

Diploma Thesis

# **Experimental investigations of the shear load bearing behavior of carbon reinforced UHPC beams**

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieur  
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

---

DIPLOMARBEIT

## **Experimentelle Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit von carbonbewehrten UHPC Trägern**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs  
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Marin Jukicic, BSc.**

Matr.Nr.: 1125042

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Benjamin Kromoser**

Institut für Tragkonstruktion  
Forschungsbereich für Stahlbeton- und Massivbau E212-2  
Technische Universität Wien,  
Karlsplatz 13/212-2, A-1040 Wien

Wien, im März 2019

---



## **Danksagung**

Diese Diplomarbeit entstand im Jahr 2018 am Institut für Tragkonstruktion im Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau. Nach einer lehrreichen und anspruchsvollen Studienzeit an der Technischen Universität Wien, endet mit dieser Diplomarbeit mein Studium an der Universität.

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn O. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Johann Kollegger, für die Möglichkeit das Studium mit einer innovativen Forschungsarbeit abzuschließen, bedanken. Ein weiterer Dank ergeht an Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Benjamin Kromoser für das Betreuen der experimentellen Untersuchungen und für die hilfreichen Anregungen sowie die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit.

Der größte Dank gilt meiner Familie. Meinen Eltern möchte ich für die bedingungslose Unterstützung und die moralische Vorbildwirkung während meiner Studienzeit danken. Meinen Schwestern danke ich dafür, dass sie stets ein offenes Ohr hatten und mir immer motivierend zur Seite gestanden sind.

---

## Kurzfassung

Die Verwendung von Hochleistungswerkstoffen im Betonbau ist mit einem hohen Energieeinsatz verbunden. Deshalb ist eine materialeffiziente Planung eine wesentliche Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit von carbonbewehrten Bauteilen aus UHPC. Im Rahmen des Forschungsprojekts „Sustainable building with textile reinforced ultra-high performance concrete“, wurde an der TU Wien in den Jahren 2016 bis 2017 das Tragverhalten von carbonbewehrten UHPC-Bauteilen untersucht. Unter der Berücksichtigung des materialeffizienten Einsatzes der Hochleistungsmaterialien, sind im Zuge des Forschungsprojektes schlanke Versuchskörper aus textilbewehrtem UHPC entwickelt worden. Bei den Versuchskörpern handelt es sich um zwei Ausführungsvarianten eines T- Trägers und eines Deckenelementes. [11] Die Versuchskörper sind in Fertigteilbauweise hergestellt worden. In zwei Versuchsreihen ist das Biege- und Querkrafttragverhalten dieser Versuchskörper untersucht worden. Dieser Diplomarbeit liegt die Versuchsreihe zur Untersuchung des Querkrafttragverhaltens der carbonbewehrten Versuchskörper zugrunde. Das Ziel dieser Diplomarbeit ist es, anhand der durchgeführten Versuche das Querkrafttragverhalten der Versuchskörper zu beschreiben. Um den Einfluss von auflagnahen Einzellasten zu untersuchen, ist die Schubslankheit bei den einzelnen Versuchskörperkonfigurationen variiert worden. Im ersten Abschnitt dieser Arbeit wird auf die Hochleistungswerkstoffe UHPC und die textilen Bewehrungselemente eingegangen. Es werden die wesentlichen Eigenschaften der einzelnen Werkstoffe erläutert. Anschließend wird der Stand der Kenntnisse des Verbundwerkstoffes TRUHPC (Textile Reinforced Ultra- High Performance Concrete) und erste Ansätze zur Berechnung der Querkrafttragfähigkeit wiedergegeben. Im letzten Abschnitt werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen erläutert und die Versagensmechanismen der einzelnen Konfigurationen der Versuchskörper bestimmt. Anhand dieser Versuchsergebnisse wird die Aussagekraft der angeführten Berechnungsansätze geprüft.

---

## Abstract

The use of high-performance materials in concrete construction requires a high amount of energy. Therefore, careful planning focusing on material efficiency is required if carbon-reinforced structural elements of UHPC are to be applied economically. Within the scope of the research project “Sustainable building with textile reinforced ultra-high performance concrete”, scientists at the TU Wien were doing research on the bearing behavior of carbon reinforced UHPC components in the years 2016 to 2017. In the course of the research project, slender test specimens of textile-reinforced UHPC were developed, with the use of high-performance materials being considered under aspects of material efficiency. These test specimens were two design variants of a T-beam as well as ceiling elements. [11] The test specimens were manufactured as precast elements. In two test series, the bending and shear bearing behaviour of these test specimens was investigated. This diploma thesis is based on the test series analysing the shear bearing behaviour of the carbon-reinforced test specimens, and its aim is to describe the shear bearing behaviour of the test specimens on the basis of the experiments carried out. To investigate the influence of single loads near supports, the shear slenderness of the individual test specimen configurations was varied. In the first section of this diploma thesis, the most important properties of the high-performance materials UHPC and textile reinforcing elements were described. Subsequently, the states of knowledge regarding the composite material TRUHPC (Textile-Reinforced Ultra-High Performance Concrete) as well as first approaches for calculating shear force resistance are outlined. In the last section, the results of the experimental tests are discussed and the failure mechanisms of the individual configurations of the test specimens are addressed. The obtained experimental results provide a basis for the validation of applied calculations.

## Abkürzungsverzeichnis

### Allgemein

AR- Glas	... <u>A</u> lkaliresistentes Glas
CFK	... <u>C</u> arbonfaserverstärkter <u>K</u> unststoff
E- Glas	... <u>E</u> lektro- Glas
E- Modul	... <u>E</u> lastizitäts <u>m</u> odul
FVK	... <u>F</u> aserverbund <u>k</u> unststoff
HM	... hochmodulige Faser
HS	... hochfeste Faser
IWA	... <u>i</u> nduktive <u>W</u> eg <u>a</u> ufnehmer
$l_f$	... <u>F</u> aserlänge
LM	... niedrigmodulige Faser
TRUHPC	... <u>T</u> extile <u>R</u> einforced <u>U</u> ltra- <u>H</u> igh <u>P</u> erformance <u>C</u> oncrete
UHPC	... <u>U</u> ltra- <u>H</u> igh <u>P</u> erformance <u>C</u> oncrete
$V_c$	... Vertikalkomponente der Betondruckkraft
$V_d$	... Vertikalkomponente aus der Dübelwirkung der Längsbewehrung
$V_i$	... Vertikalkomponente aus der Rissverzahnung
$V_p$	... Vertikalkomponente der Vorspannung
$V_{sw}$	... Vertikalkomponente der Querkraftbewehrung
VSP	... Vorspannung
W/B- Wert	... <u>W</u> asser <u>b</u> indemittelwert
W/Z- Wert	... <u>W</u> asser <u>z</u> ementwert
XPS	... <u>E</u> xtrudiertes <u>P</u> olystyrol

### Formelzeichen

$a/d$	... Schubslankheit
$A_c$	... Betonfläche
$A_r$	... Rovingquerschnittsfläche
$A_{sw}$	... Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung
$A_{t,v}$	... Querschnittsfläche der textilen Querkraftbewehrung
$a_{t,v}$	... Querschnittsfläche der textilen Querkraftbewehrung pro Meter
$\alpha$	... Zugstrebenneigung
$\alpha_c$	... Abminderungsfaktor nach VOSS
$\alpha_{cw}$	... Beiwert zur Berücksichtigung des Spannungszustands im Druckgurt
$b_{s,eff}$	... effektive Stegbreite
$b_w$	... Stegbreite
$b_{w,red}$	... effektive Stegbreite nach MOLTER
$\beta$	... Beiwert zur Berücksichtigung auflagernaher Einzellasten
$\beta_r$	... Schubbrisswinkel
$c$	... Betondeckung
$c/d_p$	... bezogene Betondeckung
$C_{Rd,c}$	... Kalibrierungsfaktor nach EC2
$C_{Rm,c}$	... Kalibrierungsfaktor nach KULAS
$d$	... statische Nutzhöhe
$\Delta l$	... Dehnung des Textilgarns
$d_p$	... Stabdurchmesser
$d_t$	... Rovingdurchmesser
$\delta$	... Beiwert zur Berücksichtigung der Dübelwirkung
$E_c$	... Elastizitätsmodul des Betons
$E_{c,m}$	... mittlerer Elastizitätsmodul des Betons
$E_t$	... Elastizitätsmodul des Textils
$f$	... Feinheit
$f_{ck}$	... charakteristische Betondruckfestigkeit
$f_{cm}$	... Mittelwert der Betondruckfestigkeit
$f_{cm}$	... mittlere Betondruckfestigkeit
$f_{ct,fl,m}$	... mittlere Biegezugfestigkeit des Betons

---

$f_{t,u}$	... Zugfestigkeit des Textils
$f_{ywd}$	... Bemessungswert der Streckgrenze der Querkraftbewehrung
$h_{f,i}$	... Flanschhöhe
$k$	... Maßstabsfaktor
$k_1$	... Beiwert zur Anrechnung der Normalspannung
$k_w$	... Begrenzung der Zugfestigkeit der Querkraftbewehrung
$k_\alpha$	... Abminderungsfaktor infolge schiefwinkliger Beanspruchung
$l_{pt}$	... Übertragungslänge
$\eta_1$	... Korrekturfaktor für Leichtbeton
$\theta$	... Druckstrebenneigung
$\omega_v$	... steifigkeitsbezogener Bewehrungsgrad
$\varphi$	... Endkriechzahl
$\rho$	... Dichte
$\rho_l$	... Längsbewehrungsgrad
$s$	... Schlupf
$s_{g,o}$	... Schlupf am verankernden Ende
$s_{g,u}$	... Schlupf am unteren durchlaufenden Ende
$s_{R\ddot{o},u}$	... Bruchrissöffnung des Versagensrisses
$s_{RG,u}$	... Bruchrissgleitung des Versagensrisses
$\sigma_{cp}$	... mittlere Betonspannung infolge Normalkraft
$\sigma_r$	... Rovingspannung
$\sigma_t$	... Textilspannung
$\sigma_x$	... Längsspannung
$\tau$	... Verbundspannung
$v_{min}$	... Faktor für Festigkeitsabminderung infolge Rissbildung
$V_{Rd,c}$	... Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit für Stahlbetonbauteile ohne Querkraftbewehrung EC2
$V_{Rd,max}$	... Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit der Betondruckstrebe nach EC2
$V_{Rd,s}$	... Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit der Querkraftbewehrung nach EC2
$V_{Rm}$	... Gesamtquerkrafttragfähigkeit nach KULAS
$V_{Rm,c}$	... Betontraganteil der Querkrafttragfähigkeit nach KULAS
$V_{Rm,f}$	... Fachwerkanteil der Querkrafttragfähigkeit nach KULAS
$w$	... Durchbiegung
$z$	... innerer Hebelsarm

## Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b> .....	<b>I</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>II</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>III</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung &amp; Zielsetzung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Einleitung.....	1
1.2 Problemstellung.....	1
1.3 Zielsetzung.....	1
<b>2 Werkstoffe</b> .....	<b>2</b>
2.1 Ultrahochfester Beton.....	2
2.1.1 Allgemeines [1] & [2].....	2
2.1.2 Ausgangsstoffe [1] & [2].....	3
Gesteinskörnung.....	3
Zement .....	3
Fließmittel .....	3
Füllerstoffe.....	3
Fasern .....	4
2.1.3 Mechanische Festigkeiten.....	5
Einaxiale Druckfestigkeit [2].....	5
Mehraxiale Druckfestigkeit [6].....	5
Einaxiale Zugfestigkeit [2].....	6
2.1.4 Zeitabhängige Werkstoffeigenschaften von UHPC.....	7
Kriechen [2].....	7
Schwinden [1].....	7
2.1.5 Dauerhaftigkeit.....	7
Carbonatisierung [2].....	7
Frost- & Frost- Tausalz- Widerstand [2].....	7
Brandwiderstand [2] .....	7
2.2 FVK- Faserverbundkunststoffe .....	8
2.2.1 Allgemeines [10].....	8
2.2.2 Stabförmige Bewehrung [15].....	9
2.2.3 Textile [12].....	10
Feinheit .....	11
Faser.....	12
Filament.....	12
Roving.....	12
Kette, Kettfaden .....	12
Schuss, Schussfaden .....	12

2.3	Bauen mit UHPC .....	12
2.3.1	Wild- Brücke [13].....	12
2.3.2	Pavillon, RWTH Aachen [14] .....	13
<b>3</b>	<b>Stand der Kenntnisse .....</b>	<b>15</b>
3.1	Einleitung.....	15
3.2	FVK- Bewehrungsstäbe in ultrahochfestem Beton.....	15
3.2.1	Allgemeines.....	15
3.2.2	Verbundverhalten von FVK- Bewehrungsstäben in ultrahochfestem Beton [15].....	15
	Verbundeigenschaften von UHPC .....	15
	Verbundverhalten der FVK- Bewehrung .....	15
3.2.3	Vorspannen von CFK- Stäben.....	18
	Das Prinzip der Vorspannung [16].....	18
	Vorspannen in ultrahochfestem Beton [17], [18] .....	18
	Endverankerung von CFK- Zugstäben [19] .....	20
3.3	TRUHPC- Textile Reinforced Ultra- High Performance Concrete .....	22
3.3.1	Allgemeines.....	22
3.3.2	Zugtragverhalten von textilbewehrten Betonelementen.....	22
	Zugtragverhalten des Bewehrungsmaterials [23] .....	22
	Zugtragverhalten des Verbundwerkstoffes [23] .....	24
3.3.3	TRUHPC unter einaxialer Druckbeanspruchung [25] .....	26
3.3.4	Verbundverhalten textiler Bewehrung [23], [26] .....	27
3.4	Querkrafttragverhalten .....	30
3.4.1	Allgemeines [16].....	30
3.4.2	Querkrafttragverhalten von textilbewehrten Bauteilen [23] .....	33
3.4.3	Querkraftmodelle.....	36
	Bemessungsansatz nach Eurocode 2 .....	36
	Bemessungsansatz nach KULAS [23]: modifizierter Ansatz nach VOSS .....	37
<b>4</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen .....</b>	<b>40</b>
4.1	Allgemeines.....	40
4.2	Verwendete Materialien.....	40
4.2.1	Ultrahochfester Beton .....	40
4.2.2	Textile.....	42
4.2.3	CFK- Stäbe [30].....	42
4.3	Herstellung der Versuchskörper.....	42
4.3.1	Versuchskörper.....	43
	Träger .....	43
	Herstellung der Vorspannung [30].....	44
	Deckenelemente .....	46
4.4	Versuchsprogramm .....	46
4.4.1	Allgemeines.....	46

---

4.4.2	Versuchsaufbau .....	47
4.4.3	Messtechnik.....	50
4.4.4	Versuchskonfigurationen .....	53
<b>5</b>	<b>Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen.....</b>	<b>57</b>
5.1	Allgemeines.....	57
5.2	Träger .....	57
5.2.1	Trägerkonfiguration .....	58
5.2.2	Versuchsergebnisse bei einer Schubslankheit von $a/d= 2,5$ .....	59
5.2.3	Versuchsergebnisse bei einer Schubslankheit von $a/d= 3,0$ .....	64
5.2.4	Versuchsergebnisse bei einer Schubslankheit von $a/d= 3,5$ .....	68
5.2.5	Versuchsergebnisse bei einer Schubslankheit von $a/d= 4,0$ .....	72
5.2.6	Einfluss der Vorspannung.....	76
5.3	Deckenelemente .....	82
5.3.1	Deckenkonfigurationen.....	83
5.3.2	Versuchsergebnisse bei einer Schubslankheit von $a/d= 3,0$ .....	85
5.3.3	Versuchsergebnisse bei einer Schubslankheit von $a/d= 4,0$ .....	88
<b>6</b>	<b>Nachrechnung der Querkraftversuche.....</b>	<b>92</b>
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerung &amp; Ausblick .....</b>	<b>94</b>
7.1	Bestehende Situation .....	94
7.2	Interpretation der Großversuche .....	94
7.3	Ausblick.....	95
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>96</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>98</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>101</b>

## ANHÄNGE A-B3

- A Verwendete Textilie
- B Dokumentation der experimentellen Untersuchungen
- B1 Träger QS1: Querkraftversuche
- B2 Träger QS2: Querkraftversuche
- B3 Deckenelemente: Querkraftversuche

## 1 Einleitung & Zielsetzung

### 1.1 Einleitung

Die Idee zu Textilbeton ist bereits in den 1990er Jahren entstanden. Forscher aus Aachen und Dresden ersetzten die Stahlbewehrung durch textile Gelege aus korrosionsbeständigen Endlos-Hochleistungs- Fasern. Im Zuge dieser Forschung ist 1996 der erste Forschungsbericht zu diesem Thema entstanden. Mit ihrer Arbeit legten sie das Fundament für weitere Forschungen zum Thema Textilbeton. [20] In weiterer Folge entstand an der TU Wien die Idee die textilen Hochleistungsbewehrungselemente mit ultrahochfestem Beton (UHPC), für eine zusätzliche Materialeinsparung, zu kombinieren. [11] UHPC zeichnet sich vor allem durch eine sehr hohe Druckfestigkeit von über  $150 \text{ N/mm}^2$  aus. Darüber hinaus besitzt UHPC aufgrund seines sehr dichten Gefüges eine hohe Dauerhaftigkeit. Die verwendeten Textilien bestehen aus Faserverbundkunststoffen (FVK) und erreichen, je nach Fasermaterial und Tränkung, Zugfestigkeiten von über  $3000 \text{ N/mm}^2$ . Als Fasermaterial kommen heutzutage AR- Glas, Basalt und Carbon zum Einsatz. Neben der hohen Zugfestigkeit, zeichnen sich FVK durch ihre Korrosionsbeständigkeit aus. Damit entfällt die Anforderung, den Korrosionsschutz der Bewehrung über die Betondeckung zu gewährleisten. Diese muss lediglich die Einleitung der Verbundspannung in den Beton sicherstellen. Die hohe Druckfestigkeit des UHPC und die Korrosionsbeständigkeit der textilen Bewehrungselemente ermöglichen die Konstruktion schlanker und filigraner Bauteile, welche in üblicher Stahlbetonbaubauweise nicht möglich wären. Um das Tragverhalten von dünnen Bauteilen aus textilbewehrtem UHPC zu untersuchen ist an der TU Wien das Forschungsprojekt „Sustainable building with textile reinforced ultra-high performance concrete“ ins Leben gerufen worden. Das Ziel dieses Forschungsprojekts war es, das Tragverhalten dünnwandiger Bauteile aus carbonbewehrtem Ultrahochleistungsbeton zu beschreiben und die offenen Fragen zu den Verbundmechanismen, zwischen der UHPC- Matrix und den textilen Bewehrungselementen, zu untersuchen. Der Einsatz von Hochleistungswerkstoffen ist immer mit einem hohen Aufwand und Energieeinsatz verbunden. Deshalb ist ein materialeffizienter Einsatz der Werkstoffe Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit textilbewehrter Konstruktionen aus UHPC. Im Unterkapitel 2.3 *Bauen mit UHPC* wird ein Überblick über bereits realisierte Bauprojekte, bei den UHPC und textile Bewehrungselemente zum Einsatz gekommen sind, gegeben.

### 1.2 Problemstellung

Das Querkrafttragverhalten von textilbewehrten Trägern aus UHPC ist derzeit noch unzureichend untersucht worden. Im Zuge der Vorbereitungen zur Versuchsdurchführung sind dabei folgenden Fragen aufgekommen:

- Welche Mechanismen führen zum Versagen der Versuchskörper?
- Wie groß ist der Einfluss der Schubslankheit auf die Querkrafttragfähigkeit?
- Wie gut geben aktuelle Berechnungsmodelle das Querkrafttragverhalten der Versuchskörper wieder?

### 1.3 Zielsetzung

Das Ziel dieser Diplomarbeit war es einen Beitrag zur Beschreibung des Querkrafttragverhalten von textilbewehrten Trägern aus ultrahochfestem Beton zu leisten. Dazu sind im Zuge dieser Diplomarbeit 24 Querkraftversuche, mit variierenden Schubslankheiten und textilem Bewehrungsgrad, an textilbewehrten Trägern aus UHPC durchgeführt worden. Vom besonderen Interesse ist es, die auftretenden Versagensmechanismen zu bestimmen und zu beschreiben.

## 2 Werkstoffe

### 2.1 Ultrahochfester Beton

#### 2.1.1 Allgemeines [1] & [2]

Ultrahochfester Beton (UHPC – Ultra- High Performance Concrete) zeichnet sich vor allem durch seine hohe Druckfestigkeit und eine sehr hohe Dauerhaftigkeit aus. Er kann als Feinkornbeton mit einem Größtkorn von bis zu 1,2 mm oder als Grobkornbeton mit einem Größtkorn von bis zu 16 mm hergestellt werden. Abhängig von seiner Zusammenstellung und dem Herstellungsverfahren können einaxiale Druckfestigkeiten zwischen rd. 150 und 250 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden. Zudem kann die Druckfestigkeit durch eine gezielte thermische Nachbehandlung weiter gesteigert werden.

Die hohe Festigkeit des UHPCs ist auf die geringe Porosität des Zementsteins und den hohen Feinkornanteil im Zementstein zurückzuführen. Dies wird durch den niedrigen Wasser/ Bindemittelwert von rd. 0,20 ermöglicht. Damit liegt dieser unter dem zur vollständigen Hydratation theoretisch erforderlichen Wert von rd. 0,23 bis 0,25. Durch diese Gegebenheit werden die Kapillarporen und die mit Hydratphasen zu füllenden Gefügaporen im Mikrogefüge des Zementsteins stark reduziert. Aufgrund des niedrigen W/B- Wert ist der Einsatz von leitungsfähigen Fließmitteln erforderlich.

Ohne die Zugabe von Fasern verformt sich UHPC bei Druck- und Zugbeanspruchung bis zum Bruch annähernd linear- elastisch. Mit dem Erreichen der Bruchlast versagt das Material explosionsartig und weist kein duktileres Verformungsvermögen auf. Die Stahlfasern ermöglichen eine rissüberbrückende Wirkung und erhöhen so die Duktilität des UHPCs. Forschungen an der Technischen Universität Kassel belegen, dass durch die Zugabe von rd. 1 V-% Stahlfasern, ein ausreichend duktileres Nachbruchverhalten erreicht werden kann.

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass die hohe Leistungsfähigkeit von UHPC im Wesentlichen auf folgenden vier Faktoren beruht:

- einem niedrigen Wasser-/ Bindemittelwert (rd. 0,2)
- einem hohen Feststoffgehalt
- einer hohen Packungsdichte
- dem Einsatz von Fasern für ein duktileres Nachbruchverhalten



**Abb. 2-1:** UHPC- Schale, Paulifurtbrücke bei St. Jakob/ Rosental [3]

Die Einsatzmöglichkeiten von UHPC sind aufgrund seiner Werkstoffeigenschaften sehr vielfältig. Im Kapitel 2.3 *Bauen mit UHPC* wird näher auf diese eingegangen. Beispielhaft für dieses Kapitel wird in **Abb. 2-1** das Tragwerk der Paulifurtbrücke bei St. Jakob/ Rosental in Kärnten angeführt. Bei dieser Brücke handelt es sich um eine trogförmige Rahmenbrücke mit einer Spannweite von

32,0 m. Aufgrund der Forderung des Bauherrn nach einem möglichst wartungsfreien Bauwerk, wurde dem Werkstoff UHPC Vorrang gegenüber einem konventionellen Stahltragwerk gegeben. [3]

### 2.1.2 Ausgangsstoffe [1] & [2]

#### Gesteinskörnung

UHPC kann als Feinkornbeton mit einem Größtkorn von bis zu 1,2 mm oder als Grobkornbeton mit einem Größtkorn von bis zu 16 mm hergestellt werden. Als Zuschlagskörnung eignen sich mehlkornarme Natur- oder Brechsande nach DIN 1164. Damit die hohe Festigkeit vom Zementstein ausgenutzt werden kann, soll der Zuschlag eine möglichst hohe Gesteinsfestigkeit von min. 200 N/mm<sup>2</sup> aufweisen. Eine gebrochene Kornform begünstigt den Verbund mit dem Zementstein. Als Zuschlag eignet sich gebrochener Basalt oder gebrochener Kies mit entsprechenden Eigenschaften.

#### Zement

Da UHPC aufgrund des niedrigen Wasser-/ Bindemittelgehalt einen hohen Zementgehalt besitzt, sind möglichst schwindarme Zemente mit niedrigem C<sub>3</sub>A- Gehalt zu bevorzugen. Zum Einsatz kommt überwiegend C<sub>3</sub>A- armer Portlandzement CEM I HS. In der Regel weisen diese Zemente einen niedrigen Wasseranspruch und eine niedrigere Wärmeentwicklung auf. Dabei werden hauptsächlich Zemente der Festigkeitsklassen 42,5 R oder 52,5 R verwendet.

#### Fließmittel

UHPC weist einen hohen Anteil an Mehlkorn  $\leq 0,125\text{mm}$  (zwischen 350 bis 400 l/m<sup>3</sup>) und einen niedrigen Wassergehalt auf. Dieser niedrige Wassergehalt ist auf den niedrigen Wasser-/ Bindemittelwert zurückzuführen. Dadurch wird der Einsatz leistungsfähiger Fließmittel erforderlich. Zum Einsatz kommen Fließmittel auf Basis von Polycarboxylaten und Polycarboxylatethern. Zu beachten ist, dass Fließmittel das Erstarren und die Festigkeitsentwicklung des Betons verzögern können.

#### Füllerstoffe

Füller übernehmen die Aufgabe, Hohlräume zwischen den Zementpartikeln zu füllen und somit den Wasseranspruch zu reduzieren. Im Frischbeton verdrängen sie das in den Hohlräumen befindliche Wasser und wirken praktisch wie ein Verflüssiger. Typische Füllerstoffe sind z.B. Mikrosilica, Quarz-, Kalkstein- und Basaltmehl.

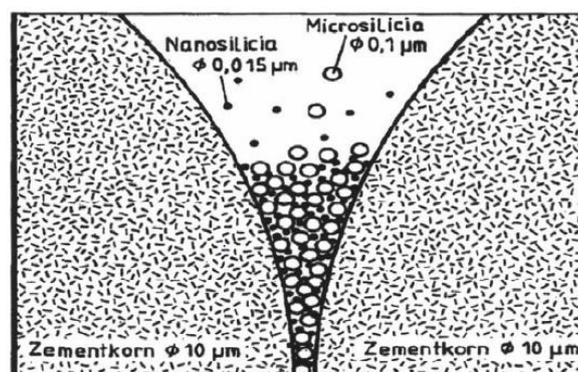


Abb. 2-2: Füllereffekt des Mikrosilica bzw. des Nanosilica [5]

In **Abb. 2-2** wird der Füllereffekt von Mikrosilica schematisch dargestellt. Die Abbildung verdeutlicht den Größenunterschied zwischen den Partikeln des Zements und jenen des Mikrosilicas.

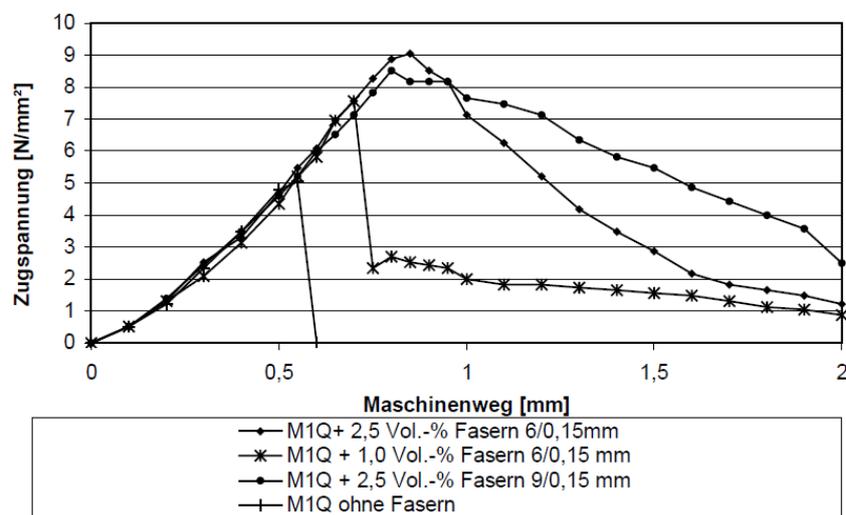
Mirkosilica ist ein Nebenprodukt bei der Herstellung von Silicium- und Ferrosilicium-Legierungen. Die Partikel des Mikrosilica besitzen eine kugelige Form und sind rd. 100-mal feiner als Zementpartikel. Aufgrund dieser Feinheit wirkt es als Mikrofüller und erhöht die Packungsdichte des UHPCs. [4]

Die leicht lösliche Kieselsäure reagiert mit den anderen Bestandteilen des Zements und bildet zusätzliche Reaktionsprodukte, wodurch die Festigkeit und die Dichtigkeit zusätzlich erhöht werden.

### Fasern

Um das Nachbruchverhalten von UHPC zu verbessern, werden dem Beton rd. 1 bis 4 V-% Stahlfasern zugegeben. Untersuchungen haben gezeigt, dass der Einsatz von längeren Fasern ( $l_f = 9,0$  mm), im Vergleich zu kürzeren Fasern ( $l_f = 6,0$  mm), bei Biegezug- und Druckbelastung ein duktileres Nachbruchverhalten ergibt.

In [2] wurde der Einfluss des Fasergehalts und der Faserlänge auf die einaxiale Zugfestigkeit untersucht. Getestet wurden Betone ohne Fasern, mit 1 V-% und 2,5 V-% 6 mm langen Fasern sowie eine Serie mit 2,5 V-% 9 mm langen Fasern. In **Abb. 2-3** ist der Einfluss des Fasergehalts auf die zentrische Zugfestigkeit von UHPC dargestellt. Es wurde bestätigt, dass mit steigendem Fasergehalt die Zugfestigkeit ansteigt. Die höchste Zugfestigkeit ist bei einem Fasergehalt von 2,5 V-% und 9 mm langen Fasern erreicht worden. Diese Kombination hat, im Vergleich zu der Probe ohne Fasern, ihre Zugfestigkeit um rd. 80 % gesteigert. Zudem wurde bestätigt, dass schon ab einem Fasergehalt von rd. 1 V-% das Nachbruchverhalten deutlich verbessert und ein duktileres Versagen erreicht wird.



**Abb. 2-3:** Einfluss des Fasergehalts auf die zentrische Zugfestigkeit von UHPC [2]

### 2.1.3 Mechanische Festigkeiten

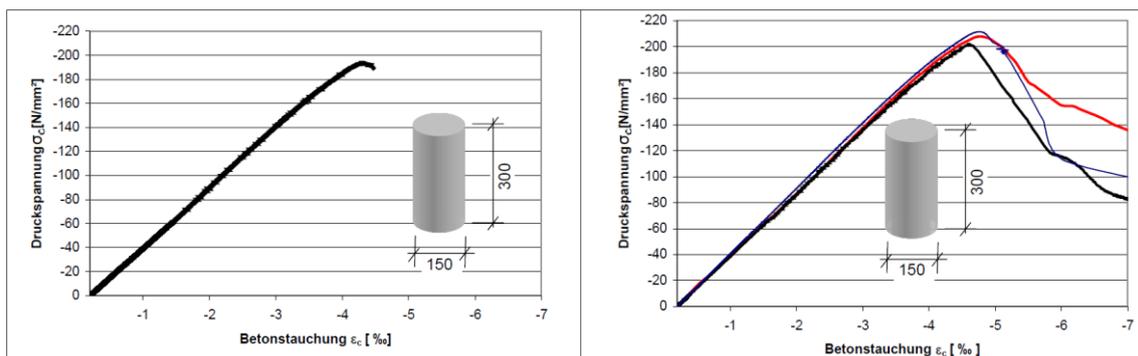
#### Einaxiale Druckfestigkeit [2]

Beim Vergleich des Verformungsverhaltens von UHPC und jenem von Normalbeton, lässt sich feststellen, dass UHPC nahezu kein plastisches Verformungsvermögen besitzt. UHPC verformt sich unter einer einaxialen Druckbelastung bis zum Erreichen von rd. 90% der Bruchlast annähernd linear- elastisch. Nach Erreichen der maximalen Festigkeit ist UHPC nicht mehr in der Lage Druckbeanspruchungen, bei gleichzeitiger Dehnungszunahme, zu ertragen. Nach Erreichen der Bruchlast versagt der Werkstoff explosionsartig, ohne jegliche Vorankündigung.

Dieses Verhalten ist auf die weitgehende Vermeidung von Inhomogenität, wie Poren oder Mikrorisse, zurückzuführen. Aufgrund des homogenen Betongefüges setzt die Rissentwicklung erst bei einem hohen Spannungsniveau ein. Aufgrund des hohen Spannungsniveaus herrscht im Betongefüge ein großes Energieangebot und führt nach der Erstrissbildung zu einer ungehinderten und rapiden Rissentwicklung. [6]

Wie in **Abb. 2-4** dargestellt, kann durch die Zugabe von Stahlfasern das spröde Bruchverhalten von UHPC deutlich verbessert und ein duktileres Nachbruchverhalten erreicht werden. Die unterschiedlich abfallenden Äste der Spannungs- Dehnungs- Linien bei den Probekörpern mit 2,5 V-% Stahlfaser können auf eine inhomogene Verteilung der Fasern oder auf unterschiedliche Faserorientierungen zurückgeführt werden.

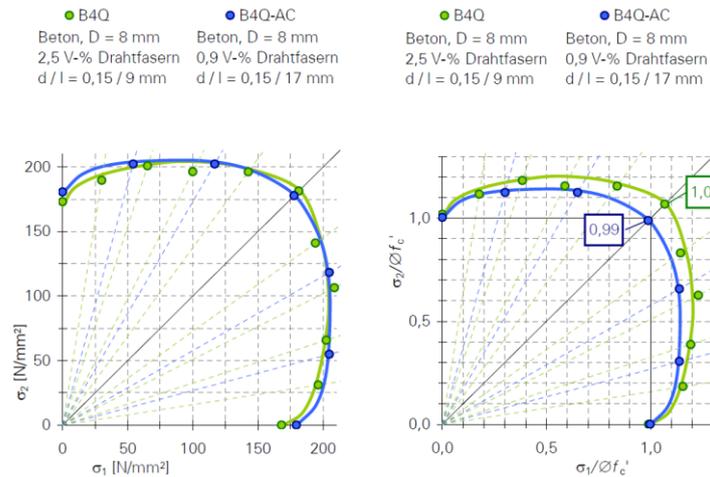
Um den Einfluss der Faserorientierung und Faserverteilung auf die Druckfestigkeit zu charakterisieren, sind weiterführende Untersuchungen vorzunehmen.



**Abb. 2-4:** Spannungs- Dehnungs- Linie von UHPC bei einaxialer Druckbeanspruchung (linkes Bild: ohne Fasern, rechtes Bild: 3 Probekörper mit 2,5 V-% Stahlfasern) [2]

#### Mehraxiale Druckfestigkeit [6]

In [6] sind Versuche an UHPC- Probekörpern unter einer zwei axialen Druckbeanspruchung durchgeführt worden. Bei diesem Versuchsprogramm sind unterschiedliche UHPC- Rezepturen, variierende Fasergehälter, unterschiedliche Faserlängen sowie verschiedene Größtkörner des Zuschlages untersucht worden. Die UHPC- Rezepturen B4Q und B4Q- AC unterscheiden sich durch die Zugabemenge an Fasern (B4Q: 2,5 V-% und B4Q- AC: 0,9V-%) und die Faserlänge (B4Q: 9 mm und B4Q- AC: 17 mm). Es hat sich gezeigt, dass unter einer zwei axialen Druckbeanspruchung beide Mischungen annähernd die gleichen Festigkeiten erreichen (siehe **Abb. 2-5**). Weiter ist festgestellt worden, dass sich die Mischung B4Q aufgrund des höheren Fasergehalts duktiler verhält als die Mischung B4Q- AC. Aufgrund des spröderen Verhaltens erzielt die Mischung B4Q- AC eine geringere Festigkeitssteigerung, gegenüber der einaxialen Druckfestigkeit, als die Mischung B4Q. Bei einem Spannungsverhältnis  $\sigma_2/\sigma_1=1,0$  ist keine Festigkeitssteigerung messbar gewesen. Hier ist lediglich die einaxiale Druckfestigkeit erreicht worden.



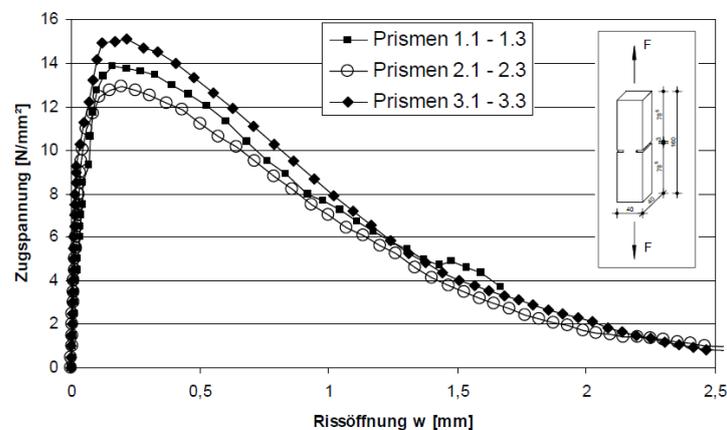
**Abb. 2-5:** Festigkeiten von UHPC unter zweiachialer Belastung (linkes Bild: Absolutwerte; rechtes Bild: normierte Werte) [6]

Aus dem Bericht [6] geht hervor, dass bei UHPC unter einer zweiachialen Druckbeanspruchung, im Vergleich zur einaxialen Druckbeanspruchung, nur eine geringfügige Steigerung der Druckfestigkeit festgestellt werden kann. Daraus ergibt sich, dass die vom Normalbeton bekannten Festigkeitssteigerungen unter einer mehraxialen Druckbeanspruchung (25%- ige Festigkeitssteigerung gegenüber der einaxialen Druckfestigkeit [7]) für ultrahochfeste Betone nicht angesetzt werden dürfen.

### Einaxiale Zugfestigkeit [2]

In [2] ist die Zugfestigkeit von UHPC an eingekerbten Probekörpern untersucht worden. Dabei sind die Probekörper zweiseitig mit Kerben von 10 mm versehen worden. Wie in **Abb. 2-6** zu sehen ist, haben die Probekörper, abhängig vom Prüfungszeitpunkt, eine einaxiale Zugfestigkeiten von rd. 12 bis rd. 17 N/mm<sup>2</sup> erreicht. Dabei ist die Zugfestigkeit erwartungsgemäß mit steigendem Alter der Probekörper gestiegen.

Um die Zugfestigkeit zu erhöhen und um das Nachbruchverhalten zu verbessern, werden den Mischungen 2,5 V-% Stahlfasern beigemischt. Es hat sich gezeigt, dass sich die Fasern senkrecht zur Einführrichtung des Frischbetons orientieren. Dies verdeutlicht, dass die Herstellung auf die Hauptbeanspruchungsrichtung abzustimmen ist.



**Abb. 2-6:** Einfluss des Betonalters auf die mittlere Spannungs- Rissöffnungs- Beziehung von UHPC [2]

### 2.1.4 Zeitabhängige Werkstoffeigenschaften von UHPC

#### Kriechen [2]

Als Kriechen wird die zeitlich veränderliche Verformung des Betons unter Dauerbelastung bezeichnet. Erste Versuche zum Thema zeigen, dass das Kriechen bei UHPC weniger ausgeprägt ist als bei Normalbeton.

In [8] werden folgende Werte für die Endkriechzahl von UHPC vorgeschlagen:

- für wärmebehandelten UHPC  $\varphi = 0,2$
- für wassergelagerten UHPC  $\varphi = 0,8$
- zum Vgl. C 25/ 30  $\varphi = 2,0$  bis  $2,5$  [9]

#### Schwinden [1]

Als Schwinden wird die zeitabhängige Volumsreduktion von Beton durch Austrocknen bezeichnet. Dabei ist der Vorgang temperatur- und belastungsunabhängig. [9] Das Schwinden kann durch eine gezielte Wärmebehandlung vorweggenommen werden.

In [1] werden folgende Werte für das Schwindmaß von UHPC vorgeschlagen:

- autogenes Schwinden 0,5 bis 0,9 mm/ m
- Trocknungsschwinden rd. 0,5 mm/ m

### 2.1.5 Dauerhaftigkeit

#### Carbonatisierung [2]

Im Vergleich zu Normalbeton, der eine Gesamtporosität von rd. 15 V-% besitzt, ist dieser Wert bei UHPC deutlich geringer, rd. 6 V-%. Aufgrund des porenarmen und sehr dichten Betongefüges ist angenommen worden, dass UHPC einen besonders hohen Widerstand gegen eindringende Gase besitzt. In [2] ist diese Vermutung bestätigt worden. Nach 3 Jahren hat die maximale Carbonatisierungstiefe bei den Probekörpern zwischen rd. 1,5 und 2,5 mm betragen.

#### Frost- & Frost- Tausalz- Widerstand [2]

Allgemein ist bekannt, dass der Widerstand gegen Frost- und Frost- Tausalz- Angriff vom Wasser- / Zementwert abhängig ist. Mit sinkendem Wasser- / Zementwert sinkt der Anteil der Kapillarporen im Betongefüge. Diese sind für den Stofftransport im Betongefüge verantwortlich. Bei UHPC beträgt der Kapillarporenanteil rd. 1,5 bis 2 V-%. Im Vergleich dazu beträgt der Kapillarporenanteil bei Normalbeton rd. 8 V-%. Deshalb ist angenommen worden, dass UHPC einen hohen Widerstand gegen Frost- und Frost- Tausalz- Angriff besitzt. Bei Untersuchungen an der Universität Kassel ist diese Annahme bestätigt worden.

#### Brandwiderstand [2]

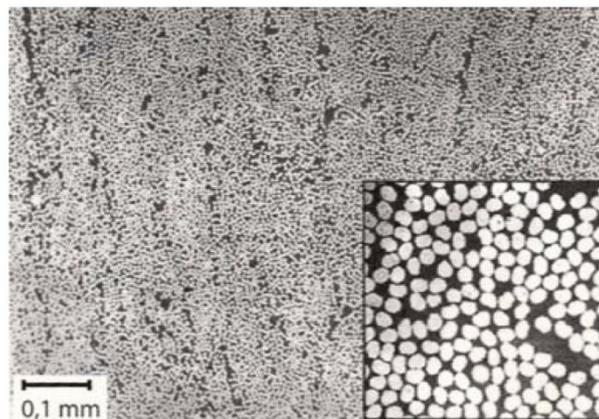
Das dichte Gefüge des UHPCs ist im Brandfall eher nachteilig. Aufgrund des porenarmen Gefüges baut sich im Fall eines Brandes im Betongefüge ein hoher Wasserdampfdruck auf. Übersteigt der Dampfdruck die Zugfestigkeit des UHPC, kommt es zu Abplatzungen, welche schon bei Gebrauchslast das Versagen einleiten können. Durch die Zugabe von rd. 0,3 bis 0,5 V-% Polypropylenfasern kann der Brandwiderstand wesentlich verbessert werden.

## 2.2 FVK- Faserverbundkunststoffe

### 2.2.1 Allgemeines [10]

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die im Bauwesen verwendeten FVK- Bewehrungen und die zum Einsatz kommenden Materialien gegeben. Auf das Tragverhalten von FVK im Verbund mit UHPC wird im Kapitel 3. *Stand der Kenntnisse* eingegangen.

Bewehrungselemente aus Faserverbundwerkstoffen bestehen aus Fasern, welche in eine Kunstharzmatrix eingebettet werden (siehe **Abb. 2-7**). Der Anteil der Verstärkungsfasern liegt zwischen 40- 70 V-%, den restlichen Anteil macht die Harzmatrix aus. Als Durchtränkung kommen vor allem Reaktionsharze zum Einsatz. Am weitesten verbreitet sind ungesättigte Polyesterharze, Vinylesterharze und Epoxidharze. Die Dehnsteifigkeit der Matrix liegt deutlich unter der Dehnsteifigkeit der Verstärkungsfasern. Als Beispiel ist hier die Kombination von CFK- Fasern und einer Epoxidharztränkung aufgeführt. Dabei schwankt das Verhältnis der beiden E- Module zwischen rd. 46 und 140. Da sich die Tränkung aufgrund der niedrigeren Dehnsteifigkeit nur zu einem unwesentlichen Anteil an der Lastabtragung in Faserrichtung beteiligt, werden die mechanischen Eigenschaften im Wesentlichen von den mechanischen Eigenschaften der Verstärkungsfasern bestimmt. Im Gegensatz dazu werden die mechanischen Eigenschaften in Querrichtung hauptsächlich von den mechanischen Eigenschaften der Kunstharzmatrix bestimmt.



**Abb. 2-7:** Querschnitt CFK [10]

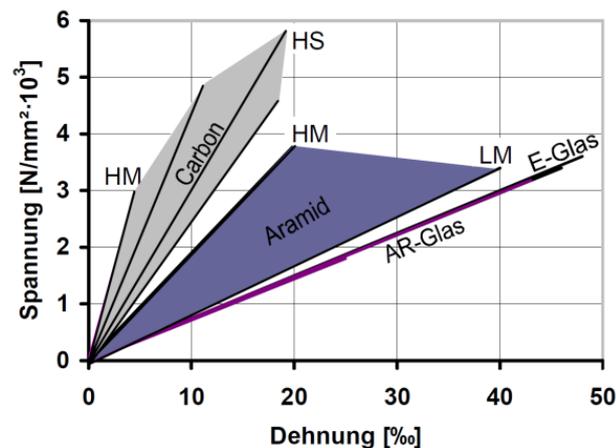
Als Fasermaterialien kommen vor allem AR- Glas, Carbon und Aramid zum Einsatz. Die wesentlichen Materialeigenschaften sind in Tabelle **Tab. 2-1** angeführt. Von den angeführten Fasermaterialien besitzt Carbon die höchste Dehnsteifigkeit (rd. 3- bis 4- Mal so hoch wie Glas) und die geringste Bruchdehnung (rd. 4,0 bis 20,0 ‰).

Faser	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> *10 <sup>3</sup> ]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> *10 <sup>3</sup> ]	Bruchdehnung [‰]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Querdehnzahl [-]
E- Glas	73- 75	3,4- 3,6	46- 48	2,5- 2,7	0,2
AR- Glas	73- 76	1,8- 3,5	25- 43	2,7	-
Aramid	80- 186	3,4- 3,8	20- 40	1,45	0,35
Carbon	250- 650	3,0- 5,8	4- 20	1,6- 2,0	0,2

**Tab. 2-1:** Eigenschaften von Fasern [10]

Die aufgelisteten Fasermaterialien zeichnen sich durch ein ausgeprägtes linear- elastisches Materialverhalten aus und besitzen keine plastischen Reserven. Sie versagen spröde. Abbildung **Abb. 2-8** dient der Veranschaulichung der unterschiedlichen Spannungs- Dehnungs- Beziehung der einzelnen Fasermaterialien. Dabei ist festzuhalten dass die Zugfestigkeit mit steigendem

Bewehrungsquerschnitt leicht abnimmt. Dies ist auf die geringere Schubsteifigkeit des Harzes und unterschiedliche Aushärtungsgrade über die Querschnittsdicke zurückführbar.



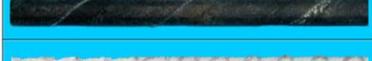
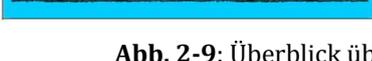
**Abb. 2-8:** Vergleich der Spannungs- Dehnungsbereiche verschiedener Fasermaterialien (HM- hochmodulige Faser, LM- niedrigmodulige Faser, HS- hochfeste Faser) [10]

Weiter ist noch zu erwähnen, dass sich Carbon und Aramid durch eine hohe chemische Beständigkeit, sowie eine hohe Dauerhaftigkeit auszeichnen. Unbehandeltes Glas weist eine niedrige Alkaliresistenz auf. Um den Widerstand im alkalischen Milieu zu steigern, wird dem Glas Zirkonium ( $ZrO_2$ ) zugegeben. Durch diesen Schritt entsteht alkaliresistentes Glas (AR- Glas).

### 2.2.2 Stabförmige Bewehrung [15]

Den wesentlichen Unterschied zur Betonstahlbewehrung stellt die Profilierung der Bewehrungsstäbe dar. In **Abb. 2-9** sind die gängigen Profilierungen und Oberflächenbeschichtungen von FVK- Stäben angeführt. Zur Sicherstellung eines wirksamen Verbunds sind lt. [15] sehr kleine Rippentiefen und kurze Betonrippen, sowie große Verhältnisse zwischen Stabrippen- und Betonrippen zu bevorzugen.

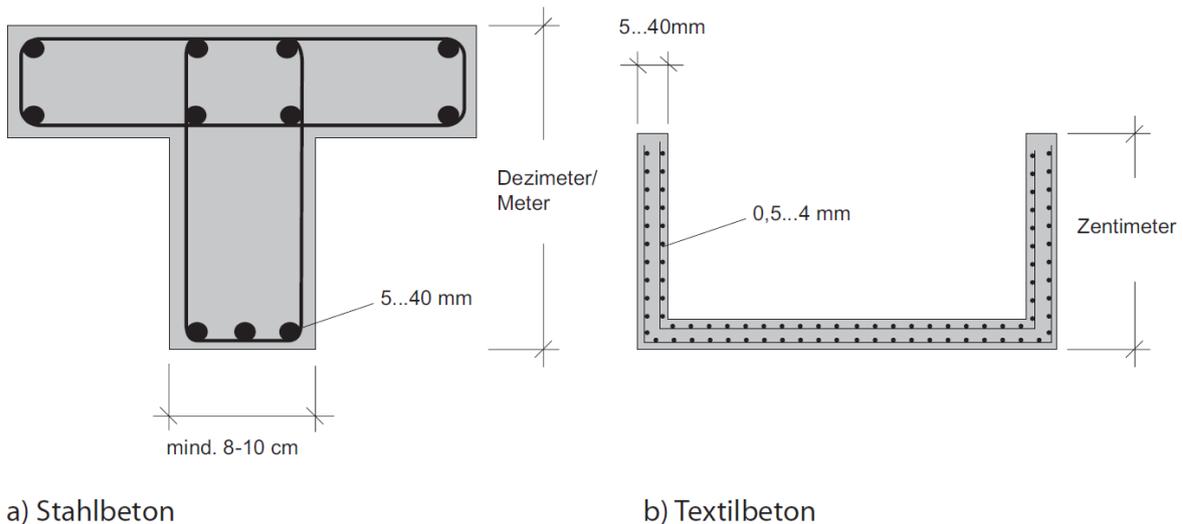
Im Kapitel 3.2 *FVK- Bewehrungsstäbe in ultrahochfestem Beton* wird näher auf das Tragverhalten von FVK- Bewehrungsstäben, im Speziellen auf das Tragverhalten von CFK- Stäben, und deren Verbundverhalten eingegangen.

	Hersteller / Literatur	Produkt / Material	Oberfläche
	FiReP GmbH	FiReP / GFK	straff umflochten
	ITA / IMB RWTH Aachen / [Heg05]	CFK	schlaff umflochten
	Hughes Brothers, Inc.	Aslan100 / GFK	straff umflochten und besandet
	Hughes Brothers, Inc.	Aslan200 / CFK	aufgeraut
	unbekannt / [Mal95]	Typ B / GFK	schlaff umflochten
	Schöck GmbH	ComBAR / GFK	eingefräste Profilierung
	Sireg	Carbopree / CFK	besandet

**Abb. 2-9:** Überblick über stabförmige FVK- Bewehrung [10]

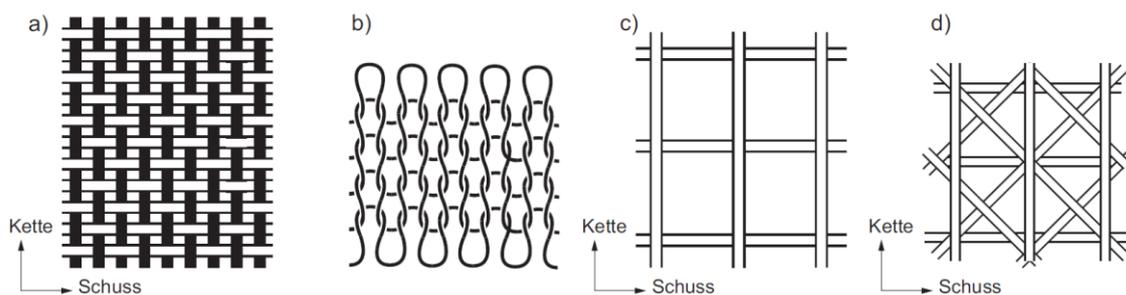
### 2.2.3 Textile [12]

Die grundlegenden ingenieurmäßigen Überlegungen sind bei Textilbeton und Stahlbeton die gleichen. Im Traglastfall übernimmt, wie bei Stahlbeton, der Beton den Abtrag der Druckkräfte und die Bewehrung die Aufnahme der Zugkräfte. Der wesentliche Unterschied bei Textilbeton gegenüber Stahlbeton liegt im Maßstab. Dies bezieht sich auf Größen, wie das Größtkorn, die Bewehrungsquerschnitte und die Bewehrungsabständen sowie die Bauteildicken. Diese sind um rd. eine Größenordnung kleiner als im konventionellen Stahlbetonbau. (siehe **Abb. 2-10**)



**Abb. 2-10:** Gegenüberstellung typischer Dimensionen und Bauteilabmessungen von Stahlbeton und Textilbeton [12]

Die Textile selbst bestehen aus Faserbündeln, die durch verschiedene textile Verarbeitungstechniken zu den endgültigen textilen Strukturen verarbeitet werden. Dabei unterscheiden sich die Erscheinungsformen der einzelnen Halbzeuge, abhängig vom Herstellungsverfahren, deutlich voneinander. (siehe **Abb. 2-11**).



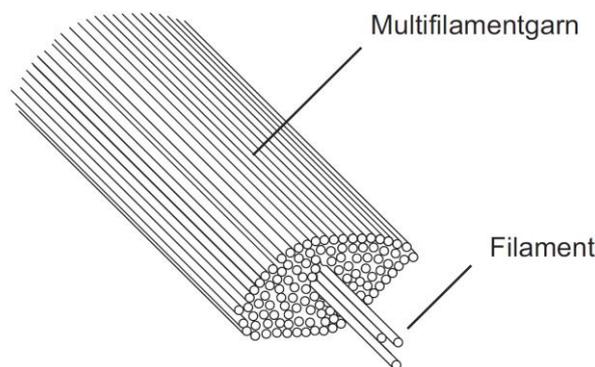
**Abb. 2-11:** Schematische Darstellung der typischen Erscheinungsformen der gebräuchlichsten ebenen Halbzeuge: a) Gewebe, b) Gestrick, c) biaxiales Gelege, d) multiaxiales Gelege [12]

Unabhängig vom Herstellungsverfahren und der Erscheinungsform der Textile können nach [12] die folgenden Anforderungen an die Textile definiert werden:

- *Geradlinige Faserorientierung:*  
zur Vermeidung zusätzlicher Beanspruchungen

- *Querschnittsgeometrie des Einzelements:*  
Kreisquerschnitt wird angestrebt
- *Gitterweite zur Einbettung des Einzelements:*  
die Betonmatrix muss jedes Einzelement vollkommen umschließen
- *Gitterweite zur Vermeidung des interlaminaeren Versagens:*  
Verbundkräfte müssen innerhalb der lichten Gitterabstände übertragen werden
- *Oberflächenstruktur:*  
Verbesserung des Verbundverhaltens
- *Verschiebefestigkeit/ Formstabilität:*  
Textilstruktur muss für die Handhabung eine ausreichende Stabilität aufweisen

Im folgenden Abschnitt werden die für Textilien typischen Begriffe erläutert. In Abbildung **Abb. 2-12** ist ein ungetränkter Multifilamentgarn schematisch dargestellt. Die Abbildung verdeutlicht den Aufbau eines solchen Garns. Dieser besteht aus zahlreichen Einzelfilamenten, die zu einem Garn zusammengefasst werden. Die Garne selbst können auch imprägniert werden. Behalten die Garne eine gerade Ausrichtung, ohne eine Verdrehung der Filamente, spricht man auch von einem Roving (Faserbündel).



**Abb. 2-12:** Multifilamentgarn bzw. Roving [12]

### Feinheit

Die Feinheit beschreibt die lineare Dichte von eindimensionalen Materialien, wie Filamenten oder Garnen. Sie wird durch die Einheit *tex* beschrieben (2-1). Aus der Feinheit kann bei bekannter Dichte des Fasermaterials die Querschnittsfläche des Filaments ermittelt werden. Die Berechnung der Faserquerschnittsfläche erfolgt gemäß Formel (2-2).

$$1_{tex} = \frac{1,0g}{1000m} \quad (2-1)$$

$$A_r = \frac{f}{\rho} = \frac{\left[ \frac{g}{m} \right]}{\left[ \frac{g}{cm^3} \right]} * 10^3 = [mm^2] \quad (2-2)$$

### Beispiel:

Am folgenden Beispiel soll die Berechnung der Querschnittsfläche verdeutlicht werden. Für die Berechnung wird ein Carbonfilamentgarn mit einer *Feinheit* von  $f=800 \text{ tex}$  und einer *Dichte* von  $\rho= 1,80 \text{ g/cm}^3$  herangezogen.

- $f = 800 \text{ tex}$
- $\rho = 1,80 \text{ g/cm}^3$
- $A_r = \frac{800}{1,80} * 10^3 = 0,44 \text{ mm}^2$

### Faser

Wie schon im ersten Abschnitt des Kapitels beschrieben, werden die mechanischen Eigenschaften von FVK- Werkstoffen in Längsrichtung im Wesentlichen durch die Fasern bestimmt. Diese werden dadurch charakterisiert, dass ihr Durchmesser weniger als 1/100 der Faserlänge beträgt.

### Filament

Als Filament wird eine Elementfaser mit undefinierter Länge bzw. undefinierter Größe bezeichnet.

### Roving

Ein Roving beschreibt ein endloses und unverdrehtes Faser- / Filamentbündel.

### Kette, Kettfaden

Kettfäden verlaufen in Herstellungsrichtung der Textile und werden durch Schussfäden verbunden.

