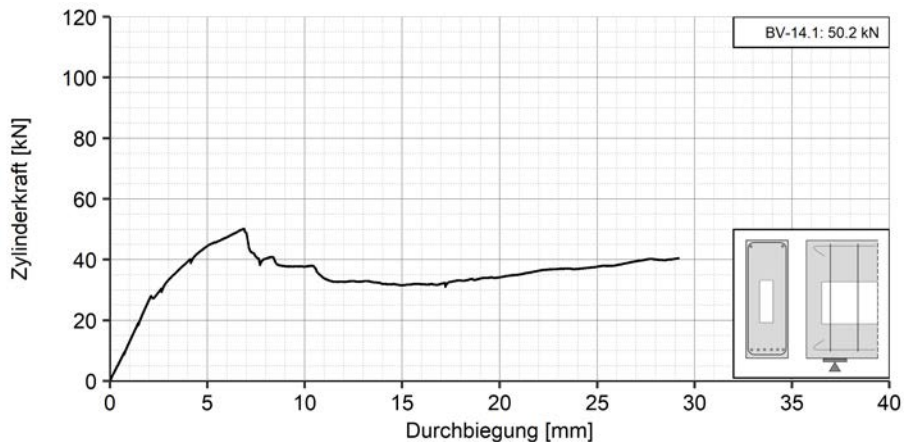


Abbildung C-43: Kraft-Durchbiegungs-Diagramm BV-14.1

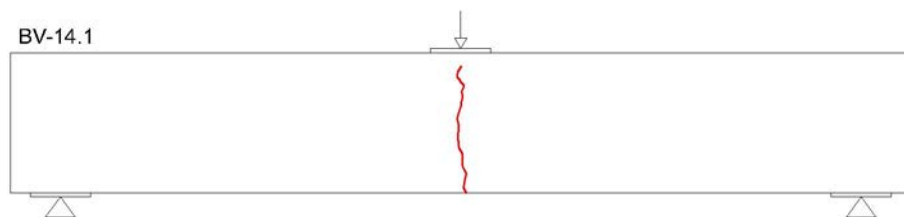


Abbildung C-44: Rissbild des Prüfkörpers am Versuchsende



Abbildung C-45: Geöffneter Prüfkörper, Haken wurden nicht aufgebogen

Abbildung C-46: Geöffneter Prüfkörper, Haken wurden aufgebogen

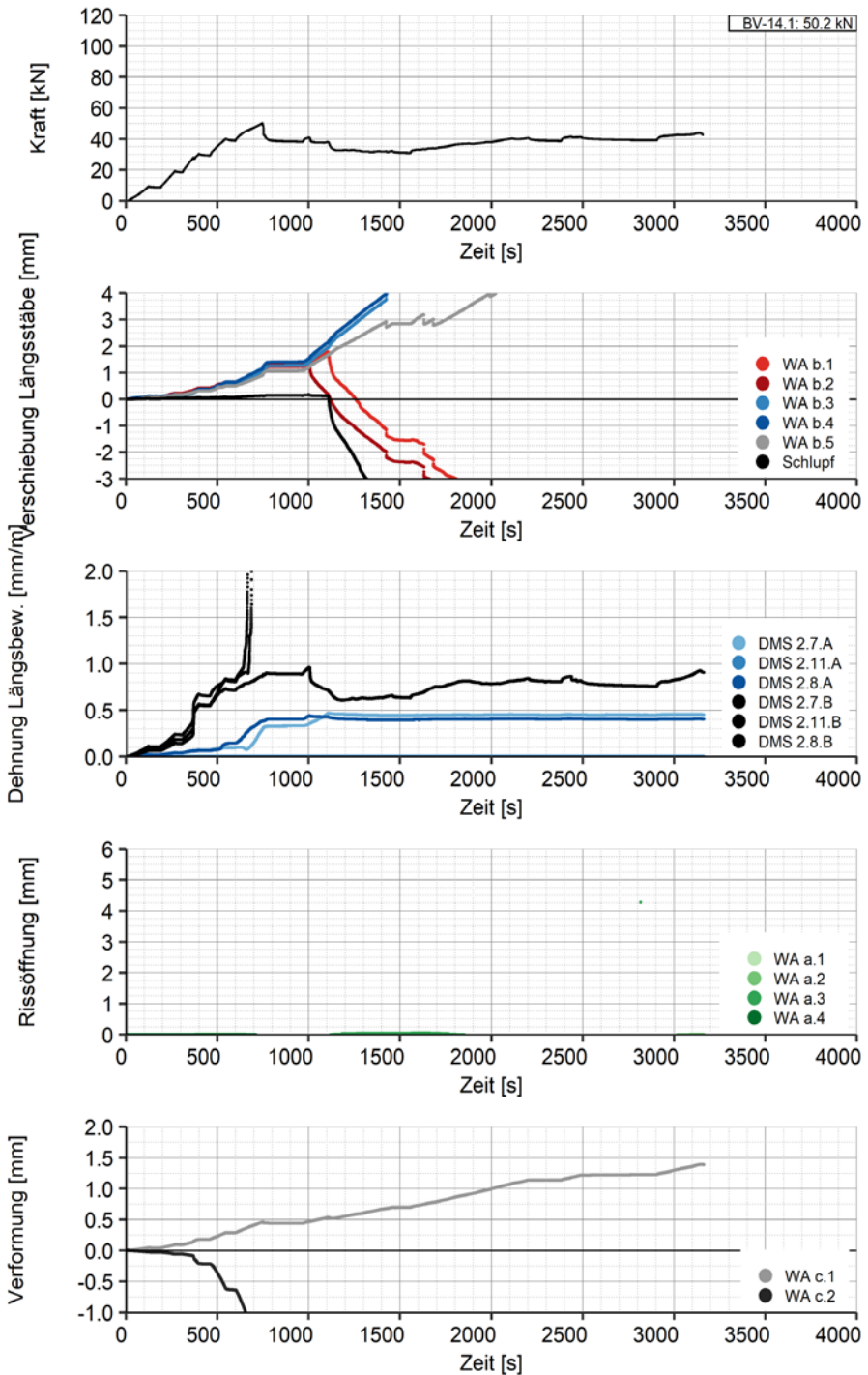


Abbildung C-47: Messergebnisse Wegaufnehmer und Dehnmessstreifen BV-14.1

**BV-15**

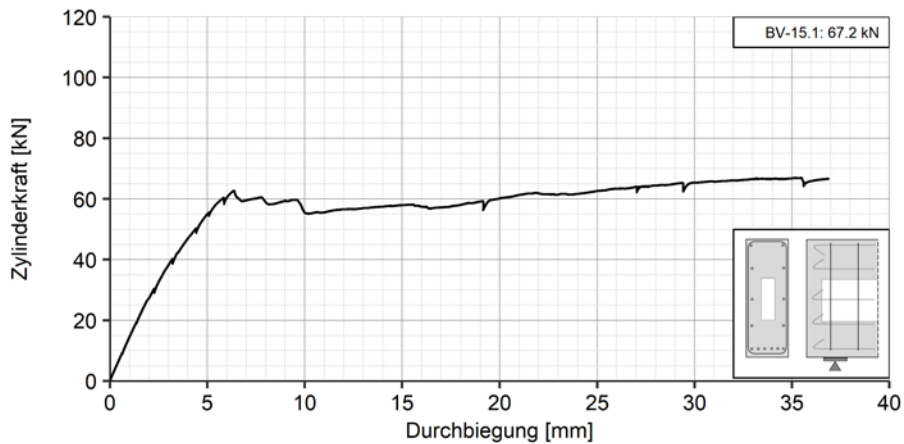


Abbildung C-48: Kraft-Durchbiegungs-Diagramm BV-15.1



Abbildung C-49: Rissbild des Prüfkörpers am Versuchsende



Abbildung C-50: Geöffneter Prüfkörper, Haken wurden aufgebogen