### Schuss, Schussfaden

Als Schussfäden werden jene Fäden bezeichnet, welche senkrecht zur Herstellungsrichtung verlaufen.

Im Kapitel 3.3 *TRUHPC- Textile Reinforced Ultra- High Performance Concrete* wird näher auf das Tragverhalten von textilen Bewehrungselementen im Verbund mit ultrahochfestem Beton eingegangen. Darin wird das Tragverhalten bei unterschiedlichen Belastungssituationen erläutert und das komplexe Verbundverhalten beschrieben.

## 2.3 Bauen mit UHPC

Im ersten Abschnitt des Kapitels wurde mit der Paulifurtbrücke bei St. Jakob/ Rosental (siehe **Abb. 2-1**) ein erster Einblick in die Anwendungen von UHPC gegeben.

Im folgenden Abschnitt wird die erste Straßenbrücke mit einem Bogentragwerk aus UHPC und der Pavillon der RWTH Aachen, mit einem Dachtragwerk aus Textilbeton, vorgestellt.

### 2.3.1 Wild- Brücke [13]

Bei der in Abbildung **Abb. 2-13** gezeigten Brücke handelt es sich um die Wild- Brücke in der Stadtgemeinde Völkermarkt (Kärnten). Durch die Errichtung der Brücke ist das umliegende Siedlungsgebiet vom Schwerlastverkehr entlastet und das Betriebsgelände des Unternehmens

Wild GmbH zusätzlich aufgeschlossen worden. Das Tragwerk der Brücke besteht aus zwei schlanken und extrem leichten Sprengwerk- Bögen aus UHPC mit einer Spannweite von rd. 70 m. Die Gesamtlänge der Brückenkonstruktion beträgt rd. 158 m. Sie ist die erste Straßenbrücke bei der das Bogentragwerk aus ultrahochfestem Beton hergestellt worden ist.



**Abb. 2-13:** Wild- Brücke in Völkermarkt in Kärnten [13]

Jeder Bogen der Brücke besteht aus jeweils sechs geraden Bogenstäben, mit einer Wandstärke von 60 mm (im Eckbereich 100 mm). Die Bogenstäbe sind im Fertigteilwerk hergestellt und vor Ort mittels externer Vorspannung miteinander verbunden worden. Um die geometrischen Abweichungen möglichst gering zu halten sind alle Stäbe des Bogentragwerks mittels CNC- gesteuerter Präzisionsfräse plangeschliffen worden.



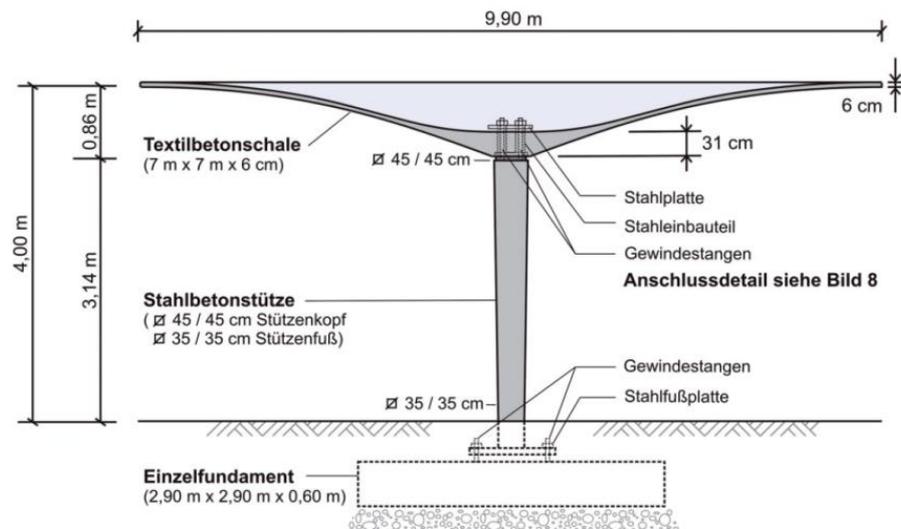
**Abb. 2-14:** Einklappen der Bogensegmente [13]

Nach dem Verbund der einzelnen Bogenstäbe zu Segmenten ist die Brücke, wie in Abbildung **Abb. 2-14** gezeigt, im Bogenklappverfahren hergestellt worden. Anschließend sind die Aufständungen und der Brückenoberbau in Ortbetonbauweise hergestellt worden.

### 2.3.2 Pavillon, RWTH Aachen [14]

Auf dem Campus der RWTH Aachen wurde ein Pavillon mit einer anspruchsvollen Dachkonstruktion aus Textilbeton errichtet. Bei dem Entwurf der Einzelschirme, des Pavillon, haben sich die Projektanten an der Formgebung des spanischen Architekten FÉLIX CANDELA (1910- 1997) gestützt. Dabei handelt es sich um eine Addition von vier doppel- gekrümmten Flächen. Abbildung **Abb. 2-15** zeigt einen Schnitt durch einen Einzelschirm des Pavillons. Der Pavillon selbst

besteht aus vier Einzelschirmen. Die Stärke der Schale beträgt am Rand 60 mm und erhöht sich zum Auflagerpunkt hin auf ein Maximum von 310 mm.



**Abb. 2-15:** Schnitt durch einen Einzelschirm (Textilbetonschale, Stahlbetonstütze und Einzelfundament) [14]

Die Herstellung des Dachtragwerks ist in Fertigteilbauweise erfolgt. Dabei sind die Textilteile lageweise einlamiert und der Feinkornbeton in Spritzbetonbauweise, von einer Arbeitsbühne aus, eingebracht worden. Abbildung **Abb. 2-16** zeigt die Herstellung eines der vier Schirmtragwerke des Pavillons. Durch eine kontinuierliche Messung der Schichtstärke ist eine lagerichtige Verlegung der Textilteile sichergestellt worden. Nach der Herstellung des Dachtragwerks ist dieses mittels Autokran an der Stahlbetonstütze angeschlossen worden.



**Abb. 2-16:** Lageweise Herstellung der Textilbetonschale in Spritzbetonbauweise [14]

### 3 Stand der Kenntnisse

#### 3.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Erkenntnisse über die maßgebenden Materialeigenschaften des Verbundwerkstoffes Carbonbeton und seiner Komponenten vorgestellt. Dabei wird sich im Wesentlichen auf die in den Dissertationen [10], [15], [17] und [23] gewonnenen Erkenntnisse gestützt. Das Ziel der durchgeführten Versuche, auf welchen diese Diplomarbeit aufbaut ist es, das Querkrafttragverhalten von textilbewehrten Tragwerken aus ultrahochfestem Beton zu beschreiben. Zu diesem Zweck ist das Querkrafttragverhalten von textilbewehrten T-Trägern, mit und ohne Vorspannung, und Deckenelementen aus UHPC untersucht worden. Erste Erkenntnisse zu diesem Thema werden in [23] angeführt.

#### 3.2 FVK- Bewehrungsstäbe in ultrahochfestem Beton

##### 3.2.1 Allgemeines

Im Unterkapitel 2.2 *FVK- Faserverbundkunststoffe* ist ein Überblick über die verschiedenen Fasermaterialien und die Oberflächenausbildung der Bewehrungsstäbe gegeben worden. In den folgenden Abschnitten wird speziell auf das Verbundverhalten von CFK- Bewehrungsstäben in Verbund mit ultrahochfestem Beton und auf deren Vorspannverhalten eingegangen. Es werden die wesentlichen Tragmechanismen erklärt und der Stand der Kenntnisse erläutert.

##### 3.2.2 Verbundverhalten von FVK- Bewehrungsstäben in ultrahochfestem Beton [15]

###### Verbundeigenschaften von UHPC

Zu Beginn wird auf die Verbundeigenschaften von ultrahochfestem Beton eingegangen. Mit steigender Druck- & Zugfestigkeit erhöht sich die Verbundfestigkeit von Beton. Im Allgemeinen liegt die max. Verbundspannung von Stahlbeton bei rd.  $15 \text{ N/mm}^2$ . Im Vergleich dazu erreicht stahlbewehrter UHPC maximale Verbundspannungen von rd.  $40\text{-}70 \text{ N/mm}^2$ . Damit werden bei UHPC, im Vergleich zu Normalbeton, rd. 3- bis 5- mal so hohe Verbundfestigkeiten erreicht. Das Verbundverhalten wird maßgebend von der Betondeckung und den Stababständen bestimmt. Da die Zugfestigkeit nur unterproportional zur Druckfestigkeit steigt, besteht bei UHPC aufgrund des steiferen Verbundes (höherer E-Modul als bei Normalbeton) eine höhere Gefahr eines Aufspaltens der Betondeckung.

PRITSCHOW führt in seiner Dissertation [15] die folgenden Faktoren als wesentliche Einflussparameter auf die Verbundfestigkeit von Hochleistungsbetonen an:

- Bezogene Rippenhöhe der Bewehrung
- Betondruckfestigkeit
- Zugfestigkeit des Betons
- Betondeckung
- E- Modul des Betons

###### Verbundverhalten der FVK- Bewehrung

Der Verbund beschreibt die Kraftübertragung zwischen den einzelnen Komponenten eines Verbundwerkstoffes. Bei bewehrtem Beton werden über die Verbundmechanismen Kräfte aus der Bewehrung, über die Kontaktfläche, in den Beton weitergeleitet. Damit stellt der Verbund den wesentlichen Tragmechanismus von bewehrten Bauteilen dar.

Um den Verbundmechanismus zu aktivieren muss ein Dehnungsunterschied zwischen der Bewehrung und der Betonmatrix auftreten. Der dabei entstehende Verformungsunterschied zwischen Beton und Bewehrung, wird im Allgemeinen als Schlupf bezeichnet.

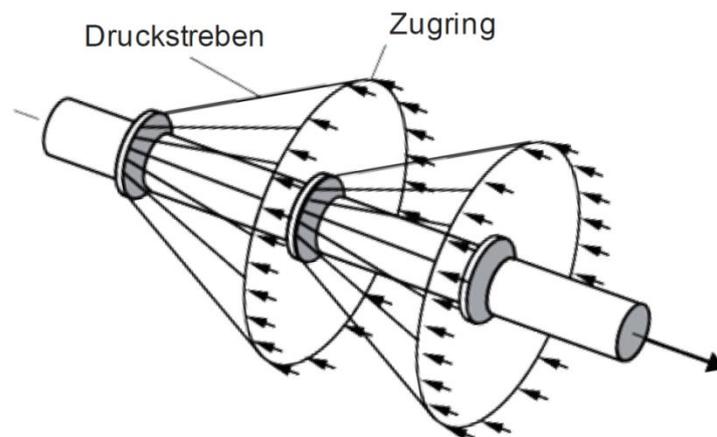
Die Verbundtragwirkung setzt sich im Wesentlichen aus drei Mechanismen zusammen:

I. Haftverbund

Der Haftverbund beruht auf einer Klebewirkung in der Kontaktfläche zwischen der Betonmatrix und der Bewehrung. Die Klebewirkung entsteht durch Adhäsion oder Kapillarkräfte. Der Haftverbund tritt nur bei keinen oder sehr geringen Relativverschiebungen zwischen Bewehrung und Beton auf und kann nur geringe Verbundspannungen übertragen.

II. Scherverbund

Tritt nachdem Übersteigen der maximalen Haftverbundspannung ein und beruht im Wesentlichen auf der Profilierung der Bewehrungsoberfläche. Durch die Herstellung von Bewehrungsrippen kommt es zu einer mechanischen Verzahnung der Bewehrung mit dem Beton. Mit zunehmender Relativverschiebung der Verbundkomponenten stellt der Scherverbund den effektivsten Verbundmechanismus dar. Das Tragverhalten kann mit dem Druckkegel- Zugring- Modell verdeutlicht werden. (siehe **Abb. 3-1**)



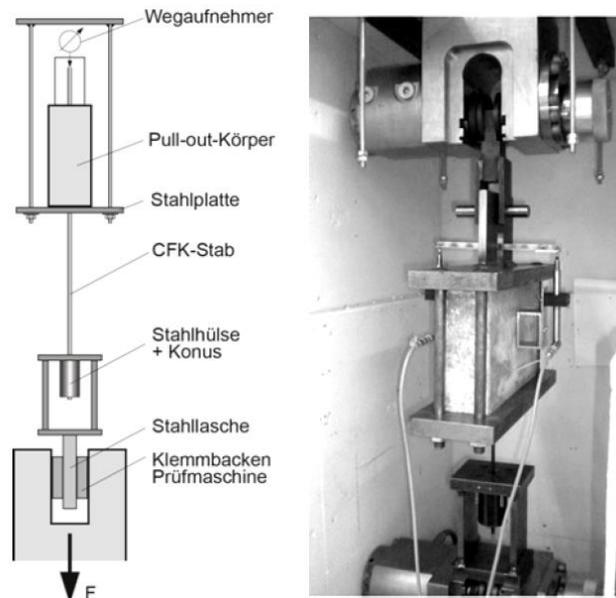
**Abb. 3-1:** Schematische Darstellung der Verbundkräfte des Scherverbundes [15]

Erfährt die Bewehrung eine Zugbeanspruchung, stützt sich diese über die Stabrippen über die Druckstrebe auf dem umgebenden Beton ab. Die entstehende Druckspannung breitet sich rotationssymmetrisch von der Rippe ausgehend aus. Der Neigungswinkel der Druckstrebe ist nicht konstant und hängt im Wesentlichen von der Geometrie der Profilierung ab. Mit zunehmendem Schlupf steigt dieser. Durch die geneigte Druckstrebe entstehen um den Bewehrungsquerschnitt ringförmig verlaufende Zugspannungen. Diese müssen vom Beton aufgenommen werden. Übersteigt die Ringzugspannung die Betonzugfestigkeit, entstehen entlang des Bewehrungsstabes Risse. Mit steigender Belastung pflanzen sich diese zur Betonoberfläche hin fort. Das Versagen stellt sich in Abhängigkeit der Betondeckung ein. Bei einer geringen Betondeckung wird das Versagen durch das Spalten der Betondeckung bestimmt. Wird die Betondeckung hingegen ausreichend groß gewählt, versagt der Verbundkörper durch ein Abscheren der Betonkonsole zwischen den Stabrippen.

### III. Reibverbund

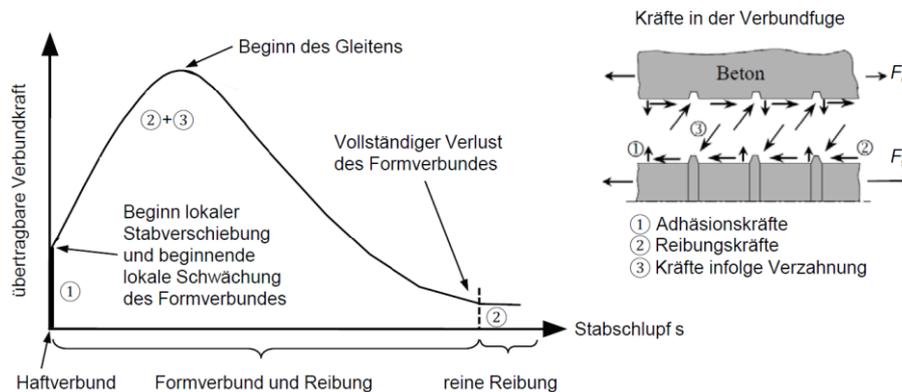
Tritt nach dem Überschreiten der maximalen Scherverbundspannung auf. Der Reibverbund wird durch das gegenseitige Verschieben der Verbundkomponenten aktiviert. Die Höhe der übertragbaren Reibverbundspannungen hängen im Wesentlichen von der Rauigkeit der Bewehrungsoberfläche ab.

Zur Untersuchung des Verbundverhaltens von FVK- Stäben werden Pull- Out- Versuche durchgeführt. In Abbildung **Abb. 3-2** ist der Versuchsaufbau der Pull- Out- Versuche aus [15] dargestellt. Anhand der Pull- Out- Versuche lassen sich die Verbundspannungs- Schlupf- Beziehungen ermittelt. Des Weiteren können anhand der Bestimmung der Versagensmechanismen wesentliche Eigenschaften des Verbundverhaltens von CFK- Stäben bestimmt werden.



**Abb. 3-2:** Versuchsaufbau: Pull- Out- Versuch [15]

Die Aktivierung der Verbundmechanismen hängt vom auftretenden Schlupf ab. In Abbildung **Abb. 3-3** ist die Verbund- Schlupf- Beziehung, für einen gerippten Bewehrungsstab in einer Betonmatrix, dargestellt. Im Normalbeton verhalten sich FVK- Bewehrungsstäbe ähnlich wie konventionelle Stabstahlbewehrungen. Dabei werden alle drei Verbundmechanismen aktiviert. Aufgrund der weicheren Oberflächenprofilierung bei FVK- Bewehrungsstäben und der höheren Zugfestigkeit des UHPCs stellt sich im UHPC, nach überschreiten des Haftverbund, ein vom Normalbeton differenzierteres Verbundverhalten ein. Das Versagen erfolgt zumeist durch das Abscheren der Stabrippen bzw. der Oberflächenausbildung. Dieser Versagensmechanismus kann bei der Verwendung von Stahlbewehrung nicht beobachtet werden. Weshalb der Oberflächen-ausbildung ein höherer Stellenwert als bei Stahlbewehrung zuzuschreiben ist.



**Abb. 3-3:** Zusammenhang zwischen den Verbundanteilen und dem Stabschlupf [15]

Glatte oder besandete Oberflächen haben sich genauso wie Umwicklungen und ähnliche Oberflächenausbildung als nicht geeignet für den Einsatz in UHPC erwiesen. Aus den Versuchen lässt sich ableiten, dass maschinell eingebrachte Stabrippen eine effektive Oberflächenprofilierung von CFK- Stäben für den Verbund mit UHPC darstellt. Der auftretende Versagensmechanismus hängt im Wesentlichen von der Betonfestigkeit und der Scherfestigkeit der verwendeten Fasertränkung ab. Dabei hat die Auswertung der Versuche in [15] ergeben, dass um den Versagensmechanismus des Abscherens der Betonrippe zu aktivieren, kurze Betonrippen und ein großes Verhältnis Stabrippe zu Betonrippenbreite anzustreben sind.

PRITSCHOW hat in [15] die für das Verbundverhalten von CFK- Stäben maßgebenden Parameter identifiziert:

- absolute Breite der einzelnen Rippen (Stabrippe und Betonrippe)
- das Verhältnis der Rippenbreiten zueinander
- Stabrippentiefe

### 3.2.3 Vorspannen von CFK- Stäben

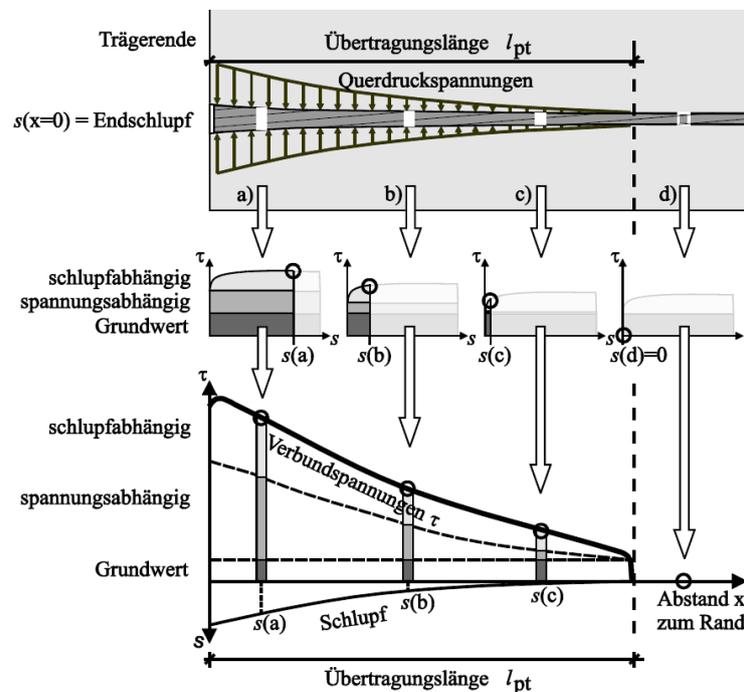
#### Das Prinzip der Vorspannung [16]

Das Konzept der Vorspannung beruht auf dem Grundgedanken, dem durch äußere Einwirkungen entstehenden Spannungszustand einen inneren Spannungszustand entgegenzusetzen. Dieser innere Spannungszustand wird durch das Vorspannen der Zuelemente im Bauteil induziert. Im Idealfall lässt sich die eingebrachte Druckkraft dahingehend beeinflussen, dass die gesamte Zugzone des Betonquerschnittes überdrückt wird und Risse größtenteils vermieden werden können. Da die Rissbildung im Wesentlichen für den Steifigkeitsverlust zwischen den Zuständen I und II, der Verbundwerkstoffe Stahlbeton bzw. Carbonbeton, verantwortlich ist, wird durch das Vorspannen das Verformungsverhalten des Tragwerks begünstigt. Deshalb weisen vorgespannte Konstruktionen ein wesentlich besseres Verformungsverhalten als lediglich schlaff bewehrte Konstruktionen auf. Die Vorspannkabel können extern am Bauteil oder im Betonkörper selbst geführt werden. Die Kraftübertragung zwischen den Spannkabeln und dem Beton kann zum einen über die Verbundwirkung oder zum anderen über Verankerungskonstruktionen sichergestellt werden.

#### Vorspannen in ultrahochfestem Beton [17], [18]

Das Verbundverhalten von profilierten Spanndrähten und von Litzen unterscheidet sich wesentlich. Durch die Rippung der Spannstäbe werden hohe Scherkräfte aktiviert. Bei Litzen und

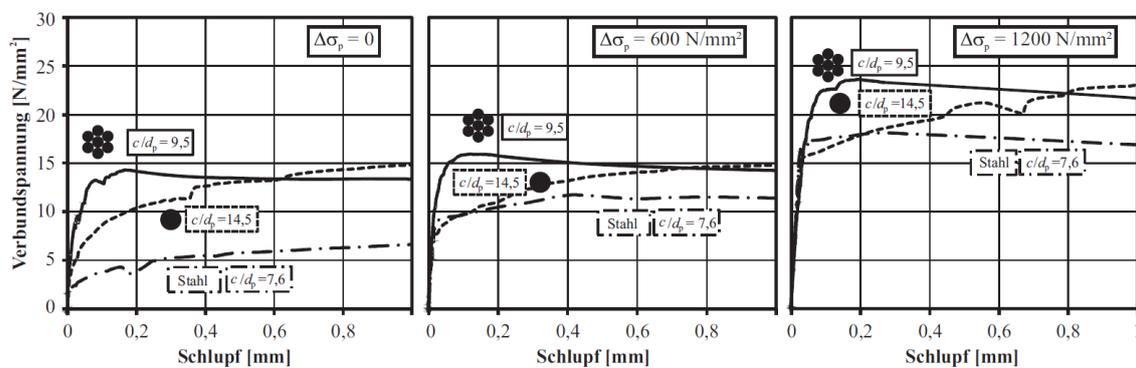
Spanndrähte ohne Oberflächenprofilierung ist der Scherverbund hingegen vernachlässigbar gering. Der Hauptanteil der Verbundkräfte wird über den Reibverbund übertragen. Durch die Querpressungen wird die Wirksamkeit des Reibverbundes zusätzlich erhöht. Die Querpressungen sind im Wesentlichen auf zwei Effekte zurückzuführen. Der Erste Effekt beruht auf dem Entstehen von Querpressungen infolge der Volumenreduktion beim Abbinden des Betons. Er ist jedoch im Vergleich zum Hoyer- Effekt deutlich geringer ausgeprägt. Beim Anziehen der Spannstäbe verringert sich deren Durchmesser, entsprechend der Querdehnzahl, infolge der Längsdehnung. Beim Ablassen der Vorspannung wird die Vorspannkraft über den Verbund in den Beton eingeleitet und der Spannstab verkürzt sich. Durch diese Verkürzung dehnt sich der Stabquerschnitt aus und drückt gegen die umgebende Betonmatrix. In Abbildung **Abb. 3-4** ist die Verteilung der Querpressung über die Übertragungslänge dargestellt. Die Übertragungslänge ist als jene Länge definiert, welche erforderlich ist um die volle Vorspannkraft vom Spannkabel, über die Verbundspannungen, in den Beton einzuleiten. Weiter sind die verschiedenen Anteile des Verbundes in ihrer qualitativen Größe in einem Spannungs- Schlupf- Abstand- Diagramm dargestellt. Die Verbundspannung ist nicht konstant über die Übertragungslänge verteilt. Außerdem ist zu erkennen, dass die Höhe der Verbundspannung maßgeblich vom auftretenden Schlupf und der durch den Hoyer- Effekt hervorgerufenen Querpressung abhängig ist. [17]



**Abb. 3-4:** Verbundkraftübertragung von Litzen mit sofortigem Verbund [17]

In [17] sind Pull- Out- Versuche an UHPC- Probekörpern mit Stahllitzen durchgeführt worden. Im Wesentlichen entspricht das Tragverhalten der Litzen in UHPC jenem der Litzen in Normalbeton. Die Ergebnisse bestätigen die Annahme, dass mit UHPC wesentlich höhere Verbundfestigkeiten als mit Normalbeton erreicht werden können. Im Mittel sind dreimal so hohe Verbundfestigkeiten als bei Normalbeton erreicht worden. Einen signifikanten Einfluss des Fasergehaltes auf die Verbundfestigkeiten oder die Übertragungslänge ist nicht zu beobachten gewesen. Diese haben bei den durchgeführten Versuchen mit 0,5'' Litzen in ultrahochfestem Beton zwischen 22 und 28 cm betragen. Bei normalfesten Betonen beträgt sie rd. 60 cm. Weiter wird eine bezogene Betondeckung von  $c/d_p = 2,5$  vorgeschlagen, um eine Sprenggrissbildung zu vermeiden. Die maximalen Schlupfwerte haben, bei den unbeschädigten Proben, zwischen 0,5 bis 0,6 mm betragen. [17]

Erste Untersuchungen mit CFK- Bewehrung als Vorspannbewehrung in Normalbeton bestätigen, dass sich CFK gut für den Einsatz als Spannbewehrung eignet. In [18] ist eine Versuchsreihe mit 63 Pull- Out- Versuchen mit CFK- Stäben und -Litzen in ultrahochfestem Beton durchgeführt worden. Neben dem Einfluss der Spannbewehrung sind die Einflüsse des Vorspanngrads, der Betondeckung und der Betonfestigkeit untersucht worden. In Abbildung **Abb. 3-5** ist der Einfluss der Vorspannung und der damit einhergehenden Querdehnung (Hoyer- Effekt) in Abhängigkeit von der Spanngliedgeometrie abgebildet. Dabei entspricht  $\Delta\sigma_p = 1200 \text{ N/mm}^2$  einem Vorspanngrad von 100 %. Ohne Vorspannung erreichen Spannlitzen aus CFK mit einem Maximalwert von rd.  $15,0 \text{ N/mm}^2$  doppelt so hohe Verbundfestigkeiten wie Spannlitzen aus Stahl. Da sich ohne Vorspannung keine Querpressungen aus dem Hoyer- Effekt ergeben, beruht die Verbundfestigkeit im Wesentlichen auf dem konstanten Grundanteil und dem schlupfabhängigen Reibungsanteil. Weshalb CFK- durch seine deutlich rauere Oberflächenausbildung auch höhere Verbundfestigkeiten erzielt. Weiter zeigen CFK- Spannlitzen ein deutlich steiferes Verbundverhalten als die CFK- Stäbe. [18]



**Abb. 3-5:** Einfluss der Spanngliedgeometrie und der Querdehnung infolge der Vorspannung  $\Delta\sigma_p$  auf das Verbundspannungs- Schlupf- Verhalten [18]

Mit dem Ablassen der Vorspannung dehnen sich die Spannelemente aus und der Hoyer- Effekt wird aktiviert. Aufgrund der, im Vergleich zu Stahl, kleineren Querdehnung ist der Hoyer- Effekt bei den CFK- Bewehrungen deutlich geringer ausgeprägt. Bei den Stahllitzen ist die Verbundspannung beim Ablassen der Vorspannung von 50% und 100% in gleichen Maßen gestiegen und erreicht einen Maximalwert von  $17 \text{ N/mm}^2$  bei 100%. Die CFK- Spannbewehrung erreicht eine maximale Verbundfestigkeit von rd.  $23 \text{ N/mm}^2$  bei 100%. Damit liegt die erreichte Verbundfestigkeit über jener von den Stahllitzen. Der Unterschied ist aufgrund der geringeren Querdehnung und den damit aktivierten Querpressungen nicht so stark ausgeprägt. Ein ausgeprägter Einfluss der Betondeckung auf die Verbundfestigkeit konnte nicht festgestellt werden. Im Vergleich zu den Untersuchungen aus [17] haben sich für CFK- Bewehrungen höhere bezogene Betondeckungen ergeben. Reichte bei den in [17] untersuchten  $0,5''$  Stahllitzen eine bezogene Betondeckung von  $c/d_p = 2,5$  aus um eine Sprenggrissbildung zu vermeiden, wird in [18] für CFK- Stäbe eine bezogene Betondeckung von  $c/d_p = 4,0$  und für CFK- Litzen  $c/d_p = 3,0$  vorgeschlagen. Die Übertragungslängen der CFK- Stäben betragen weniger als 16 cm und die der CFK- Litzen rd. 22 cm. Damit ergeben sich geringer Übertragungslängen als bei den in [17] untersuchten Stahllitzen. [18]

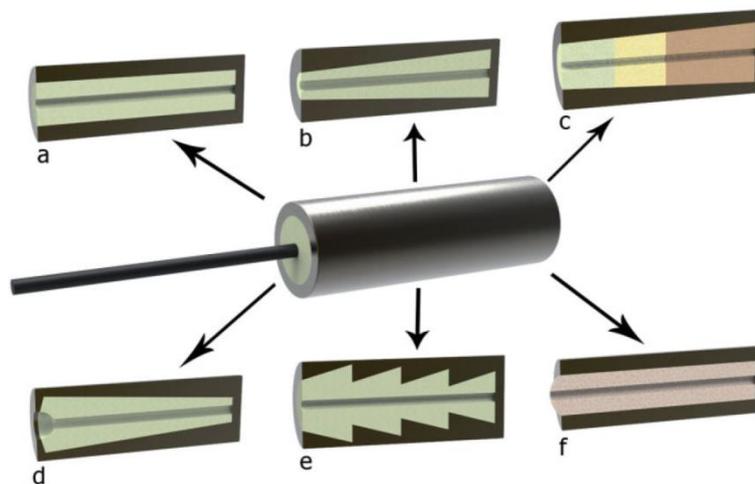
### Endverankerung von CFK- Zugstäben [19]

Bei der Verankerung von CFK- Zugelementen eignen sich, die von Stahlzuggliedern bekannten, Keilverankerungen nicht. Faserverbundkunststoffe weisen eine hohe Querdruckempfindlichkeit auf. Durch das Anpressen der Stahlkeile besteht die Gefahr einer Beschädigung der Fasern. Dementsprechend müssen für CFK- Bewehrungselemente materialgerechte Verankerungen verwendet werden. Gemäß der Leitlinie für die europäische technische Zulassungen ETAG 013, Bausätze zur Vorspannung von Tragwerken, wird gefordert dass das Versagen des Zugelemen-

tes auf der freien Länge und nicht an der Verankerung auftritt. Daraus lässt sich eine Mindestanforderung an die Verankerung ableiten. Die Ausbildung der Verankerung muss demnach mindestens die volle theoretische Tragfähigkeit des Querschnitts gewährleisten. Um lokal hohe Schubspannungen und Querpressungen zu vermeiden und um eine möglichst gleichmäßige Verteilung zu gewährleisten, wird bei den meisten Verankerungen das Prinzip des Steifigkeitsgradienten umgesetzt. Im Wesentlichen beruht dieses Prinzip auf einer konstanten Steifigkeitszunahme über die Verbundlänge. Im folgenden Abschnitt werden die aktuellen Verankerungen für CFK- Stäbe vorgestellt.

#### I. Vergussverankerungen:

Die Verankerung besteht aus einem Vergusskörper und einen den Vergusskörper umschließenden Metallzylinder. Die Vergussmasse stellt eine schubfeste Verbindung zwischen dem CFK- Stab und dem Ankerzylinder her. Durch Wirkung des Zylinders als Zugring wird ein Abplatzen der Vergussmasse verhindert. Der Spannungsgradient kann durch die Zugabe von keramischen Granulaten oder durch eine Formgebung der Vergussmasse selbst erzeugt werden (siehe **Abb. 3-6**)



**Abb. 3-6:** Vergussverankerungen für CFK- Zugstäbe [19]

#### II. Klemmverankerungen

Um Schäden an der CFK- Bewehrung zu vermeiden, dürfen die Klemmkeile nicht direkt auf die Staboberfläche pressen. Durch die Anordnung einer Zwischenschicht aus weichem Metall, wie Kupfer oder Aluminium, wird die Querpressung gleichmäßig auf die Staboberfläche verteilt. Anders als bei Vergussverankerungen wird der Steifigkeitsgradient bei Klemmverbindungen durch das Vorspannen der Klemmschrauben hergestellt (siehe **Abb. 3-7a**). Dabei nimmt die Vorspannkraft entlang des Ankers ab.



**Abb. 3-7:** a) Klemmverankerungen für CFK-Zugstäbe; b) Endverankerung durch Heissverformung [19]

### III. Endverankerung durch Formgebung

Abbildung **Abb. 3-7b)** zeigt eine Entwicklung der Firma Faigle. Dabei wird das thermoplastische Verhalten der Kunststoffmatrix ausgenutzt. Der CFK- Stab wird erwärmt und durch das Anpressen einer Formhülse verformt. Die Fasern werden dabei nicht beschädigt, vielmehr werden diese an den Einkerbungen verdichtet.

## 3.3 TRUHPC- Textile Reinforced Ultra- High Performance Concrete

### 3.3.1 Allgemeines

Bei Textilbeton oder textildbewehrtem Beton kommt anstatt der üblichen stabförmigen Stahlbewehrung, ein textiles Gelege zum Einsatz. Der große Vorteil der Textile liegt in deren Korrosionsbeständigkeit und Dauerhaftigkeit. Aufgrund dieser Materialeigenschaften kommen Tragwerke aus Textilbeton mit einer wesentlich geringeren Betondeckung aus. In Kombination mit Betonen hoher Leistungsfähigkeit lassen sich dünnwandige Konstruktionen herstellen, welche eher dem Stahlbau als dem massigen Betonbau ähneln.

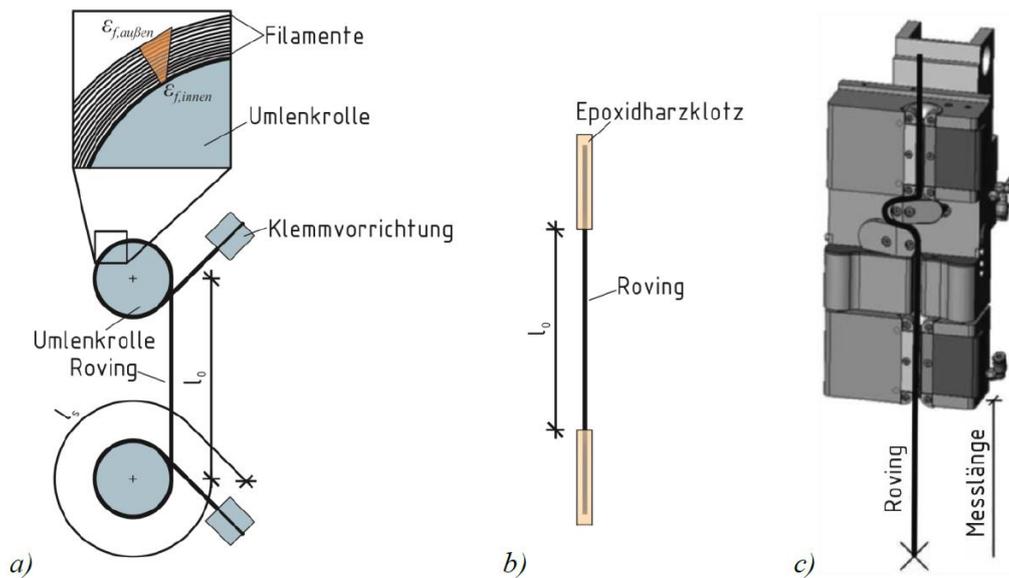
### 3.3.2 Zugtragverhalten von textildbewehrten Betonelementen

#### Zugtragverhalten des Bewehrungsmaterials [23]

Bei der Bestimmung des Spannungs- Dehnungs- Verhaltens von FVK- Bewehrungen sind zwei Problemstellungen zu lösen:

- geeignete Lasteinleitung: aufgrund der Querdruckempfindlichkeit der Fasermaterialien können Filamente beschädigt werden
- Messung der Dehnungen: das Ableiten aus dem Maschinenweg ist in der Regel zu ungenau und auftretende Sekundärverformungen verfälschen das Ergebnis

In Abbildung **Abb. 3-8** sind die wesentlichen Versuchsaufbauten schematisch abgebildet.



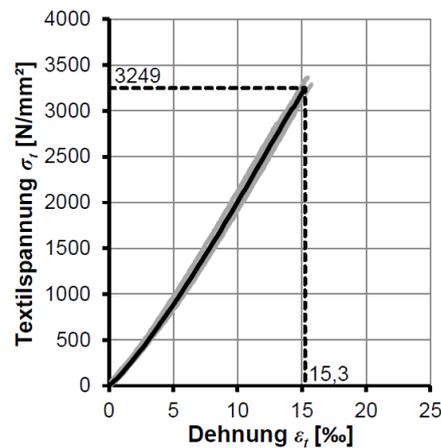
**Abb. 3-8:** Lasteinleitung für Rovingzugversuche: a) Umlenkrolle; b) Epoxidharzklotz; c) Lasteinleitungs-  
vorrichtung zur Reduzierung der Spannungskonzentration im Roving [23]

Beim Versuchsaufbau mit den Umlenkrollen kann das Dehnungsverhalten nicht realistisch abgebildet werden, da sich der Faserstrang nicht nur über die Länge  $l_0$  ausdehnt sondern auch darüber hinaus. Hinzu kommt die ungleiche Belastung über den Rovingquerschnitt. Bei der Variante mit Epoxidharzklotzen im Lasteinleitungsbereich ergibt sich eine starke Abhängigkeit vom Durchtränkungsgrad. Je höher dieser ist desto mehr Filamente werden aktiviert und höhere Textilspannungen können erreicht werden. Die besten Versuchsergebnisse werden mit einer Lasteinleitungs-  
vorrichtung zur Reduzierung der Spannungskonzentration im Roving erreicht. Dabei beschränkt sich dieses Verfahren, aufgrund der doppelten Umlenkung, auf die Anwendung bei ungetränkten Textilien.

Die Bruchspannung wird gemäß Formel (3-1) errechnet:

$$\sigma_r = \frac{F}{A_r} = \frac{[N]}{[mm^2]} = \left[ \frac{N}{mm^2} \right] \quad (3-1)$$

**mit:** F      Prüfkraft [N]  
 A<sub>r</sub>      Rovingfläche [mm<sup>2</sup>] gemäß Formel (2)  
 σ<sub>r</sub>      Rovingspannung [N/mm<sup>2</sup>]

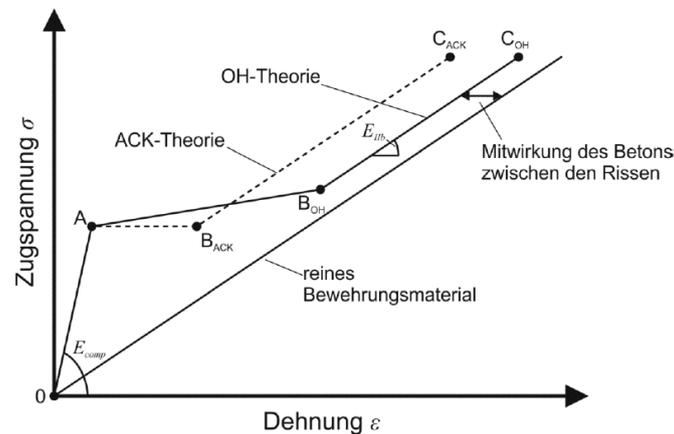


**Abb. 3-9:** Spannungs- Dehnungs- Diagramm eines Textilrovings (Schussrichtung) [23]

Abbildung **Abb. 3-9** zeigt den Spannungs- Dehnungsverlauf eines Carbonrovings (in Schussrichtung). Bei einem niedrigen Spannungsniveau ist ein gekrümmter Verlauf erkennbar. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im unbelasteten Zustand die Fasern nicht vollständig gestreckt sind. Ab einer Dehnung von rd. 5 ‰ stellt sich, bis zum Bruch, ein linear- elastischer Spannungsverlauf ein. Die Steifigkeit des Rovings wird im Wesentlichen durch die Steifigkeit der Fasern bestimmt. Das Tränkungsmedium hat nur einen untergeordneten Einfluss. Für die Höhe der Bruchspannung ist jedoch die Kombination des Tränkungsmediums und des Fasermaterials ausschlaggebend. Dieser Einfluss konnte in [23] bestätigt werden. Textilien aus AR- Glas, mit unterschiedlichen Tränkungsmedien, wurden untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass bei der Versuchsreihe mit Styrol- Butadien-Tränkung rd. 20 ‰ niedrigere Bruchspannungen, als bei der Versuchsreihe mit einer Epoxidharz-Tränkung, erreicht wurden.

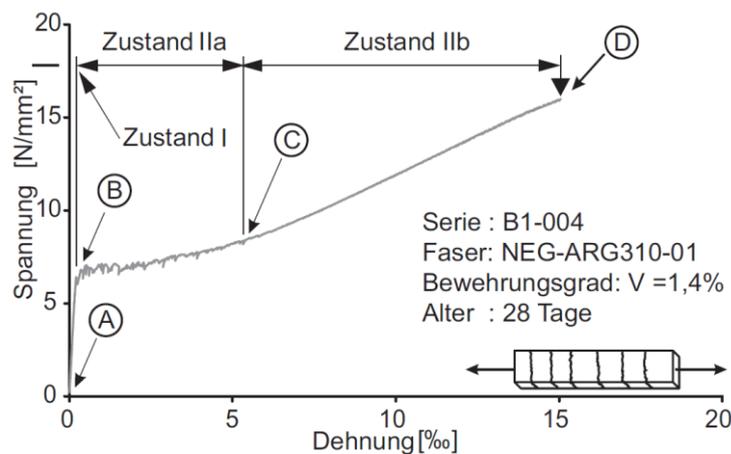
#### Zugtragverhalten des Verbundwerkstoffes [23]

Erste Untersuchungen zum Tragverhalten von Verbundwerkstoffen mit Monofilamentbewehrungen sind bereits Ende 1960 von AVESTON, COOPER und KELLY durchgeführt worden. Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist die in Abbildung **Abb. 3-10**, gestrichelte, Spannungs- Dehnungslinie. Sie ist durch das Verbinden der Punkte A, B und C entstanden. Dabei beschreibt A den Zustand der Erstrissbildung und den Übergang von ungerissenen Zustand (Zustand Ia) in den Zustand der Rissbildungsphase (Zustand IIa). Punkt B beschreibt den Abschluss der Rissbildung. Ab diesem Punkt wird die Steifigkeit des Verbundwerkstoffes durch die der Textilbewehrung bestimmt. Der Bruch wird durch den Punkt C charakterisiert. Gemäß der ACK- Theorie verläuft die Spannungsdehnungslinie zwischen A und B horizontal, es kommt zu keiner Laststeigerung. OHNO und HANNANT erweiterten diese Theorie um die, aus Zugversuchen an fibrillierten Polypropylenfasern, gewonnenen Erkenntnisse. Sie stellten fest dass es im Zustand IIa zu einer Laststeigerung kommt. In Abbildung **Abb. 3-10** ist der Spannungs- Dehnungsverlauf nach OH-Theorie dargestellt. Nach JESSE liegt die Laststeigerung im Bereich von 1,0 bis 1,3. KULAS schlägt in [23] einen Wert von 1,21 vor.



**Abb. 3-10:** Spannungs- Dehnungs- Diagramm eines textilbewehrten Betonbauteils unter zentrischer Zugbeanspruchung OH- und ACK- Theorie [23]

Im folgenden Abschnitt werden die für das Zugtragverhalten von textilbewehrten Betonbauteilen charakteristischen Zustände genauer beschrieben. Dazu ist in Abbildung **Abb. 3-11** ein typischer Spannungs- Dehnungsverlauf eines textilbewehrten Betonprobekörpers dargestellt.



**Abb. 3-11:** Spannungs- Dehnungs- Diagramm eines textilbewehrten Betonbauteils unter zentrischer Zugbeanspruchung [12]

I. Zustand I: linear-elastischer Bereich

Der in den Zugversuchen beobachtete Verlauf der Spannungs- Dehnungslinie weicht in diesem Bereich teilweise stark vom theoretischen Verlauf ab. JESSE und VOSS begründen dies mit den unterschiedlichen Aushärtungsbedingungen der taillierten Probekörper an Luft und Schalinnenseite. Durch die so entstehenden unsymmetrischen Eigenschaften entstehen in den Probekörpern zusätzliche Biegemomente, welche den nicht- linearen Verlauf verursachen. KULAS hat diesen Einfluss, durch die Verwendung zylindrischer Probekörper, nahezu neutralisieren können. Der Einfluss des Bewehrungsgrades ist aufgrund der großen Streuungen der Betonzugfestigkeit vernachlässigbar gering. [23]

II. Zustand IIa: Rissbildungsphase

Der Zustand IIa beschreibt den Zustand der Rissbildung. Nach dem Entstehen des ersten Risses bilden sich mit steigender Verformung und gering zunehmender Kraft weitere Risse, wie in OH- Theorie beschrieben. Nach JESSE liegt die Laststeigerung im Be-

reich von 1,0 bis 1,3. Das Ende der Rissbildungsphase stellt sich ein wenn zwischen den Rissen die Zugbruchkraft nicht mehr erreicht werden kann. [24]

### III. Zustand IIb: abgeschlossenes Rissbild

Im Zustand IIb ist die in den Beton eingeleitete Kraft kleiner als die Risszugkraft. Die Steifigkeit des Verbundwerkstoffes wird in diesem Bereich im Wesentlichen von der Steifigkeit der Bewehrung bestimmt. Dabei zeigt sich in Versuchen ein flacherer Verlauf der Spannungs- Dehnungslinie als beim Rovingzugversuch. KULAS führt dies auf zwei maßgebende Effekte zurück. Zum einen begründet er die Steifigkeitsreduktion mit dem kontinuierlichen Übergang vom starren Haftverbund zum Reibverbund zwischen Roving und Beton. In diesem Bereich ist kein starrer Verbund mehr gegeben und die Betondehnung entspricht nicht der des Textils. Aufgrund dieser Schwächung des Verbundes entzieht sich der Beton mit zunehmender Verformung der Mitwirkung. Der Hauptteil des Steifigkeitsdefizits ist auf die Querkontraktion der Rovinge zurückzuführen. Aufgrund der Materialeigenschaften der Tränkungen neigen diese stärker zur Querkontraktion, als beispielsweise Stahl. Bei gleichem Spannungsniveau, erfährt Epoxidharz eine rd. 63- fache höhere Querdehnung als Stahl. Dadurch löst sich der Roving vom Beton und es entsteht ein Schlupf im Prüfkörper. Dieser führt zu einer schlagartigen Verformungszunahme. [23]

### 3.3.3 TRUHPC unter einaxialer Druckbeanspruchung [25]

Unter einaxialer Druckbeanspruchung zeigt Textilbeton eine starke Abhängigkeit von der Bewehrungsgeometrie auf. MOLTER und VOSS haben diese Abhängigkeit bei Querkraftversuchen an Balken mit schmalen textilbewehrten Stegen beobachtet. Die Versuche haben eine Reduzierung der Druckstreben tragfähigkeit gezeigt. VOSS schlägt einen Abminderungsfaktor von 0,26 bis 0,34 für die Berücksichtigung der reduzierten Druckstreben tragfähigkeit vor. MOLTER bewertet die Reduktion mit 60%. Die Abhängigkeit wurde in [25] untersucht. Das Versuchsprogramm umfasst insgesamt zehn Versuchsserien aus bewehrten und unbewehrten Probekörpern. Neben dem Einfluss der Bewehrungsgeometrie, ist der Einfluss des Herstellungsverfahrens untersucht worden. Hierbei wurde ein Teil der Probekörper durch Handlaminiierung und die anderen im Gießverfahren hergestellt. In Abbildung **Abb. 3-12** ist die charakteristische Spannungs-Dehnungsbeziehung der einaxialen Druckversuche in Abhängigkeit der Bewehrungsgeometrie dargestellt. Unbewehrte Proben zeigen das für Feinbetonen typische spröde Versagen und eine vollständige Zerstörung des Probekörpers. Bei den bewehrten Proben stellen sich in Abhängigkeit der Bewehrungsgeometrie 3 maßgebende Versagensmechanismen ein.

Die Versagensarten lassen sich nach den folgenden Winkelbereichen einteilen:

#### I. Kleine Winkel: 0° bis 30°

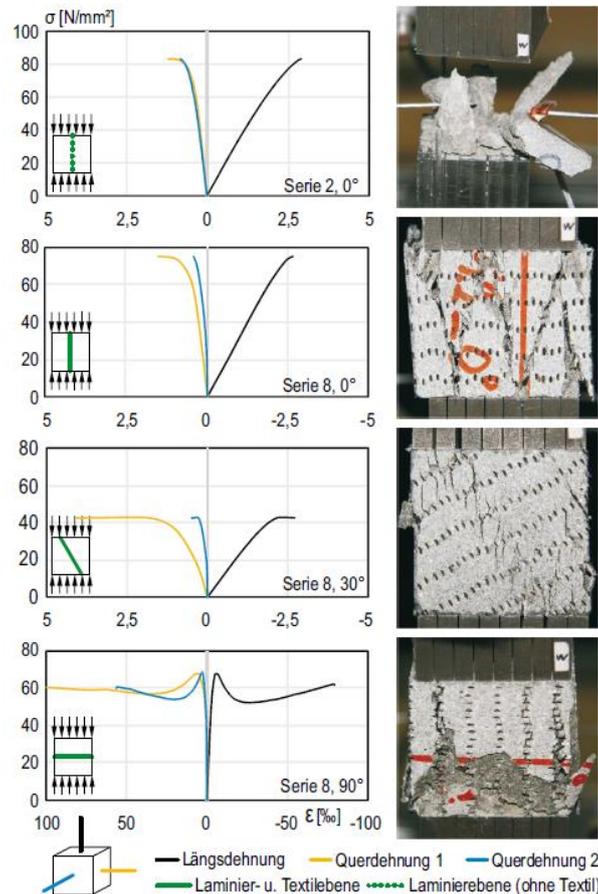
Das Textil wirkt als Störebene und ist Ausgangspunkt für die Rissbildung. Das Versagen tritt wie bei den unbewehrten Proben schlagartig ein. Der Probekörper selbst wird durch das Versagen gespalten, aber nicht vollkommen zerstört. Die Querdehnungen sind durch den richtungsabhängigen Bewehrungsgrad unterschiedlich.

#### II. Mittlere Winkel: 30° bis 60°

Der Versagensmechanismus in diesem Teilbereich ist durch ein duktileres Versagen der Probekörper gekennzeichnet. Ein Aufspalten des Probekörpers ist nicht zu beobachten gewesen. Wie auch beim ersten Teilbereich weichen die Querdehnungen in Abhängigkeit des Winkels der Bewehrung unterschiedlich stark ab.

### III. Mittlere Winkel: 60° bis 90° (90°)

In diesem Teilbereich unterscheidet sich der Versagensmechanismus sehr stark von den beiden ersten Teilbereichen. Nach Erreichen der maximalen Spannung ist zunächst ein Abfallen der Spannung, bei gleichzeitiger Zunahme der Dehnungen, zu beobachten. Danach stellt sich ein Wiederanstieg der Spannung ein. Bei einigen Proben wurden dabei Spannungen über das erste Spannungsmaximum hinaus erreicht. Die Querdehnungen gleichen sich, mit zunehmendem Winkel zu 90° an.



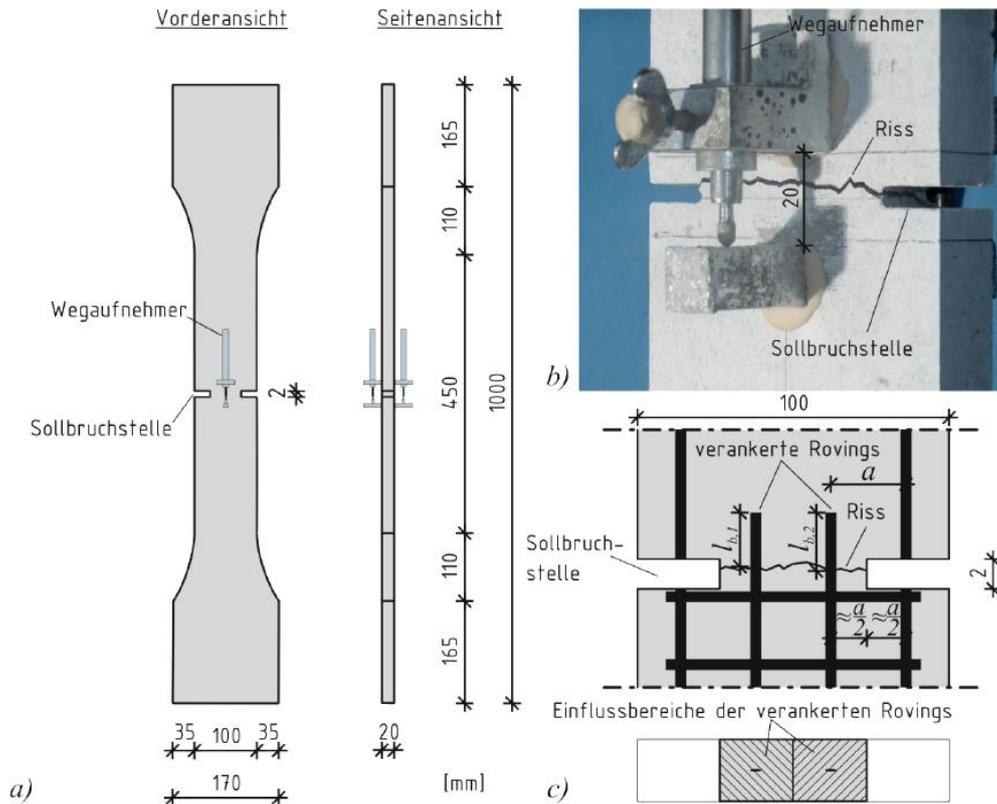
**Abb. 3-12:** Charakteristische Spannungs- Dehnungs- Beziehung eines textiltbewehrten Betonbauteils unter einaxialer Druckbeanspruchung in Abhängigkeit von der Bewehrungsgeometrie [25]

Grundsätzlich ist festgestellt worden, dass bewehrte Proben geringere Maximalspannungen als Unbewehrte erreichen. Dabei hängt die erreichte Maximalspannung sehr stark vom Winkel des Textils ab. Das Textil stellt, neben einer Querdehnungsbehinderung, eine Störstelle dar. An diesen müssen die Druckstreben umgelenkt werden. Dies führt zum Entstehen von zusätzlichen Querzugspannungen in der Betonmatrix und ist Ausgangspunkt für die Rissbildung, was das Versagen beschleunigt. Um den Einfluss des Bewehrungsgrades auf die einaxiale Druckfestigkeit zu beschreiben sind weiter Versuche an textiltbewehrten Probekörpern mit variierenden Bewehrungsgraden erforderlich. Erste Versuche deuten darauf hin, dass die angeführten Effekte bei geringeren Bewehrungsgraden weniger stark ausgeprägt sind. Weiter ist gezeigt worden, dass gegossene Proben höhere maximale Spannungen erreichen als die Laminieren. Dies lässt auf eine Störung des Gefüges durch den Herstellungsprozess des Laminierens schließen.

#### 3.3.4 Verbundverhalten textiler Bewehrung [23], [26]

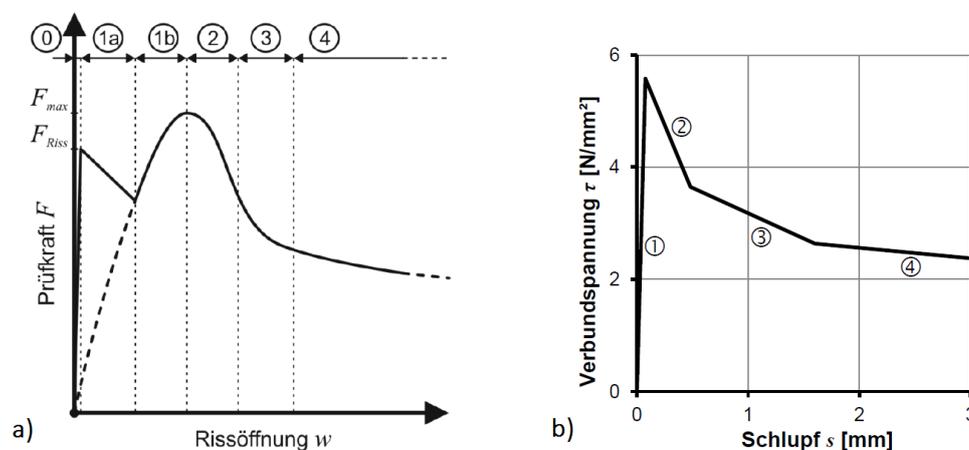
Ziel der Verbundversuche ist es, anhand der Versuchsergebnisse eine Verbund- Schlupf- Beziehung herzuleiten. Um das Verbundverhalten von Textilbeton realitätsgetreuer abzubilden und

den Einfluss der, bei Textilbeton üblichen, geringen Betondeckung (rd. 10 mm) zu berücksichtigen, ist das Verbundverhalten in [23] an modifizierten Dehnkörpern untersucht worden (siehe **Abb. 3-13**). Das Textil wird in einer Probekörperhälfte verankert und in der zweiten Hälfte mit der Verbundlänge  $l_{b,1}$  eingebunden. Um eine ungestörte Rissausbildung zu gewährleisten, wird im zu untersuchenden Bereich eine Sollbruchstelle von 2,0 mm Stärke angeordnet. Sie dient dazu den Erstriss in diesem Bereich zu initiieren.



**Abb. 3-13:** Modifizierter Dehnkörper für Auszugversuche. A) Geometrie und Messtechnik; b) Detail der Sollbruchstelle mit Riss während der Prüfung; c) Detail der Bewehrungsführung [23]

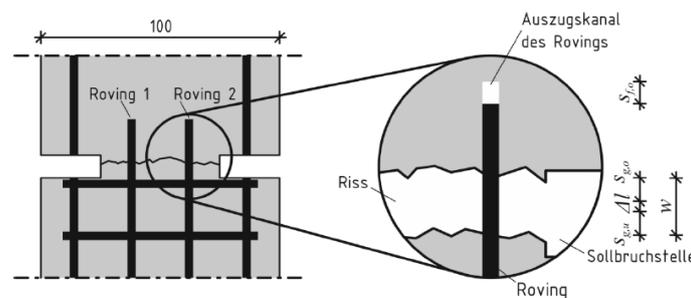
Die Verbundspannungs- Schlupf- Beziehung kann nicht direkt gemessen werden. Die Prüfkraft und die Rissöffnung können direkt abgelesen werden. Aus diesen Messgrößen lässt sich die Kraft- Rissöffnungs- Beziehung abbilden.



**Abb. 3-14:** Schematische Darstellung der Versuchsergebnisse: a) Kraft- Rissöffnungs- Beziehung; b) Verbundspannungs- Schlupf- Beziehung [23]

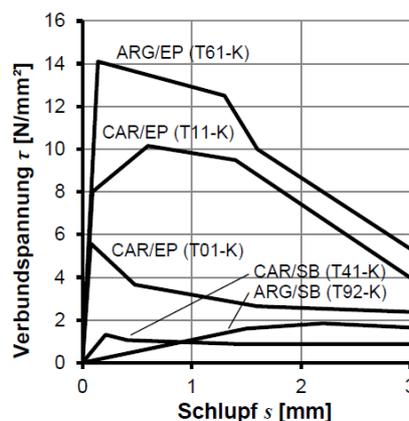
In Abbildung **Abb. 3-14a)** ist der für Textilbeton charakteristische Kraft- Rissöffnungs- Verlauf dargestellt. Die Kurve lässt sich anhand der charakteristischen Punkte in sechs Teilbereiche aufteilen. Bis zum Erreichen der Risslast herrscht ein starrer Verbund zwischen den beiden Komponenten. Es tritt keine Relativverschiebung zwischen dem Textil und der Betonmatrix auf. Das steife Verhalten in diesem Bereich ist auf den Einfluss des Betons zurückzuführen. Wird die Risslast erreicht, entsteht an der Sollbruchstelle der Riss und die Prüfkraft fällt ab. Aufgrund des Lastabfalls kommt es zu einer Umlagerung vom steifen, unnachgiebigen, Verbund zu einem nachgiebigen Verbund. Erreicht die Kurve  $F_{max}$ , ist der starre Verbund vollkommen zum nachgiebigen Verbund übergegangen. Danach ist keine Laststeigerung mehr möglich und der nachgiebige Verbund geht in einen reinen Reibverbund über. Das Verbundspannungs- Schlupf- Verhalten kann anhand von Berechnungsansätzen nach LORENZ und ORTLEPP aus der Kraft- Rissöffnung- Beziehung ermittelt werden. Dieser Berechnung liegt eine iterative Berechnung des Schlupfes, anhand der gemessenen Rissöffnung, zugrunde. Dabei setzt sich die Rissöffnung  $w$  aus dem Schlupf am verankernden Ende  $s_{g,o}$ , dem Schlupf am unteren durchlaufenden Ende  $s_{g,u}$  und der elastischen Dehnung des Textilgarns  $\Delta l$  zusammen (siehe **Abb. 3-15**). Die Rissöffnung  $w$  kann anhand der Formel 3-2 beschrieben werden. [23]

$$w(F_t) = s_{g,o}(F_t) + s_{g,u}(F_t) + \Delta l(F_t) \quad (3-2)$$



**Abb. 3-15:** Größen am Riss [23]

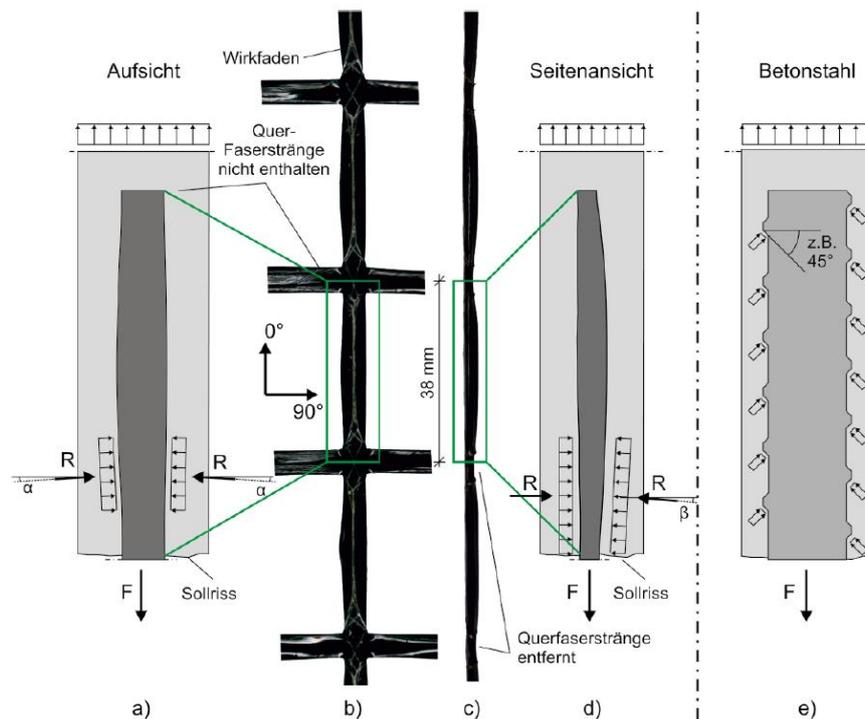
In Abbildung **Abb. 3-14b)** ist der charakteristische Verlauf der Verbundspannung- Schlupf- Kurve dargestellt. In [23] zeigten die Berechnungsansätze sehr gute Übereinstimmungen mit den Versuchsergebnissen. Die anhand einer Einbindelänge von 20,0 mm gewonnen Verbundspannung- Schlupf- Beziehungen sind auf Verankerungslängen von 60,0 mm übertragbar.



**Abb. 3-16:** Vergleich der Verbundspannung- Schlupf- Beziehung verschiedener Textilien [23]

Die aus den Versuchen ermittelten Verbundspannung- Schlupf- Beziehungen sind in **Abb. 3-16** für die einzelnen Textilien dargestellt. Dabei zeigen Styrol- Butadien Tränkungen ein weiches Verbundverhalten als Epoxidharztränkungen auf. Die Verankerungs- bzw. Übergreifungslängen

liegen bei epoxidharzgetränkten Textilien zwischen 17 mm und 43 mm. Bei den Textilien mit Styrol-Butadien-Tränkung liegen diese bei 122 mm und 320 mm. [23]



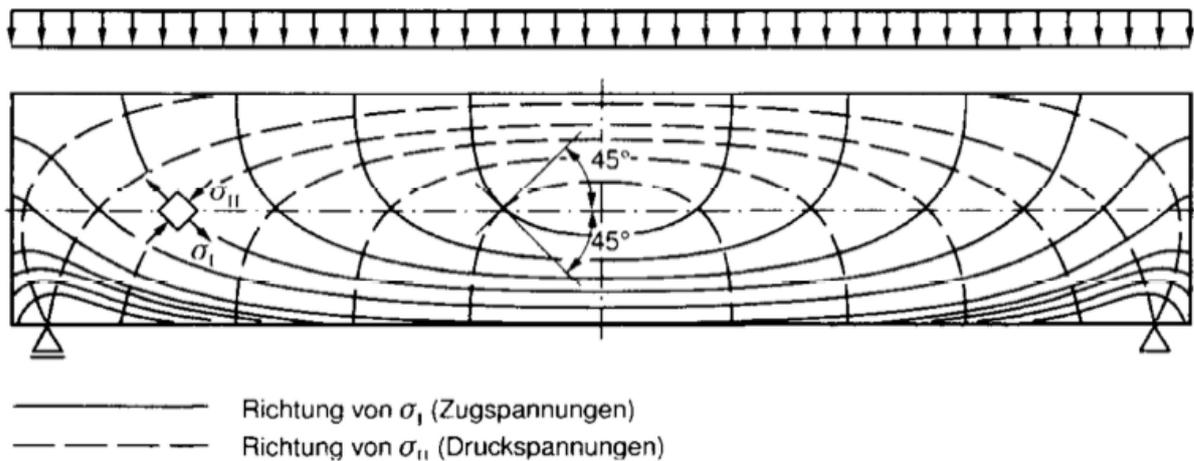
**Abb. 3-17:** Formschluss als Verbundmechanismus im Vergleich zwischen textiler Bewehrung und geripptem Betonstahl [26]

In Abbildung **Abb. 3-17** ist der Verbundmechanismus des epoxidharzgetränkten Textilrovinges jenen des gerippten Betonstahls gegenübergestellt. Das durch die Querstränge entstehende Wellenmuster kann als stark gestreckte Rippung interpretiert werden. Dieses Wellenmuster ist aufgrund des einseitigen Aufliegens des Querstranges nicht symmetrisch. Bei kurzen Einbindelängen ergibt sich somit eine große Abhängigkeit vom im Beton eingebundenen Abschnitt der Wellenform. In [26] ist gezeigt worden, dass der Einfluss der Querstränge sehr gering ausfällt. Die Knotenverbindung zwischen Längs- und Quersträngen ermöglichen es nicht zusätzliche Betonflächen zur Kraftübertragung zu aktivieren. Demnach beruhte die Erhöhung der Auszugskraft, bei den in [26] durchgeführten Versuchen, im Wesentlichen auf der größeren Einbindelänge und der damit zusätzlich aktivierten Betonfläche. Es wird angenommen, dass die Verbundeigenschaften im Wesentlichen von der Maschenweite und der damit verbundenen Wellenform abhängig sind. Um diese Annahme zu bestätigen, sind weitere Verbundversuche erforderlich. [26]

### 3.4 Querkrafttragverhalten

#### 3.4.1 Allgemeines [16]

Im ungerissenen Zustand, Zustand I, stellt sich in Betontragwerke unter Querkraftbelastung ein ebener zweiachsiger Spannungszustand mit Hauptzug- und Hauptdruckspannungen die normal zueinander verlaufen ein. In Abbildung **Abb. 3-18** ist der Verlauf der Hauptspannungstrajektorien eines Einfeldträgers unter Gleichlast dargestellt. Anhand des Verlaufs der Hauptdruckspannungen lässt sich deutlich die Form eines „Druckbogens“ erkennen. Die Hauptzugspannungen, welche normal zu den Hauptdruckspannungen verlaufen, formen am unteren Tragwerksrand ein „Zugband“. Dabei gibt es keinen wesentlichen Unterschied im Tragverhalten bei Betontragwerken mit oder ohne Querkraftbewehrung. Unterschiede im Tragmechanismus stellen sich erst mit steigender Belastung und entstehender Rissbildung ein.

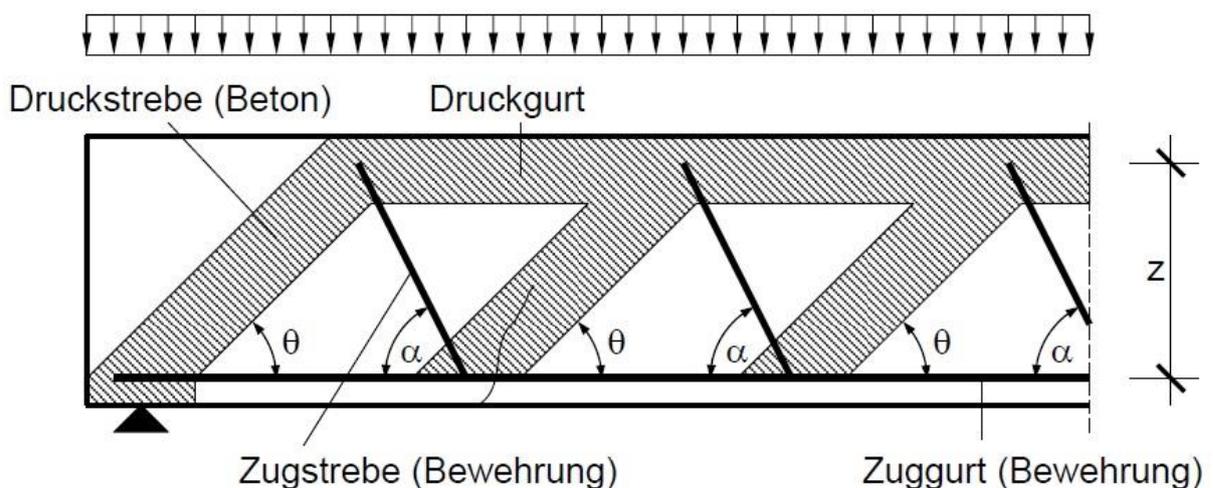


**Abb. 3-18:** Schematische Darstellung der Hauptspannungstrajektorien eines Einfeldträgers unter Gleichlast, im Zustand I [17]

Mit dem Entstehen von Rissen wird der Zustand II erreicht. Dabei wird zwischen Biege- und Schubrisen unterschieden. Schubrisen entstehen wenn die Hauptzugspannung im Steg die Betonzugfestigkeit überschreitet. Sie verlaufen senkrecht zu den Hauptzugspannungen und kennzeichnen somit die Richtung der Betondruckstreben. Das Tragverhalten im Zustand II kann dabei, bei Betontragwerken mit Querkraftbewehrung, sehr gut mit einem idealisierten Fachwerkmodell (siehe **Abb. 3-19**) beschrieben werden.

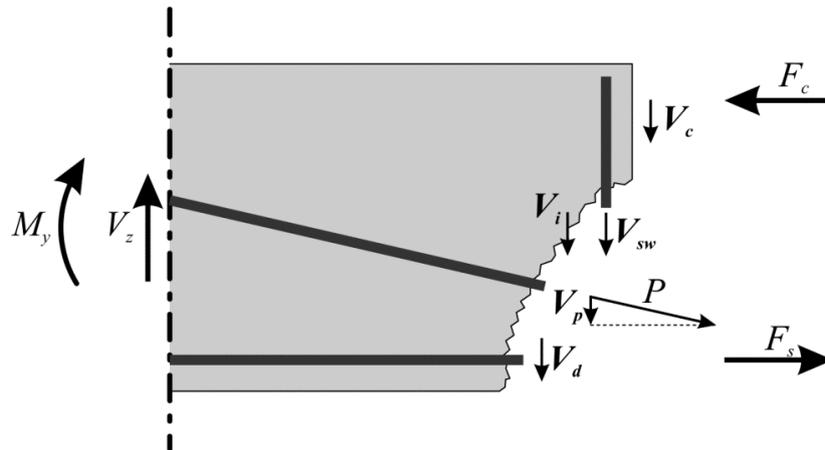
Dabei werden gemäß [16] folgende Annahmen getroffen:

- Zwischen Ober- und Untergurt bilden sich zum Auflager hin geneigte Druckstreben
- Die Kräfte der Druckstreben und des Druckgurtes werden durch den Beton aufgenommen
- Die Zugstreben des Fachwerks bestehen aus vertikalen und schräg geneigten Bewehrungselementen
- Die Zugkräfte werden durch die Bewehrung aufgenommen (Zustand II)



**Abb. 3-19:** Idealisiertes Fachwerkmodell zur Beschreibung des Querkrafttragverhaltens von bewehrten Betontragwerken [29]

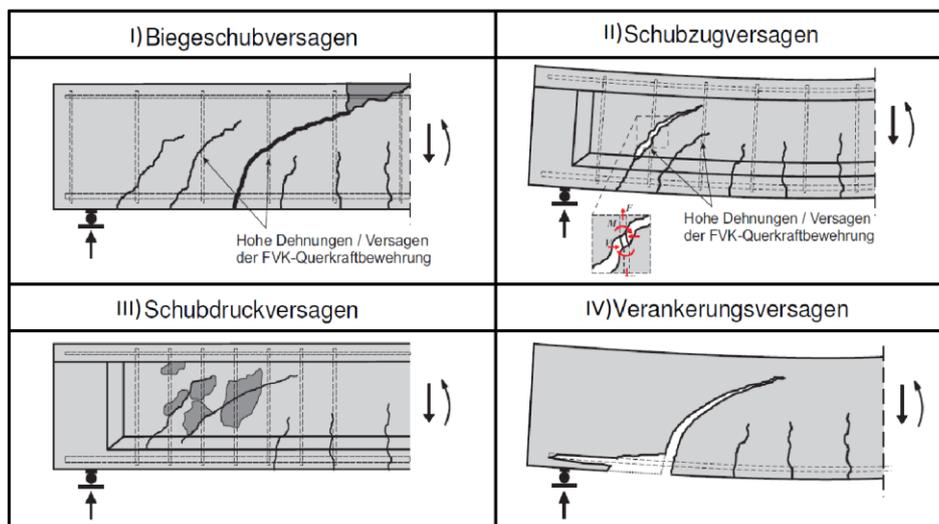
Die aktivierten Tragmechanismen für das Querkrafttragverhalten sind in Abbildung **Abb. 3-20** dargestellt. Die Anteile der einzelnen Mechanismen an der Lastabtragung hängen von den geometrischen Verhältnissen des Querschnitts, des Bewehrungsgrades und der Belastungshöhe ab.



**Abb. 3-20:** Querkraftkomponenten bei Betontragwerken mit Querkraftbewehrung [23]

<b>mit:</b>	$V_c$	Vertikalkomponente der Betondruckkraft
	$V_{sw}$	Vertikalkomponente der Querkraftbewehrung
	$V_d$	Vertikalkomponente aus der Dübelwirkung der Längsbewehrung
	$V_p$	Vertikalkomponente der Vorspannung
	$V_i$	Vertikalkomponente aus der Rissverzahnung

Das Schubversagen von querkraftbewehrten Betontragwerken kann nicht, wie bei jenen ohne Querkraftbewehrung, ausschließlich auf ein Überschreiten der Betontragfähigkeit zurückgeführt werden. In Abbildung **Abb. 3-21** sind die wesentlichen Schubversagensmechanismen für Betonkonstruktionen mit Querkraftbewehrung dargestellt.



**Abb. 3-21:** Versagensmechanismen bei Querkraftversagen von Betontragwerken mit Querkraftbewehrung [27]

#### I. Biegeschubversagen

Tritt bei Betonkonstruktionen mit geringer Querkraftbewehrung und jenen ohne Querkraftbewehrung auf. Dabei erreicht die Schubbewehrung schon mit der Schubrissbildung die Streckgrenze. Bei einer geringen Laststeigerung führt dies zu einer deutlichen Rissvergrößerung. Die Aufnahme der Querkräfte erfolgt im Wesentlichen durch die Dübelwirkung der Längsbewehrung und der Biegedruckzone. Die Dübeltragwirkung der Längsbewehrung nimmt mit zunehmender Laststeigerung ab. Was dazu führt dass die Betondruckzone eingeschnürt wird und das Tragwerk mit dem Überschreiten der Betondruckfestigkeit schlagartig versagt.

## II. Schubzugversagen

Durch eine ausreichende Querkraftbewehrung wird, nach der Schubrissbildung, das vorzeitige Einschnüren der Betondruckzone verhindert. Nach dem Entstehen der ersten Schubrisse ist eine deutliche Laststeigerung möglich. Die Fachwerktragwirkung kann sich voll einstellen. Erst ab dem Belastungsniveau, ab welchem die Querkraftbewehrung die Streckgrenze erreicht, kommt es zu einer schnelleren Öffnung der Schubrisse. Das Versagen tritt entweder durch das Reißen der Querkraftbewehrung oder durch ein Versagen der eingeschnürten Biegedruckzone ein.

## III. Schubdruckversagen

Tritt bei hochschubbewehrten profilierten Betontragwerken mit dünnen Stegen auf. Dabei kann sich, aufgrund der ausreichenden Querkraftbewehrung, die Fachwerktragwirkung voll einstellen. Aufgrund des hohen Querkraftbewehrungsgrades erreicht die Querkraftbewehrung auch im Bruchzustand die Streckgrenze nicht. Das Tragwerk versagt mit dem Erreichen der Druckstrebentragfähigkeit schlagartig

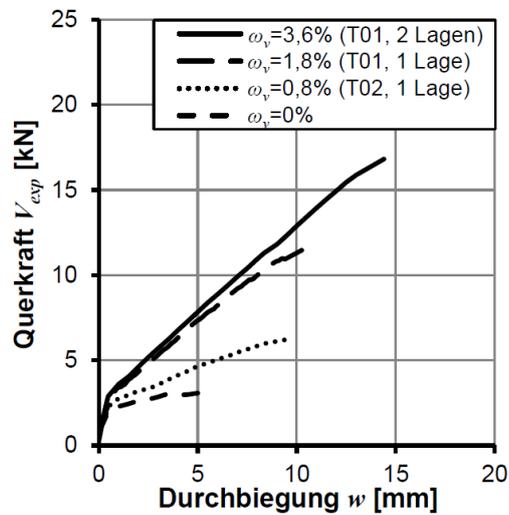
## IV. Verankerungsversagen [28]

Wird die Längsbewehrung oder die Schubbewehrung nicht ausreichend verankert, kann sich die Fachwerktragwirkung nicht voll ausbilden und das Tragwerk versagt vor dem Erreichen der Querkrafttragfähigkeit. Dieser Versagensmechanismus kann durch das Einhalten konstruktiver Vorgaben verhindert werden.

### 3.4.2 **Querkrafttragverhalten von textilbewehrten Bauteilen [23]**

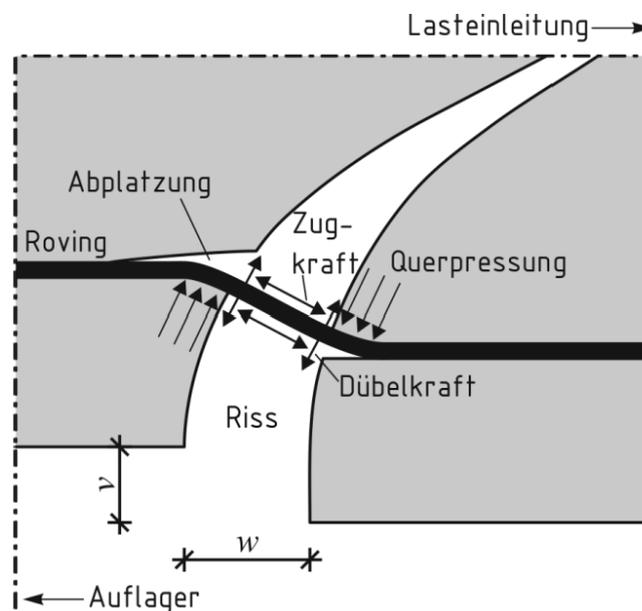
Die ersten Erkenntnisse zum Querkrafttragverhalten von textilbewehrten Betonbauteilen gehen auf die Untersuchungen von MOLTER und VOSS zurück. Dabei haben sie sich auf die Ansätze von ZINK für Bauteile ohne Querkraftbewehrung gestützt. ZINK beschreibt in seinem Modell den Tragmechanismus der ungerissenen Betondruckzone als den maßgebenden für die Querkrafttragfähigkeit. Die wesentlichen Tragmechanismen für bewehrte Betonbauteile sind in Abbildung **Abb. 3-20** dargestellt. MOLTER und VOSS haben bei ihren Untersuchungen an Betonbauteilen mit ungetränkten Textilien festgestellt, dass aufgrund der geringen Korndurchmesser der Betonmatrix die Rissverzahnung nur eine untergeordnete Rolle spielt. Weiter ist beobachtet worden, dass die Dübeltragwirkung der Längsbewehrung aufgrund der Biegeweichheit der Textilien für die Querkrafttragfähigkeit unwesentlich ist. Damit sind sie zum Schluss gekommen, dass die Querkrafttragfähigkeit von textilbewehrten Betontragwerken im Wesentlichen auf der Tragfähigkeit der ungerissenen Betondruckzone und auf der Wirkung der Querkraftbewehrung beruht. Dabei setzt sich die Gesamtragfähigkeit additiv aus beiden Traganteilen zusammen. Diese von MOLTER und VOSS getroffene Annahme muss noch in weiterführenden Versuchen bestätigt werden. In [23] wurde die Querkrafttragfähigkeit an textilbewehrten I- Trägern untersucht. Es hat sich gezeigt, dass sich die Anordnung einer Querkraftbewehrung, neben der Erhöhung der Querkrafttragfähigkeit, positiv auf das Verformungsverhalten der untersuchten Träger ausgewirkt hat. Das Versagen der Träger trat in Abhängigkeit der Verankerung der textilen Bewehrungselemente im Steg auf. Bei den Versuchskörpern, wo die Stegbewehrung lediglich über die Verankerungslänge im Untergurt verankert wurde, trat das Versagen durch einen Auszug der Textilrovings aus dem Untergurt ein. Bei den Versuchskörpern bei denen die Verankerung über Formprofile hergestellt worden ist, kam es zu einem schollenartigen Aufbrechen des Untergurtes. In Abbildung **Abb. 3-22** sind die Mittelwerte der in [23] durchgeführten Versuche, in einem Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm, in Abhängigkeit des steifigkeitsbezogenen Bewehrungsgrades, dargestellt. Dabei ermittelt sich der steifigkeitsbezogene Bewehrungsgrad gemäß Gleichung (3-3). Ein Versagen der Querkraftbewehrung, Bruch des Rovings, ist bei den Versuchen nicht aufgetreten.

$$\omega_v = \frac{A_{t,v} \cdot E_t}{A_c \cdot E_c} \quad (3-3)$$



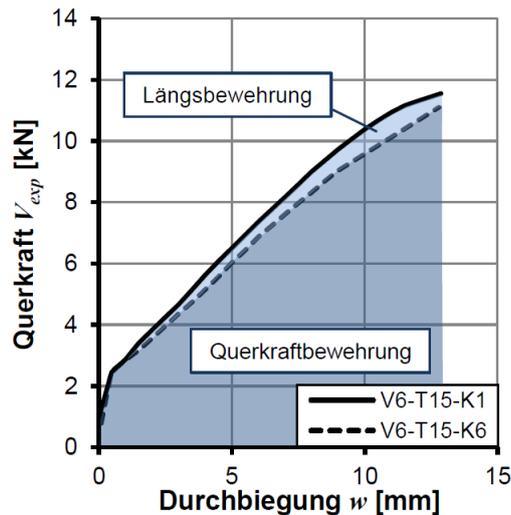
**Abb. 3-22:** Querkraft- Durchbiegungs- Beziehung in Abhängigkeit des steifigkeitsbezogenen Bewehrungsgrades der Querkraftbewehrung [23]

Bei ungetränkten Textilien werden durch die Umlenkung des Rovings am Rissufer zusätzlich die inneren Filamente des Textilrovings aktiviert (siehe **Abb. 3-23**). Der von VOSS beobachtete Einfluss der Längsbewehrung im Steg bei ungetränkten Textilien konnte von KULAS bei den Versuchen mit getränkten Textilien in [23] nicht beobachtet werden.



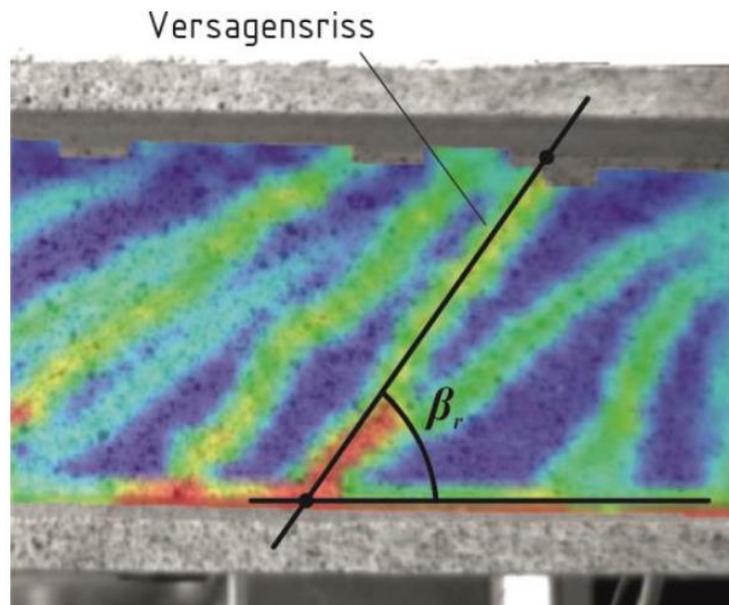
**Abb. 3-23:** Umlenkung des ungetränkten Rovings am Rissufer [23]

In Abbildung **Abb. 3-24** ist der, aus den Versuchen in [23], ermittelte Einfluss der Längsbewehrung im Steg auf die Gesamtquerkrafttragfähigkeit dargestellt. Daraus lässt sich erkennen, dass die Längsbewehrung des Steges nur einen marginalen Einfluss auf die Querkrafttragfähigkeit hat.



**Abb. 3-24:** Einfluss der Längsbewehrung im Steg und der Querkraftbewehrung auf die Gesamtquerkrafttragfähigkeit [23]

VOSS hat bei seinen Untersuchungen festgestellt, dass der Schubrißwinkel  $\beta_r$  keine Abhängigkeit vom steifigkeitsbezogenen Bewehrungsgrad  $\omega_v$  besitzt. Diese Feststellung ist in den Versuchen in [23] bestätigt worden. Dabei hat sich ein konstanter Winkel von  $\beta_r = 44^\circ$  (bei VOSS  $\beta_r = 42^\circ$ ) eingestellt. Die steilen Winkel sind auf die Nähe des Versagensrisses zur Lasteinleitung zurückzuführen. In Abbildung **Abb. 3-25** ist der Schubrißwinkel  $\beta_r$  an einem ARAMIS- Messbild, aus einem Versuch in [23], dargestellt.



**Abb. 3-25:** Schubrißwinkel  $\beta_r$  (Bild einer ARAMIS- Messung) [23]

Im Folgenden wird neben dem aktuellen Modell des Eurocodes für die Querkraftbemessung von Stahlbetonbauteilen, das Modell für die Bemessung der Querkrafttragfähigkeit von textilbewehrten Betontragwerken aus [23] vorgestellt.

### 3.4.3 Querkraftmodelle

#### Bemessungsansatz nach Eurocode 2

Der Ansatz des Eurocodes unterscheidet zwischen der Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetonbauteilen ohne Querkraftbewehrung bzw. mit Querkraftbewehrung.

#### Querkraftwiderstand für Stahlbetonbauteile ohne Querkraftbewehrung [V<sub>Rd,c</sub>]

$$V_{Rd,c} = \min \left\{ \begin{array}{l} [C_{Rd,c} \cdot \kappa \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d \\ (v_{\min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \end{array} \right. \quad (3-4)$$

mit:

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} \quad (3-5)$$

$$v_{\min} = 0,035 \cdot \kappa^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} \quad (3-6)$$

$$k_1 = 0,15 \quad (3-7)$$

$$\kappa = 1 + \sqrt{\frac{200}{d_{[mm]}}} \leq 2,0 \quad (3-8)$$

$$\rho_l = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} \leq 0,02 \quad (3-9)$$

$C_{Rd,c}$	Kalibrierungsfaktor
$v_{\min}$	Faktor für Festigkeitsabminderung infolge Rissbildung
$\kappa$	Maßstabsfaktor
$\rho_l$	Längsbewehrungsgrad
$d$	statische Nutzhöhe
$b_w$	kleinste Querschnittsbreite
$f_{ck}$	Charakteristische Betondruckfestigkeit
$\sigma_{cp}$	mittlere Betonspannung infolge Normalkraft
$k_1$	Beiwert zur Anrechnung der Normalspannung

#### Querkraftwiderstand für Stahlbetonbauteile mit Querkraftbewehrung [V<sub>u</sub>]

$$V_u = \min \left\{ \begin{array}{l} V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta \\ V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot \frac{1}{\cot \theta + \tan \theta} \end{array} \right. \quad (3-10)$$

mit:

$$0,6 \leq \tan \theta \leq 1,0$$

$$v_1 = v = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (3-11)$$

Für Tragwerke ohne Vorspannung:

$$\alpha_{cw} = 1,0$$

Für Tragwerke mit planmäßiger Vorspannung:

$$\alpha_{cw} = 1 + \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} \quad \rightarrow \quad 0 < \sigma_{cp} \leq 0,25 \cdot f_{cd} \quad (3-12)$$

$$\alpha_{cw} = 1,25 \quad \rightarrow \quad 0,25 \cdot f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0,50 \cdot f_{cd} \quad (3-13)$$

$$\alpha_{cw} = 2,5 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right) \quad \rightarrow \quad 0,50 \cdot f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 1,0 \cdot f_{cd} \quad (3-14)$$

$V_{Rd,s}$	Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit der Querkraftbewehrung
$V_{Rd,max}$	Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit der Betondruckstrebe
$f_{ywd}$	Bemessungswert der Streckgrenze der Querkraftbewehrung
$\alpha_{cw}$	Beiwert zur Berücksichtigung des Spannungszustands im Druckgurt
$v$	Faktor für Festigkeitsabminderung infolge Rissbildung
$A_{sw}$	Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung
$s$	Bügelabstand
$z$	innerer Hebelsarm
$\theta$	Neigung der Druckstrebe

### Bemessungsansatz nach KULAS [23]: modifizierter Ansatz nach VOSS

#### Querkraftwiderstand für Bauteile ohne Querkraftbewehrung [ $V_{Rm,c}$ ]

$$V_{Rm,c} = C_{Rm,c} \cdot \beta \cdot \eta_1 \cdot k \cdot (\rho_t^\delta \cdot \sigma_t \cdot f_{cm})^{1/3} \cdot b_{s,eff} \cdot d \quad (3-15)$$

mit:

$$C_{Rm,c} = 0,01 \quad \text{für Balken mit I- Querschnitt} \quad (3-16)$$

$$\beta = \frac{3}{a/d} \geq 1,0 \quad \text{für Balken mit I- Querschnitt} \quad (3-17)$$

$$\eta_1 = 1,0$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d_{[mm]}}} \leq 2,0 \quad (3-8)$$

$$\rho_l = \frac{A_l}{A_c} \quad (3-18)$$

$$\delta = 1.0 \quad \text{für Balken (b/h < 4,0)}$$

$$\sigma_t = \frac{M_{\max}}{z \cdot A_t} \quad (3-19)$$

$C_{Rm,c}$	Kalibrierungsfaktor
$\beta$	Beiwert zur Berücksichtigung auflagnaher Einzellasten
$\eta_1$	Korrekturfaktor für Leichtbeton
$k$	Maßstabsfaktor
$\rho_l$	geometrischer Bewehrungsgrad
$\delta$	Beiwert zur Berücksichtigung der Dübelwirkung
$\sigma_t$	Textilspannung
$f_{cm}$	Mittelwert der Betondruckfestigkeit
$b_{s,eff}$	effektive Stegbreite
$d$	statische Nutzhöhe

### **Querkraftwiderstand für Bauteile mit Querkraftbewehrung [V<sub>Rm,f</sub>]**

Die Gesamtquerkrafttragfähigkeit wird gemäß Gleichung (3-20) berechnet. Dabei setzt sich diese additiv aus den Betontraganteil ( $V_{Rm,c}$ ) und dem Fachwerkanteil ( $V_{Rm,f}$ ) zusammen. Dabei entspricht der Betontraganteil der Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung gemäß Gleichung (3-15). Der Fachwerkanteil wird, in Anlehnung an den Eurocode 2, aus dem Minimum der Zugstreben- bzw. Druckstrebentragfähigkeit ermittelt.

$$V_{Rm} = V_{Rm,c} + V_{Rm,f} \quad (3-20)$$

mit:

$V_{Rm}$	Gesamtquerkrafttragfähigkeit
$V_{Rm,c}$	Betontraganteil der Querkrafttragfähigkeit
$V_{Rm,f}$	Fachwerkanteil der Querkrafttragfähigkeit

KULAS modifizierte in [23] den Ansatz von VOSS indem er die Erkenntnisse seiner Untersuchungen in das Modell integrierte.

Folgenden Modifizierungen zum Ansatz von VOSS werden in die Berechnung integriert:

- Die Dehnung bzw. Zugfestigkeit der Querkraftbewehrung wird in Abhängigkeit des Querbewehrungsgrades begrenzt.
- Der Anteil der Längsbewehrung im Steg ist vernachlässigbar gering und wird im Ingenieurmodell nicht angesetzt.
- Eine Umlenkung der getränkten Textilrovinge findet nicht statt.
- Die Druckstrebentragfähigkeit wird nach VOSS angesetzt.

$$V_{Rm,f} = \min \left\{ \begin{array}{l} a_{t,w} \cdot f_{t,u} \cdot k_{\alpha} \cdot k_w \cdot z \cdot \cot \beta_r \\ \alpha_c \cdot f_{cm} \cdot b_{w,red} \cdot \frac{z}{\cot \beta_r + \tan \beta_r} \end{array} \right. \quad (3-21)$$

mit:

$$k_{\alpha} = \left( 1 - \frac{\alpha}{90^{\circ}} \right)^2 \quad (3-22)$$

$$\alpha = 90 - \beta_r \quad (3-23)$$

$$k_w = 1.81 \cdot \omega_v + 0.29 \leq 1.0 \quad (3-24)$$

$$\cot \beta_r = 1.0 - 0.55 \cdot \frac{\sigma_x}{f_{cm}} \leq \begin{cases} 2.15 \\ a/d \end{cases} \quad (3-25)$$

$$\alpha_c = 0,297$$

$$b_{w,red} = b_w - n \cdot d_t + 0.3 \cdot \sum_i h_{f,i} \quad (3-26)$$

$a_{t,w}$	Querschnittsfläche der textilen Querkraftbewehrung pro Meter
$f_{t,u}$	Zugfestigkeit des Textils
$k_{\alpha}$	Abminderungsfaktor infolge schiefwinkliger Beanspruchung
$k_w$	Begrenzung der Zugfestigkeit der Querkraftbewehrung
$\omega_v$	steifigkeitsbezogener Bewehrungsgrad (siehe Gleichung (3-3))
$\beta_r$	Schubrisswinkel
$\sigma_x$	Längsspannung
$\alpha_c$	Abminderungsfaktor nach VOSS
$b_{w,red}$	effektive Stegbreite nach MOLTER
$b_w$	Stegbreite
$d_t$	Rovingdurchmesser
$h_{f,i}$	Flanschhöhe

## 4 Experimentelle Untersuchungen

### 4.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird das dieser Diplomarbeit zugrundeliegende Versuchsprogramm erläutert. Dieses umfasst eine Versuchsreihe von 24 Querkraftversuchen an textilbewehrten Versuchskörpern aus ultrahochfestem Beton. Dabei ist der Einfluss der Schubschlankheit und der Bewehrungskonfiguration auf das Querkrafttragverhalten der Versuchskörper untersucht worden. Bei den Versuchskörpern handelt es sich um neun Träger mit T- Querschnitt und sechs Deckenelementen. Die Ausbildung der Versuchskörper wird im Unterkapitel 4.3.1 *Versuchskörper* beschrieben. Der allgemeine Versuchsaufbau wird im Unterkapitel 4.4.2 *Versuchsaufbau* erläutert.

Um die Versuche anhand ihrer spezifischen Bewehrungszusammensetzung, Querschnittsausbildung sowie der Belastungskonfiguration eindeutig zuordnen zu können, ist folgendes Bezeichnungsschema verwendet worden:

**VV- TT- Nr.- LL**

mit: VV Versuchskörper

V1: T- Träger

V2: Deckenelemente

TT Bewehrungskombination

	Biegebewehrung		Querkraftbewehrung
T05:	2 DM 8	+	Q45/ Q45 CCS 20
T06:	2 DM 10 (Nr.12: 3 DM 10)	+	Q45/ Q45 CCS 20
T07:	2 DM 8	+	Q95/ Q95 CCE 38
T08:	2 DM 10	+	Q95/ Q95 CCE 38
T09:	Q95/ Q95 CCE 38	+	Q45/ Q45 CCS 20
T10:	Q142/ Q142 CCE 25	+	Q95/ Q95 CCE 38
T11	Q142/ Q142 CCE 38	+	Q142/ Q142 CCE 38

Nr Nummer

Nr01- 11 ohne VSP

Nr12 mit VSP

LL Belastungskonfiguration/ Schubschlankheit [a/d]

L01 a/d= 2,5

L02 a/d= 3,5

L03 a/d=4,0

L04 a/d=3,0

### 4.2 Verwendete Materialien

#### 4.2.1 Ultrahochfester Beton

Die Eigenschaften von ultrahochfesten Betonen sind bereits im Kapitel 2. *Werkstoffe* beschrieben worden. Im folgenden Abschnitt wird die für die Versuche verwendete UHPC- Mischung erläutert. Diese ist in Zusammenarbeit mit dem Institut für Hochbau und Technologie unter der Lei-

tung von Dipl.- Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer erstellt worden. Die Mischungszusammensetzung der erstellten UHPC- Mischung ist der Tabelle **Tab. 4-1** zu entnehmen.

Bestandteile	Menge [kg]	Dichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	Volumen [dm <sup>3</sup> ]
Quarzsand 0,1- 0,5 mm	928	2,65	350
Zement CEM I 53,5N C <sub>3</sub> A- frei	666	3,05	218
Quarzmehl	333	2,65	126
Anmachwasser	169	1,00	169
Silikatstaub	167	2,20	76
Fließmittel	30	1,15 (bei 20°C)	26
Konsistenzhalter	13	1,04	13
Schwindreduzierer	7	1,00	7
Entlüfter	1	0,99	1
Gesamt	2314	~2,34	~1000

**Tab. 4-1:** Mischungszusammensetzung des verwendeten ultrahochfesten Betons [30]

Um die bei UHPC übliche erhöhte Schwindneigung zu reduzieren, ist für die UHPC- Mischung ein Zementgehalt von unter 800 kg/m<sup>3</sup> angestrebt worden. Darüber hinaus ist der Mischung ein Schwindreduzierer (hier Expancrete), für eine weitere Reduktion des Schwindens und zur Reduktion der Spannkraftverluste, beigemischt worden. Für eine ausreichend gute Fließfähigkeit ist durch die Zugabe von Fließmitteln und einer Erhöhung der Packungsdichte, durch die Zugabe von Quarzmehl und Silikatstaub, gesorgt worden.

In Tabelle **Tab. 4-2** werden die Ergebnisse der Werkstoffprüfungen des UHPCs dargestellt. Aufgrund fehlender Angaben zu den Deckenelementen V2-T10-Nr.10 und V2-T11-Nr.11 können diesen Versuchskörper keine zugehörigen Festigkeitswerte zugewiesen werden. Deshalb wird für Nachrechnung der Querkrafttragfähigkeit dieser Versuchskörper im Kapitel 6. *Nachrechnung der Querkraftversuche*, der Mittelwert der Versuchskörper V1-T05-Nr.01 bis V2-T09-Nr.09 gem. **Tab. 4-2** angesetzt.

Versuchskörper	Alter [d]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_{cm,fl}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{cm,prism}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{c,cube}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_{c,m}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
V1-T05-Nr.01	106	2353,80	10,30	165,30	159,73	52550,00
V1-T05-Nr.02	108	2220,24	9,19	156,80	162,00	50030,00
V1-T06-Nr.03	106	2353,80	10,30	165,30	159,73	52550,00
V1-T06-Nr.04	108	2220,24	9,19	156,80	162,00	50030,00
V1-T06-Nr.12	80	2339,68	9,84	158,07	172,98	49538,00
V1-T07-Nr.05	94	2347,62	10,48	159,47	167,00	53640,00
V1-T07-Nr.06	102	2354,33	10,54	167,82	169,97	52970,00
V1-T08-Nr.07	102	2354,33	10,54	167,82	169,97	52970,00
V1-T08-Nr.08	94	2347,62	10,48	159,47	167,00	53640,00
V2-T09-Nr.09	87	2614,00	8,92	160,55	171,66	51887,00
V2-T10-Nr.10	-	-	-	-	-	-
V2-T11-Nr.11	-	-	-	-	-	-
Mittelwert:	-	2337,47	9,86	160,92	167,03	51529,36

**Tab. 4-2:** Ergebnisse der Werkstoffprüfungen

### 4.2.2 Textil

In der Tabelle **Tab. 4-3** sind die für die Versuche verwendeten textilen Bewehrungselemente angeführt. Die technischen Datenblätter der einzelnen Textilien sind dem Anhang A zu entnehmen. Bei den verwendeten Textilien handelt es sich um mit Epoxidharz getränkte Carbontextile. Diese wurden vom Unternehmen solidian GmbH zur Verfügung gestellt.

Textil	$a_{s,l}$ [mm <sup>2</sup> /m]	$a_{s,t}$ [mm <sup>2</sup> /m]	Fasermaterial [-]	Tränkung [-]
Q45/ Q45 CCS 20	45	45	Carbon	ASA
Q95/ Q95 CCE 38	95	95	Carbon	Epoxidharz
Q142/ Q142 CCE 25	142	142	Carbon	Epoxidharz
Q142/ Q142 CCE 38	142	142	Carbon	Epoxidharz

**Tab. 4-3:** Zusammenstellung der verwendeten Textilien

<u>mit:</u>	$a_{s,l}$	Bewehrung in Längsrichtung
	$a_{s,t}$	Bewehrung in Querrichtung
	ASA	Acrylnitril- Styrol- Acrylat- Copolymere

### 4.2.3 CFK- Stäbe [30]

Die für die Versuche verwendeten CFK- Stabbewehrungen wurden von der Firma S&P Handels GmbH zur Verfügung gestellt. Dabei sind ausschließlich CFK- Stäbe mit einer besandeten Oberfläche verwendet worden. Bei dem vorgespannten Träger V1-T06-Nr.12 sind diese im Bereich der Vergussverankerung zusätzlich eingefräst worden (siehe **Abb. 4-1**).



(a) Besandeter CFK-Bewehrungsstab

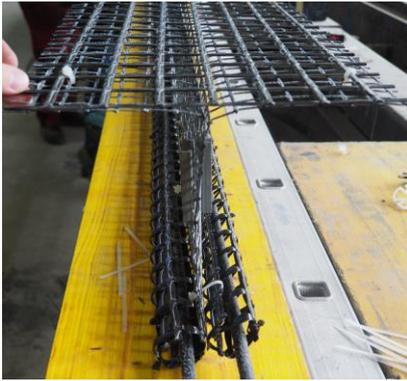


(b) Eingefräster CFK-Bewehrungsstab

**Abb. 4-1:** Verwendete CFK [30]

## 4.3 Herstellung der Versuchskörper

Die Versuchskörper sind von der Firma SW- Umwelttechnik GmbH in Lienz hergestellt worden. Um eine sachgerechte Herstellung der Versuchskörper zu gewährleisten, sind die Betonierarbeiten von einem Mitarbeiter der TU Wien begleitet worden. Parallel zum Betonieren der Träger bzw. der Deckenelemente sind die Probekörper für die Werkstoffuntersuchungen betoniert worden. Dabei sind zu jeder Betoncharge jeweils drei genormte Probewürfel (100x100x100 mm) und drei genormte Prismen (40x40x160 mm) hergestellt worden. Die Ergebnisse der Werkstoffprüfungen sind in der Tabelle **Tab. 4-2** für die einzelnen Versuchskörper angeführt. Die Bewehrungskörbe der Versuchskörper wurden vor dem Betonieren hergestellt und anschließend in die Schalung gehoben. In Abbildung **Abb. 4-2** ist jeweils ein Bewehrungskorb für einen Träger (Bild a) und ein Bewehrungskorb eines Deckenelementes (Bild b) abgebildet. [30]



a) Bewehrung der Trägerelemente [30]



b) Bewehrung der Deckenelemente

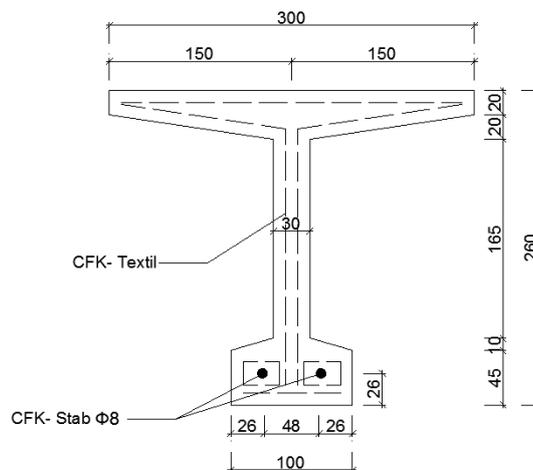
**Abb. 4-2:** Erstellung der Bewehrungskörbe für die Versuchskörper

Es sind immer zwei Versuchskörper gleichzeitig betoniert worden. Soweit in diesem Unterkapitel nichts Abweichendes angegeben wird, sind die Versuchskörper nach 48 h ausgeschalt und bis zum Abtransport am Werksgelände der Firma SW- Umwelttechnik GmbH gelagert worden. [30]

#### 4.3.1 Versuchskörper

##### Träger

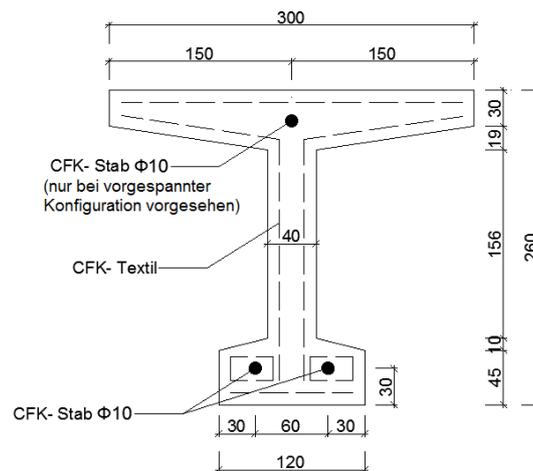
Die untersuchten Träger besitzen einen T-förmigen Querschnitt und sind in zwei unterschiedlichen Ausführungen hergestellt worden. Im Wesentlichen unterscheiden sich die Querschnitte durch die Schlankheit des Profils. Der schlankere Querschnitt ist als Trägerquerschnitt 1 (siehe **Abb. 4-3**) definiert worden. Der Trägerquerschnitt 2 (siehe **Abb. 4-4**) besitzt im Gegensatz zum Trägerquerschnitt 1 stärkere Gurt- und Stegabmessungen. Zusätzlich unterscheiden sich die Querschnitte durch die Wahl des Stabdurchmessers der CFK- Stäbe. Die CFK- Stäbe des Querschnitts 1 besitzen einen Durchmesser von 8 mm. Beim Querschnitt 2 sind CFK- Stäbe mit einem Durchmesser von 10 mm verwendet worden. Zusätzlich zu den schlaff bewehrten Versuchskörper ist ein Versuchskörper, mit Trägerquerschnitt 2, mit Vorspannung hergestellt worden.

**Abb. 4-3:** T-Trägerquerschnitt 1

In Tabelle **Tab. 4-4** sind die unterschiedlichen Konfigurationen der untersuchten Träger, mit dem Querschnitt 1 (siehe **Abb. 4-3**), dargestellt. Dabei unterscheiden sich die einzelnen Konfigurationen in der Wahl der Textilbewehrung.

Versuchskörper	VSP	$b_{UG}$ [mm]	$b_{Steg}$ [mm]	$b_{OG}$ [mm]	CFK- UG	Textile	CFK- OG
V1-T05-Nr.01/02	nein	100	30	300	2Ø8	Q45/ Q45/ 20	-
V1-T07-Nr.05/06	nein	100	30	300	2Ø8	Q95/ Q95/ 38	-

**Tab. 4-4:** Bewehrungskonfiguration für den Trägerquerschnitt 1



**Abb. 4-4:** T-Trägerquerschnitt 2

In Tabelle **Tab. 4-5** sind die unterschiedlichen Bewehrungskonfigurationen der untersuchten Träger, mit dem Querschnitt 2 (siehe **Abb. 4-4**), zusammengefasst.

Versuchskörper	VSP	$b_{UG}$ [mm]	$b_{Steg}$ [mm]	$b_{OG}$ [mm]	CFK- UG	Textile.	CFK- OG
V1-T06-Nr.03/04	nein	120	40	300	2Ø10	Q45/ Q45/ 20	-
V1-T06-Nr.12	ja	120	40	300	2Ø10	Q45/ Q45/ 20	1Ø10
V1-T08-Nr.07/08	nein	120	40	300	2Ø10	Q95/ Q95/ 38	-

**Tab. 4-5:** Bewehrungskonfiguration für den Trägerquerschnitt 2

### Herstellung der Vorspannung [30]

Der Vorspannvorgang für den Träger V1-T06-Nr.12, ist in Abbildung **Abb. 4-5** schematisch dargestellt. Dabei ist eine Vorspannung mit einem sofortigen Verbund ausgeführt worden. Beim Vorspannen des Trägers wurde eine Vergussverankerung verwendet. Dieser wurde durch eine Kopplungseinheit mit konventionellen Spannilitzen verbunden. Das Kopplungselement ermöglicht die Verwendung herkömmlicher Spannpressen zum Vorspannen von Bewehrungselementen aus Faserverbundkunststoffen. Das Vorspannen erfolgt ident zum Vorspannen von Stahlspannilitzen. Im ersten Schritt werden die Vorspannelemente aus CFK durch die Kopplungselemente mit den Stahlilitzen der Spannpressen verbunden. Im nächsten Schritt werden die CFK-

Stäbe durch den Einsatz die Spannresse vorgespannt. Das Kopplungselement verhindert dabei ein vorzeitiges Versagen der querdruckempfindlichen CFK- Fasern durch zu hohe Querpressungen.

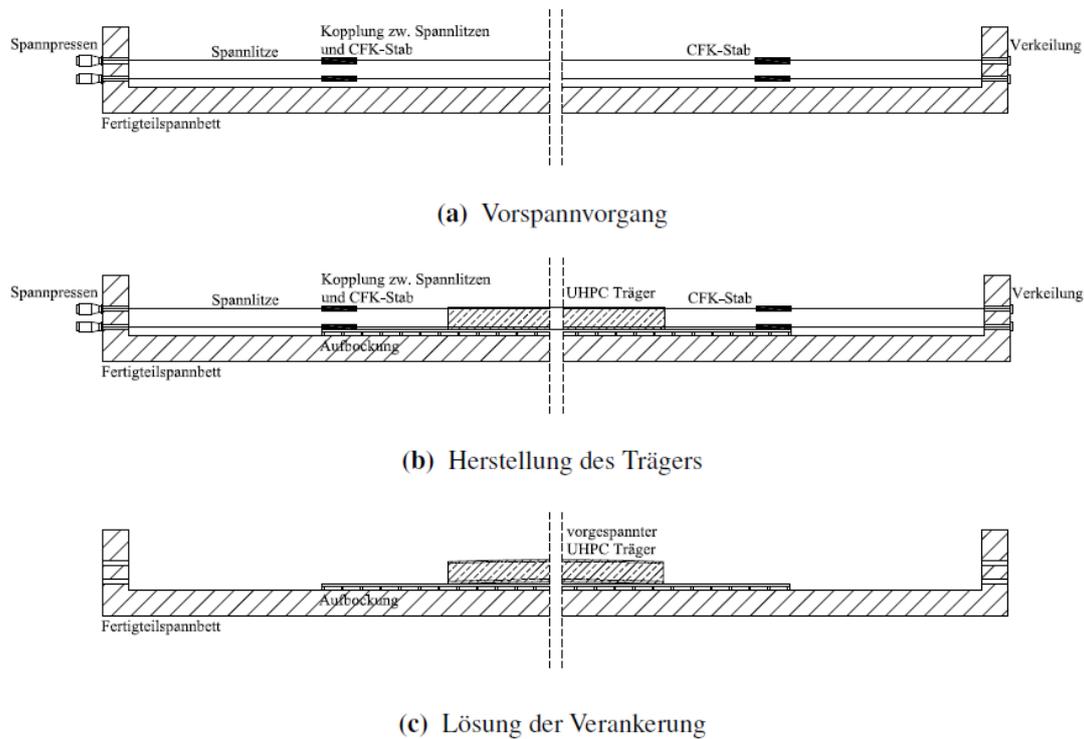


Abb. 4-5: Vorspannungsvorgang im sofortigen Verbund [30]

Nach ausreichender Aushärtungsdauer wird die Vorspannkraft abgelassen. Bei den untersuchten Versuchskörpern ist die Vorspannkraft nach 48 h, bei einer angenommenen Zylinderdruckfestigkeit des UHPCs von rd.  $60 \text{ N/mm}^2$ , abgelassen worden. Mit dem Ablassen der Vorspannkraft wird, durch die Verbundwirkung zwischen den CFK- Stäben und der Betonmatrix, die Druckkraft in den Versuchskörper eingeleitet.