Abbildung C-51: Geöffneter Prüfkörper, Haken wurden nicht aufgebogen

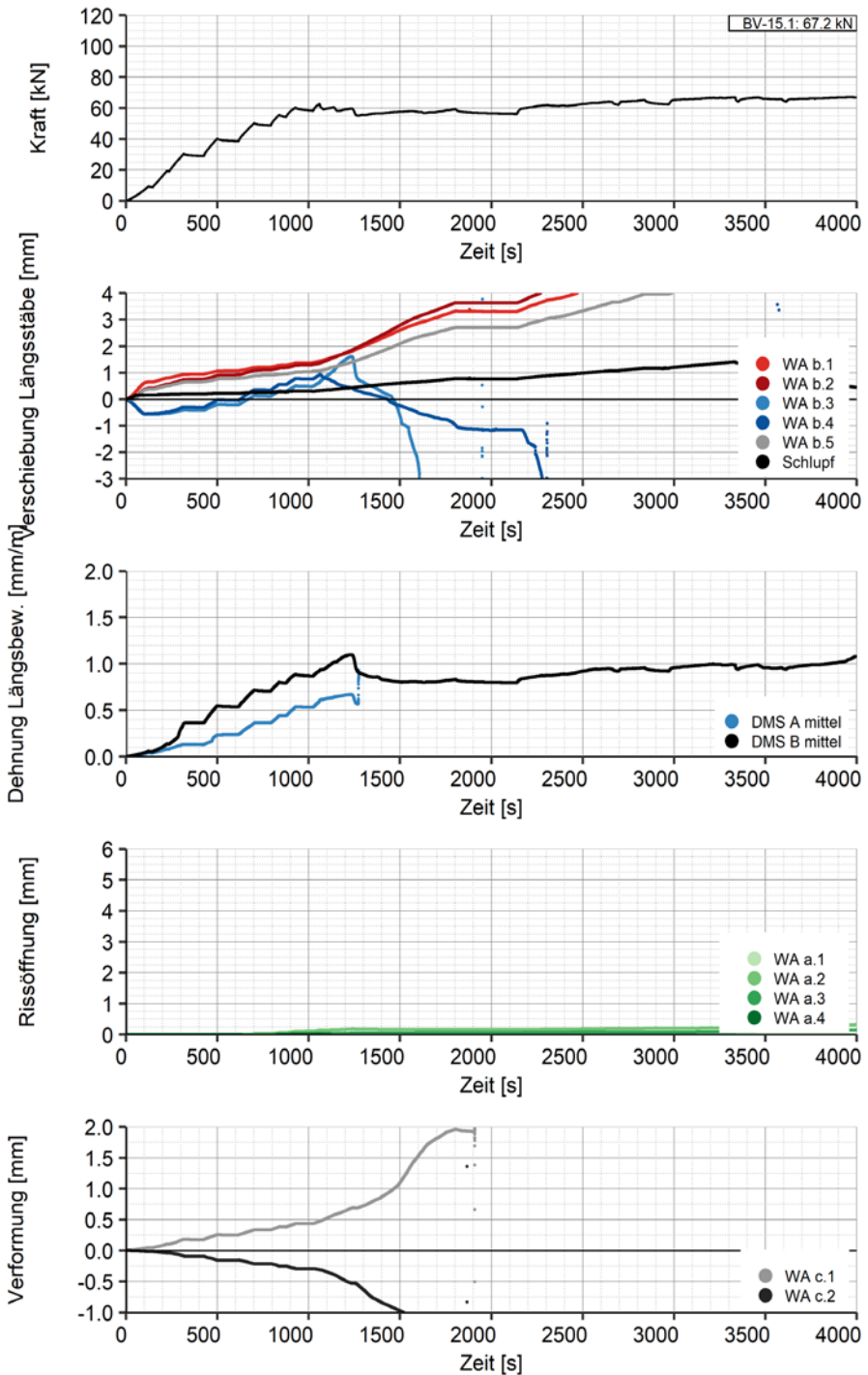


Abbildung C-52: Messergebnisse Wegaufnehmer und Dehnmessstreifen BV-15.1



## **Anhang D Lebenslauf**

### **Persönliche Daten**

Name: Martina Henseler, geb. Schwetz

### **Schulischer und beruflicher Werdegang**

- seit 11/2022: technische Leitung bei HUF HAUS GmbH & Co. KG
- 10/2021 – 10/2022: Ingenieurin in der technischen Planungsabteilung bei HUF HAUS GmbH & Co. KG
- 10/2020 – 09/2021: Leitung Technik und Normung bei Bundesverband Leichtbeton e.V. in Neuwied
- 11/2014 – 09/2020: Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Hochschule Koblenz am Fachgebiet konstruktiver Ingenieurbau im Fachbereich Bauwesen in Vollzeit bei Prof. Dr.-Ing. R. Zeitler
- 11/2014 – 12/2015: Nebentätigkeit als Ingenieurin bei Sahn-Ingenieure in Koblenz
- 02/2014 – 10/2014: Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Hochschule Koblenz am Fachgebiet konstruktiver Ingenieurbau im Fachbereich Bauwesen in Teilzeit bei Prof. Dr.-Ing. R. Zeitler
- 05/2012 – 10/2014: Ingenieurin in der Tragwerksplanung im Hoch-, Ingenieur- und Brückenbau bei Sahn-Ingenieure in Koblenz in Teilzeit
- 03/2012 – 02/2014: Studium des Bauingenieurwesens an der Hochschule Koblenz mit dem Abschluss „M.Eng., Master of Engineering“
- 03/2009 – 03/2012: Studium des Bauingenieurwesens an der Hochschule Koblenz mit dem Abschluss „B.Eng., Bachelor of Engineering“