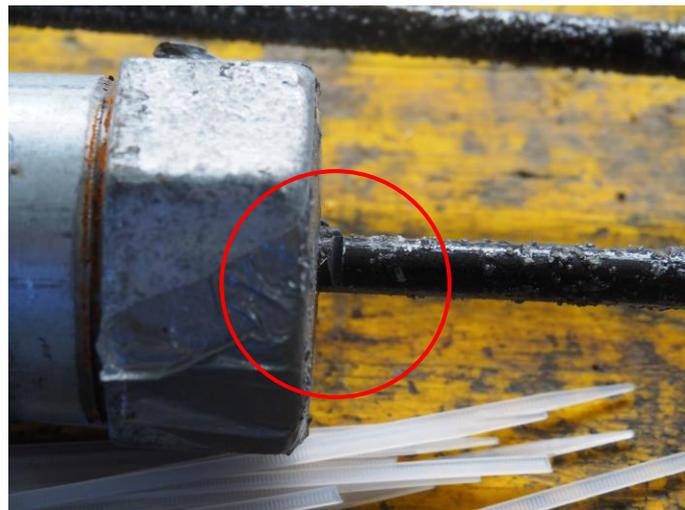
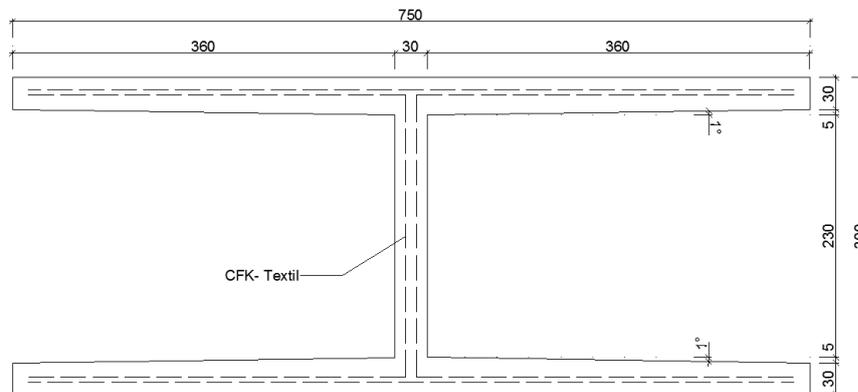


Abb. 4-6: Unsachgemäße Einfräsung der CFK- Stäbe [30]

Für die Versuchskörper ist ein Vorspanngrad von 60 % angestrebt worden. Dieser konnte aufgrund von Herstellungsungenauigkeiten im Verankerungsbereich der CFK- Stäben (siehe **Abb. 4-6**) nicht aufgebracht werden. Dabei sind die Stäbe über den Verankerungsbereich hinaus eingefräst worden. Der Vorspanngrad ist deshalb auf 25 % begrenzt worden.

## Deckenelemente

Die Deckenelemente sind mit einheitlichem Querschnitt und variierender Bewehrungskonfiguration hergestellt worden. Dabei ist Bewehrung der Deckenelemente zur Gänze mit den in Tabelle **Tab. 4-6** angeführten Textilien hergestellt worden. Darüber hinaus zeigt die Tabelle **Tab. 4-6** die Bewehrungskombination der Biege- und Querkraftbewehrung der einzelnen Deckenelemente. Die Datenblätter der Textilien sind dem Anhang A zu entnehmen. Abbildung **Abb. 4-7** zeigt den Querschnitt eines Deckenelementes.



**Abb. 4-7:** Querschnitt der Deckenelemente

Versuchskörper	VSP	$b_{UG}$ [mm]	$b_{Steg}$ [mm]	$b_{OG}$ [mm]	Bew. -UG	Querrkraftbew.	Bew.- OG
V2- T09- Nr.09	nein	750	30	750	Q95/95/38	Q45/45/20	Q95/95/38
V2- T10- Nr.10	nein	750	30	750	Q142/142/25	Q95/95/38	Q142/142/25
V2- T11- Nr.11	nein	750	30	750	Q142/142/38	Q142/142/38	Q142/142/38

**Tab. 4-6:** Bewehrungskonfiguration für der Deckenelemente

## 4.4 Versuchsprogramm

### 4.4.1 Allgemeines

Die Querkraftversuche sind im Labor des Instituts für Tragkonstruktionen der TU Wien durchgeführt worden. Der zeitliche Ablauf der Versuche ist in Tabelle **Tab. 4-7** zusammengefasst. Während der Versuchsplanung ist festgelegt worden, an jedem Versuchskörper zwei Einzelversuche mit unterschiedlichen Schubschlankheiten durchzuführen. Die Konfigurationen der Einzelversuche sind im Unterkapitel 4.4.4 *Versuchskonfigurationen* erläutert. Parallel zu den Querkraftversuchen sind die Werkstoffprüfungen an den Probewürfeln und Prismen von Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Kirnbauer am Labor der TU Wien vorgenommen worden. Die Ergebnisse der Materialprüfungen sind im Unterkapitel 4.2.1 *Ultrahochfester Beton* in der Tabelle **Tab. 4-2** für die einzelnen Versuchskörper dargestellt.

Versuchskörper	Schubslankheit	Betonierdatum	Versuchsdatum	Alter [d]
V1-T05-Nr.01-L01	a/d= 2,5	08.06.2017	19.09.2017	103
V1-T05-Nr.01-L02	a/d= 3,5	08.06.2017	19.09.2017	103
V1-T05-Nr.02-L03	a/d= 4,0	06.06.2017	21.09.2017	107
V1-T05-Nr.02-L04	a/d= 3,0	06.06.2017	21.09.2017	107
V1-T06-Nr.03-L01	a/d= 2,5	08.06.2017	20.09.2017	104
V1-T06-Nr.03-L02	a/d= 3,5	08.06.2017	20.09.2017	104
V1-T06-Nr.04-L03	a/d= 4,0	06.06.2017	22.09.2017	108
V1-T06-Nr.04-L03	a/d= 3,0	06.06.2017	22.09.2017	108
V1-T06-Nr.12-L03	a/d= 4,0	18.07.2017	02.10.2017	76
V1-T06-Nr.12-L04	a/d= 3,0	18.07.2017	02.10.2017	76
V1-T07-Nr.05-L01	a/d= 2,5	20.06.2017	20.09.2017	92
V1-T07-Nr.05-L02	a/d= 3,5	20.06.2017	20.09.2017	92
V1-T07-Nr.06-L03	a/d= 4,0	12.06.2017	22.09.2017	94
V1-T07-Nr.06-L04	a/d= 3,0	12.06.2017	22.09.2017	94
V1-T08-Nr.07-L01	a/d= 2,5	12.06.2017	21.09.2017	101
V1-T08-Nr.07-L02	a/d= 3,5	12.06.2017	21.09.2017	101
V1-T08-Nr.08-L03	a/d= 4,0	20.06.2017	22.09.2017	94
V1-T08-Nr.08-L04	a/d= 3,0	20.06.2017	22.09.2017	94
V2-T09-Nr.09-L03	a/d= 4,0	11.07.2017	03.10.2017	84
V2-T09-Nr.09-L04	a/d= 3,0	11.07.2017	03.10.2017	84
V2-T10-Nr.10-L03	a/d= 4,0	k. A.	02.10.2017	-
V2-T10-Nr.10-L04	a/d= 3,0	k. A.	02.10.2017	-
V2-T11-Nr.11-L03	a/d= 4,0	k. A.	03.10.2017	-
V2-T11-Nr.11-L04	a/d= 3,0	k. A.	03.10.2017	-

**Tab. 4-7:** Zeitplan der Versuchsdurchführung

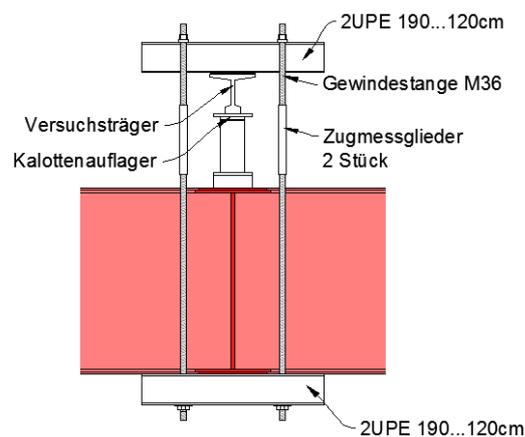
#### 4.4.2 Versuchsaufbau

Im folgenden Unterkapitel wird der Aufbau der Querkraftversuche erläutert. Die Versuche sind am Versuchslabor der TU Wien in der Gußhausstraße 28 durchgeführt worden. Im ersten Schritt sind die Versuchskörper, vom Zwischenlagerplatz im Versuchslabor, auf den Längsträger des großen Druckprüfrahmens versetzt worden. Für dieses Versetzen ist der Hallenkran des Labors verwendet worden. In Abbildung **Abb. 4-8** ist der Versetzvorgang eines Deckenelementes abgebildet.



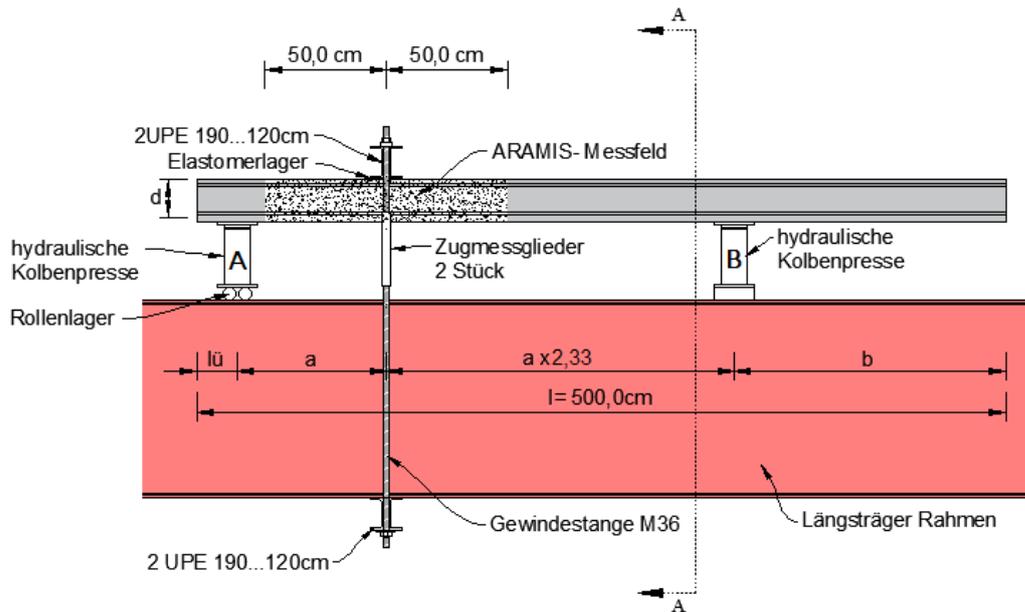
**Abb. 4-8:** Versetzen eines Versuchskörpers (Deckenelement) [30]

Für das Zwischenlagern der Versuchskörper auf dem Rahmenträger sind drei Stapelungen aus Polystyrol- Hartschaum- Platten entlang des Rahmenträgers verlegt worden. Dieses Zwischenlagern der Versuchskörper auf den Stapelungen, ermöglicht die Positionierung der hydraulischen Pressen entsprechend der Lastkonfiguration und der untersuchten Schubschlankheit. Im Unterkapitel 4.4.4 *Versuchskonfigurationen* sind die untersuchten Lastkonfigurationen der Träger und Deckenelemente in den Abbildungen **Abb. 4-17** bis **Abb. 4-22** dargestellt.



**Abb. 4-9:** Schnitt A-A durch den Versuchsaufbau der Versuchskörper

Nach dem Absetzen der Versuchskörper und dem Positionieren der Pressen ist der Querträger auf den Versuchskörper aufgesetzt worden. Der Querträger selbst besteht aus zwei, an den Gurten mit Stahlbelchen verschweißten, UPE 190 Profilen. Für die Lasteinleitung ist eine Stahlplatte, welche auf einem Elastomer gelagert wird, unter den Querträger vorgesehen worden. Der auf dem Versuchskörper aufliegende Querträger ist über Gewindestangen (M 36) mit einem weiteren Querträger, gleicher Bauweise, am Untergurt des Längsträgers des Druckrahmens fixiert worden. Um eine Schiefstellung des Querträgers während der Versuchsdurchführung zu vermeiden, sind zwischen dem Querträger und der Mutter der Gewindestangen Kalotten eingesetzt worden. Die Gewindestangen sind über Zugmessglieder gekoppelt. Diese Messglieder dienen zur Dokumentation der, während der Versuchsdurchführung, auftretenden Kräfte. In den Abbildungen **Abb. 4-9** und **Abb. 4-10** ist der allgemeine Versuchsaufbau schematisch dargestellt.



**Abb. 4-10:** Versuchsaufbau der Querkraftversuche

Die Positionierung des Querträgers ist so gewählt worden, dass für jede untersuchte Schubschlankheit der Abstand  $a$  (Abstand der Lasteinleitung durch den Querträger zum Auflager A) 30 % des Abstands der Pressen A und B zueinander ausmacht (siehe **Abb. 4-10**). Damit wird bei jeder Versuchskonfiguration ein gleichbleibendes Verhältnis der Auflagerkräfte A und B gewährleistet. Um die Einleitung einer Zwangsbeanspruchung durch eine Behinderung der freien Verformung am Auflager zu verhindern, ist die Presse A auf Stahlrollen gelagert worden. Damit ist die freie Bewegung des Auflagers in Richtung der Trägerachse ermöglicht worden. Beide Pressen sind mit Kalottenlagern und jeweils einem Wegaufnehmer ausgestattet worden. Die verwendeten Pressen sind in **Abbildung 4-11** abgebildet.



a) bewegliches Auflager (Presse A) [30]



b) festes Auflager (Press B)

**Abb. 4-11:** Auflagerkonstruktion

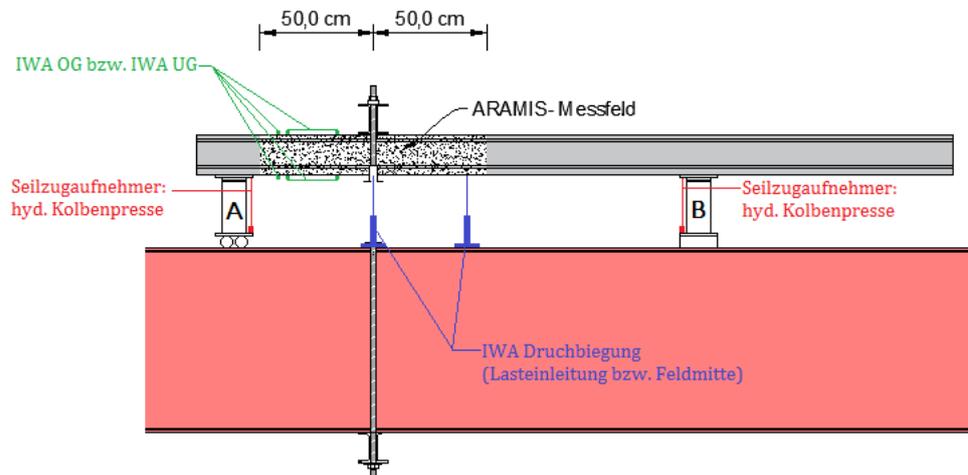
Die für die Versuche verwendete Messtechnik ist vor jeder Versuchsdurchführung neu eingerichtet worden. Diese wird im folgenden Unterkapitel 4.4.3 *Messtechnik* erläutert.

### 4.4.3 Messtechnik

Zur Dokumentation der Versuche sind die folgenden Messvorrichtungen verwendet worden:

- a) induktive Wegaufnehmer- IWA (OG)
- b) induktive Wegaufnehmer- IWA (UG)
- c) induktive Wegaufnehmer- IWA (Durchbiegung)
- d) ARAMIS- Adjustable Stereokamera
- e) Zugmessglieder
- f) Seilzugwegaufnehmer (hydraulische Pressen)

Die Abbildung **Abb. 4-12** zeigt den schematischen Aufbau der Messvorrichtungen, welche vor jeder Versuchsdurchführung am Versuchskörper neu aufgebaut worden sind. Darüber hinaus sind in Abbildung **Abb. 4-13** die verwendeten Messvorrichtungen abgebildet. Die Verformung der Versuchskörper, während der Versuchsdurchführung, ist kontinuierlich durch insgesamt vier Wegaufnehmer aufgezeichnet worden. Zwei sind an den hydraulischen Kolbenpressen positioniert worden. Hier sind Seilzugwegaufnehmer zum Einsatz gekommen. Zwei weitere Wegaufnehmer (IWA) sind zum einen an der Lasteinleitungsstelle und zum anderen in Feldmitte positioniert worden. Zur Messung der auftretenden Stauchungen und Dehnungen sind am Obergurt und am Untergurt induktive Wegaufnehmer (IWA) angebracht worden. Insgesamt sind bei den Deckenelementen acht IWA und bei den Trägern sieben IWA angebracht worden. Jeweils vier am Obergurt und vier am Untergurt. Bei den Trägern sind aufgrund des schmalen Untergurtes drei, statt vier, IWA positioniert worden. Dabei ist jeweils ein IWA, am Ober- und Untergurt, quer zur Trägerachse angebracht worden. Diese sollten eine etwaige Spaltrissbildung dokumentieren. Die auftretenden Kräfte sind durch zwei redundante Systeme aufgezeichnet worden. Zum einen sind zwei Zugmessglieder, welche als Kopplungselement der Gewindestangen dienen, eingesetzt worden. Zum anderen ist der Druck im hydraulischen Pressensystem abgelesen worden. Dadurch konnte eine Fehlmessung der auftretenden Kräfte ausgeschlossen werden.



**Abb. 4-12:** schematische Darstellung der Positionierung der Messvorrichtungen



a) IWA OK- Obergurt



b) IWA UK- Untergurt



c) IWA Durchbiegung



d) ARAMIS- Adjustable Stereokamera



e) Zugmessglieder [30]



f) Seilzugwegaufnehmer (Presse)

**Abb. 4-13:** Verwendete Messvorrichtungen

Zur Messung der Rissweiten und zur Aufzeichnung der Rissentwicklung ist auf eine optische und berührungslose Messung zurückgegriffen worden. Zum Einsatz ist das optische Messsystem ARAMIS der Fa. Gom gekommen. Das Kamerasystem erfasst die relative Verschiebung der Referenzpunkte und leitet aus diesen Relativverschiebungen die Dehnungen ab. [23] Bevor die Messungen gestartet werden konnten, ist das Messsystem von Dipl.- Ing. Pardatscher für das Versuchsprogramm kalibriert worden. Für die Versuchsdurchführung ist ein Messfeldweite von 100,0 cm festgelegt worden. Das Messfeld ist so gewählt worden, dass es sich rd. 50,0 cm beidseitig der Lasteinleitung, durch die Zugstangen, erstreckt. In Abbildung **Abb. 4-12** ist das Messfeld an einem Versuchskörper schematisch dargestellt. In Vorbereitung auf die Versuchsdurchführung ist das Messfeld mit handelsüblicher weißer Wandfarbe bestrichen worden. In Abbildung **Abb. 4-14** ist das weiß gestrichene Messfeld eines Versuchskörpers abgebildet. Durch die weiße Einfärbung des Messfeldhintergrundes wird der Kontrast zum stochastischen Muster erhöht.



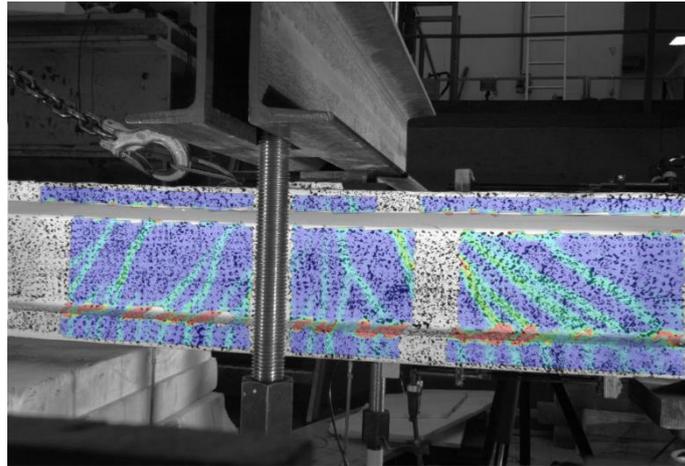
**Abb. 4-14:** Vorbereitung des ARAMIS- Messfeldes

Nach einer Trocknungszeit, von rd. 2 bis 3 h, ist das stochastische Messmuster mit einer handelsüblichen Vollton- & Abtönfarbe aufgetragen worden. Dieses stochastische Messfeld dient dem Messsystem zur Erfassung der Referenzpunkte. In Abbildung **Abb. 4-15** ist das aufgetragene Muster abgebildet.



**Abb. 4-15:** Auftragung des stochastischen Musters auf dem Versuchskörper

Nach der Trocknung des stochastischen Musters ist das Kamerasystem in einer Entfernung von rd. 130,0 cm zum Messfeld aufgebaut worden. Anschließend ist vor dem Beginn eines jeden Versuches eine Referenzmessung durchgeführt worden. Die Versuchsaufnahme ist mit einer festen Bildrate von  $\frac{1}{4}$  Hz erfolgt. Um den Aufnahmebereich des Versagens besser abzubilden, ist die Aufnahme in diesem Bereich mit einem Ringpuffer von 80 Aufnahmen und einer festen Bildrate von 10 Hz durchgeführt worden. In Abbildung **Abb. 4-16** ist eine Aufnahme des ARAMIS- Systems nach der Auswertung mit der Software GOM Correlate 2017 zu sehen. Diese Abbildung zeigt, dass das Messfeld einen nicht zusammenhängenden Bereich bildet. Vielmehr besteht das Messfeld aus drei Einzelmessfeldern. Dies resultiert aus der Gegebenheit dass sich die Gewindestange im Aufnahmebereich der Stereokamera befindet.



**Abb. 4-16:** Messbild des Trägers V1-T06-Nr.03-L01

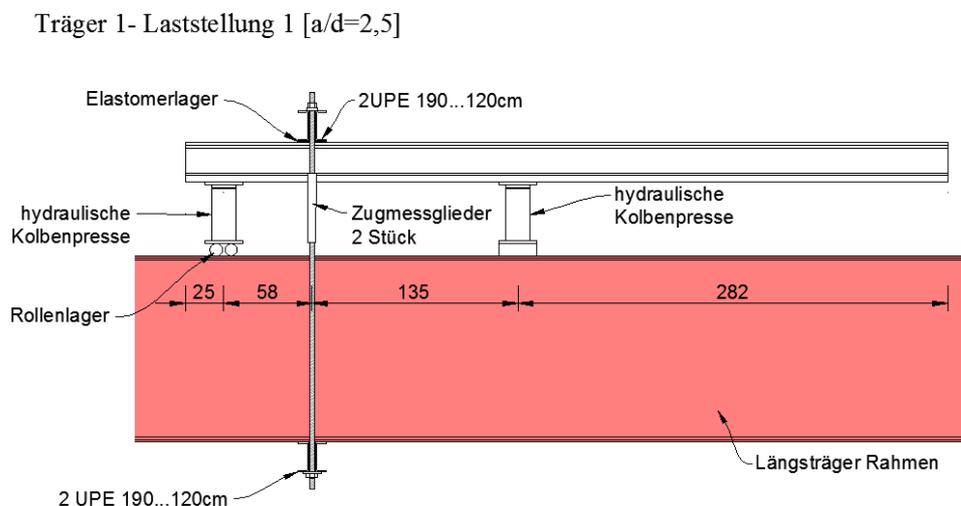
Zusätzlich zu der Aufnahme mit dem ARAMIS- System, ist jeder Versuch mit einer Videokamera aufgezeichnet worden. Diese ist gegenüber dem ARAMIS- System, auf der Trägerrückseite, positioniert worden.

#### 4.4.4 Versuchskonfigurationen

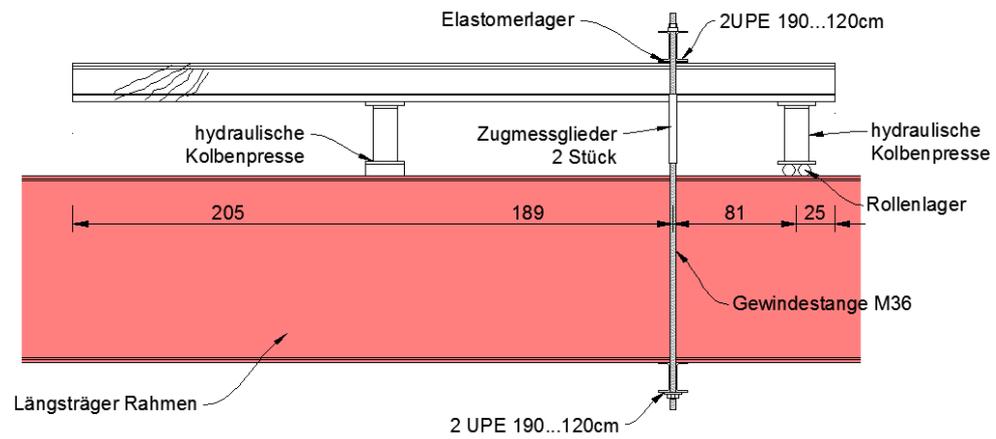
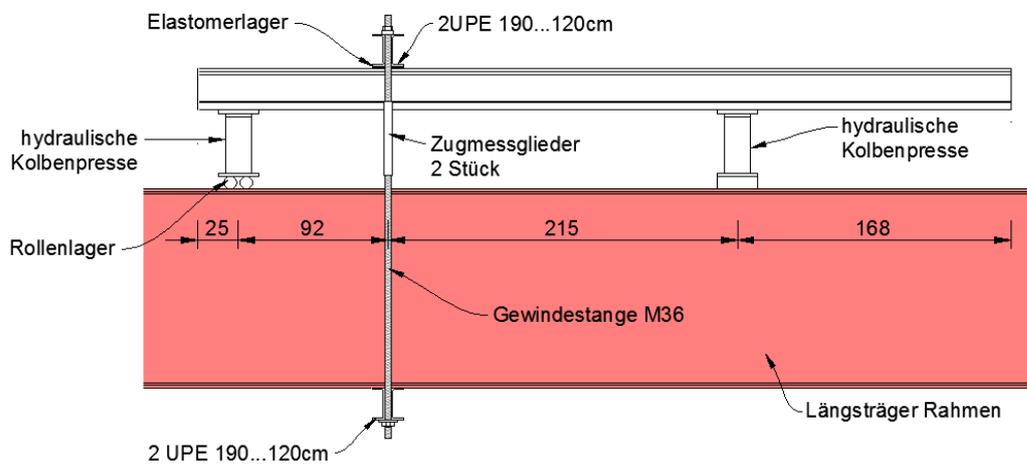
Aufgrund der Laststellung ist das Versagen auf einen lokalen Bereich um die Lasteinleitungsstelle begrenzt. Dies ermöglicht es zwei Querkraftversuche an jedem Versuchskörper durchzuführen. Somit ist es möglich gewesen an jeder Trägerkonfiguration, mit Ausnahme des vorgespannten Trägers V1-T06-Nr.12, vier Einzelversuche mit Schubschlankheiten von  $a/d = 2,5$ ;  $3,0$ ;  $3,5$  und  $4,5$  durchzuführen.

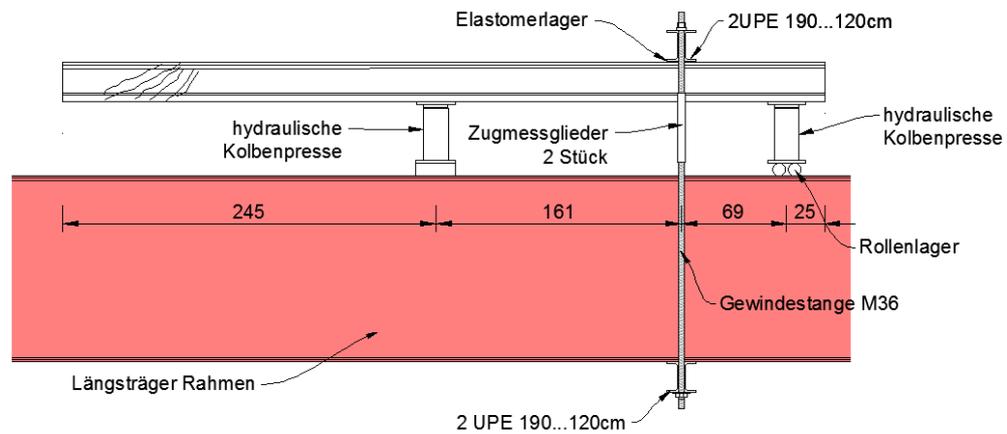
#### Lastkonfigurationen der Versuchsträger:

In den Abbildungen **Abb. 4-17** und **Abb. 4-20** sind die Versuchsaufbauten für die angeführten Schubschlankheiten schematisch dargestellt.

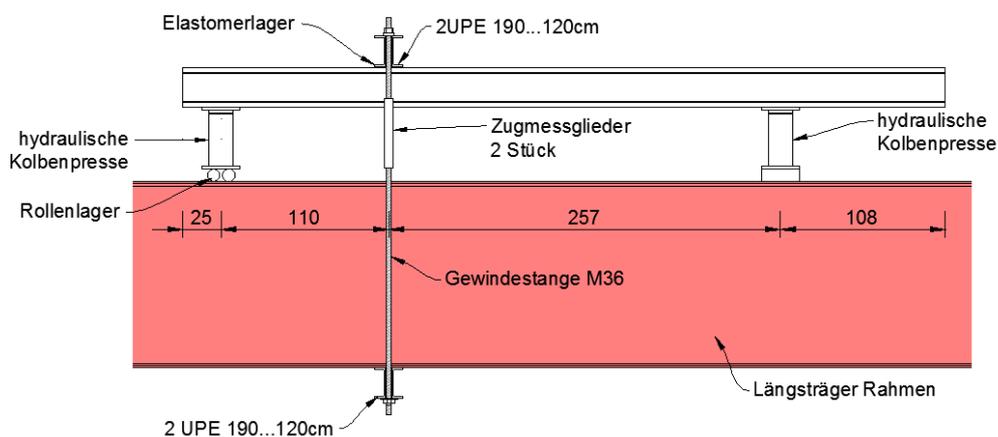


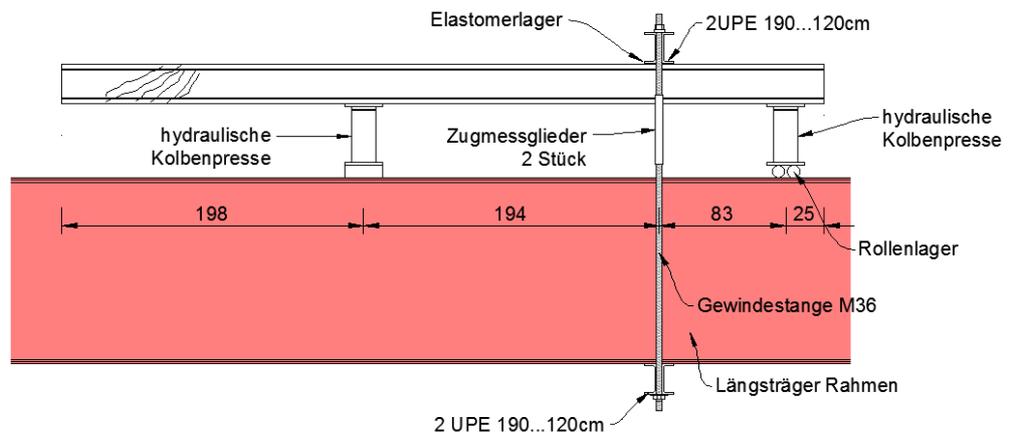
**Abb. 4-17:** Ansicht des Versuchsaufbaus: Träger 1- Laststellung 1 [ $a/d=2,5$ ]

Träger 1- Laststellung 2 [ $a/d=3,5$ ]**Abb. 4-18:** Ansicht des Versuchsaufbaus: Träger 1- Laststellung 2 [ $a/d=3,5$ ]Träger 2- Laststellung 3 [ $a/d=4,0$ ]**Abb. 4-19:** Ansicht des Versuchsaufbaus: Träger 2- Laststellung 3 [ $a/d=4,0$ ]

Träger 2- Laststellung 4 [ $a/d=3,0$ ]Abb. 4-20: Ansicht des Versuchsaufbaus: Träger 2- Laststellung 4 [ $a/d=3,0$ ]Lastkonfigurationen der Deckenelemente:

Wie bei den Versuchen an den Trägern, sind auch bei den Deckenelementen pro Versuchskörper zwei Querkraftversuche mit unterschiedlichen Laststellungen durchgeführt worden. Dabei sind die Deckenelemente mit Schubslankheiten von  $a/d=3,0$  und  $a/d=4,0$  geprüft worden. In den Abbildungen **Abb. 4-21** und **Abb. 4-22** sind die Versuchsaufbauten für die angeführten Schubslankheiten schematisch dargestellt.

Deckenelement- Laststellung 3 [ $a/d=4,0$ ]Abb. 4-21: Ansicht des Versuchsaufbaus: Deckenelement- Laststellung 3 [ $a/d=4,0$ ]

Deckenelement- Laststellung 4 [ $a/d=3,0$ ]

**Abb. 4-22:** Ansicht des Versuchsaufbaus: Deckenelement- Laststellung 4 [ $a/d=3,0$ ]

## 5 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

### 5.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Querkraftversuche für die einzelnen Versuchskörperkonfigurationen erläutert. Ein besonderes Augenmerk ist auf die Beschreibung der auftretenden Versagensmechanismen bei den einzelnen Versuchen gelegt worden. Die Bestimmung der Versagensmechanismen ist durch eine detaillierte Analyse der Versuchsdaten und die Auswertung der Messungen des ARAMIS- Systems erfolgt. Abschließend werden in Kapitel 6. *Nachrechnung der Querkraftversuche* die Einzelversuche nach den, im Unterkapitel 3.4.3 *Querkraftmodelle*, vorgestellten Modellen nachgerechnet und die Ergebnisse den Versuchsergebnissen gegenübergestellt.

### 5.2 Träger

In diesem Unterkapitel werden die Versuchsergebnisse der einzelnen Trägerkonfigurationen erläutert. Dabei sind an jeder Trägerkonfiguration, mit Ausnahme der vorgespannten Trägerkonfiguration V1-T06-Nr.12, vier Einzelversuche, gemäß den Konfigurationen des Unterkapitels 4.4.4 *Versuchskonfigurationen*, durchgeführt worden. Die Einzelergebnisse der Querkraftversuche werden entsprechend der Schubschlankheiten zusammengefasst und verglichen.

Dabei setzt sich die Versuchsauswertung aus den folgenden Punkten zusammen:

- I. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse in Abhängigkeit der Schubschlankheit
- II. Beschreibung des Querkraft- Durchbiegungsverhaltens
- III. Bestimmung der auftretenden Versagensmechanismen
- IV. Beschreibung der Versagensrissentwicklung

Die Beschreibung der Entwicklung des Versagensrisses ist durch die Auswertung der Messungen des ARAMIS- Systems erfolgt. Dabei erfolgte die Messung mit einer festen Bildrate von  $\frac{1}{4}$  Hz. Dies entspricht einer Serienaufnahme des Messfeldes, bei welcher das Messfeld alle vier Sekunden einmal aufgenommen wird. Zur Beschreibung der Rissentwicklung ist jede 20. Aufnahme ausgewertet worden. Dies entspricht einem zeitlichen Abstand zwischen den Datenauswertungen der Einzelaufnahmen von 80 Sekunden. Aufgrund dieses zeitlichen Abstandes war, es nicht möglich eine Aussage über die Erstrisskraft zu treffen. Die Rissentwicklung ist bis zum Erreichen der Bruchlast ausgewertet worden. Die Auswertung erfolgte mit der Software GOM Correlate 2017.

Die Auswertung ist nach den folgenden Punkten erfolgt:

- I. Identifizierung der Versagensrisses:  
Im ersten Schritt ist der Versagensriss identifiziert worden. Dabei sind die Einzelbilder der Messung bis zum Versagenszeitpunkt abgespielt worden. Der Versagensriss zeigt sich durch die größte Rissöffnung zum Zeitpunkt des Versagens.
- II. Anordnung der Messstreifen:  
Nach der Identifizierung des Versagensrisses sind entlang des Risses, mit Hilfe der Software, fünf digitale Messstreifen angeordnet worden. Die Messstreifen bestehen jeweils aus zwei Messpunkten, einem an jedem Rissufer. Die Messpunkte zeichnen ihre Relativverschiebungen im Vergleich zu der Referenzmessung (Zeitpunkt  $t=0$ ) auf.

III. Relativverschiebungen der einzelnen Messpunkte

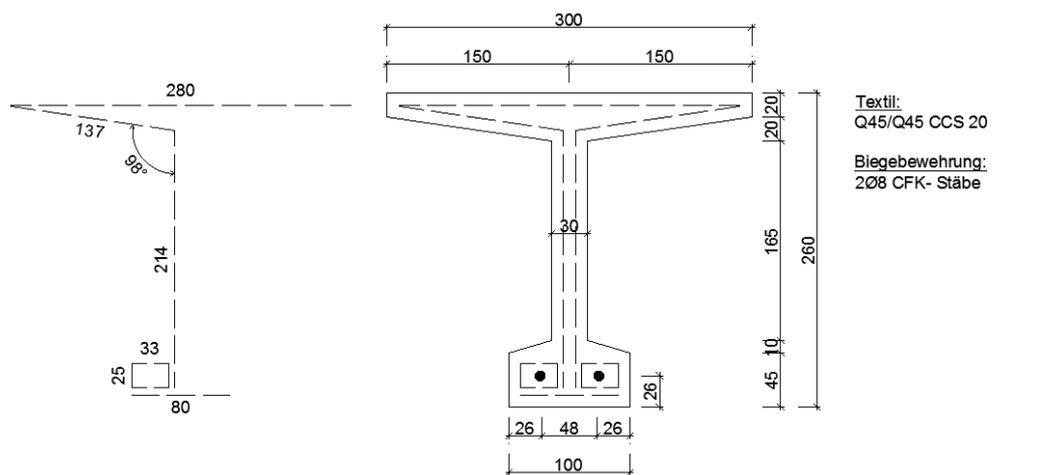
In diesem Schritt werden die Relativverschiebungen der einzelnen Messpunkte softwaregestützt ermittelt.

IV. Ermittlung der Rissöffnung und Rissgleitung

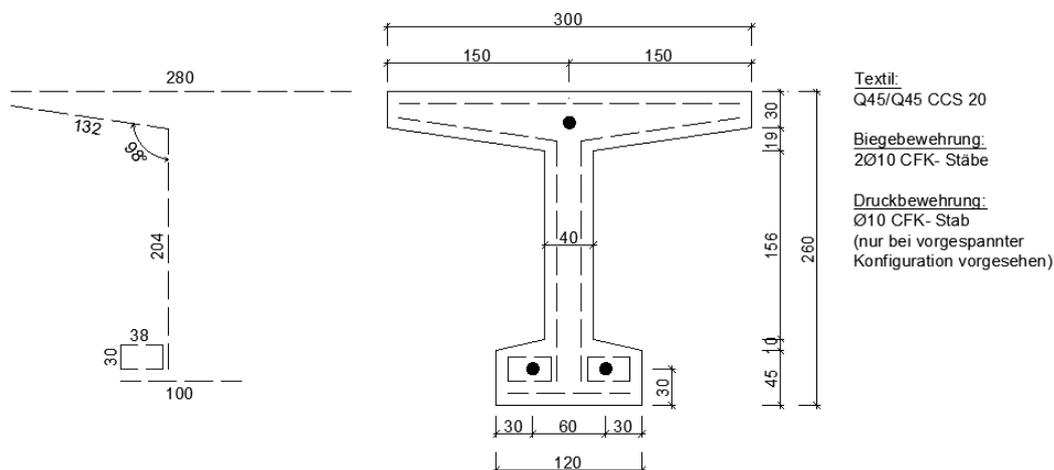
Abschließend werden aus den Relativverschiebungen der Messpunkte, mit Hilfe einer Koordinatentransformation entlang des Versagensrisses, die Rissöffnungen und Rissgleitungen ermittelt.

5.2.1 **Trägerkonfiguration**

Die Querschnittsausbildung und die Bewehrungsführung der einzelnen Trägerkonfigurationen werden in den Abbildungen **Abb. 5-1** bis **Abb. 5-4** dargestellt. Anders als bei den Deckenelementen, beruht die Verankerung der Querkraftbewehrung bei den Versuchsträgern rein auf der Einbindelänge der textilen Bewehrungselemente im Untergurt. Dies führt dazu, dass bei den meisten Versuchen lokale Anzeichen für einen Textilauszug zu beobachten waren.



**Abb. 5-1:** Trägerkonfiguration V1-T05 – Maße in [mm]



**Abb. 5-2:** Trägerkonfiguration V1-T06 (mit & ohne Vorspannung) – Maße in [mm]

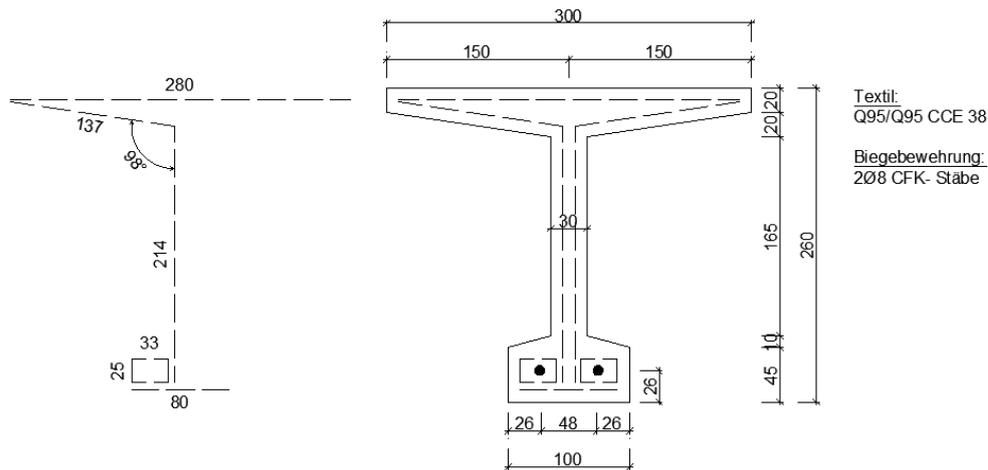


Abb. 5-3: Trägerkonfiguration V1-T07 – Maße in [mm]

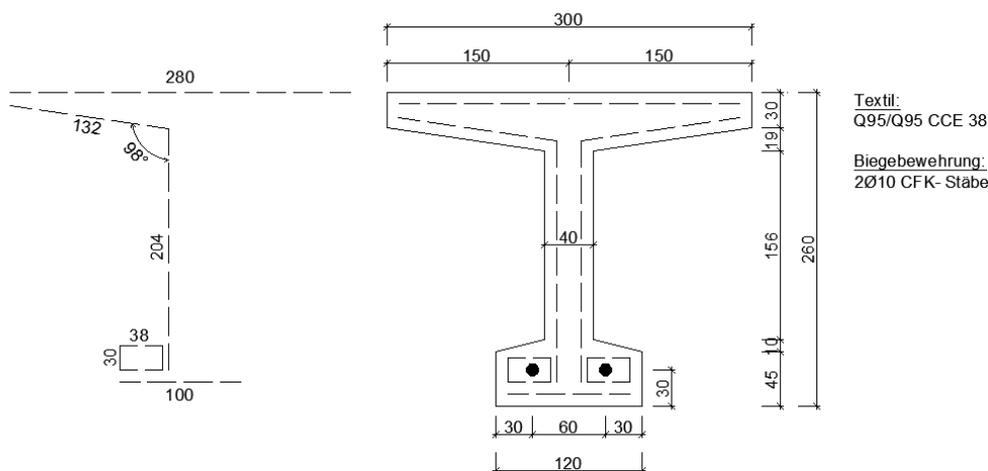


Abb. 5-4: Trägerkonfiguration V1-T08 – Maße in [mm]

### 5.2.2 Versuchsergebnisse bei einer Schubslankheit von $a/d = 2,5$

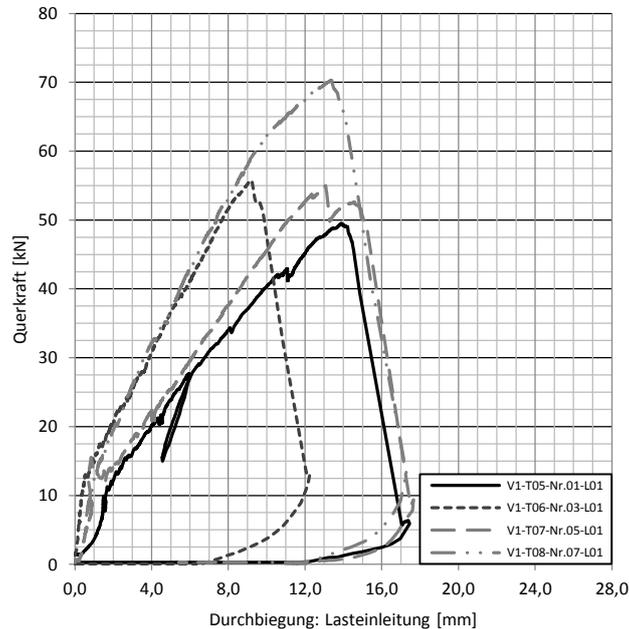
In diesem Unterkapitel werden die Versuchsergebnisse der Einzelversuche bei einer Schubslankheit von  $a/d = 2,5$  erläutert. In der Tabelle **Tab. 5-1** sind die Ergebnisse der Einzelversuche, entsprechend der Versuchskörper, zusammengefasst. Wie zu erwarten zeigt sich, dass durch eine Erhöhung des Querkraftbewehrungsgrades, höhere Versuchslasten erzielt werden konnten. Die Versuchskonfiguration V1-T05-Nr.01-L01 erreicht mit einem steifigkeitsbezogenen Querkraftbewehrungsgrades von 1,06 % eine Bruchquerkraft von 49,55 kN. Die Versuchskonfiguration V1-T07-Nr.05-L01, mit gleicher Querschnittsausgestaltung und einem steifigkeitsbezogenen Querkraftbewehrungsgrades von 2,42%, versagt bei einer Bruchquerkraft von 55,04 kN. Dies entspricht einer Erhöhung der Querkrafttragfähigkeit um rd. 11,1%. Bei den Versuchskonfigurationen V1-T06-Nr.03-L01 und V1-T08-Nr.07-L01 fallen die Ergebnisse ähnlich aus. Beide Konfigurationen besitzen den gleichen Querschnitt. Der steifigkeitsbezogene Querkraftbewehrungsgrades der Versuchskonfiguration V1-T06-Nr.03-L01 beträgt 0,79 %. Damit wird eine

Bruchquerkraft von 55,82 kN erreicht. Das Versagen tritt bei Versuchsconfiguration V1-T08-Nr.07-L01 bei einer Querkraft von 70,33 kN ein. Dies entspricht einer Erhöhung von rd. 26,0 %, im Vergleich zur Konfiguration V1-T06-Nr.03-L01. Die Schubbrisswinkel liegen im Bereich von 43° (bei V1-T05-Nr.01-L01) bis 63° (bei V1-T06-Nr.03-L01). Dabei zeigt sich keine ausgeprägte Abhängigkeit vom Bewehrungsgrad oder der Querschnittsausbildung.

Versuchskörper	$\omega_v$ [%]	$S_{R\ddot{o},u}$ [mm]	$S_{RG,u}$ [mm]	$\beta_r$ [°]	$V_{u,exp}$ [kN]
V1-T05-Nr.01-L01	1,06	1,09	1,08	43	49,55
V1-T06-Nr.03-L01	0,79	0,17	0,15	63	55,82
V1-T07-Nr.05-L01	2,42	0,64	0,88	59	55,04
V1-T08-Nr.07-L01	1,84	0,69	1,57	46	70,33

**Tab. 5-1:** Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Versuchsträger bei einer Schubschlankheit von  $a/d=2,5$

In der Abbildung **Abb. 5-5** sind die Querkraft- Durchbiegungs- Diagramme der einzelnen Trägerkonfigurationen bei einer Schubschlankheit von  $a/d=2,5$  dargestellt. Bei allen Kurvenverläufen ist der Übergang vom ungerissenen in den Zustand der abgeschlossenen Rissbildung erkennbar. Die Kurvenverläufe der Konfigurationen V1-T06-Nr.03-L01 und V1-T08-Nr.07-L01 zeigen ein deutlich steiferes Verhalten als jene der Konfigurationen V1-T05-Nr.01-L01 und V1-T07-Nr.05-L01. Dies ist auf die Ausbildung der Querschnitt der Versuchskörper zurückzuführen. Die Konfigurationen V1-T05-Nr.01-L01 und V1-T07-Nr.05-L01 besitzen einen schlankeren Querschnitt und dem entsprechend weisen diese Versuchskörpern ein weiches Querkräft-Durchbiegungs- Verhalten auf. Eine Ermittlung der Erstrisskraft ist im Zuge dieser Diplomarbeit nicht durchgeführt worden.



**Abb. 5-5:** Querkräft- Durchbiegungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubschlankheit von  $a/d=2,5$

Bestimmung des Versagensmechanismus:a) V1-T05-Nr.01-L01:

Abbildung **Abb. 5-6a**) zeigt das Rissbild der Versuchskonfiguration V1-T05-Nr.01- L01 unmittelbar nach dem Eintritt des Versagens. Der Versuchskörper zeigt schon vor dem Erreichen des Bruchlastniveaus ein ausgeprägtes Rissbild. Neben den Schubrisen, welche von der Lasteinleitung zum Auflager führen, zeigen sich um den Bereich der Lasteinleitung durch den Querträger, vereinzelte Biegerisse mit geringen Rissöffnungen. Auf den Versuchsaufnahmen ist die Entstehung lokal begrenzter Risse, welche sich von der Risswurzel der Schubrisse ausgehend entlang des Steg- Untergurtanschlusses in Richtung des Auflagers fortpflanzen, zu erkennen. Diese Rissentwicklung lässt auf einen lokalen Auszug oder eine Delamination der textilen Bewehrungselemente im Steg schließen. In den Abbildungen **Abb. 5-7** und **Abb. 5-8** ist die Rissentwicklung des Versagensrisses dargestellt. Diese bestätigen die oben angeführte Annahme des Textilauszugs oder der Delamination. Da diese Mechanismen lokal begrenzt sind führen sie nicht zum Versagen des Versuchskörpers. Vielmehr wird das Versagen damit eingeleitet. Die Aufnahmen zeigen eine konstante Entwicklung der Rissöffnung bis zum Erreichen von rd. 85 % des Bruchlastniveaus. Mit dem annähern an das Bruchlastniveau, beschleunigt sich die Rissöffnung und kündigt das Versagen des Versuchskörpers an. Bei diesem Versuchskörper ist das Versagen durch das Versagen der textilen Bewehrungselemente im Steg eingetreten. Durch den Bruch des Textils kommt es zu einer Einschnürung der Betondruckzone und im Anschluss zum Bruch derselben.

b) V1-T06-Nr.03-L01:

Im Vergleich zur Versuchskonfiguration V1-T05-Nr.01-L01, ist der Querschnitt der Versuchskonfiguration V1-T06-Nr.03-L01 gedrungenener ausgebildet worden. Die Stärke der Gurte und des Steges ist, im Vergleich zur Konfiguration V1-T05-Nr.01-L01, um rd. 33 % erhöht worden (siehe **Abb. 5-2**). Die Versuchskonfiguration V1-T06-Nr.03-L01 (siehe **Abb. 5-6b**)) zeigt keine ausgeprägte Rissbildung bis zum Eintritt des Versagens. Neben dem Versagensriss sind im Messfeld lediglich vereinzelte Schub- und Biegerisse erkennbar. Die Messung des ARAMIS- Systems zeigt eine langsame und gleichmäßige Rissentwicklung des Versagensrisses bis zum Erreichen des Bruchlastniveaus. Die Rissentwicklung ist in den Abbildungen **Abb. 5-7** und **Abb. 5-8** dargestellt. Der Kurvenverlauf des Querkraft- Rissöffnung- bzw. Querkraft- Rissgleitungs- Diagrammes lässt darauf schließen dass es während der Versuchsdurchführung zu keiner Delamination oder einem Auszug der textilen Bewehrungselemente im Steg kommt. Dies wird durch die Videoaufnahmen bestätigt. Mit dem Erreichen der Bruchlast kommt es zu einem schlagartigen Versagen. Das Versagen des Versuchskörpers ist, wie bei der Versuchskonfiguration V1-T05-Nr.01-L01, auf das Versagen der textilen Bewehrungselemente im Steg zurückzuführen.

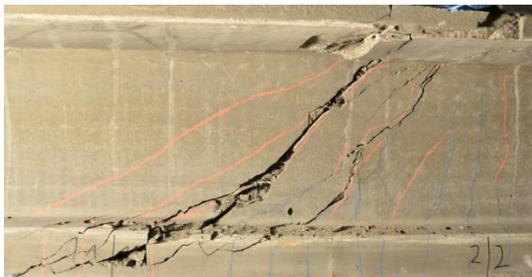
c) V1-T07-Nr.05-L01:

Abbildung **Abb. 5-5** zeigt das Querkraft- Durchbiegungs- Verhalten der einzelnen Versuchskonfigurationen. Der Kurvenverlauf der Versuchskonfiguration V1-T07-Nr.05-L01 zeigt mit dem Erreichen der Bruchlast, einen plötzlichen Lastabfall. Die Messung des ARAMIS- Systems zeigt dass dieser Lastabfall mit einer plötzlichen und verstärkten Rissaufweitung des Versagensrisses verbunden ist. Die Rissentwicklungsdiagramme in den Abbildungen **Abb. 5-7** und **Abb. 5-8** zeigen ein Abflachen der Kurven mit dem Erreichen des Bruchlastniveaus. Dieses Verhalten deutet, wie schon bei der Versuchskonfiguration V1-T05-Nr.01-L01, auf einen lokalen Auszug oder eine lokale Delamination der textilbewehrten Bewehrungselemente im Steg hin. Nach dem Eintritt des Lastabfalls kommt es zu einem erneuten Lastanstieg, welcher mit einem Abfall der Steifigkeit verbunden ist.

Dieser Steifigkeitsverlust äußert sich durch einen flacheren Kurvenverlauf des wiederansteigenden Astes der Querkraft- Durchbiegungs- Kurve in Abbildung **Abb. 5-5**. Mit dem Wiederanstieg der Prüflast kommt es zu einer verstärkten Rissaufweitung im Messfeld. Mit dem Erreichen von rd. 95 % der maximalen Prüflast, versagen die einzelnen Betondruckstreben zwischen den Rissen und es kommt zur Abplatzung des Stegbetons im Bereich des Versagensrisses. In der Abbildung **Abb. 5-6c)** ist das Rissbild der Versuchskonfiguration abgebildet. Die Abbildung bestätigt dass es zu keinem Versagen der textilen Bewehrungselemente kommt. Abschließend kann festgehalten werden, dass das Versagen der Versuchskonfiguration auf das Delaminieren oder den Auszug der textilen Bewehrungselemente im Steg zurückzuführen ist.

d) V1-T08-Nr.07-L01:

In Abbildung **Abb. 5-5** ist die Querkraft- Durchbiegungs- Beziehung der Versuchskonfiguration dargestellt. Mit dem Erreichen von rd. 85 % der Bruchlast stellt sich ein flacherer Kurvenverlauf ein. Dieses Abflachen der Querkraft- Durchbiegungs- Kurve ist auf einen Steifigkeitsverlust und eine Aufweichung des Systems zurückzuführen. Der Steifigkeitsverlust lässt auf einen Auszug oder eine Delamination der textilen Bewehrungselemente im Steg schließen. Bestätigt wird diese Annahme durch die Messergebnisse des ARAMIS- Systems. Die aus der Messung ermittelten Rissentwicklungsdigramme sind in den Abbildungen **Abb. 5-7 & Abb. 5-8** dargestellt. Die Querkraft- Rissöffnungs- Kurve bzw. die Querkraft- Rissgleitungs- Kurve zeigt, mit dem Erreichen des Bruchlastniveaus, einen abflachenden Verlauf. Nach dem Erreichen des Bruchlastniveaus beschleunigt sich die Rissentwicklung im Messfeldbereich. Dies setzt sich bis zur Zerstörung der Betonstruktur, im Bereich des Versagensrisses, fort. In Abbildung **Abb. 5-6d)** ist das Rissbild der Versuchskonfiguration nach der Zerstörung der Betonstruktur dargestellt. Nach der Beendigung der Versuchsdurchführung ist die Betondeckung des Steges abgeschlagen worden. Es ist festgestellt worden, dass es zu keinem Bruch der Querkraftbewehrung gekommen ist. Das Versagen ist somit rein auf einen Auszug oder eine Delamination der textilen Bewehrungselemente im Steg zurückzuführen.



a) V1-T05-Nr.01-L01



b) V1-T06-Nr.03-L01

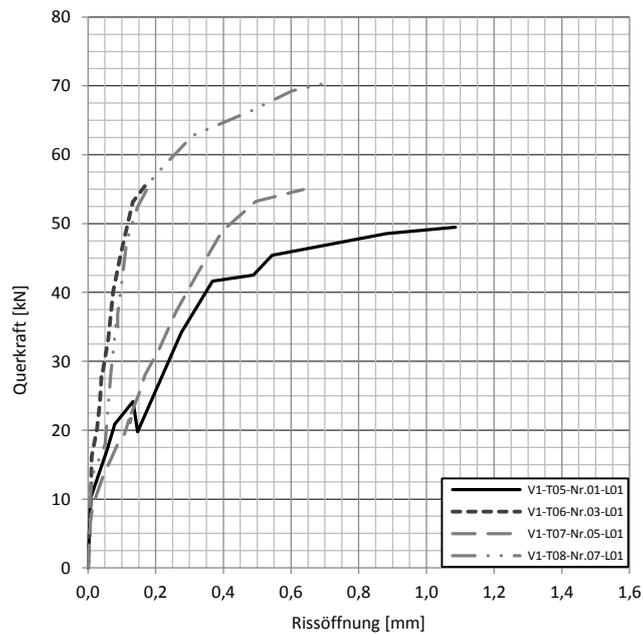


c) V1-T07-Nr.05-L01

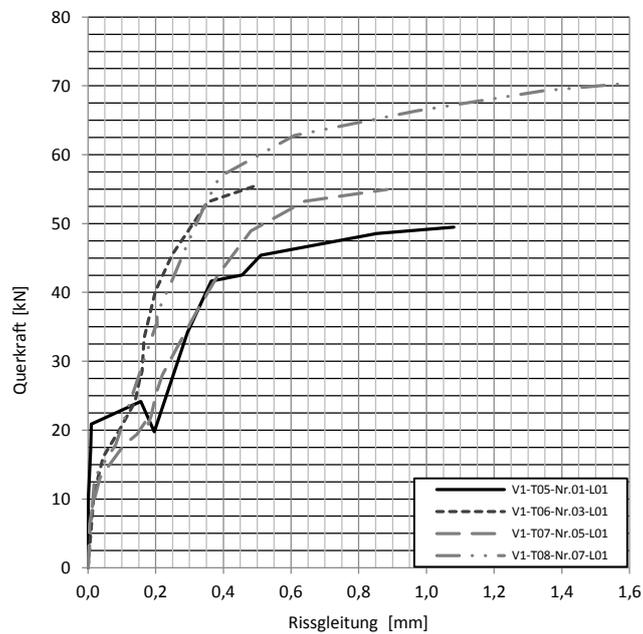


d) V1-T08-Nr.07-L01

**Abb. 5-6:** Rissbilder der Versuchsträger bei einer Schubschlankheit von  $a/d=2,5$

Entwicklung des Versagensrisses:

**Abb. 5-7:** Querkraft- Rissöffnungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von  $a/d=2,5$



**Abb. 5-8:** Querkraft- Rissgleitungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von  $a/d=2,5$

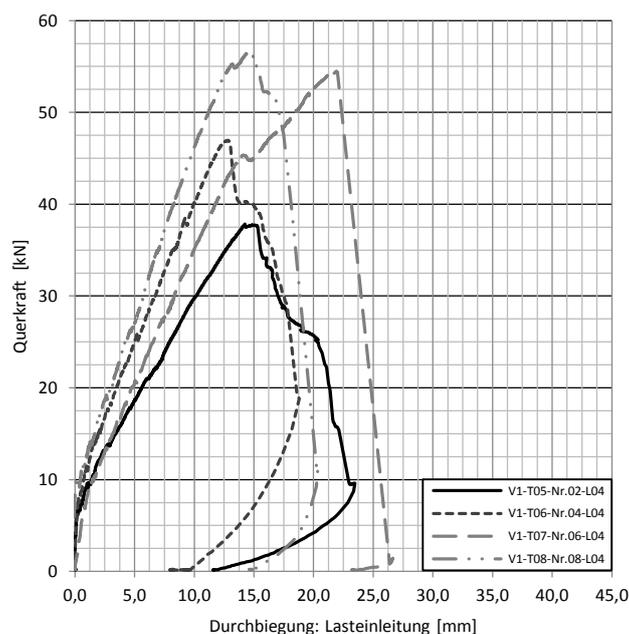
### 5.2.3 Versuchsergebnisse bei einer Schubslankheit von $a/d=3,0$

Die Tabelle **Tab. 5-2** zeigt die Zusammenfassung der Versuchsergebnisse Einzelversuche bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$ . Wie erwartet führt die Erhöhung des Querkraftbewehrungsgrades, auch bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$ , zu einer Erhöhung der Querkrafttragfähigkeit. Bei der Versuchskonfiguration V1-T05-Nr.02-L04 wird, mit einem steifigkeitsbezogenen Querkraftbewehrungsgrades von 1,11%, eine Bruchquerkraft von 37,83 kN erreicht. Die Konfiguration V1-T07-Nr.06-L04, mit gleicher Querschnittsausbildung wie V1-T05-Nr.02-L04, erreicht durch die Erhöhung des Querkraftbewehrungsgrades eine Bruchquerkraft von 54,44 kN. Dies entspricht einer Steigerung der Bruchquerkraft von rd. 43,9 %. Bei den Versuchskonfigurationen V1-T06-Nr.04-L04 und V1-T08-Nr.08-L04 wird, durch das Erhöhen des steifigkeitsbezogenen Querkraftbewehrungsgrades, eine Steigerung der Bruchquerkraft von rd. 20,2 % erreicht. Dabei erzielt die Konfiguration V1-T06-Nr.04-L04, mit einem steifigkeitsbezogenen Querkraftbewehrungsgrades von 0,83 %, eine Bruchquerkraft von 46,93 kN und die Konfiguration V1-T08-Nr.08-L04, mit einem steifigkeitsbezogenen Querkraftbewehrungsgrad von 1,82 %, eine Bruchquerkraft von 56,40 kN. Die Schubbrisswinkel der Versuchskonfigurationen liegen im Bereich von  $43^\circ$  (bei V1-T06-Nr.04-L04) bis  $64^\circ$  (bei V1-T05-Nr.02-L04). Dabei zeigt sich, wie schon bei den Ergebnissen mit einer Schubslankheit von  $a/d=2,5$ , keine ausgeprägte Abhängigkeit vom Bewehrungsgrad oder der Querschnittsausbildung.

Versuchskörper	$\omega_v$ [%]	$SR_{0,u}$ [mm]	$SR_{G,u}$ [mm]	$\beta_r$ [°]	$V_{u,exp}$ [kN]
V1-T05-Nr.02-L04	1,11	0,50	1,10	64	37,83
V1-T06-Nr.04-L04	0,83	0,98	0,94	46	46,93
V1-T07-Nr.06-L04	2,45	1,91	1,39	43	54,44
V1-T08-Nr.08-L04	1,82	0,39	0,67	53	56,40

**Tab. 5-2:** Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$

Die Abbildung **Abb. 5-9** zeigt die Querkraft- Durchbiegungs- Diagramme der einzelnen Trägerkonfigurationen bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$ . Wie schon bei den Versuchen mit einer Schubslankheit von  $a/d=2,5$  zeigen die Kurvenverläufe eine starke Abhängigkeit von der Querschnittsausbildung der Versuchskörper.



**Abb. 5-9:** Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$

Bestimmung des Versagensmechanismus:a) V1-T05-Nr.02-L04:

Abbildung **Abb. 5-9** zeigt die Querkraft- Durchbiegungs- Beziehung der Versuchskonfigurationen bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$ . Der Verlauf der Querkraft- Durchbiegungs- Kurve der Versuchskonfiguration V1-T05-Nr.02-L04 zeigt ein, sich mit dem Erreichen des Bruchlastniveaus einstellendes, kurzes Plateau. Die Entstehung dieses Plateaus ist auf den sukzessiven Auszug der textilen Bewehrungselemente im Bereich der Risswurzel des Versagensrisses zurückzuführen. In den Abbildungen **Abb. 5-11** und **Abb. 5-12** ist die Entwicklung des Versagensrisses im Querkraft- Rissöffnungs- bzw. Querkraft- Rissgleitungs- Diagramm dargestellt. Aufgrund der Auswertung des Versagensrisses bis zum Erreichen der Bruchlast, ist das Plateau in den Diagrammen nicht abgebildet. Das Rissbild, nach abgeschlossener Versuchsdurchführung, ist in der Abbildung **Abb. 5-10a)** abgebildet. In der Abbildung ist der Textilauszug durch die, von der Risswurzel des Versagensrisses ausgehend, fortpflanzende Risse erkennbar. Der primäre Versagensmechanismus ist auf das Versagen der Verankerung der textilen Bewehrungselemente und den fortschreitenden Auszug aus dem Untergurt zurückzuführen. In weiterer Folge wird, mit der fortschreitenden Rissbildung, die Betondruckzone eingeschnürt und versagt. Im Anschluss an die Versuchsdurchführung ist die Betondeckung im Bereich des Versagensrisses abgetragen worden. Es konnte ein teilweiser Bruch des textilen Bewehrungselements festgestellt werden.

b) V1-T06-Nr.04-L04:

Ähnlich wie bei der Versuchskonfiguration V1-T05-Nr.02-L04 versagt die Versuchskonfiguration V1-T06-Nr.04-L04 durch das Versagen der Verankerung der textilen Bewehrungselemente im Steg. Das Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm der Versuchskonfiguration, in Abbildung **Abb. 5-9**, zeigt einen stetigen Kurvenverlauf mit konstanter Steigung bis zum Erreichen der Bruchlast. Abbildung **Abb. 5-10b)** zeigt das Rissbild zum Zeitpunkt der maximalen Prüflast. Die Abbildung lässt ein Herausbrechen des Stegs vom Untergurt an der Risswurzel des Versagensrisses erkennen. Die Entwicklung des Versagensrisses ist in den Abbildungen **Abb. 5-11** und **Abb. 5-12** abgebildet. Wie schon bei der Versuchskonfiguration V1-T05-Nr.02-L04 ist die Auswertung des Versagensrisses nur bis zum Erreichen der Bruchlast durchgeführt worden. Womit das Nachbruchverhalten des Versuchskörpers nicht abgebildet wurde. Mit dem Erreichen der Bruchlast setzt das sukzessive Versagen der Verankerung der textilen Bewehrungselemente im Steg ein. Im Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm äußert sich dies durch die kontinuierliche Abnahme der Prüflast, bei gleichzeitiger der Zunahme der Durchbiegung. Auch bei dieser Versuchskonfiguration ist die Betondeckung, zur Überprüfung auf einen Bruch der Textile, abgeschlagen worden. Wie schon bei der Versuchskonfiguration V1-T05-Nr.02-L04 war ein teilweiser Bruch der Textile zu beobachten.

c) V1-T07-Nr.06-L04:

Die Entwicklung des Versagensrisses ist in den Abbildungen **Abb. 5-11** und **Abb. 5-12** dargestellt. Die Diagramme zeigen, dass mit dem Erreichen von rd. 80 % der Bruchlast der Kurvenverlauf der Querkraft- Rissöffnungs- bzw. der Querkraft- Rissgleitungs- Beziehung einen Knick besitzt. Ab diesem Zeitpunkt setzt das Herausziehen der textilen Bewehrungselemente des Steges ein. Dies wird durch die Messung des ARAMIS- Systems bestätigt. Im Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm, in der Abbildung **Abb. 5-9**, äußert sich der Steifigkeitsverlust durch den Textilauszug, durch einen flacheren Kurvenverlauf. Da sich der Textilauszug lokal auf einen Bereich an der Risswurzel beschränkt, führt dieser nicht zum Versagen des Prüfkörpers. Vielmehr setzt mit dem Beginn des Textilauszugs eine verstärkte Rissbildung ein. Diese setzt sich bis zum Erreichen der Bruchlast

fort. Das Versagen der Versuchskonfiguration tritt, mit dem Erreichen der Bruchlast, durch ein Versagen der Betondruckstrebe ein. Im Zuge des Versagenseintrittes wird die Betondeckung im Bereich des Versagensrisses abgesprengt und die textilen Bewehrungselemente werden freigelegt. An dem freigelegten Textil waren keine Bruchstellen zu erkennen. Lediglich die Knotenpunkte des Textils sind aufgebrochen worden. Das abgeschlossene Rissbild, nach Versagenseintritt, ist in Abbildung **Abb. 5-10c)** abgebildet.

d) V1-T08-Nr.08-L04:

Das Versagen der Versuchskonfiguration wird durch den Auszug der textilen Bewehrungselemente des Steges eingeleitet. Durch den sukzessiven Textilauszug wird die Betonstruktur des Steges zerstört, was zu einer Schädigung der Betondruckzone führt. Anschließend versagt diese mit dem Erreichen der Bruchlast. In der Abbildung **Abb. 5-10d)** ist das Rissbild des Versuchskörpers nach Versagenseintritt abgebildet. Das Eintreten der beschriebenen Versagensmechanismen wird durch die Messung des ARAMIS- Systems bestätigt. In den Rissentwicklungsdiagrammen des Versagensrisses in den Abbildungen **Abb. 5-11** und **Abb. 5-12** äußert sich der Textilauszug durch ein Abflachen des Kurvenverlaufs nach dem Erreichen des Zustandes der abgeschlossenen Rissbildung. Wie schon bei den vorhergehenden Versuchskonfigurationen ist die Betondeckung um den Versagensriss abgetragen worden. Ein Bruch der textilen Bewehrungselemente konnte nicht festgestellt werden.



a) V1-T05-Nr.02-L04



b) V1-T06-Nr.04-L04

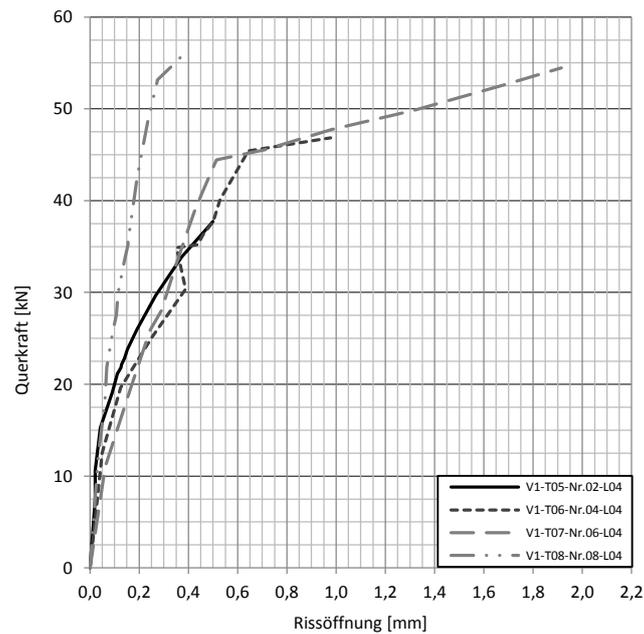


c) V1-T07-Nr.06-L04

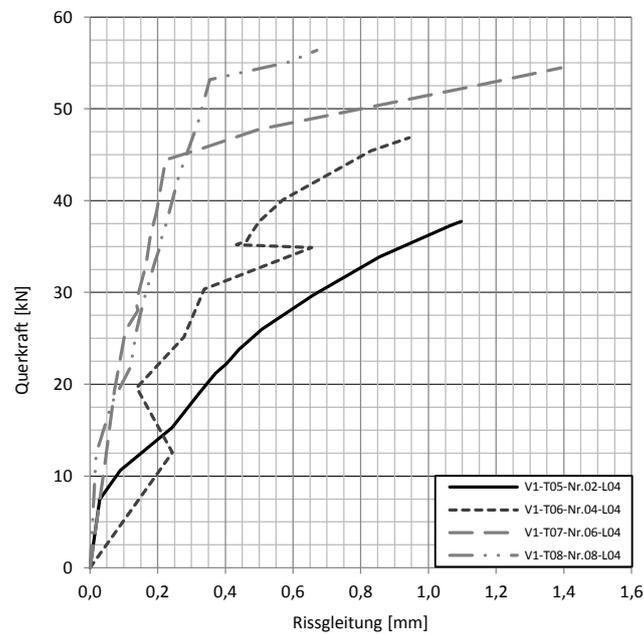


d) V1-T08-Nr.08-L04

**Abb. 5-10:** Rissbilder der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$

Entwicklung des Versagensrisses:

**Abb. 5-11:** Querkraft- Rissöffnungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$



**Abb. 5-12:** Querkraft- Rissgleitungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$

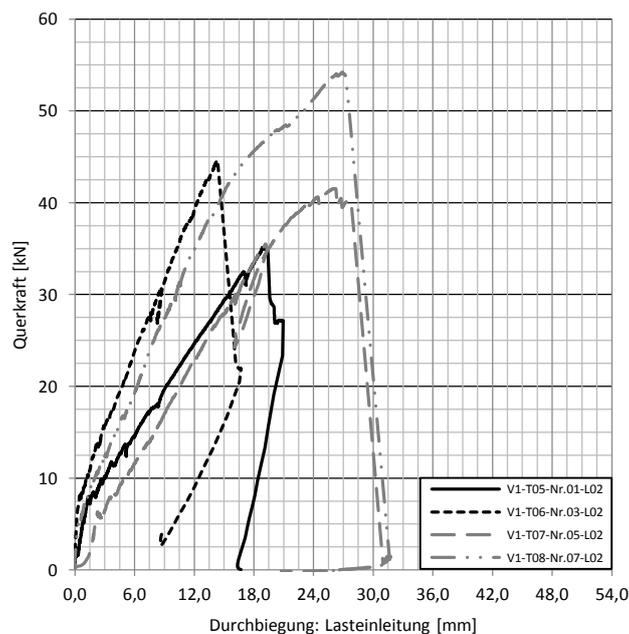
### 5.2.4 Versuchsergebnisse bei einer Schubslankheit von $a/d=3,5$

In der Tabelle **Tab. 5-3** sind die Ergebnisse der Einzelversuche, bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,5$ , entsprechend den Versuchskörpern zusammengefasst. Auch bei der betrachteten Schubslankheit zeigt sich eine Erhöhung der Querkrafttragfähigkeit mit der Erhöhung des Querkraftbewehrungsgrades. Die Bruchquerkraft der Konfiguration V1-T05-Nr.01-L02, mit einem steifigkeitsbezogenen Querkraftbewehrungsgrades von 1,06 %, liegt bei 35,09 kN. Durch eine Erhöhung des steifigkeitsbezogenen Querkraftbewehrungsgrades auf 2,42 %, erreicht die Konfiguration V1-T07-Nr.05-L02 eine Bruchquerkraft von 41,54 kN. Dies entspricht einer Steigerung der Bruchquerkraft von rd. 18,4 %. Bei den Konfigurationen V1-T06-Nr.03-L02 und V1-T08-Nr.07-L02 zeigt sich ein ähnliches Ergebnis. Hier beträgt die Steigerung, durch die Erhöhung des steifigkeitsbezogenen Querkraftbewehrungsgrades, rd. 21,9 %. Die Schubbrisswinkel der Versuchskonfigurationen liegen im Bereich von  $32^\circ$  (bei V1-T08-Nr.07-L02) bis  $64^\circ$  (bei V1-T07-Nr.05-L02). Dabei zeigt sich dass sich bei den Versuchskonfigurationen V1-T05-Nr.01-L02 und V1-T07-Nr.05-L02, mit der schlanken Querschnittsausbildung, deutlich steilere Schubbrisswinkel ausbilden als bei den Konfigurationen V1-T06-Nr.03-L02 und V1-T08-Nr.07-L02.

Versuchskörper	$\omega_v$ [%]	$S_{R0,u}$ [mm]	$S_{RG,u}$ [mm]	$\beta_r$ [°]	$V_{u,exp}$ [kN]
V1-T05-Nr.01-L02	1,06	0,43	0,69	61	35,09
V1-T06-Nr.03-L02	0,79	0,63	0,59	49	44,48
V1-T07-Nr.05-L02	2,42	0,48	1,11	64	41,54
V1-T08-Nr.07-L02	1,84	1,98	1,06	32	54,21

**Tab. 5-3:** Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,5$

Die Abbildung **Abb. 5-13** zeigt die Querkraft- Durchbiegungs-Diagramme der einzelnen Trägerkonfigurationen bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,5$ . Auch bei der betrachteten Schubslankheit zeigt sich eine starke Abhängigkeit des Kurvenverlaufs von der Querschnittsausbildung.



**Abb. 5-13:** Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,5$

Bestimmung des Versagensmechanismus:a) V1-T05-Nr.01-L02:

Die Abbildung **Abb. 5-13** zeigt die Querkraft- Durchbiegungs- Beziehung der Versuchskonfigurationen bei einer Schubslankheit von  $a/d= 3,5$ . Beim Verlauf der Querkraft- Durchbiegungs- Kurve, der Konfiguration V1-T05-Nr.01-L02, stellt sich mit dem Erreichen des Bruchlastniveaus ein Plateau ein. Eine mögliche Ursache für die Entstehung dieses Plateaus könnte ein sukzessiver Auszug der textilen Bewehrungselemente des Steges im Bereich der Risswurzel des Versagensrisses sein. Die Diagramme der Versagensrissentwicklung in den Abbildungen **Abb. 5-15** und **Abb. 5-16** sind bis zum Erreichen der Bruchlast gezeichnet worden. Die Diagramme zeigen, dass es bis zum Erreichen des Bruchlastniveaus zu keinem Textilauszug oder einer Delamination der textilen Bewehrungselemente des Steges kommt. Bei diesem Versuch ist die Versagensursache nicht eindeutig bestimmbar. Es wird angenommen, dass mit dem Erreichen der Bruchlast entweder ein Auszug oder ein sukzessiver Bruch der textilen Bewehrungselemente an der Risswurzel des Versagensrisses einsetzt. Die Abbildung **Abb. 5-14a)** zeigt das Rissbild mit dem Erreichen der Bruchlast.

b) V1-T06-Nr.03-L02:

Die Aufnahme der Versuchsdurchführung zeigt keine ausgeprägte Rissbildung bis zum Versagen der Versuchskonfiguration. Das Versagen tritt ohne vorherige Ankündigung durch das Versagen der textilen Bewehrungselemente im Steg ein. In den Abbildungen **Abb. 5-15** und **Abb. 5-16** ist die Entwicklung des Versagensrisses dargestellt. Der Verlauf des Querkraft- Rissöffnungs- bzw. der Querkraft- Rissgleitungs- Kurve zeigt keine Anzeichen für eine Delamination oder eine Auszug der textilen Bewehrungselemente des Steges. Auch die Querkraft- Durchbiegungs- Beziehung in Abbildung **Abb. 5-13** zeigt keine Anzeichen für einen der zwei angeführten Versagensmechanismen. Nach dem Erreichen des Zustands der abgeschlossenen Rissbildung verläuft die Kurve stetig und mit konstanter Steigung bis zum Versagenseintritt. Die Abbildung **Abb. 5-14b)** zeigt das Rissbild der Versuchskonfiguration nach dem Eintritt des Versagens.

c) V1-T07-Nr.05-L02:

In der Abbildung **Abb. 5-14c)** ist das Rissbild, nach der Beendigung der Versuchsdurchführung, abgebildet. Mit dem Erreichen des Bruchlastniveaus stellt sich im Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm in Abbildung **Abb. 5-13** eine Plateau ein und es kommt zu einem stetigen Steifigkeitsverlust. Dieses Plateau ist auf ein fortschreitendes Herausziehen oder ein Delaminieren der textilen Bewehrungselemente des Steges zurückzuführen. Diese Annahme wird durch die Messung des ARAMIS- Systems bestätigt. Die Messung zeigt, dass sich mit dem Einstellen des Querkraftplateaus, die Rissentwicklung im Bereich der Risswurzel des Versagensrisses beschleunigt und in Richtung des Auflagers fortsetzt. In den Diagrammen der Versagensrissentwicklung, in den Abbildungen **Abb. 5-15** und **Abb. 5-16**, äußert sich der Textilauszug bzw. das Delaminieren durch ein Abflachen der Querkraft- Rissöffnungs- bzw. Querkraft- Rissgleitungs- Kurve. Das Versagen der Versuchskonfiguration tritt im Anschluss durch ein Versagen der, durch das Delaminieren vorgeschädigten, Betondruckstrebe ein. Mit dem Versagen der Betondruckstrebe kommt es im Bereich des Versagensrisses zur Abplatzung der Betondeckung. Durch die Abplatzung ist das Textil freigelegt worden. Ein Bruch des textilen Bewehrungselements ist nicht festgestellt worden.

d) V1-T08-Nr.07-L02:

Das Versagen der Versuchskonfiguration V1-T08-Nr.07-L02 wird durch ein sukzessives Herausziehen bzw. ein Delaminieren der textilen Bewehrungselemente des Steges eingeleitet. Der Eintritt einer der beiden Versagensmechanismen äußert sich durch ein Abflachen der Kurve im Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm (siehe Abbildung **Abb. 5-13**). Mit dem Erreichen von rd. 78 % der Bruchlast tritt dieses Abflachen ein. Selbiges ist bei den Diagrammen zu der Rissentwicklung des Versagensrisses in den Abbildungen **Abb. 5-15** und **Abb. 5-16** zu beobachten. Die Messung des ARAMIS- Systems zeigt, dass mit dem Erreichen des angeführten Prüflastniveaus, ein beschleunigtes Aufgehen der Risse an der Risswurzel des Versagensrisses einsetzt. Dieser Versagensmechanismus führt aufgrund seiner lokalen Begrenztheit nicht zum Versagen der Versuchskonfiguration. Das Versagen tritt durch das Versagen der, durch das Delaminieren vorgeschädigten, Betondruckstreben ein. In der Abbildung **Abb. 5-14d**) ist das Rissbild nach dem Versagen der Betondruckstrebe abgebildet. Aufgrund der Abplatzung der Betondeckung, im Bereich des Versagensrisses, ist es möglich gewesen die textilen Bewehrungselemente des Steges auf einen Bruch zu untersuchen. Im Zuge der Untersuchung ist kein Bruch festgestellt worden.



a) V1-T05-Nr.01-L02



b) V1-T06-Nr.03-L02

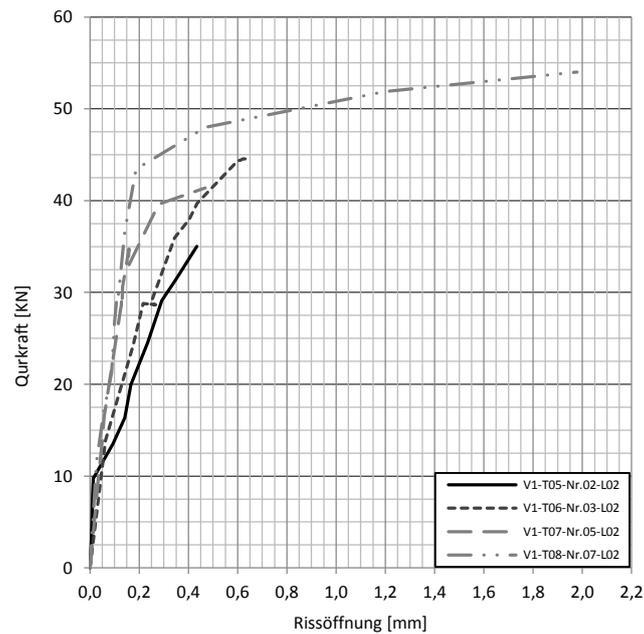


c) V1-T07-Nr.05-L02

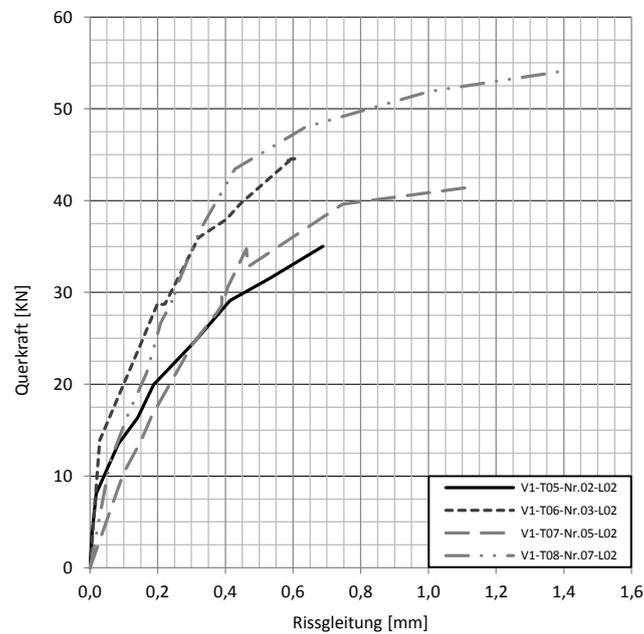


d) V1-T08-Nr.07-L02

**Abb. 5-14:** Rissbilder der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,5$

Entwicklung des Versagensrisses:

**Abb. 5-15:** Querkraft- Rissöffnungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,5$



**Abb. 5-16:** Querkraft- Rissgleitungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,5$

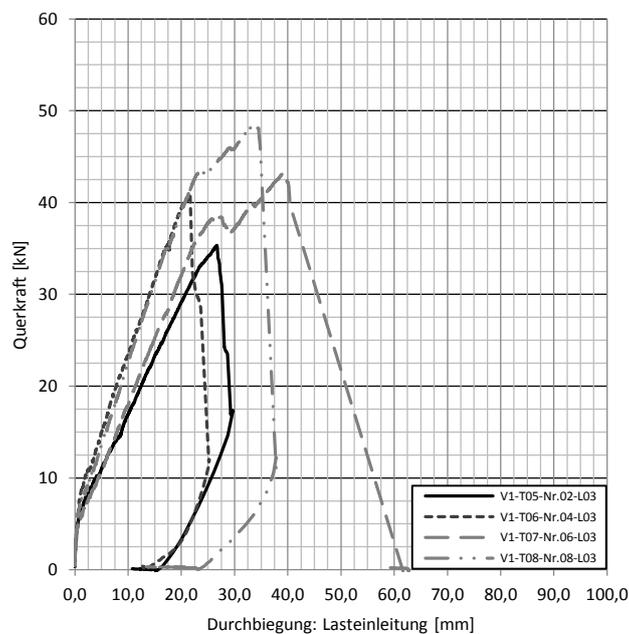
### 5.2.5 Versuchsergebnisse bei einer Schubslankheit von $a/d=4,0$

In der Tabelle **Tab. 5-4** sind die Ergebnisse der Einzelversuche, bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$ , entsprechend den Versuchskörpern zusammengefasst. Auch bei der betrachteten Schubslankheit zeigt sich eine Erhöhung der Querkrafttragfähigkeit mit der Erhöhung des Querkraftbewehrungsgrades. Die erreichte Bruchquerkraft der Konfiguration V1-T05-Nr.02-L03, mit einem steifigkeitsbezogenen Querkraftbewehrungsgrades von 1,11 %, beträgt 35,32 kN. Durch eine Erhöhung des steifigkeitsbezogenen Bewehrungsgrades auf 2,45 %, erreicht die Konfiguration V1-T07-Nr.06-L03 eine Bruchquerkraft von 43,17 kN. Die Steigerung der Bruchquerkraft, durch die Erhöhung des Querkraftbewehrungsgrades, beträgt rd. 22,2 %. Bei den Konfigurationen V1-T06-Nr.04-L03 und V1-T08-Nr.08-L03 beträgt die Steigerung, durch die Erhöhung des steifigkeitsbezogenen Querkraftbewehrungsgrades, rd. 18,8 %. Die Schubrisswinkel der Versuchskonfigurationen liegen im Bereich von  $47^\circ$  (bei V1-T08-Nr.08-L03) bis  $58^\circ$  (bei V1-T06-Nr.04-L03). Dabei zeigt sich, wie schon bei den Versuchen zuvor, keine ausgeprägte Abhängigkeit vom Bewehrungsgrad oder Querschnittsausbildung.

Versuchskörper	$\omega_v$ [%]	$s_{R\ddot{O},u}$ [mm]	$s_{RG,u}$ [mm]	$\beta_r$ [°]	$V_{u,exp}$ [kN]
V1-T05-Nr.02-L03	1,11	0,17	0,66	56	35,32
V1-T06-Nr.04-L03	0,83	0,58	0,92	58	40,68
V1-T07-Nr.06-L03	2,45	-	-	-	43,17
V1-T08-Nr.08-L03	1,82	-	-	47	48,32

**Tab. 5-4:** Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$

Die Abbildung **Abb. 5-17** zeigt die Querkraft- Durchbiegungs-Diagramme der einzelnen Trägerkonfigurationen bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$ . Wie bei den zuvor betrachteten Schubslankheiten zeigt sich auch hier eine starke Abhängigkeit des Kurvenverlaufs von der Querschnittsausbildung.



**Abb. 5-17:** Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$

Bestimmung des Versagensmechanismus:a) V1-T05-Nr.02-L03:

Bei der Versuchsdurchführung der Konfiguration V1-T05-Nr.02-L03 zeigt sich bis zum Erreichen des Bruchlastniveaus keine ausgeprägte Rissbildung. Auf den Videoaufnahmen ist zu erkennen, dass sich der Versagensriss erst mit dem Erreichen der Bruchlast bildet. Die Rissentwicklung des Versagensrisses ist in den Diagrammen der Abbildungen **Abb. 5-19** und **Abb. 5-20** dargestellt. Das Querkraft- Rissöffnungsdiagramm (siehe **Abb. 5-19**) zeigt keine Anzeichen für einen möglichen Textilauszug oder eine Delamination der textilen Bewehrungselemente des Steges. Das Auftreten einer dieser Mechanismen würde sich durch ein Abflachen des Kurvenverlaufs äußern. Das Versagen der Versuchskonfiguration wird durch das Versagen der textilen Bewehrungselemente im Steg eingeleitet. In der Abbildung **Abb. 5-18a**) ist das Rissbild der Versuchskonfiguration unmittelbar nach dem Versagenseintritt abgebildet.

b) V1-T06-Nr.04-L03:

Die Querkraft- Durchbiegungs- Kurve in Abbildung **Abb. 5-17** zeigt, mit dem Erreichen der Bruchlast, einen plötzlichen Lastabfall. Dieser Abfall lässt sich durch einen lokal Auszug oder eine Delamination der textilen Bewehrungselemente des Steges erklären. Mit dem Erreichen der Bruchlast kommt es, an der Risswurzel des Versagensrisses, zu einer lokal begrenzten Aktivierung einer der beiden Versagensmechanismen. Die Abbildung **Abb. 5-18b**) zeigt das Rissbild der Versuchskonfiguration unmittelbar nach dem Erreichen der Bruchlast. In weiterer Folge pflanzt sich der Riss entlang des Untergurt- Steg-Anschlusses, bis zum Versagen der textilen Bewehrungselemente und dem Bruch des Versuchskörpers, fort. Da es nach dem initialen Lastabfall zu keiner weiteren Laststeigerung kommt, kann als primärer Versagensmechanismus eine Delamination oder ein Auszug der textilen Bewehrungselemente im Steg identifiziert werden.

c) V1-T07-Nr.06-L03:

Das Versagen der Versuchskonfiguration V1-T07-Nr.06-L03 ist auf das Versagen der Betondruckstrebe zurückzuführen. Dabei ist Rissbild der Versuchskonfiguration in der Abbildung **Abb. 5-18c**) abgebildet. Die Abbildung lässt erkennen, dass es nicht zum Bruch der textilen Bewehrungselemente des Steges gekommen ist. In der Abbildung **Abb. 5-17** ist das Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm der Versuchskonfiguration abgebildet. Das Diagramm zeigt, dass sich mit dem Erreichen von rd. 87% der Bruchlast ein erster Hochpunkt im Kurvenverlauf bildet. Dieser Hochpunkt ist auf den beginnenden Textilauszug im Bereich der Risswurzel des Versagensrisses zurückzuführen. Die Messung des ARAMIS- Systems bestätigt diese Annahme. Mit dem Erreichen des Hochpunktes wird das Messfeld um den Bereich des Versagensrisses, aufgrund zu großer Verschiebungen, diffus und es findet keine weitere Messung dieses Bereiches statt. Damit findet ein Monitoring des Versagensrisses nur bis zum Erreichen dieses Hochpunktes statt. Die Rissentwicklung ist in den Abbildungen **Abb. 5-19** und **Abb. 5-20** dargestellt. Nach dem Erreichen dieses Hochpunktes kommt es zu einem weiteren Lastanstieg. Dabei ist dieser, aufgrund des fortschreitenden Textilauszugs, mit einer Einbuße der Steifigkeit verbunden. Dieser Steifigkeitsverlust äußert sich durch einen, im Vergleich zum Kurvenverlauf bis zum Einsetzen des Textilauszugs, flacher Kurvenverlauf. Mit dem Wiederanstieg der Prüflast schreitet der Auszug der textilen Bewehrungselemente des Steges sukzessiv in Richtung des Auflagers voran. Mit dem Erreichen der Bruchlast kommt es zu einem explosionsartigen Versagen der Betondruckstrebe.

d) V1-T08-Nr.08-L03:

Das Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm in Abbildung **Abb. 5-17** zeigt, mit dem Erreichen von rd. 90 % der Bruchlast, ein Abflachen des Kurvenverlaufs. Dieses Abflachen ist auf den beginnenden Auszug der textilen Bewehrungselemente des Steges aus dem Untergurt zurückzuführen. Die Messung des ARAMIS- Systems zeigt, dass sich mit dem Erreichen dieses Niveaus eine beschleunigte und in Richtung des Auflagers fortschreitende Rissbildung einsetzt. Wie schon bei der Versuchskonfiguration V1-T07-Nr.06-L03, schlägt die Messung der Rissentwicklung mit dem beginnenden Textilauszug, aufgrund zu hoher Verschiebungen der Messpunkte, fehl. Deshalb ist die Rissentwicklung in den Abbildungen **Abb. 5-19** und **Abb. 5-20** nur bis zum Einsetzen des Textilauszugs dargestellt. Mit dem Erreichen der Bruchlast versagt die Betonstruktur zwischen den Rissen. In Abbildung **Abb. 5-18d)** ist das Rissbild der Versuchskonfiguration unmittelbar nach dem Erreichen der Bruchlast abgebildet. Nach abgeschlossener Versuchsdurchführung ist die Betondeckung im Steg partiell abgetragen worden. Ein Bruch der textilen Bewehrungselemente ist an keiner der untersuchten Stellen festgestellt worden.



a) V1-T05-Nr.02-L03



b) V1-T06-Nr.04-L03

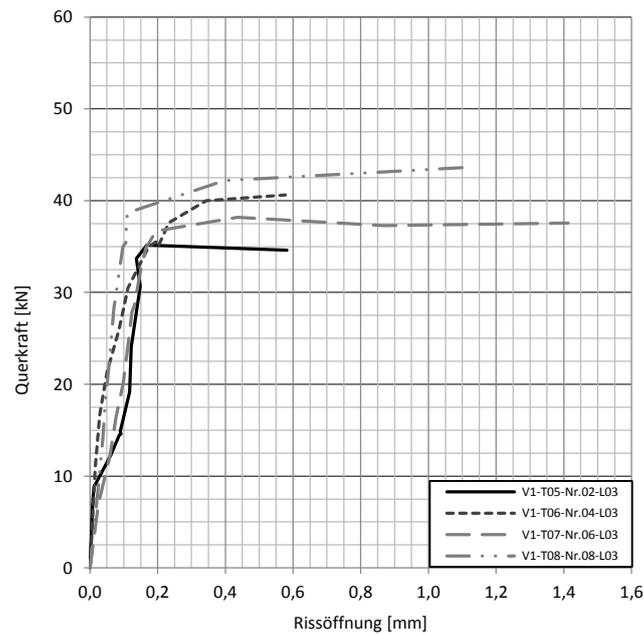


c) V1-T07-Nr.06-L03

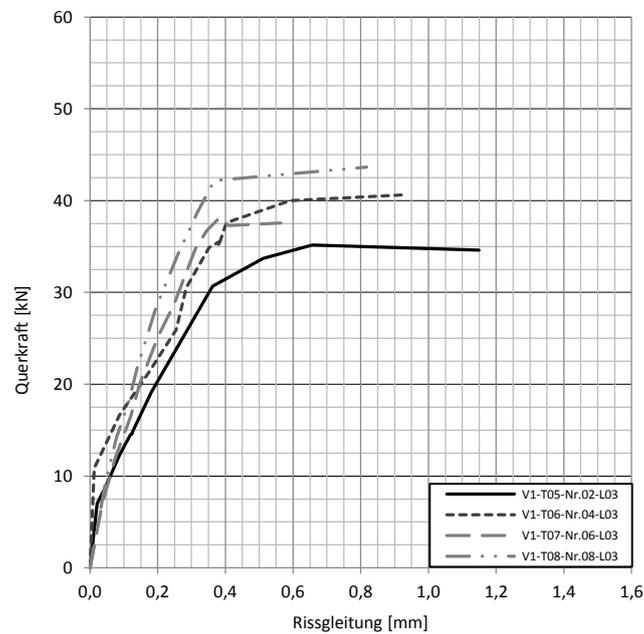


d) V1-T08-Nr.08-L03

**Abb. 5-18:** Rissbilder der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$

Entwicklung des Versagensrisses:

**Abb. 5-19:** Querkraft- Rissöffnungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$



**Abb. 5-20:** Querkraft- Rissgleitungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$

### 5.2.6 Einfluss der Vorspannung

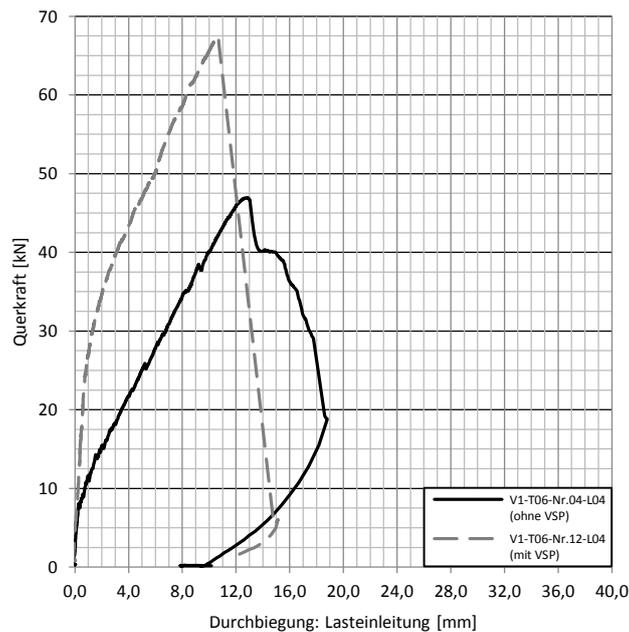
Versuchsergebnisse bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$ :

In der Tabelle **Tab. 5-5** sind die Ergebnisse der Versuchskonfiguration V1-T06-Nr12-L04 zusammengefasst und den Ergebnissen der Konfiguration V1-T06-Nr.04-L04 gegenübergestellt. Im Vergleich zu der schlaff bewehrten Konfiguration V1-T06-Nr.04-L04, erreicht die vorgespannte Konfiguration V1-T06-Nr.12-L04 mit 67,43 kN, eine um rd. 43,5 % höhere Querkrafttragfähigkeit (siehe **Tab. 5-5**).

Versuchskörper	VSP	$\omega_v$	$S_{R0,u}$	$S_{RG,u}$	$\beta_r$	$V_{u,exp}$
	[-]	[%]	[mm]	[mm]	[°]	[kN]
V1-T06-Nr.04-L04	Nein	0,83	0,98	0,94	46	46,93
V1-T06-Nr.12-L04	Ja	0,84	0,80	0,65	39	67,34

**Tab. 5-5:** Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Versuchsträger V1-T06-Nr.04 & V1-T06-Nr.12 bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$

In der Abbildung **Abb. 5-21** ist das Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm der Versuchskonfigurationen V1-T06-Nr.04-L04 und V1-T06-Nr.12-L04, für eine Schubslankheit von  $a/d= 3,0$ , dargestellt. Diese beiden Versuchskörper besitzen die gleiche Querschnittsausbildung und Bewehrungsführung. Diese sind in der Abbildung **Abb. 5-2** dargestellt. Im Unterschied zu dem schlaff bewehrten Versuchskörper V1-T06-Nr.04-L04, ist der Versuchskörper V1- T06- Nr.12-L04 mit einem Vorspanngrad von 25%, der Bruchkraft der Biegebewehrungsstäbe, hergestellt worden. Durch den Vergleich der beiden Versuchskonfigurationen lässt sich der Einfluss der Vorspannung deutlich erkennen. Durch das Vorspannen wird die Steifigkeit des Versuchskörpers deutlich erhöht. Bei Versuchskonfiguration V1-T06-Nr.04-L04 setzt die Erstrissbildung bei Querkraft von rd. 7,0 kN ein. Im Vergleich dazu setzt diese bei der vorgespannten Versuchskonfiguration V1-T06-Nr.12-L04, auf einem Querkraftniveau von rd. 25,0 kN ein. Dies zeigt, dass die Rissbildung bei der vorgespannten Konfiguration auf einem deutlich höheren Querkraftniveau einsetzt. Darüber hinaus weist die vorgespannte Konfiguration, im Vergleich zur schlaff bewehrten Konfiguration, ein deutlich verbessertes Querkraft- Durchbiegungs- Verhalten auf. Bei gleichem Belastungsniveau weist die Versuchskonfiguration V1-T06-Nr.12-L04, im Vergleich zu Konfiguration V1-T06-Nr.04-L04, eine deutlich geringere Durchbiegung auf.



**Abb. 5-21:** Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm der Versuchsträger V1-T06-Nr.04 & V1-T06-Nr.12 bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$

Zusammenfassend kann für diese Belastungskonfiguration festgestellt werden, dass sich bereits durch das Vorspannen bei einem geringen Vorspanngrad von 25%, die Gebrauchstauglichkeit des Versuchskörpers im Vergleich zum schlaff bewehrten Gegenstück wesentlich verbessert. Nicht nur wird der Zustand der abgeschlossenen Rissbildung auf einem höheren Belastungsniveau erreicht, sondern auch die Durchbiegung wird bei gleichem Belastungsniveau deutlich verringert. Darüber hinaus wird die Querkrafttragfähigkeit wesentlich verbessert.

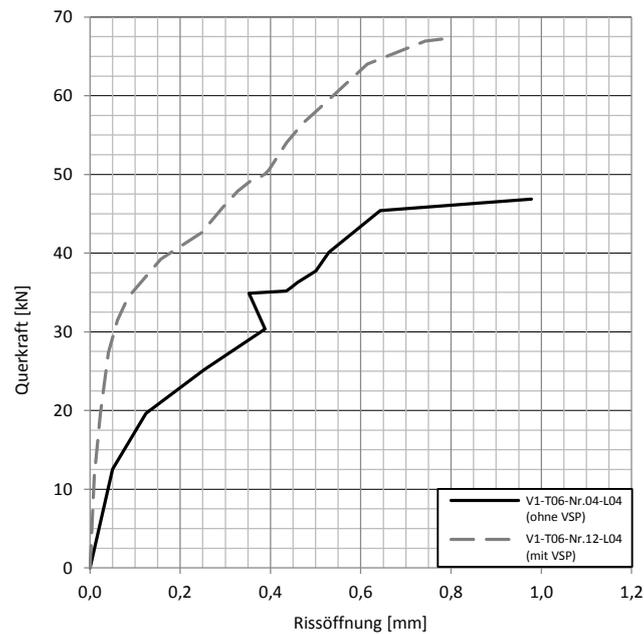
#### Bestimmung des Versagensmechanismus:

##### V1-T06-Nr.12-L04:

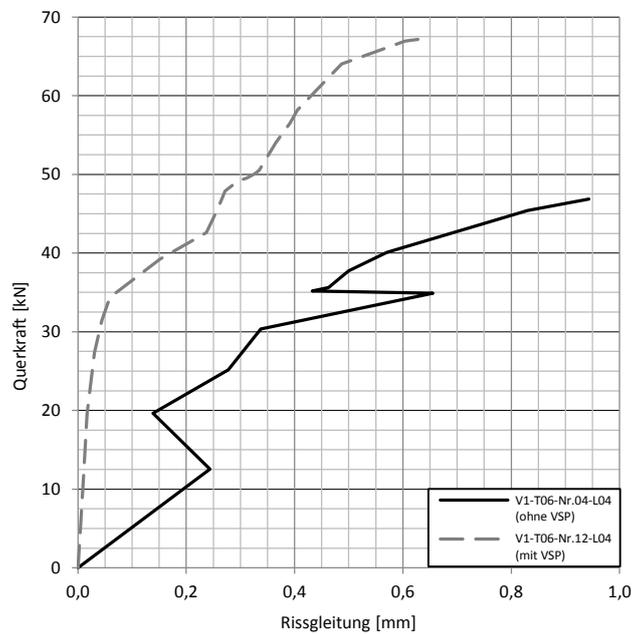
Die Entwicklung des Versagensrisses der Versuchskonfigurationen V1-T06-Nr.12-L04 und V1-T06-Nr.04-L04 ist in den Abbildungen **Abb. 5-23** und **Abb. 5-24** dargestellt. Dabei zeigt die Abbildung **Abb. 5-23** die Querkraft- Rissöffnungs- Beziehung und die Abbildung **Abb. 5-24** die Querkraft- Rissgleitungs- Beziehung der beiden Versuchskonfigurationen. Anders als bei der schlaff bewehrten Konfiguration V1-T06-Nr.04-L04, wird das Versagen bei der vorgespannten Konfiguration V1-T06-Nr.12-L04 nicht durch einen Textilauszug oder eine Delamination der textilen Bewehrungselemente im Steg eingeleitet. Die Messung des ARAMIS- Systems bestätigt dies. Das Versagen der vorgespannten Konfiguration V1-T06-Nr.12-L04 wird durch ein Versagen der textilen Bewehrungselemente im Steg eingeleitet. Durch den Bruch der textilen Bewehrungselemente wird die Betondruckzone eingeschnürt und versagt mit dem Erreichen der Bruchlast. Der Bruch der textilen Bewehrungselemente im Steg wird durch die Versuchsaufnahmen bestätigt.



**Abb. 5-22:** Rissbild des Versuchsträgers V1-T06-Nr.12 bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$

Entwicklung des Versagensrisses:

**Abb. 5-23:** Querkraft- Rissöffnungs- Diagramm der Versuchsträger V1-T06-Nr.04 & V1-T06-Nr.12 bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$



**Abb. 5-24:** Querkraft- Rissgleitungs- Diagramm der Versuchsträger V1-T06-Nr.04 & V1-T06-Nr.12 bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$

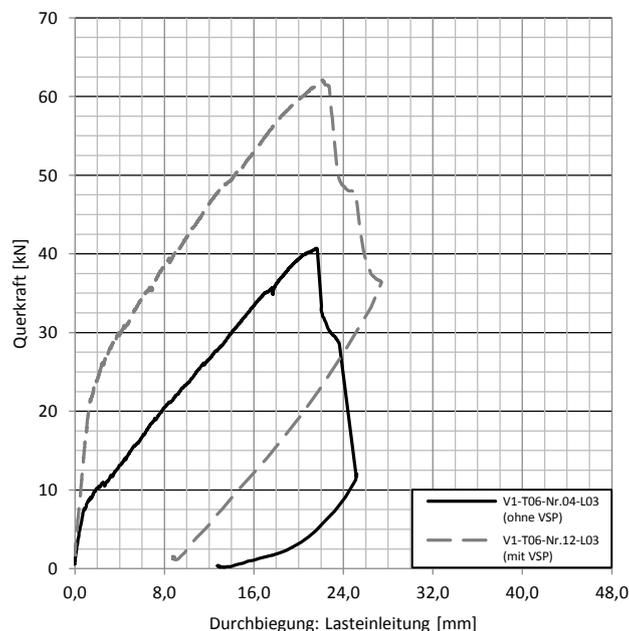
Versuchsergebnisse bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$ :

Die Tabelle **Tab. 5-6** zeigt die Ergebnisse der Versuchskonfigurationen V1-T06-Nr.12-L03 und V1-T06-Nr.04-L03.

Versuchskörper	VSP [-]	$\omega_v$ [%]	$SR_{0,u}$ [mm]	$SR_{G,u}$ [mm]	$\beta_r$ [°]	$V_{u,exp}$ [kN]
V1-T06-Nr.04-L03	Nein	0,83	0,58	0,92	58	40,68
V1-T06-Nr.12-L03	Ja	0,84	0,92	0,77	43	62,17

**Tab. 5-6:** Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Versuchsträger V1-T06-Nr.04 & V1-T06-Nr.12 bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$

Die Abbildung **Abb. 5-25** zeigt das Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm der Versuchskonfigurationen V1-T06-Nr.04-L03 und V1-T06-Nr.12-L03. Ähnlich wie bei Versuchen mit einer Schubslankheit von  $a/d= 3,0$ , ist auch bei diesen Belastungskonfigurationen eine deutliche Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit, aufgrund der Vorspannung, erkennbar. Die Durchbiegung der Versuchskonfiguration V1-T06-Nr.04-L03 beträgt auf Bruchlastniveau 21,56 mm. Bei dem gleichen Belastungsniveau beträgt die Durchbiegung der Versuchskonfiguration V1-T06-Nr.12-L03 rd. 9,0mm. Die Versuchskonfiguration V1-T06-Nr.04-L03 erreicht den Zustand der abgeschlossenen Rissbildung bei einer Querkraft von rd. 7,0 kN. Im Vergleich dazu wird dieser Zustand bei der Versuchskonfiguration V1-T06-Nr.12-L03 bei einer Querkraft von rd. 22,5 kN erreicht. Dies entspricht einer Erhöhung von in etwa 321 %. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse der schlaff bewehrten Konfiguration zu den Ergebnissen des vorgespannten Gegenstücks zeigt, dass das Vorspannen die Gebrauchstauglichkeit des Versuchskörpers deutlich verbessert und die Querkrafttragfähigkeit erhöht. Die Steigerung der Querkrafttragfähigkeit beträgt bei dieser Belastungskonfiguration rd. 52,7 %.



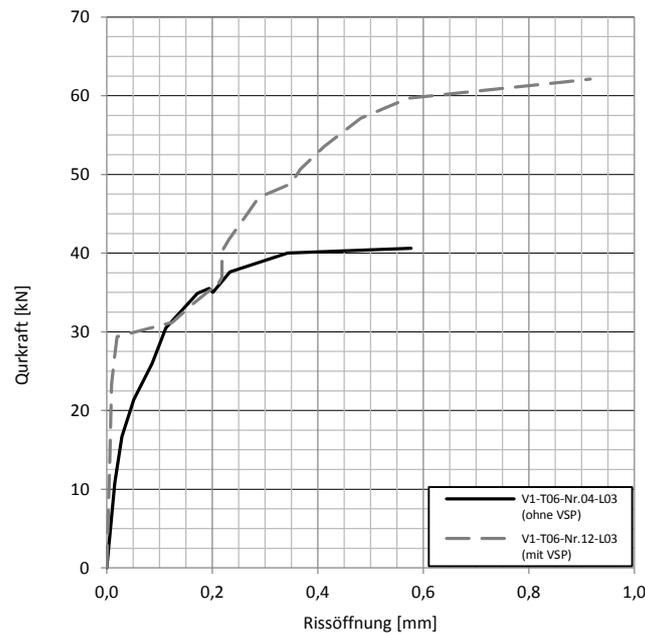
**Abb. 5-25:** Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm der Versuchsträger V1-T06-Nr.04 & V1-T06-Nr.12 bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$

Bestimmung des Versagensmechanismus:V1-T06-Nr.12-L03:

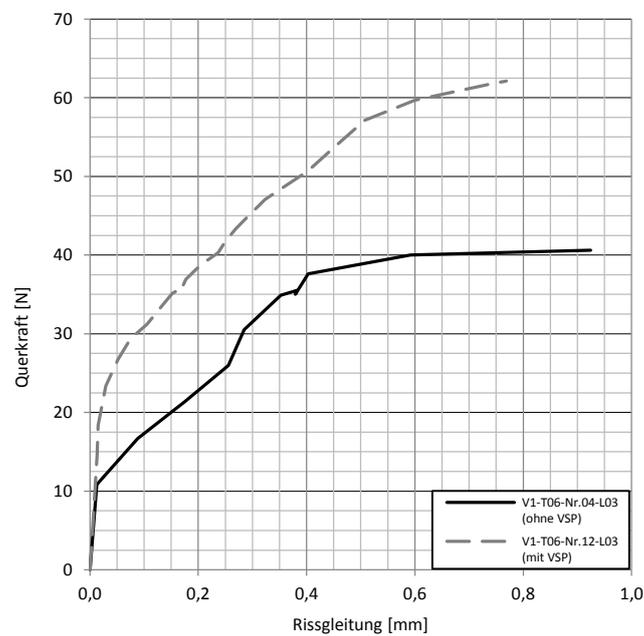
Ähnlich wie bei der schlaff bewehrten Konfiguration V1-T06-Nr.04-L03 kommt es bei der vorgespannten Konfiguration V1-T06-Nr.12-L03 zu einem plötzlichen Lastabfall in der Querkraft- Durchbiegungs- Kurve in Abbildung, **Abb. 5-25**. Der Lastabfall tritt mit dem Erreichen der Bruchlast ein und lässt sich durch einen lokal begrenzten Auszug oder eine lokal begrenzte Delamination der textilen Bewehrungselemente des Steges erklären. Mit dem Erreichen der Bruchlast kommt es zu einer Aktivierung einer der beiden Versagensmechanismen an der Risswurzel des Versagensrisses. Die Abbildung **Abb. 5-26** zeigt das Rissbild der Versuchskonfiguration nach der abgeschlossenen Rissbildung. Es ist zu erkennen, dass sich der Initialriss, an der Risswurzel, mit der weiteren Versuchsdurchführung in Richtung des Auflagers fortgepflanzt hat. Ein Versagen der textilen Bewehrungselemente im Steg ist nicht belegt worden. Nach dem initialen Lastabfall kommt es zu keiner weiteren Laststeigerung. Deshalb ist als der primäre Versagensmechanismus eine Delamination oder ein Auszug der textilen Bewehrungselemente im Steg identifiziert worden. Die Abbildungen **Abb. 5-27** und **Abb. 5-28** zeigen die Entwicklung des Versagensrisses der Versuchskonfigurationen V1-T06-Nr.04-L03 und V1-T06-Nr.12-L03. Dabei ist die Rissentwicklung nur bis zu dem Erreichen Bruchlast aufgezeichnet worden.



**Abb. 5-26:** Rissbild des Versuchsträgers V1-T06-Nr.12 bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$

Entwicklung des Versagensrisses:

**Abb. 5-27:** Querkraft- Rissöffnungs- Diagramm der Versuchsträger V1-T06-Nr.04 & V1-T06-Nr.12 bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$



**Abb. 5-28:** Querkraft- Rissgleitungs- Diagramm der Versuchsträger V1-T06-Nr.04 & V1-T06-Nr.12 bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$

### 5.3 Deckenelemente

In diesem Unterkapitel werden die Versuchsergebnisse der Einzelversuche der Deckenelemente erläutert. Dabei sind an jedem Deckenelement zwei Einzelversuche, gemäß den Konfigurationen des Unterkapitels 4.4.4 *Versuchskonfigurationen*, durchgeführt worden. Die Einzelergebnisse der Querkraftversuche werden entsprechend der Schubschlankheiten zusammengefasst und verglichen.

Dabei setzt sich die Versuchsauswertung aus den folgenden Punkten zusammen:

- I. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse in Abhängigkeit der Schubschlankheit
- II. Beschreibung des Querkraft- Durchbiegungsverhaltens
- III. Bestimmung der auftretenden Versagensmechanismen
- IV. Beschreibung der Versagensrissentwicklung

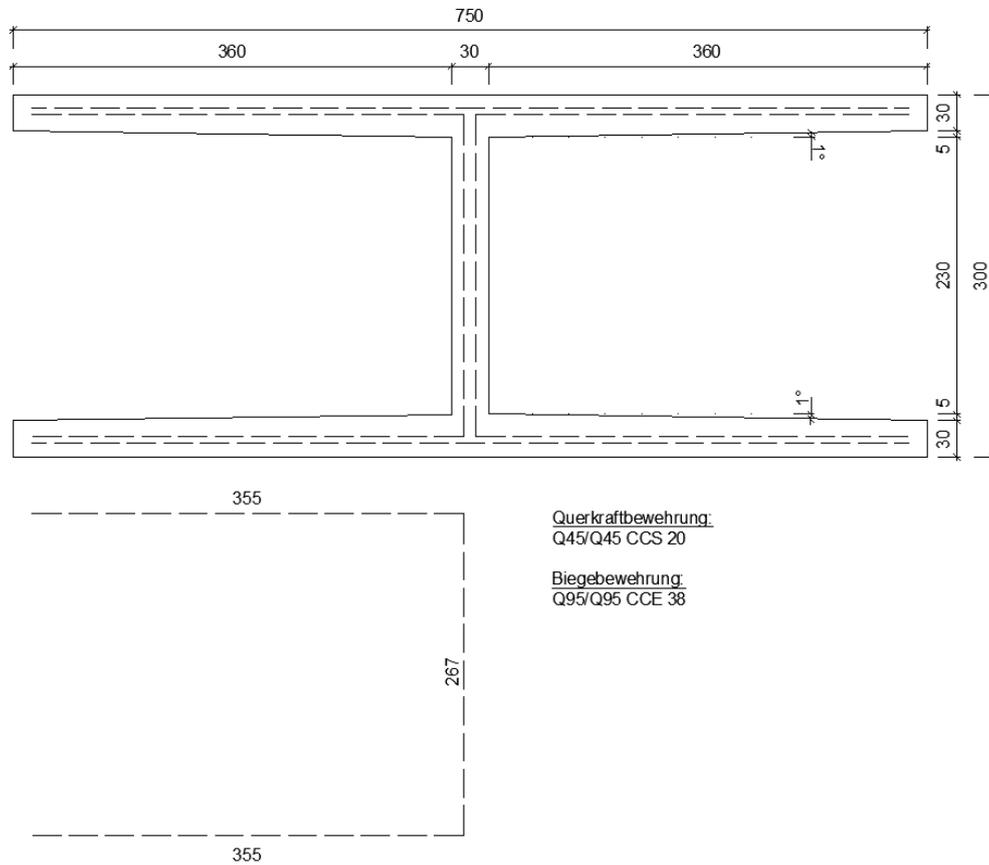
Die Beschreibung der Entwicklung des Versagensrisses ist durch die Auswertung der Messungen des ARAMIS- Systems erfolgt. Dabei erfolgte die Messung mit einer festen Bildrate von  $\frac{1}{4}$  Hz. Dies entspricht einer Serienaufnahme des Messfeldes, bei welcher das Messfeld alle vier Sekunden einmal aufgenommen wird. Zur Beschreibung der Rissentwicklung ist jede 20. Aufnahme ausgewertet worden. Dies entspricht einem zeitlichen Abstand zwischen den Datenauswertungen der Einzelaufnahmen von 80 Sekunden. Aufgrund dieses zeitlichen Abstandes, war es nicht möglich eine Aussage über die Erstrisskraft zu treffen. Die Rissentwicklung ist bis zum Erreichen der Bruchlast ausgewertet worden. Die Auswertung erfolgte mit der Software GOM Correlate 2017.

Die Auswertung ist, wie zuvor bei den Versuchsträgern, nach den folgenden Punkten erfolgt:

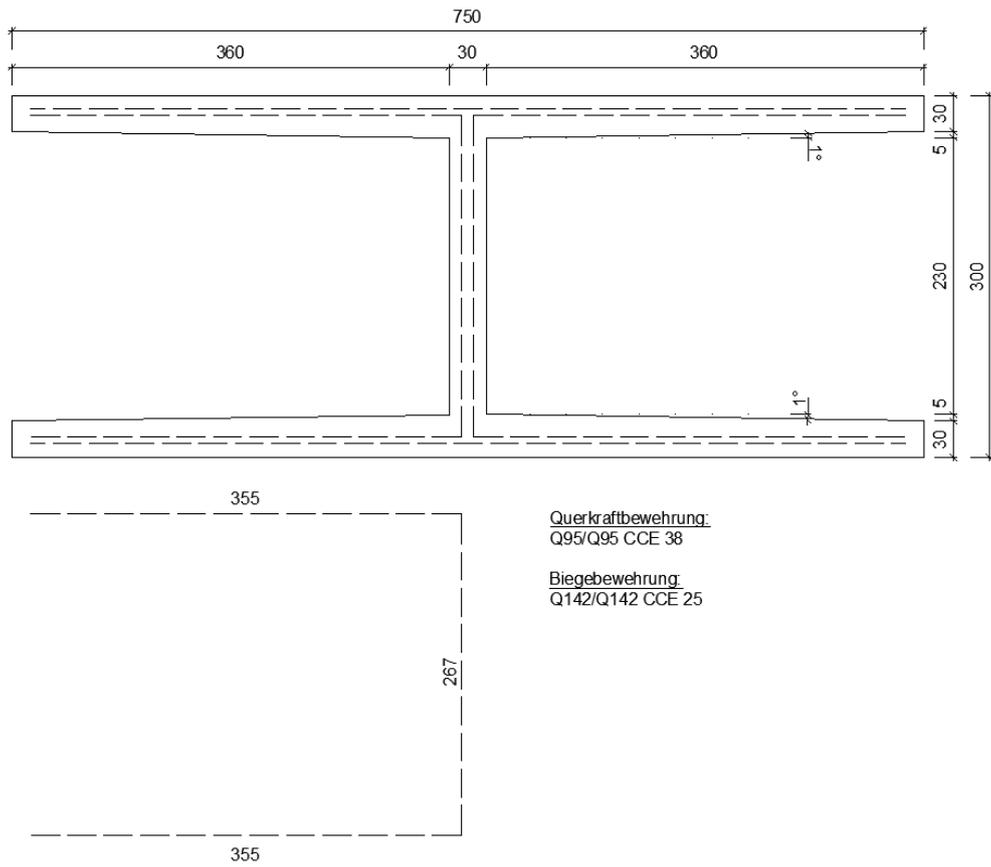
- I. Identifizierung der Versagensrisses:  
Im ersten Schritt ist der Versagensriss identifiziert worden. Dabei sind die Einzelbilder der Messung bis zum Versagenszeitpunkt abgespielt worden. Der Versagensriss zeigt sich durch die größte Rissöffnung zum Zeitpunkt des Versagens.
- II. Anordnung der Messstreifen:  
Nach der Identifizierung des Versagensrisses sind entlang des Risses, mit Hilfe der Software, fünf digitale Messstreifen angeordnet worden. Die Messstreifen bestehen jeweils aus zwei Messpunkten, einem an jedem Rissufer. Die Messpunkte zeichnen ihre Relativverschiebungen im Vergleich zu der Referenzmessung (Zeitpunkt  $t=0$ ) auf.
- III. Relativverschiebungen der einzelnen Messpunkte  
In diesem Schritt werden die Relativverschiebungen der einzelnen Messpunkte softwaregestützt ermittelt.
- IV. Ermittlung der Rissöffnung und Rissgleitung  
Abschließend werden aus den Relativverschiebungen der Messpunkte, mit Hilfe einer Koordinatentransformation entlang des Versagensrisses, die Rissöffnungen und Rissgleitungen ermittelt.

### 5.3.1 Deckenkonfigurationen

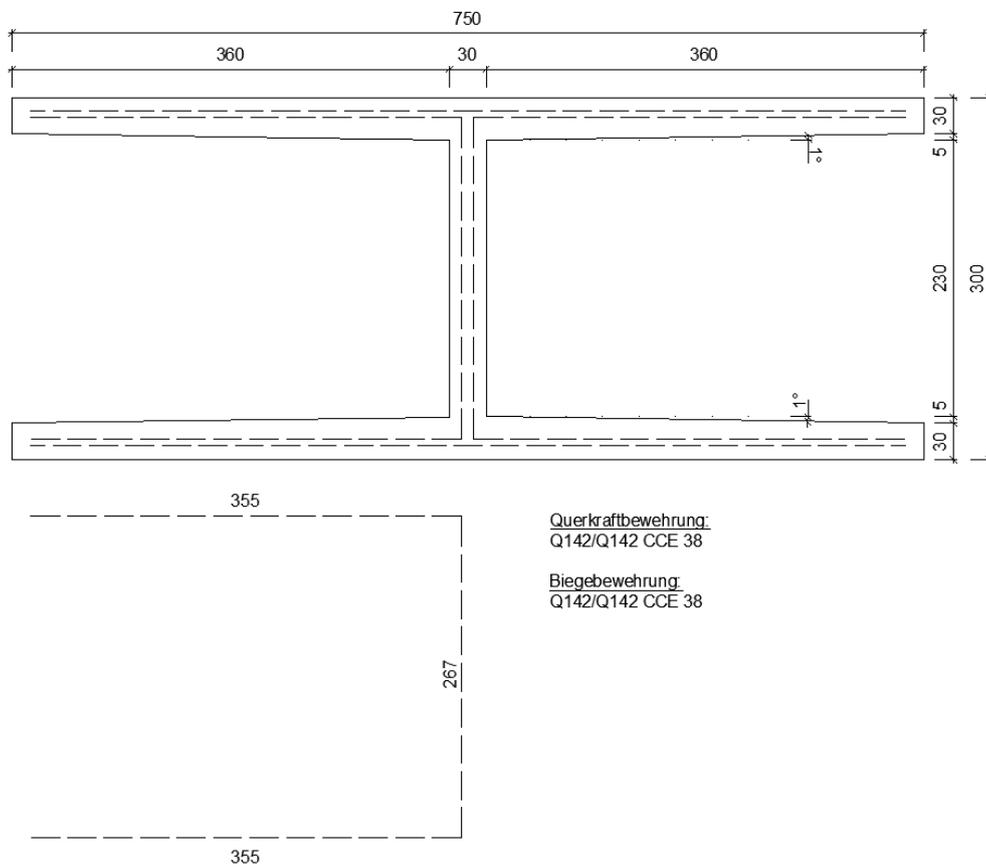
Die Querschnittsausbildung und die Bewehrungsführung der einzelnen Deckenelemente werden in den Abbildungen **Abb. 5-29** bis **Abb. 5-31** dargestellt.



**Abb. 5-29:** Deckenelement V2-T09 – Maße in [mm]



**Abb. 5-30:** Deckenelement V2-T10 – Maße in [mm]



**Abb. 5-31:** Deckenelement V2-T11 – Maße in [mm]

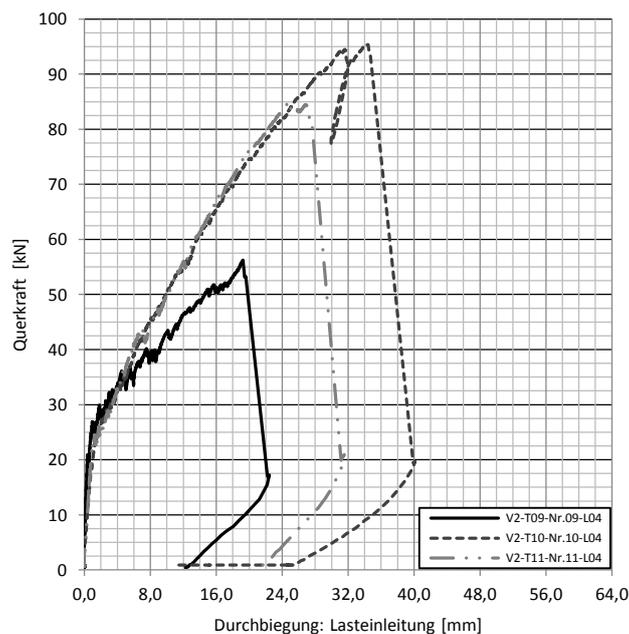
### 5.3.2 Versuchsergebnisse bei einer Schubslankheit von $a/d=3,0$

In der Tabelle **Tab. 5-7** sind die Ergebnisse der Einzelversuche der Deckenelemente, bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$ , entsprechend den Versuchskörpern zusammengefasst. Mit der Erhöhung des steifigkeitsbezogenen Querkraftbewehrungsgrades von 1,16% auf 2,52 %, wird die Querkrafttragfähigkeit um rd. 69,5 % gesteigert. Gegen die Erwartungen zeigt sich, durch die Erhöhung des steifigkeitsbezogenen Querkraftbewehrungsgrades von 2,53 % auf 3,30 %, eine Abminderung der Querkrafttragfähigkeit von rd. 10,6 %. Dies lässt vermuten, dass ein steifigkeitsbezogenen Bewehrungsgrades von rd. 2,5 %, einen oberen Grenzwert für die Querkrafttragfähigkeit der Deckenelemente darstellt. Die Schubbrisswinkel der Versuchskonfigurationen liegen im Bereich von  $35^\circ$  (bei V2-T10-Nr.10-L04) bis  $79^\circ$  (bei V2-T09-Nr.09-L04). Dabei zeigt sich keine ausgeprägte Abhängigkeit vom steifigkeitsbezogenen Bewehrungsgrad.

Versuchskörper	$\omega_v$ [%]	$S_{R0,u}$ [mm]	$S_{RG,u}$ [mm]	$\beta_r$ [°]	$V_{u,exp}$ [kN]
V2-T09-Nr.09-L04	1,16	0,14	0,63	79	56,21
V2-T10-Nr.10-L04	2,52	2,03	1,12	35	95,31
V2-T11-Nr.11-L04	3,30	0,59	0,91	55	85,16

**Tab. 5-7:** Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Deckenelemente bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$

Die Abbildung **Abb. 5-32** zeigt die Querkraft- Durchbiegungs- Diagramme der einzelnen Deckenelemente, bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$ . Die Kurvenverläufe lassen annehmen, dass alle Versuchskörper den Zustand der abgeschlossenen Rissbildung, annähernd auf dem gleichen Belastungsniveau erreichen. Nach dem Erreichen des Zustands der abgeschlossenen Rissbildung, stellt sich der weitere Kurvenverlauf entsprechend der Steifigkeit ein. Dabei zeigt sich zwischen den Konfigurationen V2-T09-Nr.09-L04 und V2-T10-Nr.10-L04 eine deutliche Steifigkeitssteigerung. Zwischen den Konfigurationen V2-T10-Nr.10-L04 und V2-T11-Nr.11-L04 kommt es trotz des höheren Bewehrungsgrad zu keiner weiteren Zunahme der Steifigkeit und Querkrafttragfähigkeit. Dies bekräftigt die Annahme, dass der steifigkeitsbezogenen Querkraftbewehrungsgrades von rd. 2,50 % einen oberen Grenzwert darstellt bzw. dass die maximale Tragfähigkeit der Betondruckstrebe erreicht ist.



**Abb. 5-32:** Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm der Deckenelemente bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$

Bestimmung des Versagensmechanismus:a) V2-T09-Nr.09-L04:

Die Versuchskonfiguration V2-T09-Nr.09-L04 zeigt bis zu dem Erreichen der Bruchlast keine ausgeprägte Rissbildung. Die Entwicklung des Versagensrisses ist, bis zum Erreichen der Bruchlast, in den Abbildungen **Abb. 5-34** und **Abb. 5-35** dargestellt. In der Abbildung **Abb. 5-32** ist das Querkraft- Durchbiegungs- Verhalten der Konfiguration dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass nach dem Erreichen des Zustandes der abgeschlossenen Rissbildung, das Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm bis zum Bruch idealisiert- linear und mit konstanter Steigung verläuft. Daraus lässt sich schließen, dass es zu keiner Delamination der textilen Bewehrungselemente kommt. Ein Delaminieren der textilen Bewehrungselemente würde zu einer Steifigkeitseinbuße und damit zu einem Abflachen des Kurvenverlaufs, mit dem Einsetzen der Delamination, führen. Mit dem Erreichen der Bruchlast kommt es zu einem einseitigen Bruch des Untergurtes. Dabei ist auf den Videoaufnahmen zu erkennen, dass das Aufgehen des Versagensrisses vom Untergurt ausgeht. Der Bruch des Untergurtes findet auf der Seite, auf welcher die Videokamera aufgestellt war, statt. Auf der Seite, auf welcher das ARAMIS- System aufgestellt worden war, ist es zu keinem Bruch des Untergurtes gekommen. Es wird angenommen, dass das Primärversagen auf einen Bruch der Biegebewehrung, also auf ein Biegeversagen, zurückzuführen ist. Ein Bruch der textilen Bewehrungselemente im Steg oder ein Bruch der Betondruckzone ist nicht festgestellt worden. Das Rissbild, unmittelbar nach dem Erreichen der Bruchlast, ist in der Abbildung **Abb. 5-33a)** dargestellt. Neben dem Versagensriss ist ein Riss entlang des Obergurt- Steg- Anschlusses zu erkennen. Dieser erstreckt sich, ausgehend vom Versagensriss, bis zum Ende des Versuchskörpers.

b) V2-T10-Nr.10-L04:

In der Abbildung **Abb. 5-33b)** ist das Rissbild der Versuchskonfiguration V2-T10-Nr.10-L04, unmittelbar nach dem Erreichen der Bruchlast, abgebildet. Die Abbildung zeigt dass es im Zuge des Versagens der Versuchskonfiguration zu einem Abplatzen der Betondeckung im Bereich des Versagensrisses gekommen ist. Dieses Abplatzen tritt im Zuge des Versagens der Betondruckstrebe ein. Dabei zeigen die Versuchsaufnahmen dass bereits vor dem Erreichen der Bruchlast zu lokal Abplatzungen der Betondeckung des Steges kommt. In den Abbildungen **Abb. 5-34** und **Abb. 5-35** die Entwicklung des Versagensrisses. Dabei ist in der Abbildung **Abb. 5-34** die Querkraft- Rissöffnungs- Beziehung und in der Abbildung **Abb. 5-35** die Querkraft- Rissgleitungs- Beziehung dargestellt. Nach Beendigung der Versuchsdurchführung konnten die textilen Bewehrungselemente im Steg, aufgrund der abgeplatzten Betondeckung, auf Bruchstellen untersucht werden. Im Zuge der Überprüfung konnten vereinzelt Brüche an den Garnen der textilen Bewehrungselemente festgestellt werden. Die Bruchkanten der Garne sind glatt ausgebildet und weisen keine Ausfaserungen auf. Deshalb wird angenommen, dass der Bruch der Textilgarne auf das explosionsartige Versagen der Betondruckstrebe zurückzuführen ist und nicht auf eine Überschreitung der Bruchspannung der Textile.

c) V2-T11-Nr.11-L04:

Die Abbildung **Abb. 5-32** zeigt die Querkraft- Durchbiegungs- Diagramme der Versuchskonfigurationen bei einer Schubschlankheit von  $a/d=3,0$ . Der Kurvenverlauf der betrachteten Versuchskonfiguration zeigt ein sich, mit dem Erreichen des Bruchlastniveaus, einstellendes Plateau. Die Messung des ARAMIS- Systems zeigt, dass sich am Beginn des Plateaus ein lokales Abplatzen der Betondeckung im Bereich der Risswurzel des Versagensrisses einstellt. Die Abplatzungen setzen sich entlang des Plateaus fort. Mit dem Erreichen des Plateauendes versagt die Betonstruktur zwischen den Rissen und es kommt zu einem explosionsartigen Bruch. In Abbildung **Abb. 5-33c)** ist das Rissbild nach dem

Erreichen der Bruchlast dargestellt. Die Diagramme der Rissentwicklung sind in den Abbildungen **Abb. 5-34** und **Abb. 5-35** dargestellt. Nach der Versuchsdurchführung sind, im Zuge der Begutachtung des Bruches, vereinzelt Brüche an den textilen Bewehrungselementen festgestellt worden.



a) V2-T09-Nr.09-L04



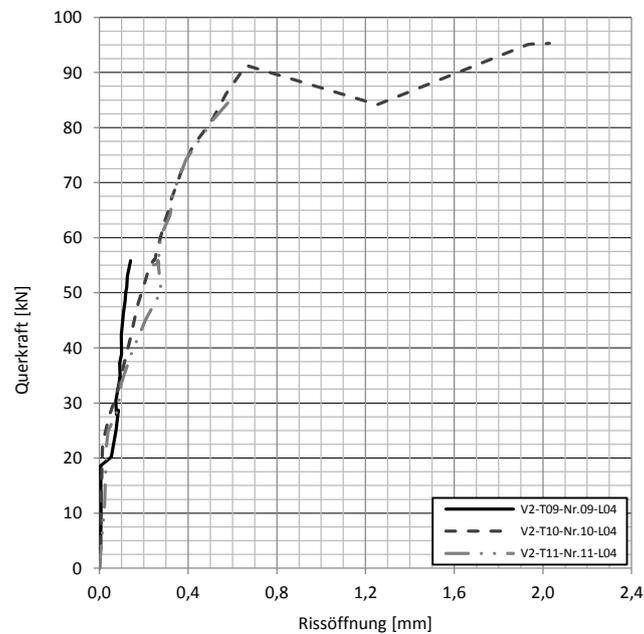
b) V2-T10-Nr.10-L04



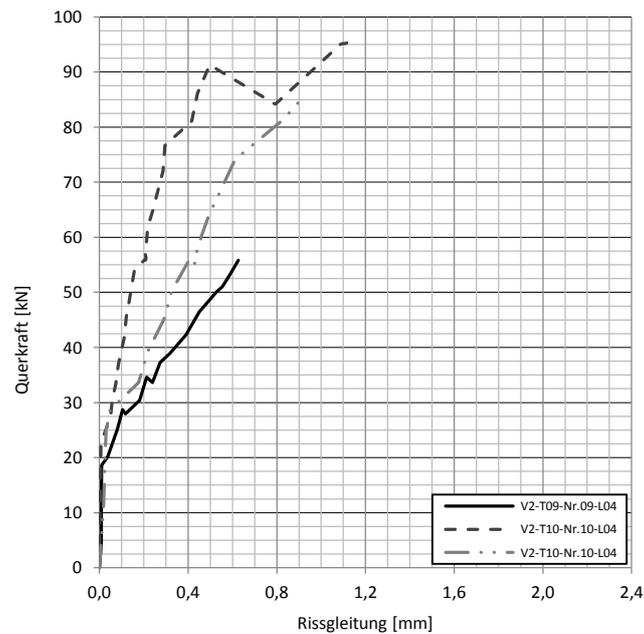
c) V2-T11-Nr.11-L04

**Abb. 5-33:** Rissbilder der Deckenelemente bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$

#### Entwicklung des Versagensrisses:



**Abb. 5-34:** Querkraft- Rissöffnungs- Diagramm der Deckenelemente bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$



**Abb. 5-35:** Querkraft- Rissgleitungs- Diagramm der Deckenelemente bei einer Schubschlankheit von  $a/d=3,0$

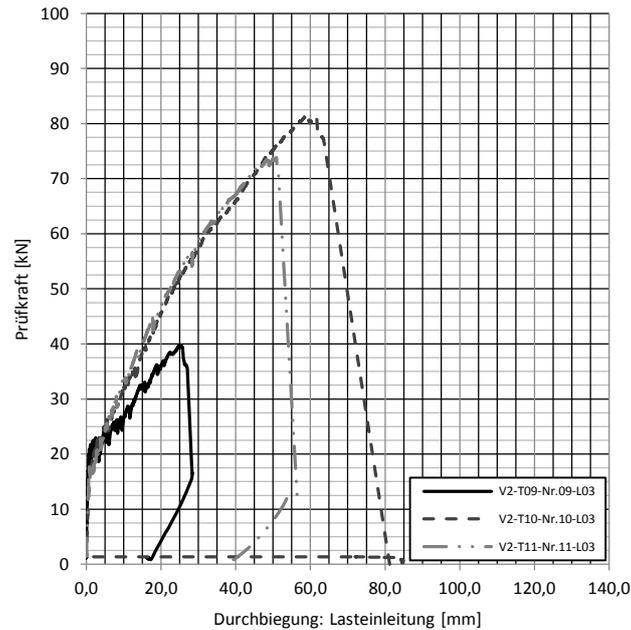
### 5.3.3 Versuchsergebnisse bei einer Schubschlankheit von $a/d= 4,0$

Die Tabelle **Tab. 5-8** zeigt eine Zusammenfassung der Einzelversuchsergebnisse der Deckenelemente, bei einer Schubschlankheit von  $a/d=4,0$ . Wie schon bei den Einzelversuchen mit einer Schubschlankheit von  $a/d= 3,0$ , zeigt sich auch hier eine Abminderung der Querkrafttragfähigkeit bei der Erhöhung des steifigkeitsbezogenen Querkraftbewehrungsgrades von 2,53 % auf 3,30 %. Die Abminderung beträgt hier rd. 9,1%. Die Schubrisswinkel der Versuchskonfigurationen liegen im Bereich von  $38^\circ$  (bei V2-T10-Nr.10-L03) bis  $53^\circ$  (bei V2-T09-Nr.09-L03). Dabei zeigt sich, wie schon bei den Versuchen zuvor, keine ausgeprägte Abhängigkeit vom steifigkeitsbezogenen Bewehrungsgrad.

Versuchskörper	$\omega_v$ [%]	$SR_{\text{R},u}$ [mm]	$SR_{\text{G},u}$ [mm]	$\beta_r$ [°]	$V_{u,\text{exp}}$ [kN]
V2-T09-Nr.09-L03	1,16	1,55	2,11	53	39,71
V2-T10-Nr.10-L03	2,52	0,61	0,37	38	81,17
V2-T11-Nr.11-L03	3,30	0,91	0,36	44	73,82

**Tab. 5-8:** Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Deckenelemente bei einer Schubschlankheit von  $a/d=4,0$

In der Abbildung **Abb. 5-36** sind die Querkraft- Durchbiegungs- Diagramme der einzelnen Deckenelemente, bei einer betrachteten Schubschlankheit von  $a/d=4,0$  dargestellt. Wie bei den Versuchen zuvor, zeigen die Kurvenverläufe der Versuchskonfigurationen V2-T09-Nr.09-L03 und V2-T10-Nr.10-L03, eine Zunahme der Steifigkeit und der Querkrafttragfähigkeit mit dem Erhöhen des Bewehrungsgrades. Zwischen den Konfigurationen V2-T10-Nr.10-L04 und V2-T11-Nr.11-L04 kommt es, trotz des höheren Bewehrungsgrad, zu keiner Zunahme der Steifigkeit.



**Abb. 5-36:** Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm der Deckenelemente bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$

#### Bestimmung des Versagensmechanismus:

a) V2-T09-Nr.09-L03:

Das Versagen der Versuchskonfiguration V2-T09-Nr.09-L03 ist auf den Bruch der textilen Bewehrungselemente im Steg zurückzuführen. Das Rissbild, nach dem Erreichen der Bruchlast, ist in der Abbildung **Abb. 5-37a)** dargestellt. Dabei zeigt die Darstellung dass es zu keinem Bruch des Druckgurtes gekommen ist. Vielmehr ist das Nachbruchverhalten durch das Herausbrechen des Steges vom Untergurt- Steg- Anschluss beschrieben. Die Entwicklung des Versagensrisses ist in den Abbildungen **Abb. 5-38** und **Abb. 5-39** dargestellt. Das Herausbrechen des Steges an der Risswurzel des Versagensrisses äußert sich im Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm in der Abbildung **Abb. 5-36** durch ein sich, mit dem Erreichen der Bruchlast, einstellendes Plateau. Ein Delaminieren der textilen Bewehrungselemente im Steg oder ein Textilauszug ist auf den Versuchsaufnahmen nicht zu erkennen. Das Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm in der Abbildung **Abb. 5-36** zeigt auch keine Anzeichen für das Eintreten einer der beiden genannten Mechanismen.

b) V2-T10-Nr.10-L03:

Das Rissbild, nach Beendigung der Versuchsdurchführung, der Versuchskonfiguration V2-T10-Nr.10-L03, ist in der Abbildung **Abb. 5-37b)** dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit dem Eintritt des Versagens ein Abplatzen der Betondeckung im Bereich des Versagensrisses stattgefunden hat. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Versagen dieser Versuchskonfiguration durch ein Versagen der Betondruckstreben eingetreten ist. Auf den Versuchsaufnahmen ist zu erkennen, dass mit dem Annähern an das Bruchlastniveau, eine verstärkte Rissbildung im Bereich des Versagensrisses einsetzt. Dabei zeigen die Abbildungen **Abb. 5-38** und **Abb. 5-39** die Entwicklung des Versagensrisses. Mit dem Erreichen der Bruchlast versagen die Betondruckstreben zwischen den Rissen und es kommt zu einem schlagartigen Bruch des Stegbetons. Im Zuge des Versagens, platzt die Betondeckung im Bereich des Versagensrisses ab und legt die textilen Bewehrungs-

elemente frei. Dadurch konnte festgestellt werden, dass es zu einem Bruch vereinzelter Textilgarne der textilen Bewehrungselemente gekommen ist. Da die Brüche nicht entlang eines Risses verlaufen, wird in diesem Fall angenommen, dass der Bruch dieser Garne im Zuge des schlagartigen Versagens der Betondruckstrebe eingetreten ist. Diese Annahme wird durch die Form der Bruchkante der Textilgarne bekräftigt. Diese ist glatt und ohne Ausfaserungen der Textilfilamente ausgebildet. Ein Textilbruch, infolge einer Überschreitung der Bruchspannung, würde, wie bei den Versuchen wo ein Textilbruch eingetreten ist, eine ausgefaserte Bruchkante hinterlassen.

c) V2-T11-Nr.11-L03:

In der Abbildung **Abb. 5-37c)** ist das Rissbild der Versuchskonfiguration, unmittelbar nach dem Versagenseintritt, abgebildet. Es ist zu erkennen, dass im Zuge des Versagens die Betondeckung großflächig abgeplatzt ist. Dies ist auf den primären Versagensmechanismus dieses Versuches zurückzuführen. In der Abbildung **Abb. 5-36** ist die Querkraft-Durchbiegungs- Beziehung der Versuchskonfigurationen bei einer Schubschlankheit von  $a/d=4,0$  dargestellt. Mit dem Erreichen des Bruchlastniveaus stellt sich ein Plateau, im Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm ein. Auf der Messung des ARAMIS- Systems ist zu erkennen, dass sich am Beginn des Plateaus ein lokales Abplatzen der Betondeckung im Bereich des Versagensrisses einstellt. Entlang des Plateaus entstehen neue Abplatzungen bis zum Erreichen des Plateauendes. Mit dem Erreichen des Plateauendes versagt die Betonstruktur zwischen den Rissen und es kommt zu einem explosionsartigen Bruch. Die aus der ARAMIS- Messung ermittelte Rissentwicklung ist in den Abbildungen **Abb. 5-38** und **Abb. 5-39** dargestellt. Nach der Versuchsdurchführung sind, im Zuge der Begutachtung der Bruchstelle, vereinzelt Textilbrüche festgestellt worden.



a) V2-T09-Nr.09-L03

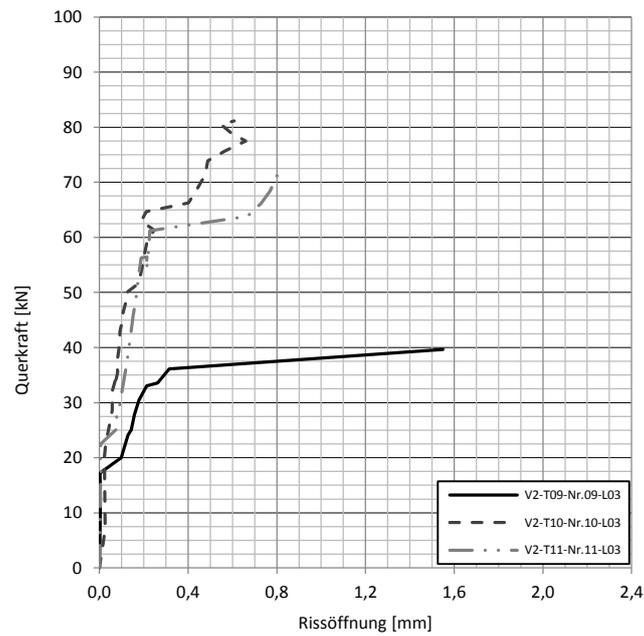


b) V2-T10-Nr.10-L03

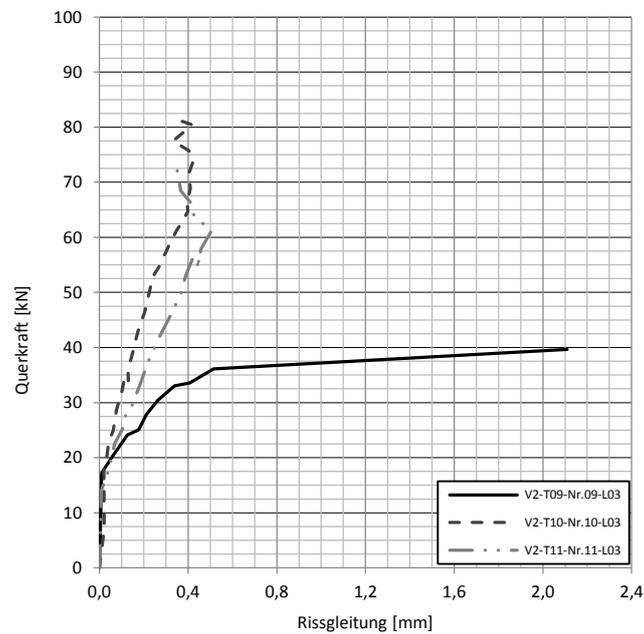


c) V2-T11-Nr.11-L03

**Abb. 5-37:** Rissbilder der Deckenelemente bei einer Schubschlankheit von  $a/d=4,0$

Entwicklung des Versagensrisses:

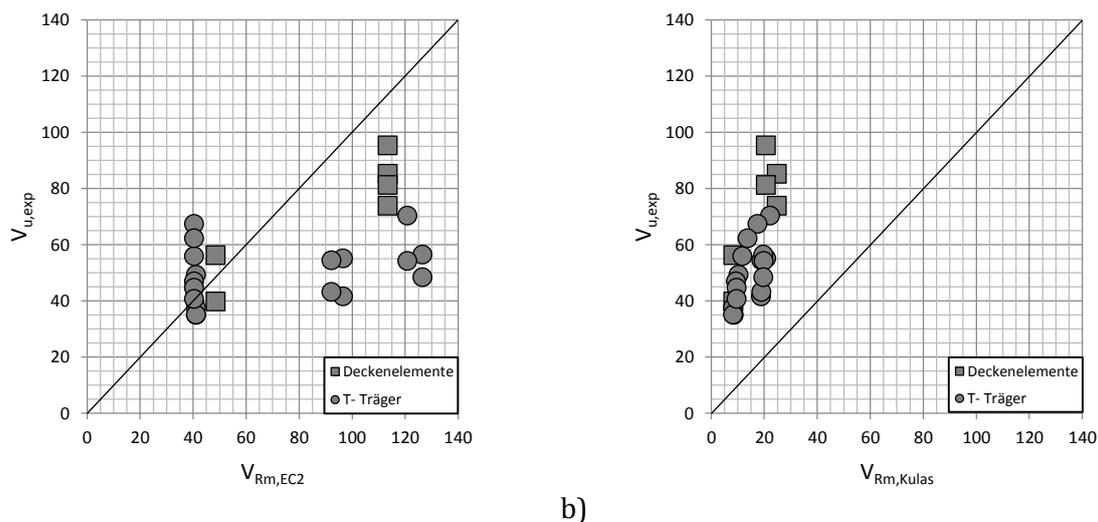
**Abb. 5-38:** Querkraft- Rissöffnungs- Diagramm der Deckenelemente bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$



**Abb. 5-39:** Querkraft- Rissgleitungs- Diagramm der Deckenelemente bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$

## 6 Nachrechnung der Querkraftversuche

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit der, im Unterkapitel 3.4.3 *Querkraftmodelle*, vorgestellten Berechnungsansätze ist die rechnerische Querkrafttragfähigkeit für die durchgeführten Querkraftversuche ermittelt worden. In der Abbildung **Abb. 6-1** ist der Vergleich der experimentellen und rechnerischen Querkrafttragfähigkeit, nach dem Berechnungsmodell des EC2+ NA und nach Kulas [23], dargestellt. Bei der Berechnung der Querkrafttragfähigkeit nach EC2+ NA ist festzustellen, dass mit zunehmendem Querkraftbewehrungsgrad und zunehmender Schubschlankheit die Querkrafttragfähigkeit überschätzt wird. Dies betrifft die Konfigurationen V1-T07, V1-T08, V2-T09, V2-T10 und V2-T11. Bei diesen Versuchskörpern sind die textilen Bewehrungselemente des Stegs, mit Ausnahme des Versuchskörpers V2-T11, mit dem Textil Q95/ Q95 CCE 38 hergestellt worden. Bei dem Versuchskörper V2-T11 ist das Textil Q142/ Q142 CCE 38 verwendet worden. Der steifigkeitsbezogene Querkraftbewehrungsgrad dieser Konfigurationen beträgt  $\omega_v > 1,8\%$ . Bei den Konfigurationen V1-T05 und V2-T09, mit  $\omega_v \sim 1,0\%$ , liegen die Ergebnisse, bei einer Schubschlankheit von  $a/d < 3,0$ , im konservativen Bereich. Bei diesen Versuchskörpern, inkl. dem Versuchskörper V1-T06, sind die textilen Bewehrungselemente des Stegs mit dem Textil Q45/ Q45 CCS 20 hergestellt worden. Mit steigender Schubschlankheit wird auch bei diesen Konfigurationen die Querkrafttragfähigkeit überschätzt. Lediglich bei der Versuchskonfiguration V1-T06, mit  $\omega_v \sim 0,8\%$ , liegen die berechneten Querkrafttragfähigkeiten, unabhängig von der Schubschlankheit, im konservativen Bereich. Die Ergebnisse der berechneten Querkrafttragfähigkeit zeigen, dass der aktuelle Ansatz nach EC2+ NA nur für die Konfiguration V1-T06 konservative Ergebnisse liefert. Darüber hinaus weisen die Ergebnisse eine starke Streuung auf. Damit ist dieser Ansatz für eine sichere Abschätzung der Querkrafttragfähigkeit nicht geeignet.



a) **Abb. 6-1:** Vergleich der experimentellen Versuchsergebnisse der Versuchskörper mit den rechnerischen Ergebnissen: a) nach EC2; b) nach Kulas

Grundsätzlich zeigt sich, dass die Berechnung der Querkrafttragfähigkeit nach dem Modell von KULAS konservative Ergebnisse liefert. Die Abweichung von den experimentellen Versuchsergebnissen hängt dabei stark vom textilen Bewehrungselement ab. Bei den Versuchskonfigurationen V1-T05 und V1-T06 beträgt der Mittelwert des Quotient aus experimenteller Querkrafttragfähigkeit ( $V_{u,exp}$ ) und rechnerischer Querkrafttragfähigkeit ( $V_{u,KULAS}$ ) rd. 4,46. Bei diesen Versuchskonfigurationen sind die textilen Bewehrungselemente mit dem Textil Q45/45 CCS 20 hergestellt worden. Bei den Versuchskonfigurationen V1-T07 und V1-T08 bestehen die textilen Bewehrungselemente aus dem Textil Q95/95 CCE 38. Der Mittelwert des Quotient aus experimenteller Querkrafttragfähigkeit ( $V_{u,exp}$ ) und rechnerischer Querkrafttragfähigkeit ( $V_{u,KULAS}$ ) beträgt bei diesen Konfigurationen rd. 2,62. Um eine bessere Übereinstimmung der rechnerischen Querkrafttragfähigkeit mit Versuchsergebnissen zu erhalten, wäre ein möglicher Ansatz den Vorfaktor ( $C_{Rm,c} = 0,01$ ), unter der Beibehaltung des Formelapparats, an die jeweilige Versuchs-

konfiguration anzupassen. Für die Konfigurationen V1-T07 und V1-T08 würde sich somit ein Vorfaktor von  $C_{Rm,c} = 0,026$  und für die Konfigurationen V1-T05 und V1-T06  $C_{Rm,c} = 0,044$  ergeben. Dieser Ansatz erscheint jedoch wenig praktikabel und würde eine Anpassung des Vorfaktors an die jeweilige Konfiguration erfordern. Eine universelle Anwendung des Ansatzes wäre somit nicht mehr möglich. Ähnlich wie bei den Versuchsträgern weist die rechnerische Querkrafttragfähigkeit der Deckenelemente V2-T09, V2-T10 und V2-T10 eine starke Abhängigkeit vom Bewehrungsgrad (siehe 5. *Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen*) auf. Dabei nimmt der Mittelwert des Quotient aus experimenteller Querkrafttragfähigkeit ( $V_{u,exp}$ ) und rechnerischer Querkrafttragfähigkeit ( $V_{u,KULAS}$ ) mit steigendem Bewehrungsgrad ab. Dieser beträgt für die Konfiguration V2-T09 rd. 5,72, für V2-T10 rd. 4,26 und für V2-11 rd. 3,20. Die Ergebnisse der berechneten Querkrafttragfähigkeit zeigen, dass der Ansatz nach KULAS konservative Ergebnisse liefert. Dieser bildet die Versuchsergebnisse jedoch mehr oder weniger gut nach. Um die Versuchsergebnisse besser nachzubilden müsste, wie oben angeführt, der Vorfaktor entsprechend der Versuchskonfiguration angepasst werden. Ein Delaminieren oder ein Auszug der Textilien aus der Verankerung wird bei diesem Ansatz nicht berücksichtigt. Bei der Bestimmung der Versagensmechanismen im Kapitel 5. *Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen* zeigt sich, dass die angeführten Mechanismen bei den meisten Versuchsdurchführungen das Versagen einleiteten oder als sekundärer Versagensmechanismus auftraten. Aus diesem Grund sollten diese Mechanismen im zukünftigen Berechnungsmodell für die Querkrafttragfähigkeit von textilbewehrten Bauteilen aus UHPC berücksichtigt werden.

## 7 Schlussfolgerung & Ausblick

### 7.1 Bestehende Situation

Bereits in den 1990er Jahren kam an den Technischen Universitäten in Aachen und Dresden die Idee zu Textilbeton auf. Die Forscher ersetzten die konventionelle Stahlbewehrung durch textile Gelege aus korrosionsbeständigen Endlos- Hochleistungs- Fasern und legten damit das Fundament für weitere Forschungen zum Thema Textilbeton. [20] Die Idee des Textilbetons ist an der TU Wien aufgegriffen und im Zuge weiterer Forschungstätigkeiten näher untersucht worden. Inhalt der Forschungstätigkeit war die Untersuchung des Tragverhaltens von textilbewehrten ultrahochfesten Beton (engl. Textile Reinforced Ultra- High Performance Concrete). Durch den Einsatz von ultrahochfesten Beton, anstelle des Normalbetons, konnte im Vergleich zum üblichen Textilbeton, eine zusätzliche Materialeinsparung erreicht werden. UHPC zeichnet sich, neben seiner sehr hohen Druckfestigkeit, vor allem durch eine sehr hohe Dauerhaftigkeit aus. Die Textilien bestehen aus Faserverbundkunststoff (FVK) und besitzen, neben einer extrem hohen Zugfestigkeit, eine sehr hohe Korrosionsbeständigkeit. Damit entfällt die Anforderung, den Korrosionsschutz der Bewehrung über die Betondeckung zu gewährleisten. Letztendlich besteht die Aufgabe der Betondeckung lediglich in der Übertragung der Verbundspannungen von der Bewehrung in den Beton. Aus diesem Grund ermöglicht die Kombination textiler Bewehrungselemente mit UHPC, die Herstellung sehr schlanker und dauerhafter Betontragwerke. Aufgrund der Komplexität des Hochleistungswerkstoffes TRUHPC, besteht der Bedarf nach umfassenden Forschungsprojekten und großangelegten Versuchsprogrammen zur Klärung der offenen Fragen in Bezug auf das Tragverhalten. Erste Untersuchungen wurden, in den Jahren 2016 bis 2017 an der TU Wien im Rahmen des Forschungsprojektes „Sustainable building with textile reinforced ultra-high performance concrete“, das Tragverhalten carbonbewehrter UHPC-Bauteile durchgeführt. Dabei ist in zwei Versuchsreihen das Biege- bzw. das Querkraftverhalten in Großversuchen untersucht worden.

An den Technischen Universitäten in Aachen und Dresden wurden bereits erste Forschungsarbeiten im Bereich textilbewehrter Bauteile durchgeführt. Aus den Arbeiten von VOSS und KULAS gehen erste Berechnungsansätze für die Berechnung der Biege- und Querkrafttragfähigkeit textilbewehrter Bauteile hervor. Dabei beschränkt sich VOSS auf die Anwendung ungetränkter textiler Bewehrungselemente. In der Arbeit von KULAS [23] werden die Berechnungsansätze für das Tragverhalten von textilbewehrten Bauteilen um die Anwendung getränkter Textilien erweitert.

### 7.2 Interpretation der Großversuche

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die durchgeführten Querkraftversuche vielversprechende Ergebnisse liefern. Die auftretenden Versagensmechanismen konnten in den meisten Fällen eindeutig bestimmt werden. Bei den Versuchsträgern sind die textilen Bewehrungselemente im Steg, lediglich über die Einbindelänge im Untergurt verankert worden. Die Bewehrungs- und Schalungsangaben zu den Versuchsträgern sind im Unterkapitel 5.2.1 *Trägerkonfiguration* in den Abbildungen **Abb. 5-1** bis **Abb. 5-4** angeführt. Dies führt dazu, dass bei fast allen Querkraftversuchen Anzeichen für einen lokalen Auszug oder ein Delaminieren der textilen Bewehrungselemente im Bereich des Untergurtanschlusses zu beobachten waren. Ein Textilbruch konnte nur bei wenigen Versuchen beobachtet werden. Ein derartiges Versagen beschränkte sich auf die Versuchskörper mit einem niedrigen Querkraftbewehrungsgrad. Bei dem Großteil der Versuche führte der Textilauszug entweder direkt zum Versagen oder leitete es zumindest ein. Ein Versagen der Betondruckstrebe ist bei den Versuchsträgern nur vereinzelt eingetreten und zu meiste resultierte dieses aus einer Vorschädigung der Betonstruktur durch Delaminationsprozesse der textilen Bewehrungselemente im Steg. Daraus lässt sich schließen, dass bei den durchgeführten Versuchen, die volle Querkrafttragfähigkeit der Versuchskonfigurationen in den meisten Fällen nicht erreicht werden konnte. In welcher Größenordnung der Einfluss des Delaminierens der textilen Bewehrungselemente liegt, konnte im Zuge dieser Versuchsreihe nicht geklärt werden. Hier ist weitere Forschungsarbeit gefragt um den Einfluss auf

das Querkrafttragverhalten zu beschreiben. Die Annahme, dass sich ein Vorspannen der Versuchskörper positiv auf die Querkrafttragfähigkeit von textilbewehrten UHPC- Bauteilen auswirkt, konnte bei dieser Versuchsserie bestätigt werden. Schon bei einem niedrigen Vorspanngrad von 25 % der Bruchfestigkeit der CFK- Stäbe konnte, in Abhängigkeit der Schubslankheit  $a/d$ , die Querkrafttragfähigkeit um bis zu rd. 52,7 % gesteigert werden. Bei den Deckenelementen ist die Verankerung der textilen Bewehrungselemente im Steg, anders als bei den Versuchsträgern, durch die Formgebung der Bewehrungselemente bewerkstelligt worden. Dazu sind die Bewehrungs- und Schalungsangaben der Deckenelemente, im Unterkapitel 5.3.1 *Deckenkonfigurationen* in den Abbildungen **Abb. 5-29** bis **Abb. 5-31** angeführt. Bei den Versuchen zeigt sich eine klare Abhängigkeit der Versagensmechanismen vom Bewehrungsgrad. Bei dem gering bewehrten Deckenelement, hier lag der steifigkeitsbezogene Querkraftbewehrungsgrad bei 1,16%, trat das Versagen durch einen Bruch der textilen Bewehrungselemente ein. Wobei das Versagen bei diesem Versuchskörper bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$  durch ein Biegeversagen eintrat. Die zwei weiteren Versuchskörper, mit höherem Querkraftbewehrungsgrad, versagten durch ein Versagen der Betondruckstrebe. Der Einfluss des Delaminierens der textilen Bewehrungselemente fällt bei den Deckenelementen deutlich geringer aus. Für eine Quantifizierung des Einflusses bedarf es weiteren Untersuchungen.

Die Nachrechnung der Querkraftversuche im Kapitel 6. *Nachrechnung der Querkraftversuche* zeigte, dass die vorhandenen Modelle noch nicht in der Lage sind die Querkrafttragfähigkeit vorauszusagen. Das in [23] angeführte Bemessungsmodell führt zwar zu konservativen Ergebnissen, die errechneten Querkrafttragfähigkeiten liegen jedoch weit unter den Versuchsergebnissen. In diesem Kapitel wird aufgezeigt, dass durch ein Anpassen des Vorfaktors, bessere Übereinstimmungen der rechnerischen Tragfähigkeiten mit Versuchsergebnissen erzielt werden können. Da dies aber eine konfigurationsabhängige Anpassung des Vorfaktors erfordern würde, wird dieser Ansatz als nicht praxistauglich eingestuft. Abschließend ist festgestellt worden, dass auch der Berechnungsansatz nach Eurocode 2 keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefert.

### 7.3 Ausblick

Um den Einfluss des Textilauszugs und des Delaminieren zu validieren und die volle Kapazität der Querkrafttragfähigkeit der Versuchskonfigurationen zu untersuchen, erscheint es sinnvoll eine weitere Versuchsreihe zu starten. Bei dieser sollte die Verankerung der textilen Bewehrungselemente des Stegs durch Formprofilierung hergestellt werden. Damit sollte zumindest der Textilauszug in Griff bekommen zu sein.

**Literaturverzeichnis**

- [1] E. Feling & M. Schmidt: *Ultra- Hochfester Beton "Planung und Bau der ersten Brücke mit UHPC in Europa"*; *Schriftreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 2, Universität Kassel*
- [2] E. Fehling, M. Schmidt, T. Teichmann, K. Bunje, R. Bornemann, B. Middendorf: *Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC), Forschungsbericht DFG FE 497/ 1- 1, Heft 1; Universität Kassel*
- [3] M. Olipitz: *Paulifurtbrücke – Entwurf, Planung und Ausführung einer UHPC-Schalenbrücke; Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015), Heft 5*
- [4] J. Kirnbauer: *Der Vakuummischprozess zur Herstellung von Ultra High Performance Concrete; Dissertation Technische Universität Wien, 2013*
- [5] K. Safranek: *Einfluss unterschiedlicher Mischprozesse auf die Festigkeit ultrahochfester Betone; Diplomarbeit Technische Universität Wien, 2016*
- [6] M. Curbach K. Speck: *Versuchstechnische Ermittlung und mathematische Beschreibung der mehraxialen Festigkeit von Ultra-Hochfestem Beton (UHPC)– Zweiaxiale Druckfestigkeit; Arbeitsbericht an die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) zum Forschungsvorhaben CU 37/6-1, Technische Universität Dresden 2007*
- [7] J. Kollegger: *Skriptum zur Vorlesung Betonbau 2, 8. Auflage. Institut für Tragkonstruktion der Technischen Universität Wien, 2014*
- [8] *Interim Recommendations on „Ultra High Performance Fibre- Reinforced Concretes“; AFGC (Association Francaise de Génie Civil)/ SETRA*
- [9] G. Valentin, W. Potucek, G. F. Kidéry & R. Fritze: *Stahlbetonbau Teil 1: Grundlagen und Beispiele, Manz 2009*
- [10] J. Niewels: *Zum Tragverhalten von Betonbauteilen mit Faserverbundkunststoff- Bewehrung; Dissertation Rheinisch- Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2008*
- [11] B. Kromoser, P. Preinstorfer & J. Kollegger: *Building lightweight structures with carbon-fiber-reinforced polymer-reinforced ultra-high-performance concrete: Research approach, construction materials, and conceptual design of three building components; Structural Concrete 2018, 1- 15*
- [12] F. Jessen & M. Curbach: *Verstärken mit Textilbeton; Beton- Kalender 2010: Brücken- Betonbau im Wasser*
- [13] L. Sparowitz: *WILD- Brücke: Pilotprojekt Straßenbrücke aus Ultra High Performance Concrete; 2. Auflage, 2010*
- [14] A. Scholzen, R. Chuboda & J. Hegger: *Dünnwandiges Schalentragwerk aus textilbewehrtem Beton- Entwurf, Bemessung und baupraktische Umsetzung, Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), Heft 11*
- [15] A. Pritschow: *Zum Verbundverhalten von CFK- Bewehrungsstäben in Bauteilen aus ultrahochfestem Beton; Dissertation Universität Stuttgart, 2016*
- [16] J. Kollegger: *Skriptum zur Vorlesung Betonbau 1, 7.Auflage. Institut für Tragkonstruktion der Technischen Universität Wien, 2014*
- [17] G. Bertram: *Zum Verbund- und Querkrafttragverhalten von Spannbetonträgern aus Ultra- hochfestem Beton; Dissertation RWTH- Aachen, 2012*
- [18] A. Stark & J. Hegger: *Verbundverhalten von CFK- Spannbewehrung in UHPFRC, Beton- und Stahlbeton 108 (2013), Heft 10*
- [19] M. Schlaich, B. Zwingmann & R. Goller: *Zugemente aus CFK und ihre Verankerungen; Bautechnik 2012, Vol. 89 (12)*
- [20] S. Scheerer: *Was ist Textilbeton? – Eine kurze Einführung in das Thema; Beton- und Stahlbetonbau Spezial 2015*
- [21] E. Lorenz, E. Schütze, F. Schladitz & M. Curbach: *Textilbeton- Grundlegende Untersuchungen im Überblick; Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 10*
- [22] E. Lorenz, E. Schütze & S. Weiland: *Textilbeton- Eigenschaften des Verbundwerkstoffes; Beton- und Stahlbetonbau Spezial 2015*
- [23] C. H. Kulas: *Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile; Dissertation RWTH Aachen, 2013*
- [24] F. Jesse: *Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix; Dissertation Technische Universität Dresden, 2004*
- [25] J. Bochmann, M. Curbach & F. Jesse: *Carbonbeton unter einaxialer Druckbeanspruchung- Ergebnisse systematischer experimenteller Untersuchungen; Beton- und Stahlbeton 112 (2017) Heft 5*

- 
- [26] J. Bielak, A. Spelter, N. Will & M. Classen: *Verankerungsverhalten textiler Bewehrungen in dünnen Betonabuteilen; Beton- und Stahlbetonbau 113 (2018) Heft 7*
- [27] M. C. Kurth: *Zum Querkrafttragverhalten von Bauteilen mit Faserverbundkunststoff- Bewehrung; Dissertation RWTH Aachen, 2012*
- [28] K. Zilch & G. Zehetmaier: *Bemessung im konstruktiven Betonbau- Nach DIN 1045- 1(Fassung 2008) und EN 1992- 1- 1 (Eurocode 2); 2. Auflage*
- [29] Bildquelle: [https://baustatik-wiki.fiw.hswismar.de/mediawiki/index.php/Datei:Querkraftbemessung\\_\(13\).jpg](https://baustatik-wiki.fiw.hswismar.de/mediawiki/index.php/Datei:Querkraftbemessung_(13).jpg)
- [30] G. Hartl: *Untersuchungen zum Biegetragverhalten von carbonbewehrten Bauteilen aus UHPC; Diplomarbeit Technische Universität Wien, 2017*

**Abbildungsverzeichnis**

- 2-1 UHPC- Schale, Paulifurtbrücke bei St. Jakob/ Rosental [3]
- 2-2 Füllereffekt des Mikrosilica bzw. des Nanosilica [5]
- 2-3 Einfluss des Fasergehalts auf die zentrische Zugfestigkeit von UHPC [2]
- 2-4 Spannungs- Dehnungs- Linie von UHPC bei einaxialer Druckbeanspruchung (links: ohne Fasern, rechts: 3 Probekörper mit 2,5 V-% Stahlfasern) [2]
- 2-5 Festigkeiten von UHPC unter zweiaxialer Belastung(linkes Bild: Absolutwerte; rechtes Bild: normierte Werte) [6]
- 2-6 Einfluss des Betonalters auf die mittlere Spannungs- Rissöffnungs- Beziehung von UHPC [2]
- 2-7 Querschnitt CFK [10]
- 2-8 Vergleich der Spannungs- Dehnungsbereiche verschiedener Fasermaterialien (HM- hochmodulige Faser, LM- niedrigmodulige Faser, HS- hochfeste Faser) [10]
- 2-9 Überblick über stabförmige FVK- Bewehrung [10]
- 2-10 Gegenüberstellung typischer Dimensionen und Bauteilabmessungen von Stahlbeton und Textilbeton [12]
- 2-11 Schematische Darstellung der typischen Erscheinungsformen der gebräuchlichsten ebenen Halbzeuge: a) Gewebe, b) Gestrick, c) biaxiales Gelege, d) multiaxiales Gelege [12]
- 2-12 Multifilamentgarn bzw. Roving [12]
- 2-13 Wild- Brücke in Völkermarkt in Kärnten [13]
- 2-14 Einklappen der Bogensegmente [13]
- 2-15 Schnitt durch einen Einzelschirm (Textilbetonschale, Stahlbetonstütze und Einzelfundament) [14]
- 2-16 Lageweise Herstellung der Textilbetonschale in Spritzbetonbauweise [14]
- 3-1 Schematische Darstellung der Verbundkräfte des Scherverbundes [15]
- 3-2 Versuchsaufbau: Pull- Out- Versuch [15]
- 3-3 Zusammenhang zwischen den Verbundanteilen und dem Stabschlupf [15]
- 3-4 Verbundkraftübertragung von Litzen mit sofortigem Verbund [17]
- 3-5 Einfluss der Spanngliedgeometrie und der Querdehnung infolge der Vorspannung  $\Delta\sigma_p$  auf das Verbundspannungs- Schlupf- Verhalten [18]
- 3-6 Vergussverankerungen für CFK- Zugstäbe [19]
- 3-7 a) Klemmverankerungen für CFK- Zugstäbe; b) Endverankerung durch Heissverformung [19]
- 3-8 Lasteinleitung für Rovingzugversuche: a) Umlenkrolle; b) Epoxidharzklotz; c) Lasteinleitungs- vorrichtung zur Reduzierung der Spannungskonzentration im Roving [23]
- 3-9 Spannungs- Dehnungs- Diagramm eines Textilrovings (Schussrichtung) [23]
- 3-10 Spannungs- Dehnungs- Diagramm eines textilbewehrten Betonbauteils unter zentrischer Zugbeanspruchung OH- und ACK- Theorie [23]
- 3-11 Spannungs- Dehnungs- Diagramm eines textilbewehrten Betonbauteils unter zentrischer Zugbeanspruchung [12]
- 3-12 Charakteristische Spannungs- Dehnungs- Beziehung eines textilbewehrten Betonbauteils unter einaxialer Druckbeanspruchung in Abhängigkeit von der Bewehrungsgeometrie [25]
- 3-13 Modifizierter Dehnkörper für Auszugversuche. A) Geometrie und Messtechnik; b) Detail der Sollbruchstelle mit Riss während der Prüfung; c) Detail der Bewehrungsführung [23]
- 3-14 Schematische Darstellung der Versuchsergebnisse: a) Kraft- Rissöffnungs- Beziehung; b) Verbundspannungs- Schlupf- Beziehung [23]
- 3-15 Größen am Riss [23]
- 3-16 Vergleich der Verbundspannung- Schlupf- Beziehung verschiedener Textilien [23]
- 3-17 Formschluss als Verbundmechanismus im Vergleich zwischen textiler Bewehrung und geripptem Betonstahl [27]
- 3-18 Schematische Darstellung der Hauptspannungstrajektorien eines Einfeldträgers unter Gleichlast im Zustand I [17]
- 3-19 Idealisierendes Fachwerkmodell zur Beschreibung des Querkrafttragverhaltens von bewehrten Betontragwerken [29]
- 3-20 Querkraftkomponenten bei Betontragwerken mit Querkraftbewehrung [23]
- 3-21 Versagensmechanismen bei Querkraftversagen von Betontragwerken mit Querkraftbewehrung [26]
- 3-22 Querkraft- Durchbiegungs- Beziehung in Abhängigkeit des steifigkeitsbezogenen Bewehrungsgrades der Querkraftbewehrung [23]

- 3-23 Umlenkung des ungetränkten Rovings am Rissufer [23]
- 3-24 Einfluss der Längsbewehrung im Steg und der Querkraftbewehrung auf die Gesamtquerkrafttragfähigkeit [23]
- 3-25 Schubbrisswinkel  $\beta_r$  (Bild einer ARAMIS- Messung) [23]
- 4-1 Verwendete CFK [30]
- 4-2 Erstellung der Bewehrungskörbe für die Versuchskörper
- 4-3 T-Trägerquerschnitt 1
- 4-4 T-Trägerquerschnitt 2
- 4-5 Vorspannungsvorgang im sofortigen Verbund [30]
- 4-6 Unsachgemäße Einfräsung der CFK- Stäbe [30]
- 4-7 Querschnitt der Deckenelemente
- 4-8 Versetzen eines Versuchskörpers (Deckenelement) [30]
- 4-9 Schnitt A-A durch den Versuchsaufbau der Versuchskörper
- 4-10 Versuchsaufbau der Querkraftversuche
- 4-11 Auflagerkonstruktion
- 4-12 Schematische Darstellung der Positionierung der Messvorrichtungen
- 4-13 Verwendete Messvorrichtungen
- 4-14 Vorbereitung des ARAMIS- Messfeldes
- 4-15 Auftragung des stochastischen Musters auf dem Versuchskörper
- 4-16 Messbild des Trägers V1-T06-Nr.03-L01
- 4-17 Ansicht des Versuchsaufbaus: Träger 1- Laststellung 1 [a/d=2,5]
- 4-18 Ansicht des Versuchsaufbaus: Träger 1- Laststellung 2 [a/d=3,5]
- 4-19 Ansicht des Versuchsaufbaus: Träger 2- Laststellung 3 [a/d=4,0]
- 4-20 Ansicht des Versuchsaufbaus: Träger 2- Laststellung 4 [a/d=3,0]
- 4-21 Ansicht des Versuchsaufbaus: Deckenelement- Laststellung 3 [a/d=4,0]
- 4-22 Ansicht des Versuchsaufbaus: Deckenelement- Laststellung 4 [a/d=3,0]
- 5-1 Trägerkonfiguration V1-T05 – Maße in [mm]
- 5-2 Trägerkonfiguration V1-T06 (mit & ohne Vorspannung) – Maße in [mm]
- 5-3 Trägerkonfiguration V1-T07 – Maße in [mm]
- 5-4 Trägerkonfiguration V1-T08 – Maße in [mm]
- 5-5 Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von a/d=2,5
- 5-6 Rissbilder der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von a/d=2,5
- 5-7 Querkraft- Rissöffnungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von a/d=2,5
- 5-8 Querkraft- Rissgleitungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von a/d=2,5
- 5-9 Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von a/d=3,0
- 5-10 Rissbilder der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von a/d=3,0
- 5-11 Querkraft- Rissöffnungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von a/d=3,0
- 5-12 Querkraft- Rissgleitungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von a/d=3,0
- 5-13 Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von a/d=3,5
- 5-14 Rissbilder der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von a/d=3,5
- 5-15 Querkraft- Rissöffnungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von a/d=3,5
- 5-16 Querkraft- Rissgleitungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von a/d=3,5
- 5-17 Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von a/d=4,0
- 5-18 Rissbilder der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von a/d=4,0
- 4-19 Querkraft- Rissöffnungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von a/d=4,0
- 4-20 Querkraft- Rissgleitungs- Diagramm der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von a/d=4,0
- 5-21 Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm der Versuchsträger V1-T06-Nr.04 & V1-T06-Nr.12 bei einer Schubslankheit von a/d=3,0
- 5-22 Rissbild des Versuchsträgers V1-T06-Nr.12 bei einer Schubslankheit von a/d=3,0

- 
- 5-23 Querkraft- Rissöffnungs- Diagramm der Versuchsträger V1-T06-Nr.04 & V1-T06-Nr.12 bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$
  - 5-24 Querkraft- Rissgleitungs- Diagramm der Versuchsträger V1-T06-Nr.04 & V1-T06-Nr.12 bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$
  - 5-25 Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm der Versuchsträger V1-T06-Nr.04 & V1-T06-Nr.12 bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$
  - 5-26 Rissbild des Versuchsträgers V1-T06-Nr.12 bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$
  - 5-27 Querkraft- Rissöffnungs- Diagramm der Versuchsträger V1-T06-Nr.04 & V1-T06-Nr.12 bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$
  - 5-28 Querkraft- Rissgleitungs- Diagramm der Versuchsträger V1-T06-Nr.04 & V1-T06-Nr.12 bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$
  - 5-29 Deckenelement V2-T09 – Maße in [mm]
  - 5-30 Deckenelement V2-T10 – Maße in [mm]
  - 5-31 Deckenelement V2-T11 – Maße in [mm]
  - 5-32 Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm der Deckenelemente bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$
  - 5-33 Rissbilder der Deckenelemente bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$
  - 5-34 Querkraft- Rissöffnungs- Diagramm der Deckenelemente bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$
  - 5-35 Querkraft- Rissgleitungs- Diagramm der Deckenelemente bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$
  - 5-36 Querkraft- Durchbiegungs- Diagramm der Deckenelemente bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$
  - 5-37 Rissbilder der Deckenelemente bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$
  - 5-38 Querkraft- Rissöffnungs- Diagramm der Deckenelemente bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$
  - 5-39 Querkraft- Rissgleitungs- Diagramm der Deckenelemente bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$
  - 6-1 Vergleich der experimentellen Versuchsergebnissen der Versuchskörper mit den rechnerischen Ergebnissen: a) nach EC2; b) nach Kulas

---

**Tabellenverzeichnis**

- 2-1 Eigenschaften von Fasern [10]
- 4-1 Mischungszusammensetzung des verwendeten ultrahochfesten Betons [30]
- 4-2 Ergebnisse der Werkstoffprüfungen
- 4-3 Zusammenstellung der verwendeten Textilien
- 4-4 Bewehrungskonfiguration für den Trägerquerschnitt 1
- 4-5 Bewehrungskonfiguration für den Trägerquerschnitt 2
- 4-6 Bewehrungskonfiguration für die Deckenelemente
- 4-7 Zeitplan der Versuchsdurchführung
- 5-1 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von  $a/d=2,5$
- 5-2 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$
- 5-3 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,5$
- 5-4 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Versuchsträger bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$
- 5-5 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Versuchsträger V1-T06-Nr.04 & V1-T06-Nr.12 bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$
- 5-6 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Versuchsträger V1-T06-Nr.04 & V1-T06-Nr.12 bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$
- 5-7 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Deckenelemente bei einer Schubslankheit von  $a/d=3,0$
- 5-8 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Deckenelemente bei einer Schubslankheit von  $a/d=4,0$





## **ANHÄNGE A-B3**

## A Verwendete Textilie

### TECHNISCHES DATENBLATT TECHNICAL DATA SHEET

solidian GRID Q45/45-CCS-20

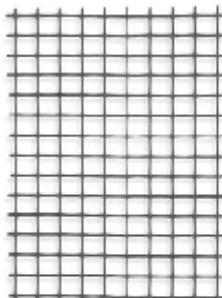


Abbildung  
Figure

#### Material / Material

Fasermaterial		Carbon
Fiber Material		Carbon
Tränkmaterial		Acrylnitril-Styrol-Acrylat-Copolymere (ASA)
Impregnation Material		Acrylnitril-Styrol-Acrylester-Copolymer (ASA)
Form		Rollenware
Shape		roll good
Abmessungen	[m]	50 x 1,95 (Länge = Längsrichtung x Breite = Querrichtung)
Dimensions		50 x 1,95 (length = longitudinal x width = transversal)
Flächengewicht	[g/m <sup>2</sup> ]	208
Weight		

#### Kenndaten / Specifications

		Längsrichtung / longitudinal	Querrichtung / transversal
Achsabstand Strang	[mm]	20	20
Gap Distance			
Faserquerschnittsfläche (Bewehrung)	[mm <sup>2</sup> /m]	45	45
Reinforcement Cross Section Area			
Faserquerschnittsfläche (Strang)	mm <sup>2</sup>	0,9	0,9
Fiber Cross Section Area			
Bruchspannung	Mittel		
Tensile Strength	Mean	1.200	1.300
	Min.	950	1.000
	Min.		
	Max.	1.400	1.400
	Max.		

#### Hinweise / Information

Verarbeitungstemperaturen und Beständigkeiten beachten, nur durch unterwiesenes Fachpersonal verarbeiten, geeignete Betonmischungen verwenden, mit Schutzhandschuhen und -brillen arbeiten, bitte ggf. weitere Schutzmaßnahmen beachten.

Consider working temperatures and resistance, installation only by trained staff, use suitable concrete mixtures, wear safety gloves and protective goggles, please observe additional protective measures.

Besandet / sand coated

Änderungen vorbehalten / Subject to change without notice

Version / Version: IN170222GN

Datum / Date: 06.03.2017

## TECHNISCHES DATENBLATT TECHNICAL DATA SHEET

solidian GRID Q95/95-CCE-38

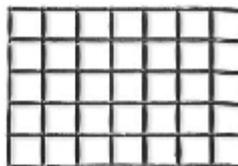


Abbildung  
Figure

<b>Material / material</b>			
Fasermaterial		Carbon	
Fiber material		carbon	
Tränkungsmaterial		Epoxidharz	
Impregnation material		epoxy resin	
Form		Mattenware	
Shape		panel	
Abmessungen		3,0 x 1,2 (Länge = Längsrichtung x Breite = Querrichtung)	
Dimensions	[m]	3.0 x 1.2 (Length = longitudinal x width = transversal)	
<b>Kenndaten / Specifications</b>			
		Längsrichtung / longitudinal	Querrichtung / transversal
Achsabstand Strang	[mm]	38	38
Axial distance			
Faserquerschnittsfläche (Bewehrung)	[mm <sup>2</sup> /m]	95	95
Cross section area of reinforcement			
Faserquerschnittsfläche (Strang)	[mm <sup>2</sup> ]	3,62	3,62
Cross section area of strands			
Garnzugfestigkeit		> 4.000	> 4.000
Tensile strength of the roving			
	Mittel	3.200	3.300
	avg.		
Bruchspannung	Min.	2.800	2.700
Tensile strength	min.		
	Max.	3.700	4.000
	max.		
Bruchspannung (Charakteristischer Wert) <sup>2)</sup>		2.300	2.000
Tensile strength (characteristic value) <sup>2)</sup>			
E-Modul		220.000	205.000
Young's modulus			

### Hinweise / information

Textilbetonbauteile unterliegen zur Zeit keinen bauaufsichtlichen Zulassungen (Normen, Richtlinien usw.). Bei tragenden Bauteilen sind Baubehörden, Prüfstatiker, Gutachter usw. hinzuzuziehen und länderspezifische Regelungen zu beachten (z.B. Zustimmungen im Einzelfall).

Es wird empfohlen diese Werte im Betonbauteil (vor Ort im Fertigteilwerk) zu überprüfen, um individuelle Einflüsse aus der Betonmischung zu erfassen.

Verarbeitungstemperaturen und Beständigkeiten beachten, nur durch unterwiesenes Fachpersonal verarbeiten, geeignete Betonmischungen verwenden, mit Schutzhandschuhen und -brillen arbeiten. Bitte ggf. weitere Schutzmaßnahmen beachten!

<sup>2)</sup> Der charakteristische Wert wurde auf Basis von DIN EN 1990 aus experimentellen Untersuchungen an Rovingzugversuchen abgeleitet. Die hier angegebenen Werte stellen Werte für die statische Kurzzeitfestigkeit bei Raumtemperatur (20°C) dar; Einflüsse aus Dauerhaftigkeit, Dauerstandlasten, zyklischen Beanspruchungen, usw. sind hier nicht berücksichtigt.

*Textile concrete components are currently not subject to any building authority approvals (standards, guidelines etc.). In the case of structural building sites, building authorities must be consulted with test statitors, experts etc. and country-specific regulations must be observed (e.g. approvals of specific cases).*

*It is recommended to check these values in the concrete component (on site the prefabricated concrete plant) in order to detect individual influences from the concrete mix.*

*Consider working temperatures and resistance, installation only by trained staff, use suitable concrete mixtures, wear safety gloves and goggles. Please, consider additional protective measures.*

<sup>2)</sup> *The characteristic value was derived on the basis of DIN EN 1990 from experimental studies of roving tests. The values provided here represent short-term static tensile strength; the influences of durability, long-term loads, cyclic stresses etc. are not taken into consideration.*

Änderungen vorbehalten / subject to change without notice

Version / version: 170726GN

Datum / date: 26.07.2017

solidian GmbH  
Sigmaringer Straße 150  
72458 Albstadt / Germany

Phone +49 7431 30 31 37  
Fax +49 7431 30 83 137  
info@solidian.com

www.solidian.com

## TECHNISCHES DATENBLATT TECHNICAL DATA SHEET

solidian GRID Q142/142-CCE-25

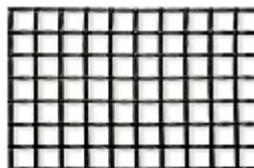


Abbildung  
Figure

Material / material			
Fasermaterial		Carbon	
Fiber material		carbon	
Tränkungsmaterial		Epoxidharz	
Impregnation material		epoxy resin	
Form		Mattenware	
Shape		panel	
Abmessungen		3,0 x 1,2 (Länge = Längsrichtung x Breite = Querrichtung)	
Dimensions	[m]	3.0 x 1.2 (Length = longitudinal x width = transversal)	
Kenndaten / Specifications			
		Längsrichtung / longitudinal	Querrichtung / transversal
Achsabstand Strang	[mm]	25	25
Axial distance			
Faserquerschnittfläche (Bewehrung)	[mm <sup>2</sup> /m]	142	142
Cross section area of reinforcement			
Faserquerschnittfläche (Strang)	[mm <sup>2</sup> ]	3,62	3,62
Cross section area of strands			
Garnzugfestigkeit		> 4.000	> 4.000
Tensile strength of the roving			
	Mittel		
	avg.	3.100	3.300
	Min.		
Bruchspannung		2.700	2.700
Tensile strength	[N/mm <sup>2</sup> ]		
	Min.		
	Max.	3900	4.100
	max.		
Bruchspannung (Charakteristischer Wert) <sup>2)</sup>		2.200	2.200
Tensile strength (characteristic value) <sup>2)</sup>			
E-Modul		220.000	205.000
Young's modulus			
Hinweise / information			
Textilbetonbauteile unterliegen zur Zeit keinen bauaufsichtlichen Zulassungen (Normen, Richtlinien usw.). Bei tragenden Bauteilen sind Baubehörden, Prüfstatiker, Gutachter usw. hinzuzuziehen und länderspezifische Regelungen zu beachten (z.B. Zustimmungen im Einzelfall).			
Es wird empfohlen diese Werte im Betonbauteil (vor Ort im Fertigteilwerk) zu überprüfen, um individuelle Einflüsse aus der Betonmischung zu erfassen.			
Verarbeitungstemperaturen und Beständigkeiten beachten, nur durch unterwiesenes Fachpersonal verarbeiten, geeignete Betonmischungen verwenden, mit Schutzhandschuhen und -brillen arbeiten. Bitte ggf. weitere Schutzmaßnahmen beachten!			
<sup>2)</sup> Der charakteristische Wert wurde auf Basis von DIN EN 1990 aus experimentellen Untersuchungen an Rovingzugversuchen abgeleitet. Die hier angegebenen Werte stellen Werte für die statische Kurzzeitfestigkeit bei Raumtemperatur (20°C) dar; Einflüsse aus Dauerhaftigkeit, Dauerstandlasten, zyklischen Beanspruchungen, usw. sind hier nicht berücksichtigt.			
Textile concrete components are currently not subject to any building authority approvals (standards, guidelines etc.). In the case of structural building sites, building authorities must be consulted with test statitors, experts etc. and country-specific regulations must be observed (e.g. approvals of specific cases).			
It is recommended to check these values in the concrete component (on site the prefabricated concrete plant) in order to detect individual influences from the concrete mix.			
Consider working temperatures and resistance, installation only by trained staff, use suitable concrete mixtures, wear safety gloves and goggles. Please, consider additional protective measures.			
<sup>2)</sup> The characteristic value was derived on the basis of DIN EN 1990 from experimental studies of roving tests. The values provided here represent short-term static tensile strength; the influences of durability, long-term loads, cyclic stresses etc. are not taken into consideration.			
Änderungen vorbehalten / subject to change without notice			
Version / version: 170726GN		Datum / date: 26.07.2017	

solidian GmbH  
Signeringer Straße 150  
72458 Albstadt / Germany

Phone +49 7431 10 31 37  
Fax +49 7431 10 65 157  
info@solidian.com

www.solidian.com

## TECHNISCHES DATENBLATT TECHNICAL DATA SHEET

solidian GRID Q142/142-CCE-38

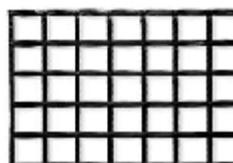


Abbildung  
Figure

### Material / material

Fasermaterial		Carbon
Fiber material		carbon
Tränkungsmaterial		Epoxidharz
Impregnation material		epoxy resin
Form		Mattenware
Shape		panel
Abmessungen		5,0 x 1,2 (Länge = Längsrichtung x Breite = Querrichtung)
Dimensions	[m]	3.0 x 1.2 (Length = longitudinal x width = transversal)

### Kenndaten / Specifications

		Längsrichtung / longitudinal	Querrichtung / transversal
Achsabstand Strang	[mm]	38	38
Axial distance			
Faserquerschnittsfläche (Bewehrung)	[mm <sup>2</sup> /m]	142	142
Fiber cross section area of reinforcement			
Faserquerschnittsfläche (Strang)	[mm <sup>2</sup> ]	5,42	5,42
Fiber cross section area of strands			
Garnzugfestigkeit		> 4.000	> 4.000
Tensile strength of the roving			
	Mittel	2500	2.800
	avg.		
Bruchspannung	Mitt.	2.200	2.000
Tensile strength	min.		
	Max. [MPa]	3.300	3.300
	max.		
Bruchspannung (Charakteristischer Wert) <sup>2)</sup>		2.200	2.200
Tensile strength (characteristic value) <sup>2)</sup>			
E-Modul		180.000	180.000
Young's modulus			

### Hinweise / information

Textilbetonbauteile unterliegen zur Zeit keinen bauaufsichtlichen Zulassungen (Normen, Richtlinien usw.). Bei tragenden Bauteilen sind Baubehörden, Prüfstatiker, Gutachter usw. hinzuzuziehen und länderspezifische Regelungen zu beachten (z.B. Zustimmungen im Einzelfall).

Es wird empfohlen diese Werte im Betonbauteil (vor Ort im Fertigteilwerk) zu überprüfen, um individuelle Einflüsse aus der Betonmischung zu erfassen.

Verarbeitungstemperaturen und Beständigkeiten beachten, nur durch unterwiesenes Fachpersonal verarbeiten, geeignete Betonmischungen verwenden, mit Schutzhandschuhen und -brillen arbeiten. Bitte ggf. weitere Schutzmaßnahmen beachten!

<sup>2)</sup> Der charakteristische Wert wurde auf Basis von DIN EN 1990 aus experimentellen Untersuchungen an Rovingversuchen abgeleitet. Die hier angegebenen Werte stellen Werte für die statische Kurzzeitfestigkeit bei Raumtemperatur (20°C) dar; Einflüsse aus Dauerhaftigkeit, Dauerstandlasten, zyklischen Beanspruchungen, usw. sind hier nicht berücksichtigt.

*Textile concrete components are currently not subject to any building authority approvals (standards, guidelines etc.). In the case of structural building sites, building authorities must be consulted with test staters, experts etc. and country-specific regulations must be observed (e.g. approvals of specific cases).*

*It is recommended to check these values in the concrete component (on site the prefabricated concrete plant) in order to detect individual influences from the concrete mix.*

*Consider working temperatures and resistance, installation only by trained staff, use suitable concrete mixtures, wear safety gloves and goggles. Please, consider additional protective measures.*

<sup>2)</sup> *The characteristic value was derived on the basis of DIN EN 1990 from experimental studies of roving tests. The values provided here represent short-term static tensile strength; the influences of durability, long-term loads, cyclic stresses etc. are not taken into consideration.*

Änderungen vorbehalten / subject to change without notice

Version / version: 170726GN

Datum / date: 26.07.2017

solidian GmbH  
Sigmaringer Straße 150  
72458 Albstadt / Germany

Phone +49 7431 10 31 37  
Fax +49 7431 10 65 137  
info@solidian.com

www.solidian.com

## B Dokumentation der experimentellen Untersuchungen

Die Versuche werden nach folgendem Schema bezeichnet:

VV- TT- Nr.- LL

mit: VV Versuchskörper

V1: T- Träger

V2: Deckenelemente

TT Bewehrungskombination

	Biegebewehrung		Querkraftbewehrung
T05:	2 DM 8	+	Q45/ Q45 CCS 20
T06:	2 DM 10 (Nr.12: 3 DM 10)	+	Q45/ Q45 CCS 20
T07:	2 DM 8	+	Q95/ Q95 CCE 38
T08:	2 DM 10	+	Q95/ Q95 CCE 38
T09:	Q95/ Q95 CCE 38	+	Q45/ Q45 CCS 20
T10:	Q142/ Q142 CCE 25	+	Q95/ Q95 CCE 38
T11	Q142/ Q142 CCE 38	+	Q142/ Q142 CCE 38

Nr Nummer

Nr01- 11 ohne VSP

Nr12 mit VSP

LL Belastungskonfiguration/ Schubschlankheit [a/d]

L01 a/d= 2,5

L02 a/d= 3,5

L03 a/d=4,0

L04 a/d=3,0

Versuchskörper

B-5

V1-T05- Nr.01- L02

**Bewehrung:**

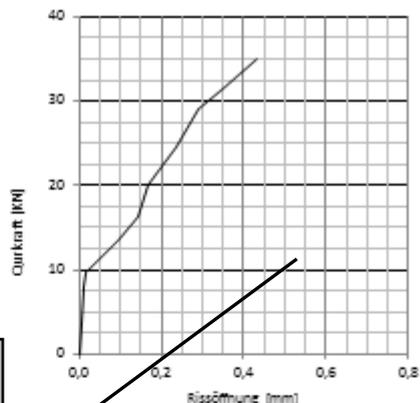
Querkraftbew. Q45/Q45CCS20  
 Biegebewehrung CFK DM8 2 [Stk]  
 Druckbewehrung CFK DM8 1 [Stk]  
 Bewehrungsgrad  $w_v = 1,14$  [%]

**Lastkonfiguration:**

Last-Auflager  $a = 810$  [mm]  
 Nutzhöhe  $d_m = 230$  [mm]  
 Stabankheit  $a/d_m = 3,5$  [-]

**UHPC:**

Druckfestigkeit  $f_{cm,prism} = 168,5$  [N/mm<sup>2</sup>]  
 Biegezugfestigkeit  $f_{ct,m} = 10,3$  [N/mm<sup>2</sup>]  
 Elastizitätsmodul

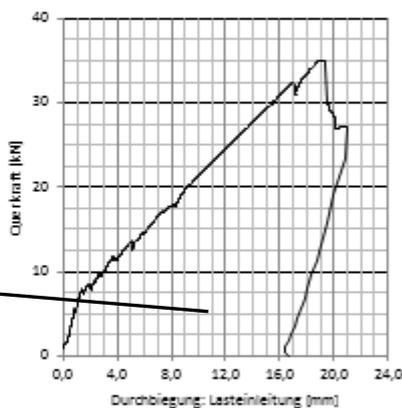
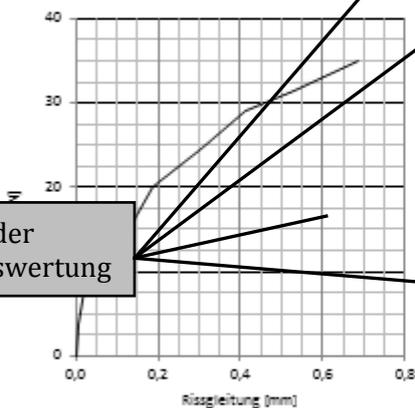


Angaben zum Versuchskörper

aus versuchsbegleitenden Werkstoffprüfungen

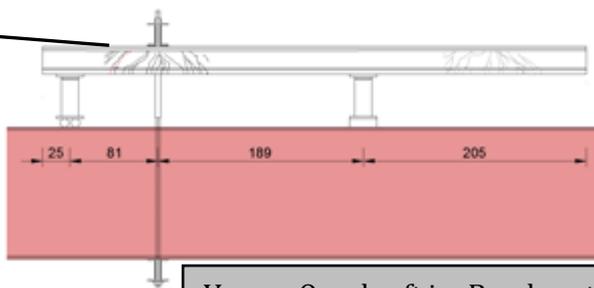
$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR\dot{O}_{u}$ [mm]	$SRG_{u}$ [mm]	Versagen
35,09	28,42	61	18,84	0,43	0,69	Biegeschubversagen

Ergebnisse der Versuchsauswertung



Rissbild

Stabmodellierung CAD:



Rissbild im Bruchzustand:



$V_{u,exp}$  Querkraft im Bruchzustand  
 $M_{u,exp}$  Moment im Bruchzustand  
 $\beta_r$  Schubrisswinkel des Versagensrisses  
 $w_u$  Durchbiegung im Bruchzustand  
 $SR\dot{O}_{u}$  mittlere Rissöffnung des Versagensrisses im Bruchzustand  
 $SRG_{u}$  mittlere Rissgleitung im Versagensriss im Bruchzustand

## B1 Träger QS1: Querkraftversuche

### V1- T05- Nr.01- L01

#### Bewehrung:

Querkraftbew.	Q45/Q45CCS20		
Biegebewehrung	CFK DM8	2	[Stk]

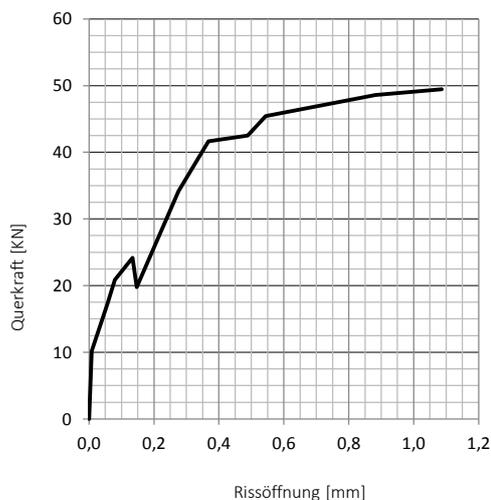
Bewehrungsgrad	$\omega_v =$	1,06	[%]
----------------	--------------	------	-----

#### Lastkonfiguration:

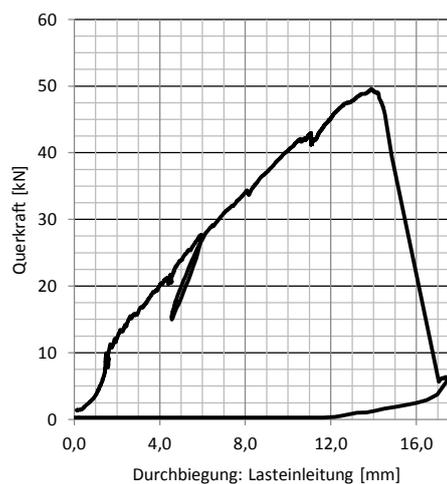
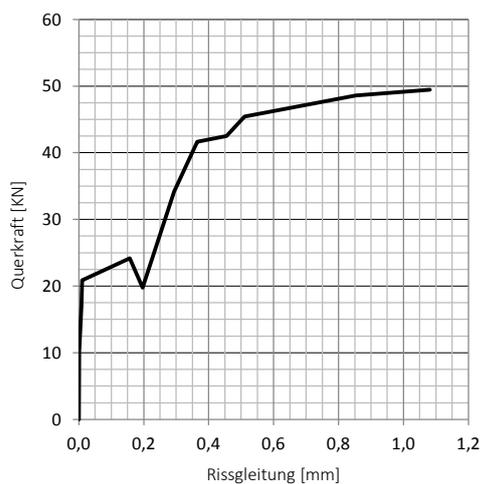
Abstand Last-Auflager	$a =$	580	[mm]
Statische Nutzhöhe	$d_m =$	230	[mm]
Schubslankheit	$a/d_m =$	2,5	[-]

#### UHPC:

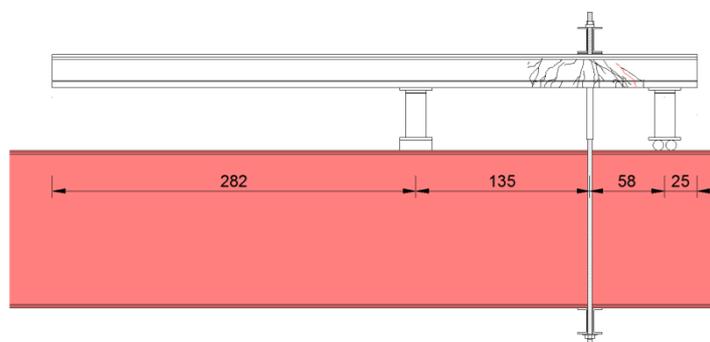
Druckfestigkeit	$f_{cm,prism} =$	168,5	[N/mm <sup>2</sup> ]
Biegezugfestigkeit	$f_{ct,fl,m} =$	10,3	[N/mm <sup>2</sup> ]
Elastizitätsmodul	$E_{c,m} =$	52550	[N/mm <sup>2</sup> ]



$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR\ddot{o},u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
49,55	28,72	43	13,89	1,09	1,08	Textilbruch



Rissmodellierung CAD:



Rissbild im Bruchzustand:



### V1- T05- Nr.01- L02

#### Bewehrung:

Querkraftbew. Q45/Q45CCS20  
 Biegebewehrung CFK DM8 2 [Stk]

Bewehrungsgrad  $\omega_v = 1,06$  [%]

#### Lastkonfiguration:

Abstand Last-Auflager  $a = 810$  [mm]

Statische Nutzhöhe  $d_m = 230$  [mm]

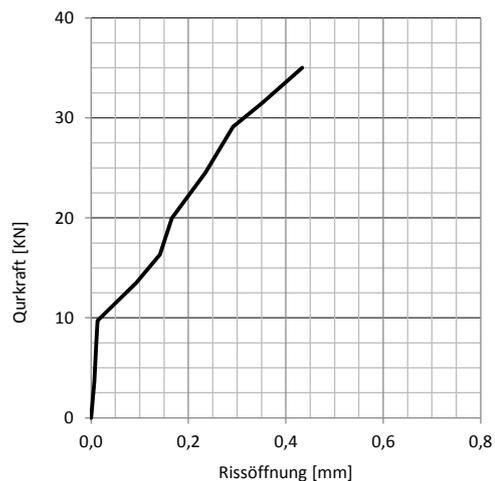
Schubslankheit  $a/d_m = 3,5$  [-]

#### UHPC:

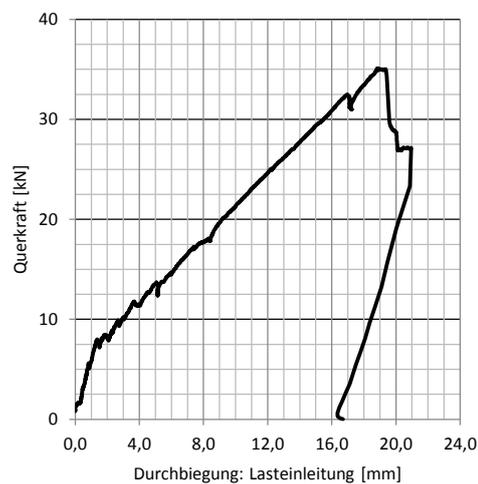
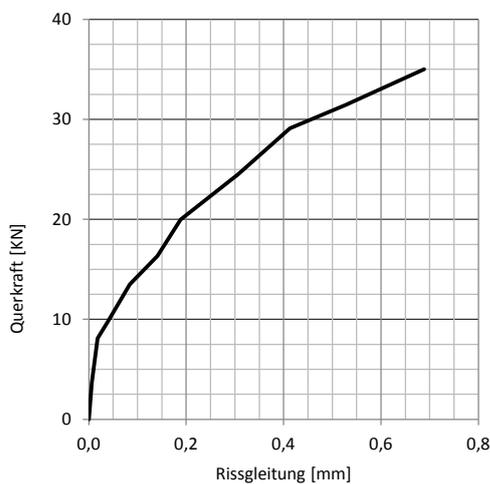
Druckfestigkeit  $f_{cm,prism} = 168,5$  [N/mm<sup>2</sup>]

Biegezugfestigkeit  $f_{ct,fl,m} = 10,3$  [N/mm<sup>2</sup>]

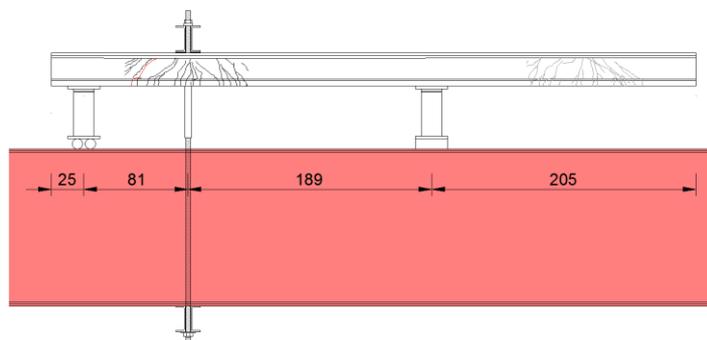
Elastizitätsmodul  $E_{c,m} = 52550$  [N/mm<sup>2</sup>]



$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR0,u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
35,09	28,42	61	18,84	0,43	0,69	Textilauszug



Rissmodellierung CAD:



Rissbild im Bruchzustand:



## V1- T05- Nr.02- L03

**Bewehrung:**

Querkraftbew. Q45/Q45CCS20  
 Biegebewehrung CFK DM8 2 [Stk]

Bewehrungsgrad  $\omega_v = 1,11$  [%]

**Lastkonfiguration:**

Abstand Last-Auflager  $a = 920$  [mm]

Statische Nutzhöhe  $d_m = 230$  [mm]

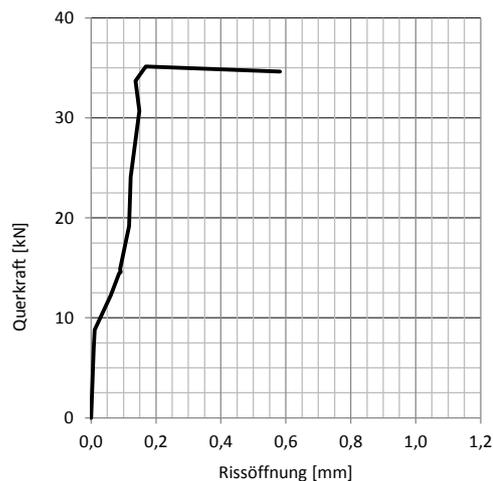
Schubslankheit  $a/d_m = 4,0$  [-]

**UHPC:**

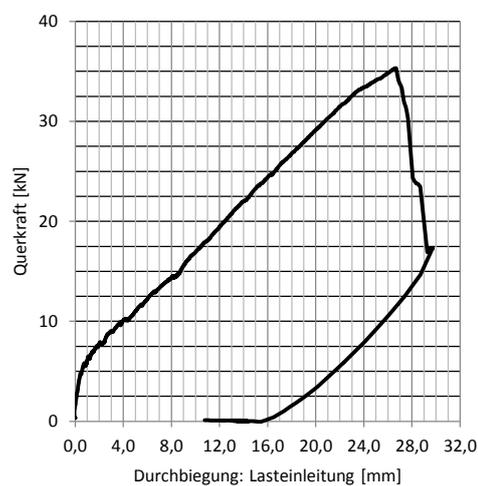
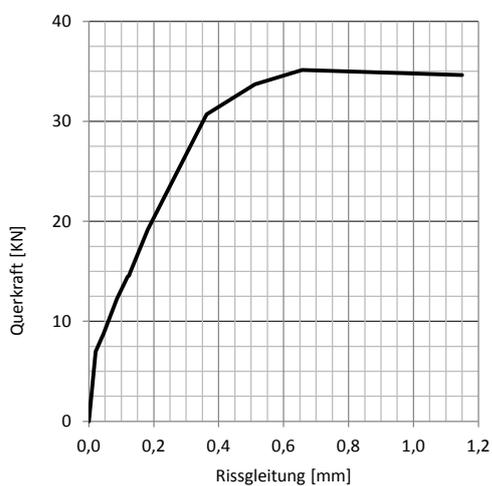
Druckfestigkeit  $f_{cm,prism} = 156,8$  [N/mm<sup>2</sup>]

Biegezugfestigkeit  $f_{ct,fl,m} = 9,19$  [N/mm<sup>2</sup>]

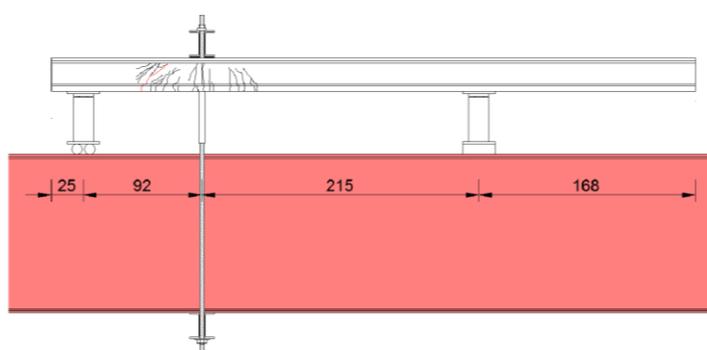
Elastizitätsmodul  $E_{c,m} = 50030$  [N/mm<sup>2</sup>]



$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR\dot{0},u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
35,32	32,51	56	26,67	0,17	0,66	Textilbruch



## Rissmodellierung CAD:



## Rissbild im Bruchzustand:



### V1- T05- Nr.02- L04

#### Bewehrung:

Querkraftbew. Q45/Q45CCS20  
 Biegebewehrung CFK DM8 2 [Stk]

Bewehrungsgrad  $\omega_v = 1,11$  [%]

#### Lastkonfiguration:

Abstand Last-Auflager  $a = 690$  [mm]

Statische Nutzhöhe  $d_m = 230$  [mm]

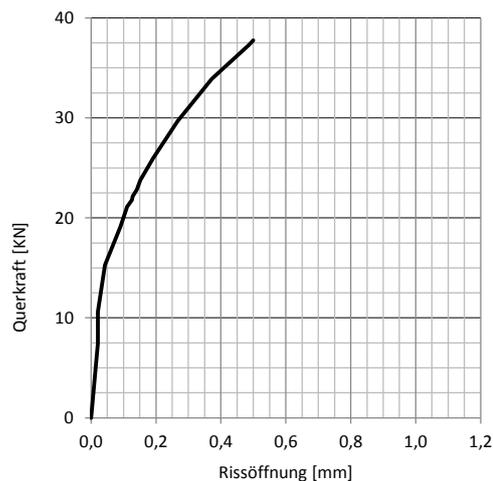
Schubslankheit  $a/d_m = 3,0$  [-]

#### UHPC:

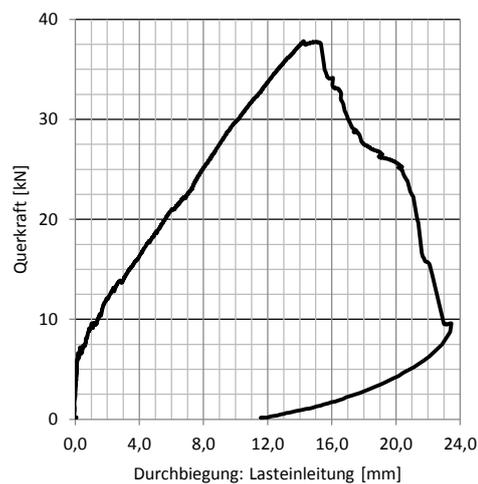
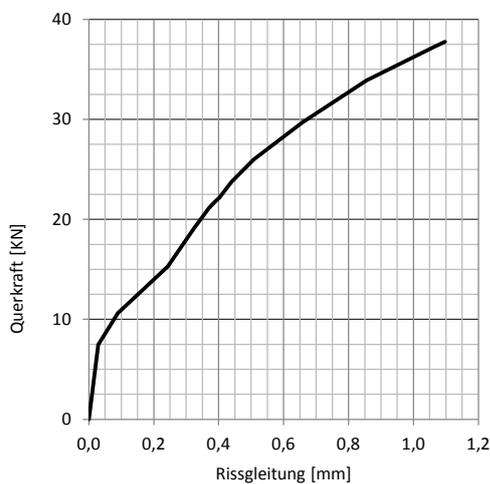
Druckfestigkeit  $f_{cm,prism} = 156,8$  [N/mm<sup>2</sup>]

Biegezugfestigkeit  $f_{ct,fl,m} = 9,19$  [N/mm<sup>2</sup>]

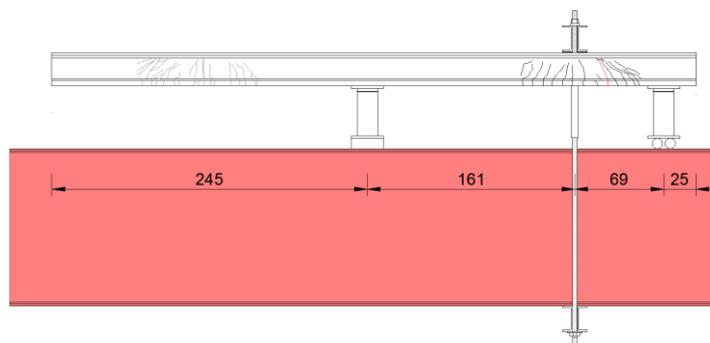
Elastizitätsmodul  $E_{c,m} = 50030$  [N/mm<sup>2</sup>]



$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR0,u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
37,83	26,10	64	14,23	0,50	1,10	Textilauszug



Rissmodellierung CAD:



Rissbild im Bruchzustand:



## V1- T07- Nr.05- L01

**Bewehrung:**

Querkraftbew. Q95/Q95CCE38  
 Biegebewehrung CFK DM8 2 [Stk]

Bewehrungsgrad  $\omega_v = 2,42$  [%]

**Lastkonfiguration:**

Abstand Last-Auflager  $a = 580$  [mm]

Statische Nutzhöhe  $d_m = 230$  [mm]

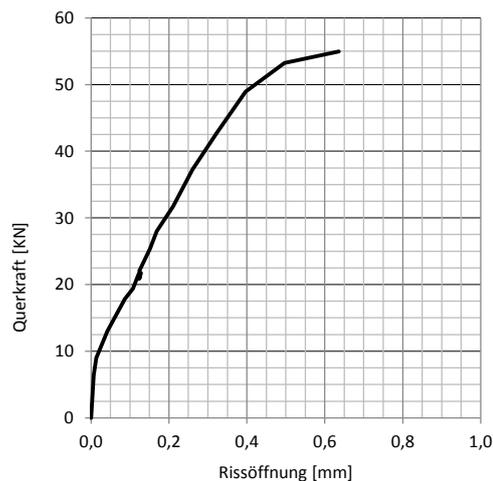
Schubslankheit  $a/d_m = 2,5$  [-]

**UHPC:**

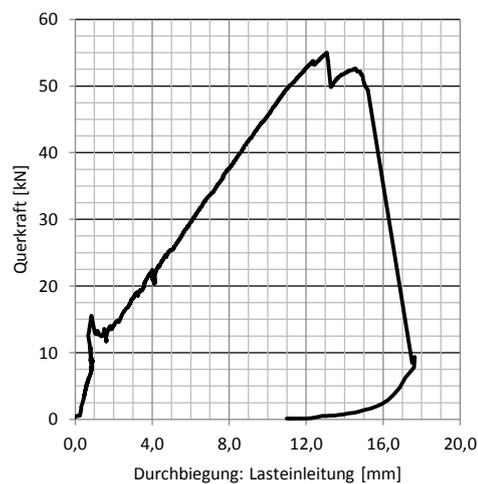
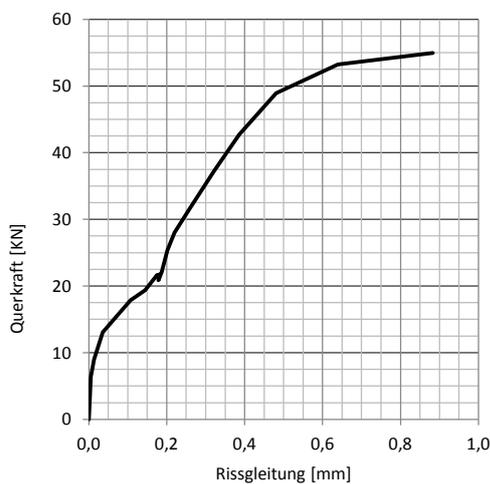
Druckfestigkeit  $f_{cm,prism} = 159,47$  [N/mm<sup>2</sup>]

Biegezugfestigkeit  $f_{ct,fl,m} = 10,48$  [N/mm<sup>2</sup>]

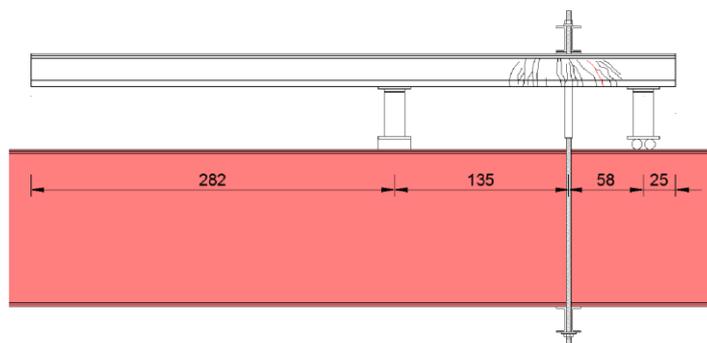
Elastizitätsmodul  $E_{c,m} = 53640$  [N/mm<sup>2</sup>]



$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR0,u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
55,04	31,90	59	13,07	0,64	0,88	Textilauszug/ Delaminieren



## Rissmodellierung CAD:



## Rissbild im Bruchzustand:



### V1- T07- Nr.05- L02

#### Bewehrung:

Querkraftbew. Q95/Q95CCE38  
 Biegebewehrung CFK DM8 2 [Stk]

Bewehrungsgrad  $\omega_v = 2,42$  [%]

#### Lastkonfiguration:

Abstand Last-Auflager  $a = 810$  [mm]

Statische Nutzhöhe  $d_m = 230$  [mm]

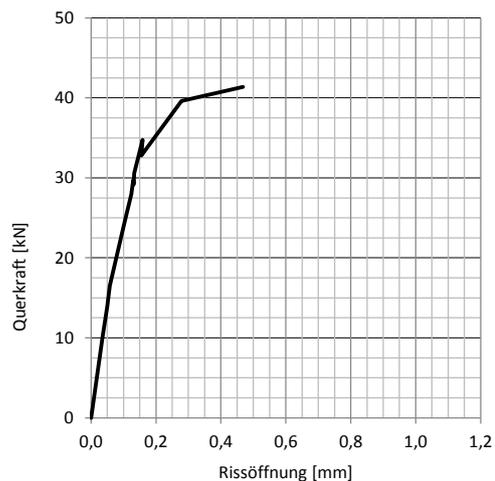
Schubslankheit  $a/d_m = 3,5$  [-]

#### UHPC:

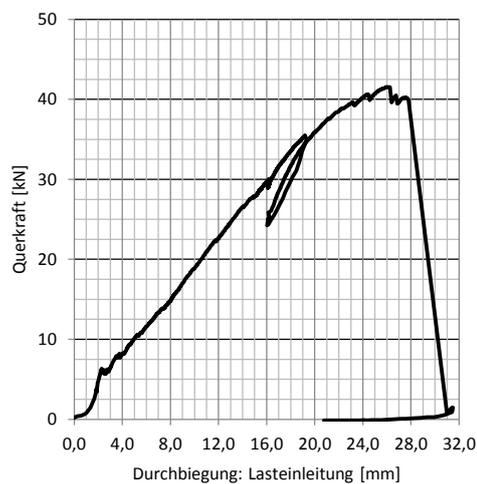
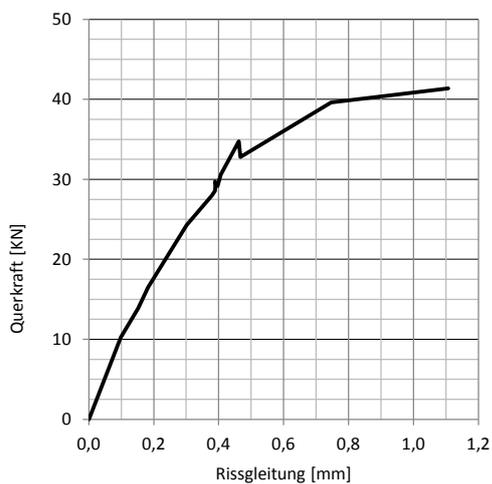
Druckfestigkeit  $f_{cm,prism} = 159,47$  [N/mm<sup>2</sup>]

Biegezugfestigkeit  $f_{ct,fl,m} = 10,48$  [N/mm<sup>2</sup>]

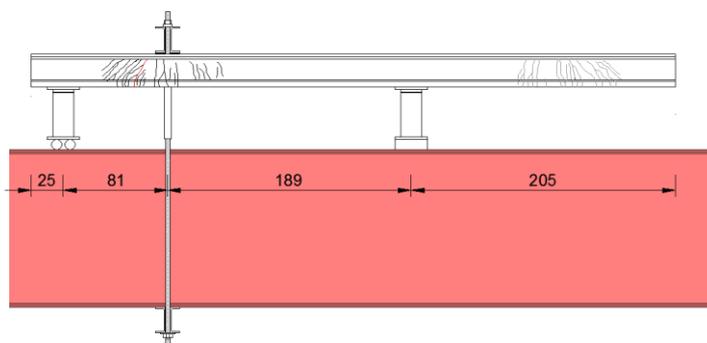
Elastizitätsmodul  $E_{c,m} = 53640$  [N/mm<sup>2</sup>]



$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR\bar{0},u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
41,54	33,64	64	25,93	0,48	1,11	Versagen der Betondruckstrebe



#### Rissmodellierung CAD:



#### Rissbild im Bruchzustand:



---

**V1- T07- Nr.06- L03**


---

**Bewehrung:**

Querkraftbew. Q95/Q95CCE38  
 Biegebewehrung CFK DM8 2 [Stk]

Bewehrungsgrad  $\omega_v = 2,45$  [%]

**Lastkonfiguration:**

Abstand Last-Auflager  $a = 920$  [mm]

Statische Nutzhöhe  $d_m = 230$  [mm]

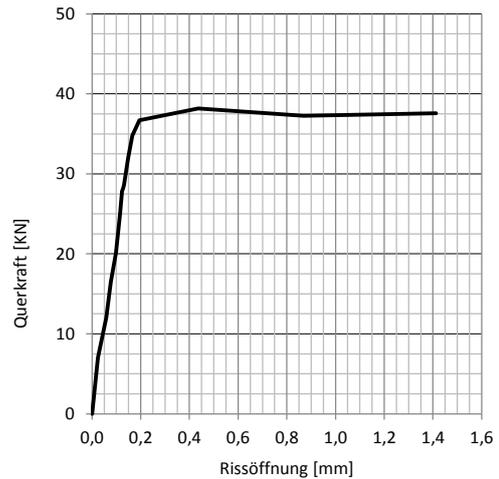
Schubslankheit  $a/d_m = 4,0$  [-]

**UHPC:**

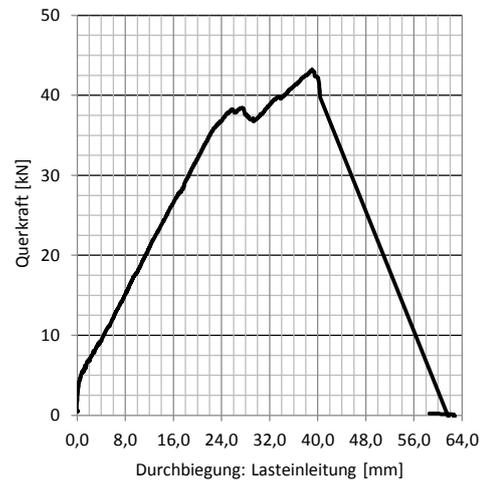
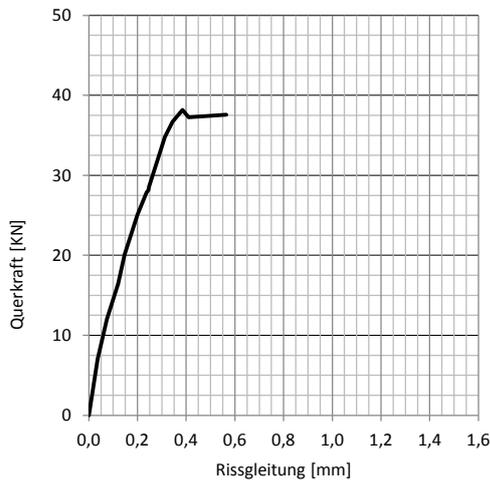
Druckfestigkeit  $f_{cm,prism} = 167,82$  [N/mm<sup>2</sup>]

Biegezugfestigkeit  $f_{ct,fl,m} = 10,54$  [N/mm<sup>2</sup>]

Elastizitätsmodul  $E_{c,m} = 52970$  [N/mm<sup>2</sup>]

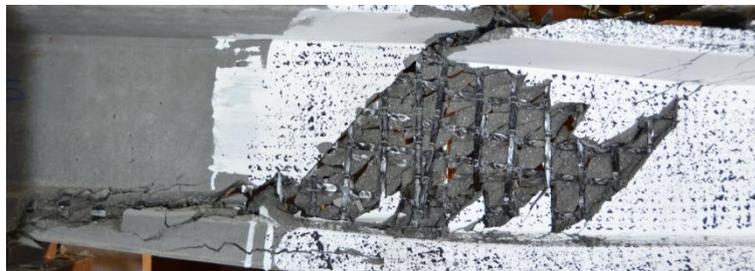


$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR\ddot{O},u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
43,17	39,74	-	39,08	-	-	Versagen der Betondruckstrebe

**Hinweis:**

Aufgrund des Abplatzen des Messfeldes vor dem Bruch, beschreiben die Diagramme zur Rissöffnung und Rissgleitung den Versuch nur bis zu einem Querkraftniveau von 37,56 kN (rd. 87% von  $V_u$ ).

Rissbild im Bruchzustand:



### V1- T07- Nr.06- L04

#### Bewehrung:

Querkraftbew. Q95/Q95CCE38  
 Biegebewehrung CFK DM8 2 [Stk]

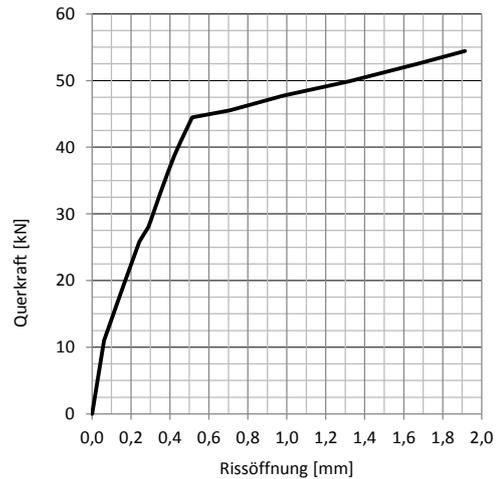
Bewehrungsgrad  $\omega_v = 2,45$  [%]

#### Lastkonfiguration:

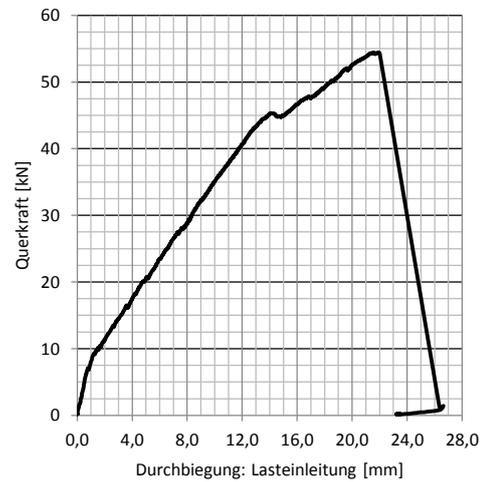
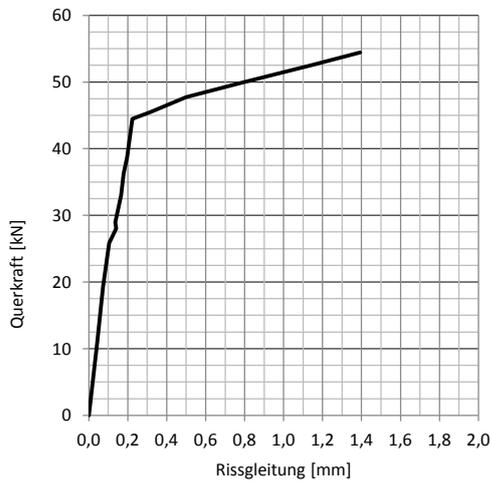
Abstand Last-Auflager  $a = 690$  [mm]  
 Statische Nutzhöhe  $d_m = 230$  [mm]  
 Schubschlankheit  $a/d_m = 3,0$  [-]

#### UHPC:

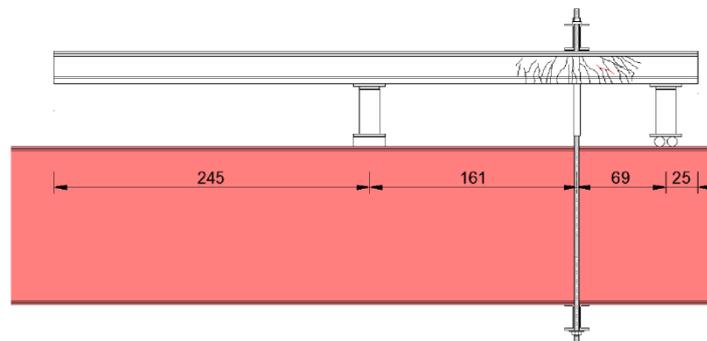
Druckfestigkeit  $f_{cm,prism} = 167,82$  [N/mm<sup>2</sup>]  
 Biegezugfestigkeit  $f_{ct,fl,m} = 10,54$  [N/mm<sup>2</sup>]  
 Elastizitätsmodul  $E_{c,m} = 52970$  [N/mm<sup>2</sup>]



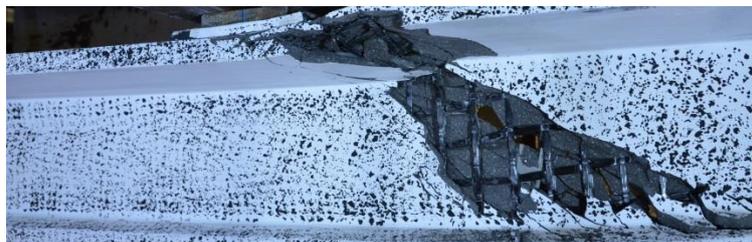
$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR\bar{0},u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
54,44	37,57	43	21,59	1,91	1,39	Versagen der Betondruckstrebe



Rissmodellierung CAD:



Rissbild im Bruchzustand:



## B2 Träger QS2: Querkraftversuche

### V1- T06- Nr.03- L01

#### Bewehrung:

Querkraftbew.	Q45/Q45CCS20		
Biegebewehrung	CFK DM10	2	[Stk]

Bewehrungsgrad	$\omega_v =$	0,79	[%]
----------------	--------------	------	-----

#### Lastkonfiguration:

Abstand Last-Auflager	$a =$	580	[mm]
-----------------------	-------	-----	------

Statische Nutzhöhe	$d_m =$	230	[mm]
--------------------	---------	-----	------

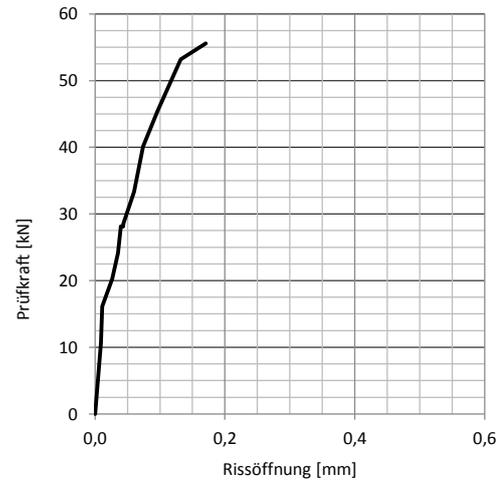
Schubslankheit	$a/d_m =$	2,5	[-]
----------------	-----------	-----	-----

#### UHPC:

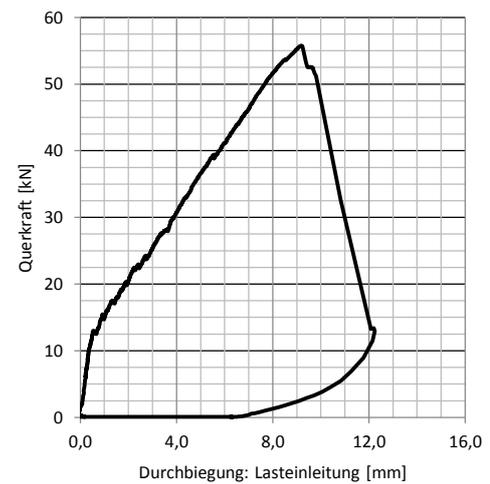
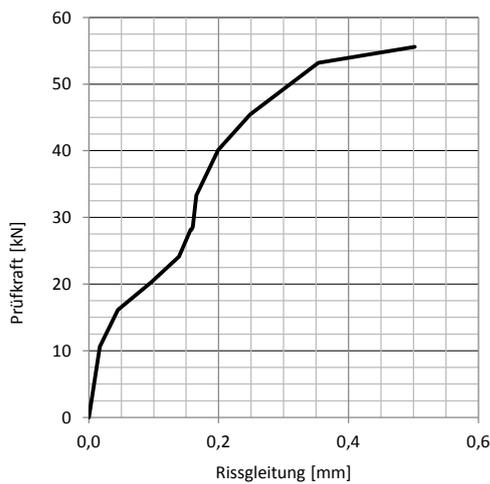
Druckfestigkeit	$f_{cm,prism} =$	156,8	[N/mm <sup>2</sup> ]
-----------------	------------------	-------	----------------------

Biegezugfestigkeit	$f_{ct,fl,m} =$	9,19	[N/mm <sup>2</sup> ]
--------------------	-----------------	------	----------------------

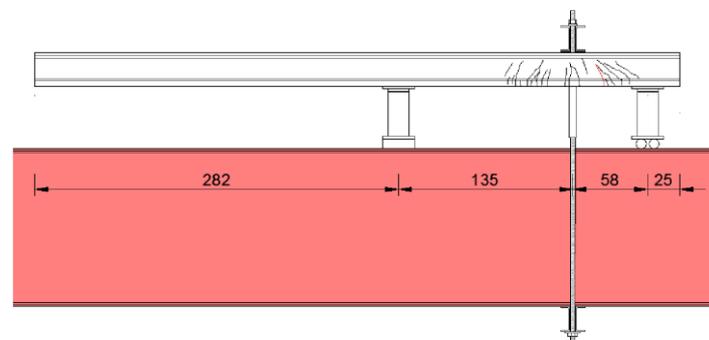
Elastizitätsmodul	$E_{c,m} =$	50030	[N/mm <sup>2</sup> ]
-------------------	-------------	-------	----------------------



$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR\ddot{o},u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
55,82	32,35	63	9,18	0,17	0,50	Textilbruch



Rissmodellierung CAD:



Rissbild im Bruchzustand:



## V1- T06- Nr.03- L02

**Bewehrung:**

Querkraftbew. Q45/Q45CCS20  
 Biegebewehrung CFK DM10 2 [Stk]

Bewehrungsgrad  $\omega_v = 0,79$  [%]

**Lastkonfiguration:**

Abstand Last-Auflager  $a = 810$  [mm]

Statische Nutzhöhe  $d_m = 230$  [mm]

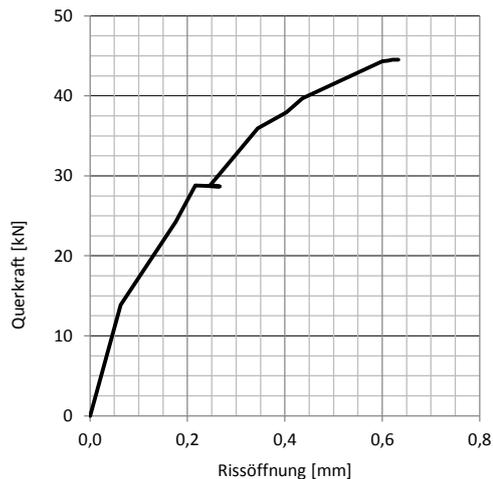
Schubslankheit  $a/d_m = 3,5$  [-]

**UHPC:**

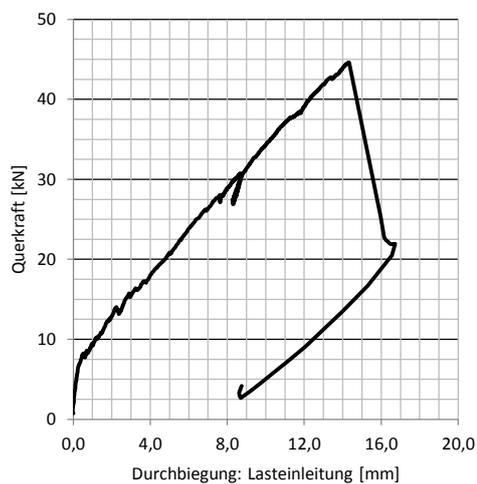
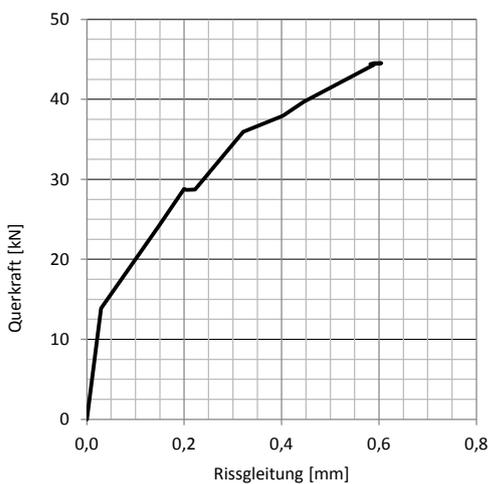
Druckfestigkeit  $f_{cm,prism} = 156,8$  [N/mm<sup>2</sup>]

Biegezugfestigkeit  $f_{ct,fl,m} = 9,19$  [N/mm<sup>2</sup>]

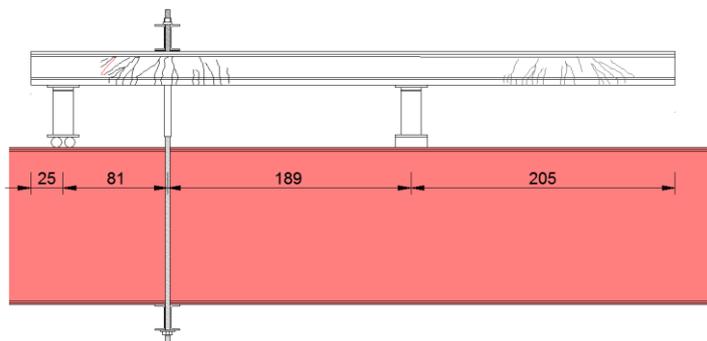
Elastizitätsmodul  $E_{c,m} = 50030$  [N/mm<sup>2</sup>]



$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR\bar{0},u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
44,48	36,11	49	14,27	0,63	0,59	Textilbruch



## Rissmodellierung CAD:



## Rissbild im Bruchzustand:



### V1- T06- Nr.04- L03

#### Bewehrung:

Querkraftbew. Q45/Q45CCS20  
 Biegebewehrung CFK DM10 2 [Stk]

Bewehrungsgrad  $\omega_v = 0,83$  [%]

#### Lastkonfiguration:

Abstand Last-Auflager  $a = 920$  [mm]

Statische Nutzhöhe  $d_m = 230$  [mm]

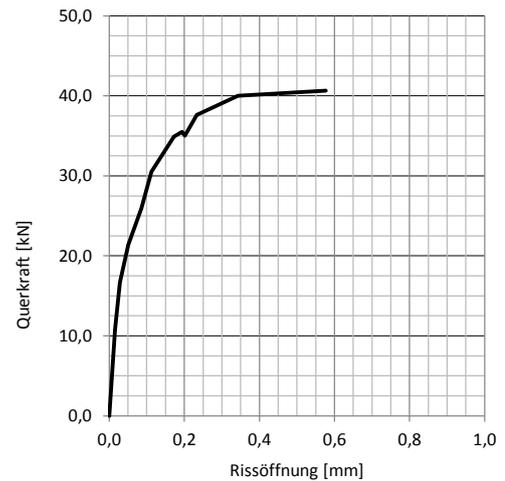
Schubslankheit  $a/d_m = 4,0$  [-]

#### UHPC:

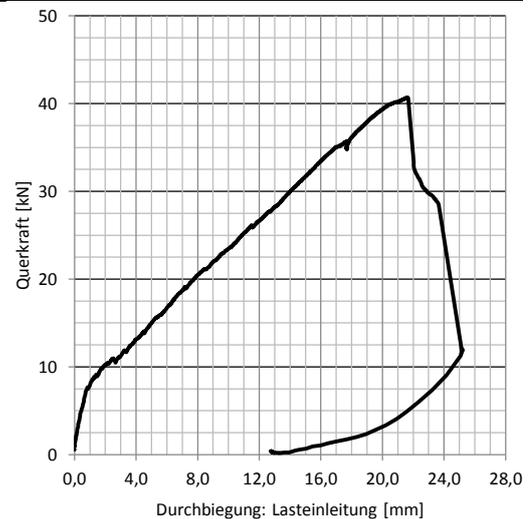
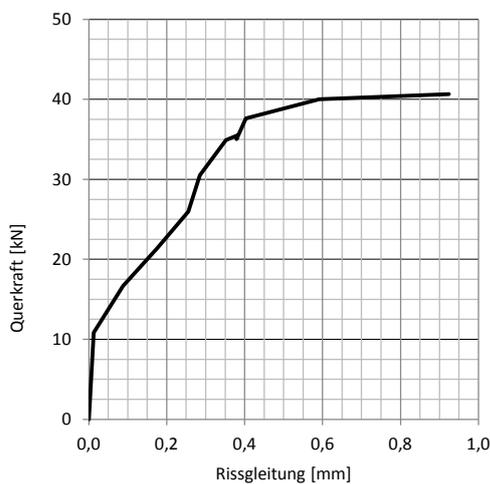
Druckfestigkeit  $f_{cm,prism} = 156,8$  [N/mm<sup>2</sup>]

Biegezugfestigkeit  $f_{ct,fl,m} = 9,19$  [N/mm<sup>2</sup>]

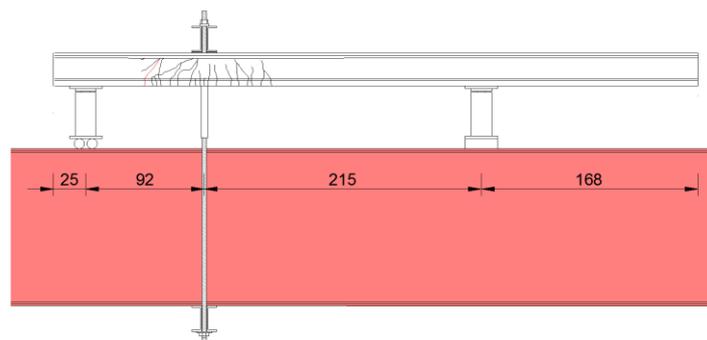
Elastizitätsmodul  $E_{c,m} = 50030$  [N/mm<sup>2</sup>]



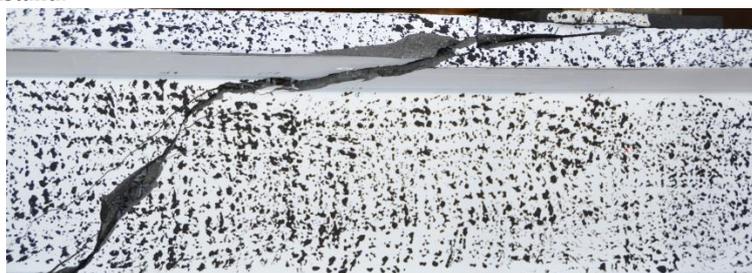
$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR\dot{0},u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
40,68	37,44	58	21,56	0,58	0,92	Textilauszug/ Delaminieren



Rissmodellierung CAD:



Rissbild im Bruchzustand:



V1- T06- Nr.04- L04

**Bewehrung:**

Querkraftbew. Q45/Q45CCS20  
 Biegebewehrung CFK DM10 2 [Stk]

Bewehrungsgrad  $\omega_v = 0,83$  [%]

**Lastkonfiguration:**

Abstand Last-Auflager a= 690 [mm]

Statische Nutzhöhe  $d_m = 230$  [mm]

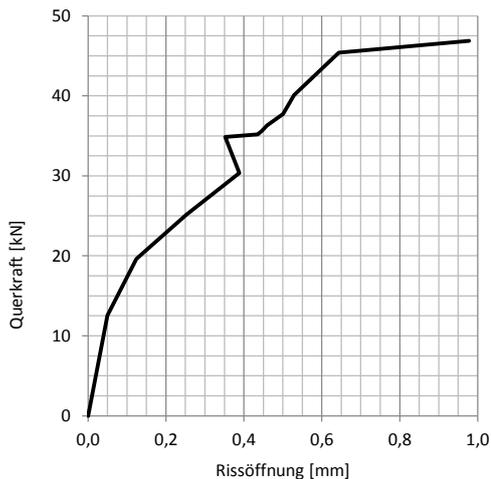
Schubslankheit  $a/d_m = 3,0$  [-]

**UHPC:**

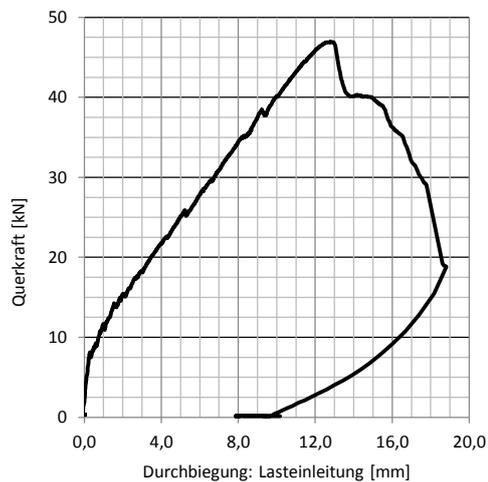
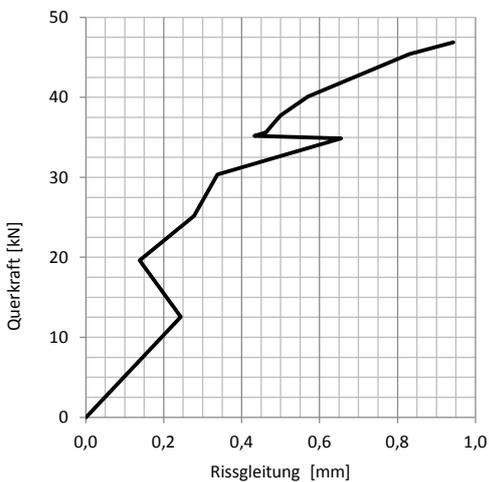
Druckfestigkeit  $f_{cm,prism} = 156,8$  [N/mm<sup>2</sup>]

Biegezugfestigkeit  $f_{ct,fl,m} = 9,19$  [N/mm<sup>2</sup>]

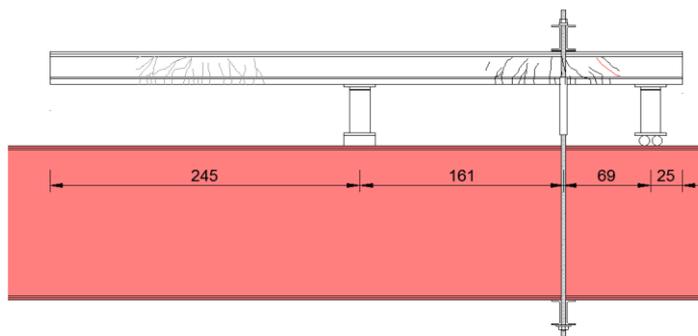
Elastizitätsmodul  $E_{c,m} = 50030$  [N/mm<sup>2</sup>]



$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR0,u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
46,93	32,8	46	12,76	0,98	0,94	Textilauszug/ Delaminieren



Rissmodellierung CAD:



Rissbild im Bruchzustand:



### V1- T06- Nr.12- L03

#### Bewehrung:

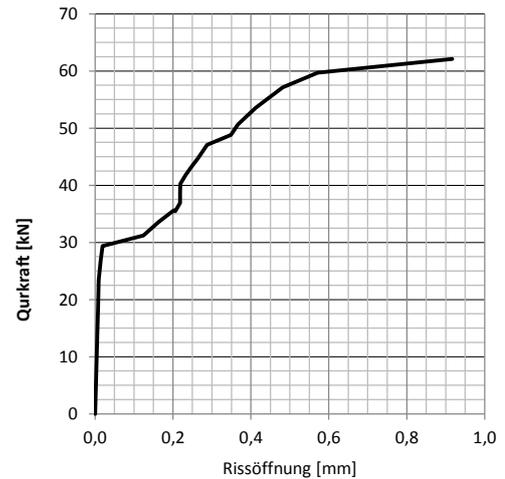
Querkraftbew.	Q45/Q45CCS20		
Biegebewehrung	CFK DM10	2	[Stk]
Bewehrung- OG	CFK DM10	1	[Stk]
Bewehrungsgrad (Vorgespannt)	$\omega_v =$	0,84	[%]

#### Lastkonfiguration:

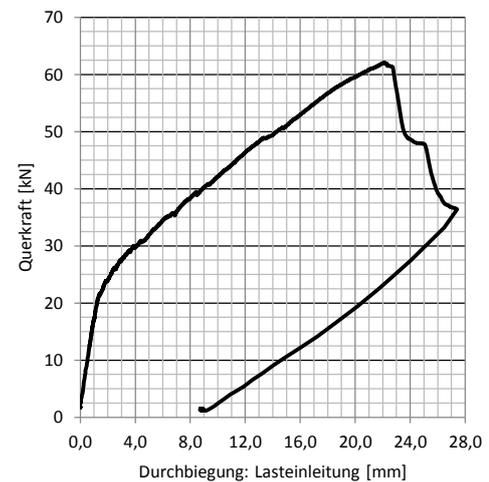
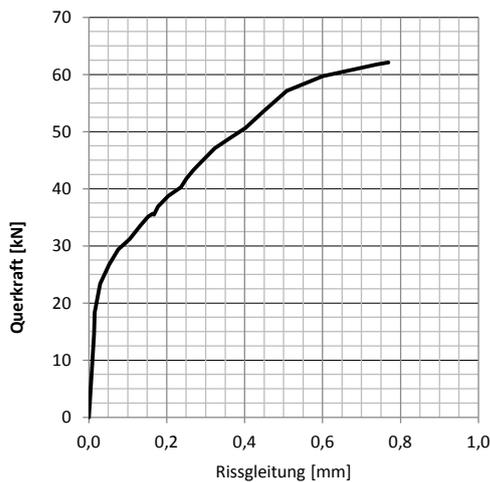
Abstand Last-Auflager	$a =$	920	[mm]
Statische Nutzhöhe	$d_m =$	230	[mm]
Schubslankheit	$a/d_m =$	4,0	[-]

#### UHPC:

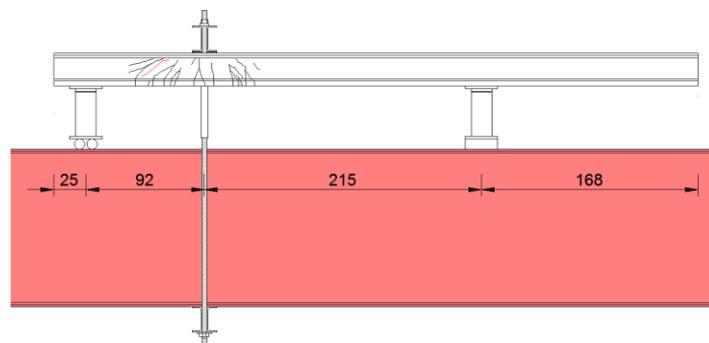
Druckfestigkeit	$f_{cm,prism} =$	158,07	[N/mm <sup>2</sup> ]
Biegezugfestigkeit	$f_{ct,fl,m} =$	9,84	[N/mm <sup>2</sup> ]
Elastizitätsmodul	$E_{c,m} =$	49538	[N/mm <sup>2</sup> ]



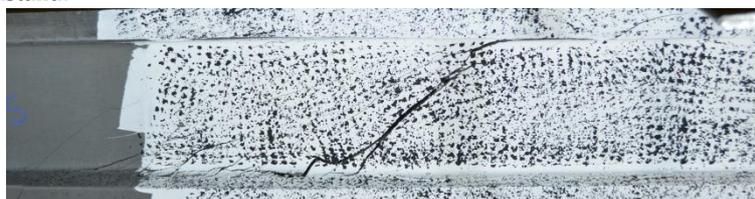
$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR\dot{0},u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
62,17	56,57	43	22,14	0,92	0,77	Textilauszug/ Delaminieren



Rissmodellierung CAD:



Rissbild im Bruchzustand:



### V1- T06- Nr.12- L04

#### Bewehrung:

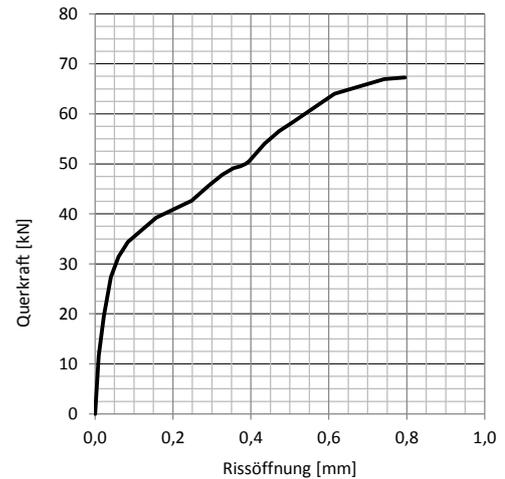
Querkraftbew.	Q45/Q45CCS20		
Biegebewehrung	CFK DM10	2	[Stk]
Bewehrung- OG	CFK DM10	1	[Stk]
Bewehrungsgrad (Vorgespannt)	$\omega_v =$	0,84	[%]

#### Lastkonfiguration:

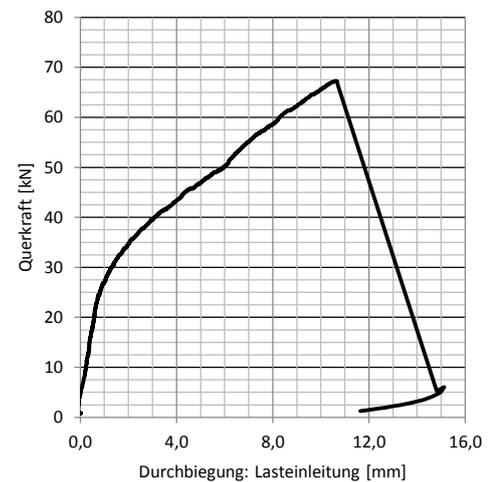
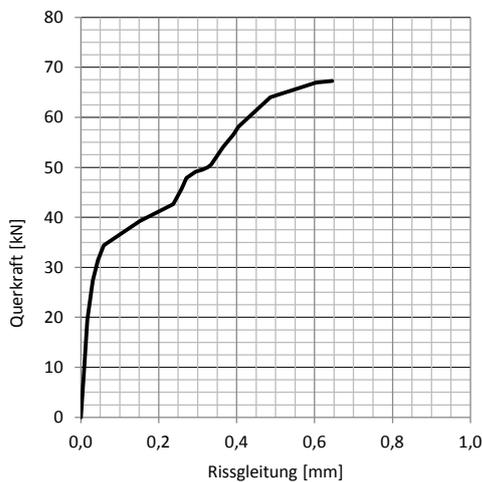
Abstand Last-Auflager	$a =$	690	[mm]
Statische Nutzhöhe	$d_m =$	230	[mm]
Schubslankheit	$a/d_m =$	3,0	[-]

#### UHPC:

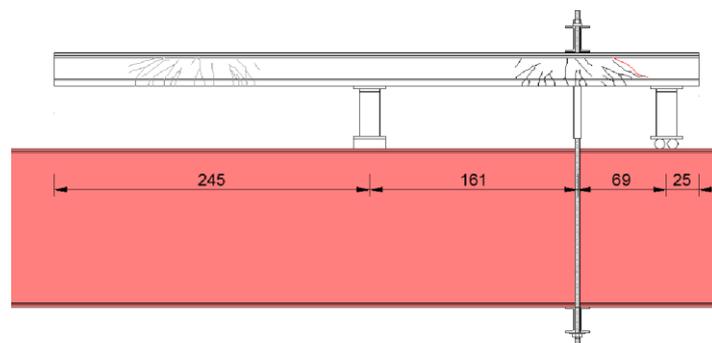
Druckfestigkeit	$f_{cm,prism} =$	158,07	[N/mm <sup>2</sup> ]
Biegezugfestigkeit	$f_{ct,fl,m} =$	9,84	[N/mm <sup>2</sup> ]
Elastizitätsmodul	$E_{c,m} =$	49538	[N/mm <sup>2</sup> ]



$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR\dot{0},u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
67,43	46,53	39	10,60	0,80	0,65	Textilbruch



Rissmodellierung CAD:



Rissbild im Bruchzustand:



### V1- T08- Nr.07- L01

#### Bewehrung:

Querkraftbew. Q95/Q95CCE38  
 Biegebewehrung CFK DM10 2 [Stk]

Bewehrungsgrad  $\omega_v = 1,84$  [%]

#### Lastkonfiguration:

Abstand Last-Auflager  $a = 580$  [mm]

Statische Nutzhöhe  $d_m = 230$  [mm]

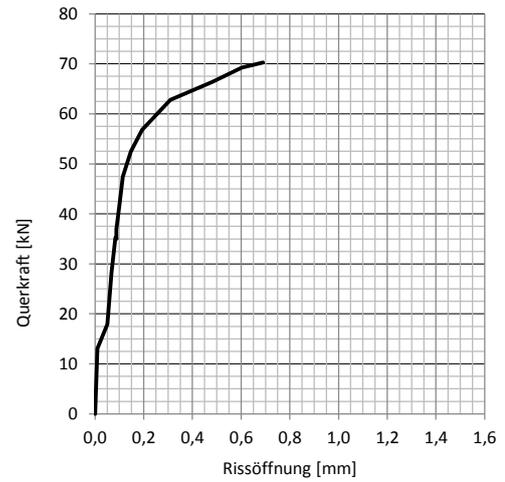
Schubslankheit  $a/d_m = 2,5$  [-]

#### UHPC:

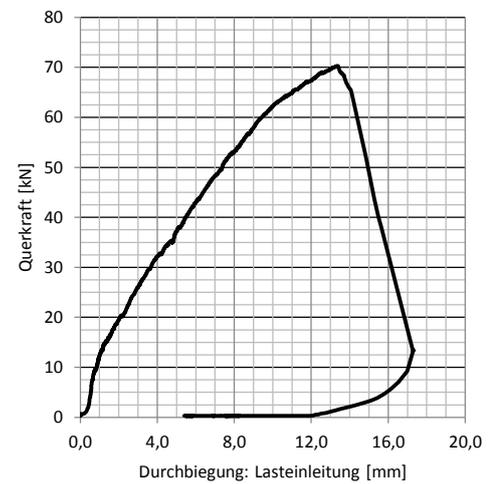
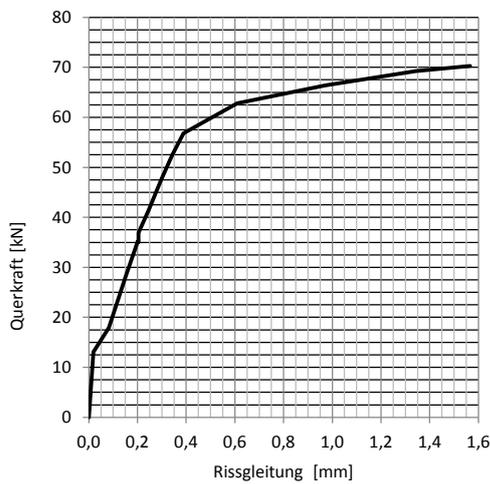
Druckfestigkeit  $f_{cm,prism} = 167,82$  [N/mm<sup>2</sup>]

Biegezugfestigkeit  $f_{ct,fl,m} = 10,54$  [N/mm<sup>2</sup>]

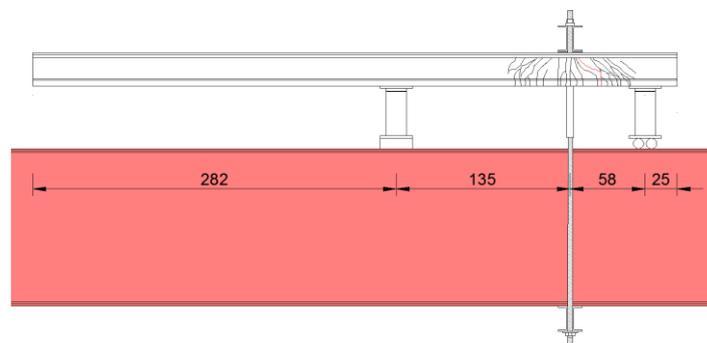
Elastizitätsmodul  $E_{c,m} = 52970$  [N/mm<sup>2</sup>]



$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR0,u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
70,33	40,76	46	13,34	0,69	1,57	Textilauszug/ Delaminieren



Rissmodellierung CAD:



Rissbild im Bruchzustand:



### V1- T08- Nr.07- L02

#### Bewehrung:

Querkraftbew. Q95/Q95CCE38  
 Biegebewehrung CFK DM10 2 [Stk]

Bewehrungsgrad  $\omega_v = 1,84$  [%]

#### Lastkonfiguration:

Abstand Last-Auflager  $a = 810$  [mm]

Statische Nutzhöhe  $d_m = 230$  [mm]

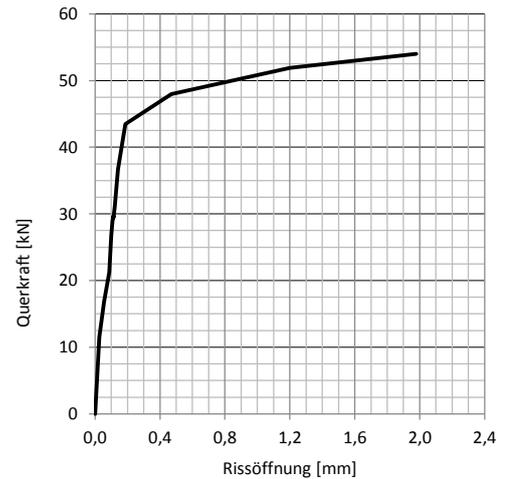
Schubslankheit  $a/d_m = 3,5$  [-]

#### UHPC:

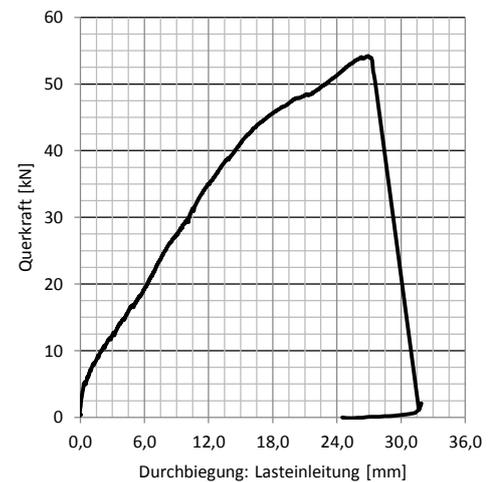
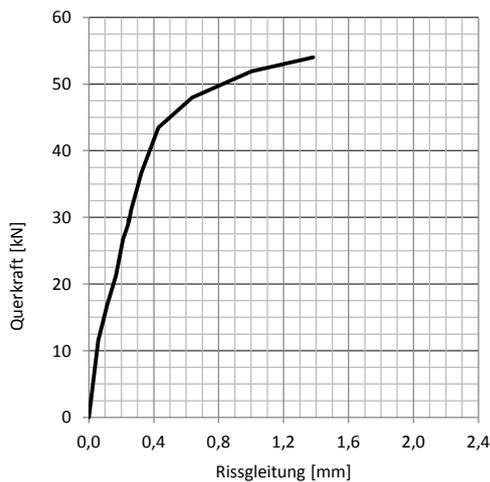
Druckfestigkeit  $f_{cm,prism} = 167,82$  [N/mm<sup>2</sup>]

Biegezugfestigkeit  $f_{ct,fl,m} = 10,54$  [N/mm<sup>2</sup>]

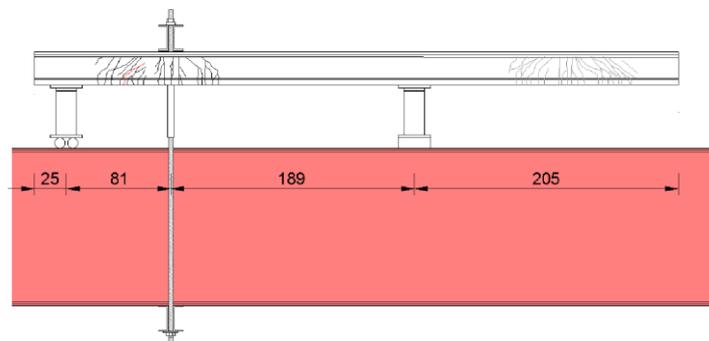
Elastizitätsmodul  $E_{c,m} = 52970$  [N/mm<sup>2</sup>]



$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR\bar{0},u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
54,21	43,91	32	26,91	1,98	1,06	Textilauszug



Rissmodellierung CAD:



Rissbild im Bruchzustand:



---

**V1- T08- Nr.08- L03**


---

**Bewehrung:**

Querkraftbew. Q95/Q95CCE38  
 Biegebewehrung CFK DM10 2 [Stk]

Bewehrungsgrad  $\omega_v = 1,82$  [%]

**Lastkonfiguration:**

Abstand Last-Auflager  $a = 920$  [mm]

Statische Nutzhöhe  $d_m = 230$  [mm]

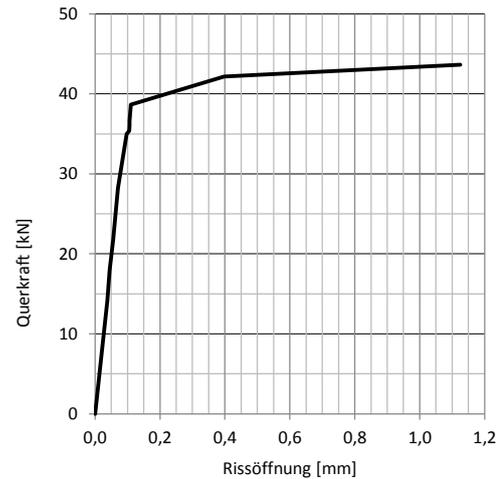
Schubslankheit  $a/d_m = 4,0$  [-]

**UHPC:**

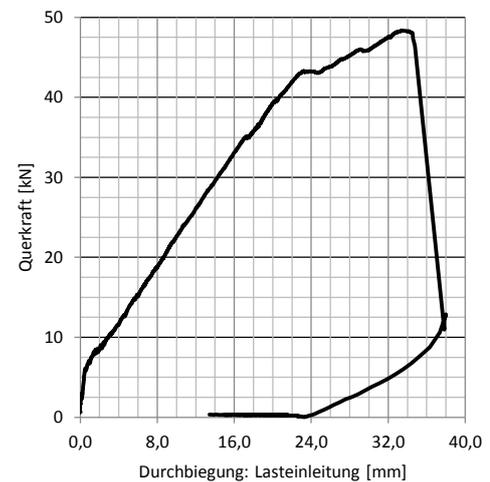
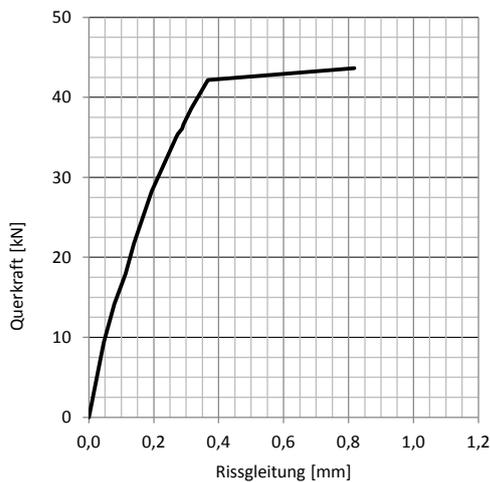
Druckfestigkeit  $f_{cm,prism} = 159,47$  [N/mm<sup>2</sup>]

Biegezugfestigkeit  $f_{ct,fl,m} = 10,48$  [N/mm<sup>2</sup>]

Elastizitätsmodul  $E_{c,m} = 53640$  [N/mm<sup>2</sup>]



$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR\dot{0},u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
48,32	44,48	47	33,41	-	-	Textilauszug

**Hinweis:**

Aufgrund des Abplatzen des Messfeldes vor dem Bruch, beschreiben die Diagramme zur Rissöffnung und Rissgleitung den Versuch nur bis zu einem Querkraftniveau von 43,65 kN (rd. 90% von  $V_u$ ).

Rissbild im Bruchzustand:



### V1- T08- Nr.08- L04

#### Bewehrung:

Querkraftbew. Q95/Q95CCE38  
 Biegebewehrung CFK DM10 2 [Stk]

Bewehrungsgrad  $\omega_v = 1,82$  [%]

#### Lastkonfiguration:

Abstand Last-Auflager  $a = 690$  [mm]

Statische Nutzhöhe  $d_m = 230$  [mm]

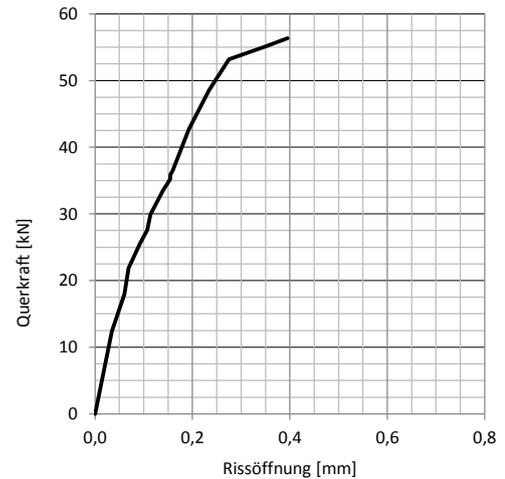
Schubslankheit  $a/d_m = 3,0$  [-]

#### UHPC:

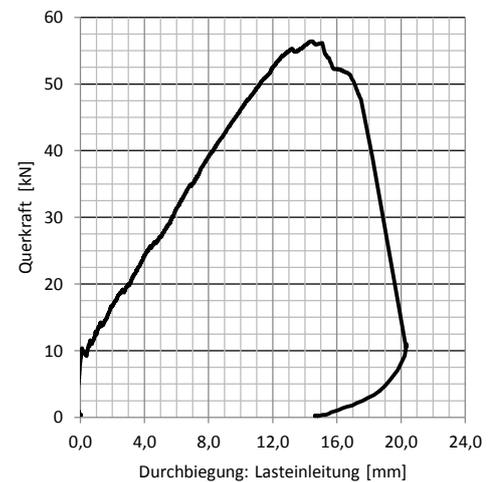
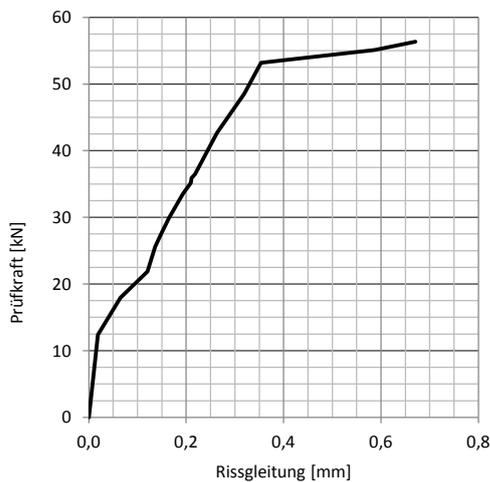
Druckfestigkeit  $f_{cm,prism} = 159,47$  [N/mm<sup>2</sup>]

Biegezugfestigkeit  $f_{ct,fl,m} = 10,48$  [N/mm<sup>2</sup>]

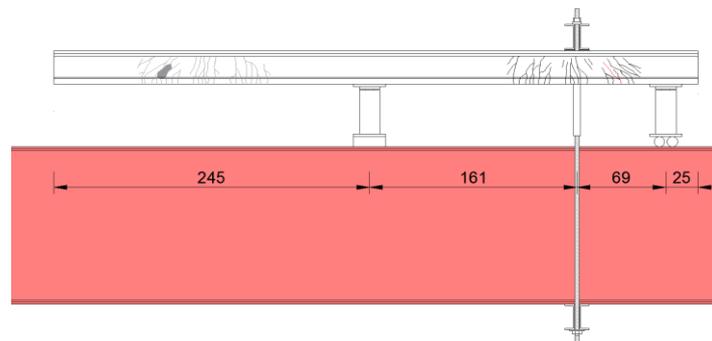
Elastizitätsmodul  $E_{c,m} = 53640$  [N/mm<sup>2</sup>]



$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR0,u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
56,40	38,92	53	14,36	0,39	0,67	Textilauszug



Rissmodellierung CAD:



Rissbild im Bruchzustand:



### B3 Deckenelemente: Querkraftversuche

#### V2- T09- Nr.09- L03

##### Bewehrung:

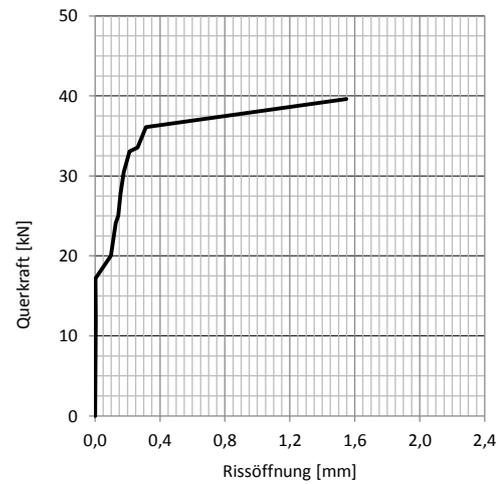
Querkraftbew.	Q45/Q45CCS20	
Biegebewehrung	Q95/Q95CCE38	
Druckbewehrung	Q95/Q95CCE38	
Bewehrungsgrad	$\omega_v = 1,16$	[%]

##### Lastkonfiguration:

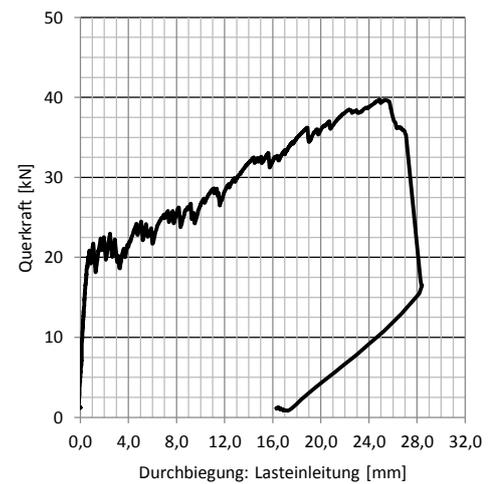
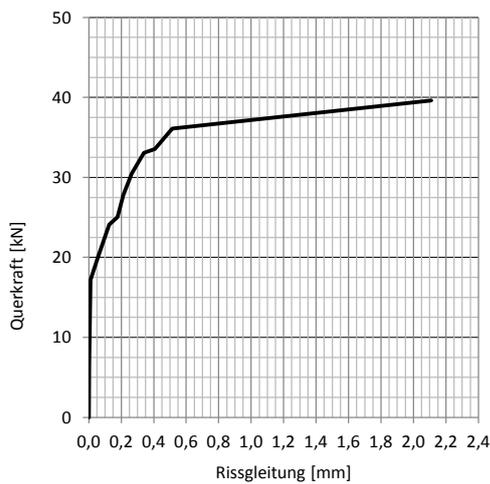
Abstand Last-Auflager	$a = 1100$	[mm]
Statische Nutzhöhe	$d_m = 276,8$	[mm]
Schubslankheit	$a/d_m = 4,0$	[-]

##### UHPC:

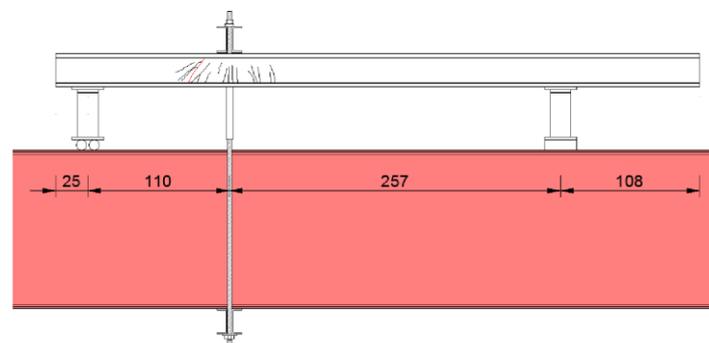
Druckfestigkeit	$f_{cm,prism} = 160,55$	[N/mm <sup>2</sup> ]
Biegezugfestigkeit	$f_{ct,fl,m} = 8,92$	[N/mm <sup>2</sup> ]
Elastizitätsmodul	$E_{c,m} = 51887$	[N/mm <sup>2</sup> ]



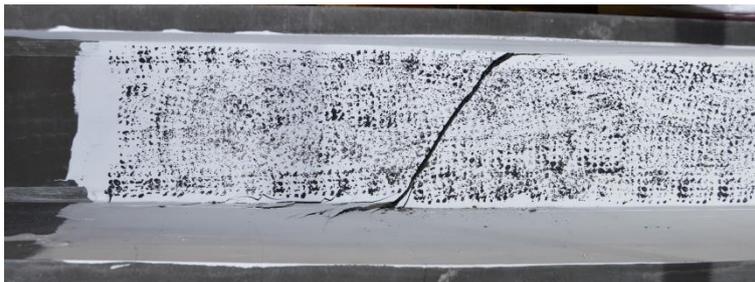
$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR\ddot{o},u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
39,71	43,69	53	24,92	1,55	2,11	Textilbruch



Rissmodellierung CAD:



Rissbild im Bruchzustand:



## V2- T09- Nr.09- L04

**Bewehrung:**

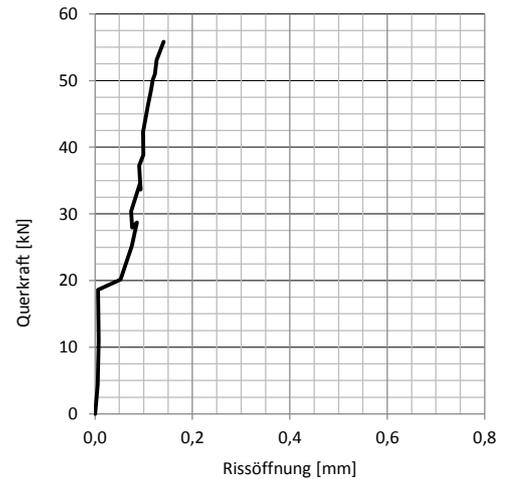
Querkraftbew.	Q45/Q45CCS20	
Biegebewehrung	Q95/Q95CCE38	
Druckbewehrung	Q95/Q95CCE38	
Bewehrungsgrad	$\omega_v = 1,16$	[%]

**Lastkonfiguration:**

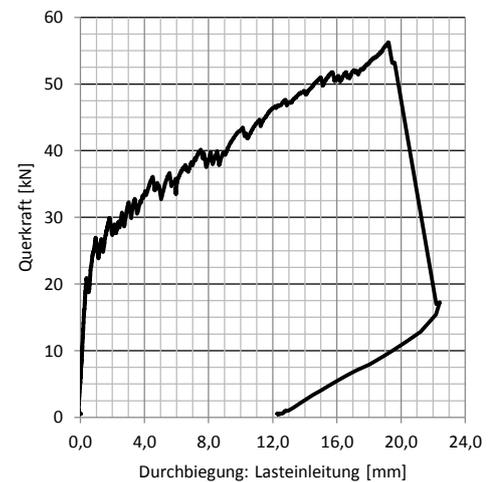
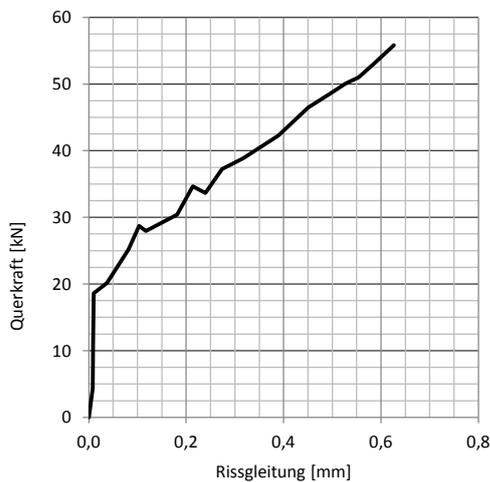
Abstand Last-Auflager	$a = 830$	[mm]
Statische Nutzhöhe	$d_m = 276,8$	[mm]
Schubslankheit	$a/d_m = 3,0$	[-]

**UHPC:**

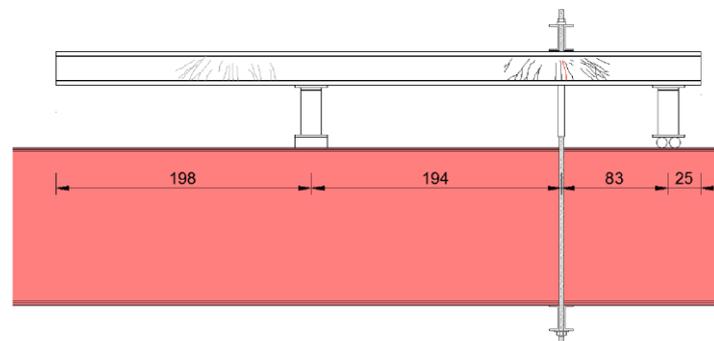
Druckfestigkeit	$f_{cm,prism} = 160,55$	[N/mm <sup>2</sup> ]
Biegezugfestigkeit	$f_{ct,fl,m} = 8,92$	[N/mm <sup>2</sup> ]
Elastizitätsmodul	$E_{c,m} = 51887$	[N/mm <sup>2</sup> ]



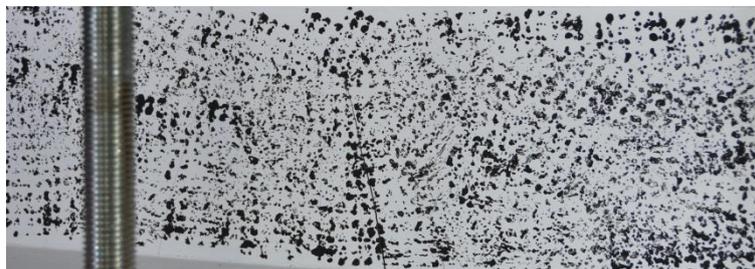
$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR\dot{0},u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
56,21	46,68	79	19,19	0,14	0,63	Biegeversagen



Rissmodellierung CAD:



Rissbild im Bruchzustand:



V2- T10- Nr.10- L03

**Bewehrung:**

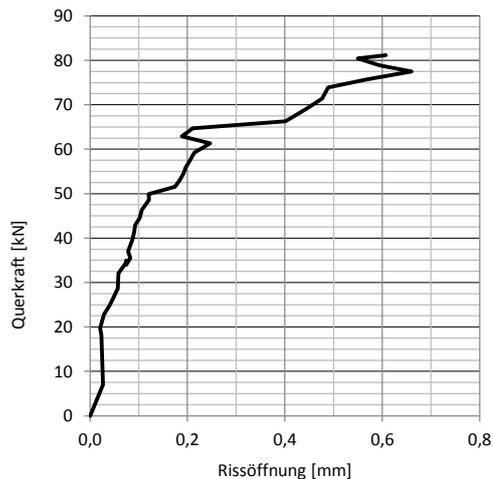
Querkraftbew.	Q95/Q95CCE38	
Biegebewehrung	Q142/Q145CCE25	
Druckbewehrung	Q142/Q142CCE25	
Bewehrungsgrad	$\omega_v = 2,52$	[%]

**Lastkonfiguration:**

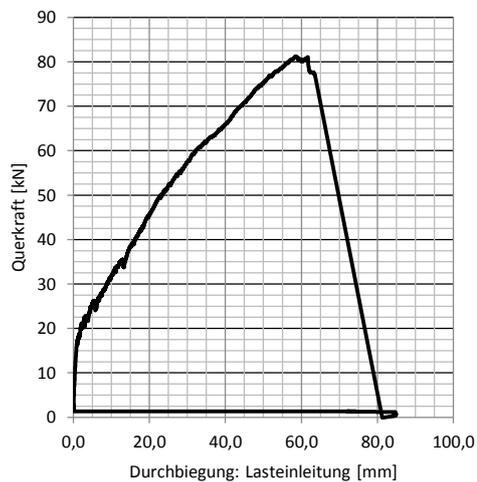
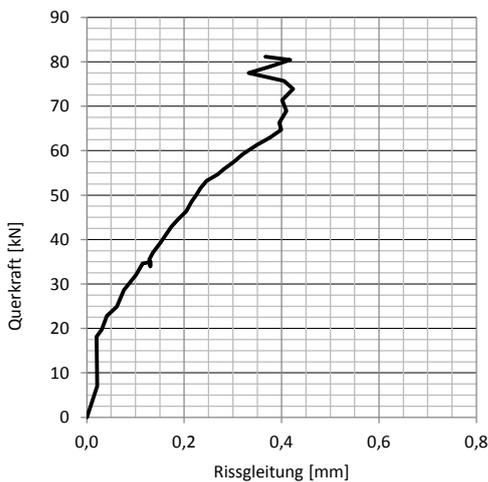
Abstand Last-Auflager	a = 1100	[mm]
Statische Nutzhöhe	d <sub>m</sub> = 276,8	[mm]
Schubslankheit	a/d <sub>m</sub> = 4,0	[-]

**UHPC:**

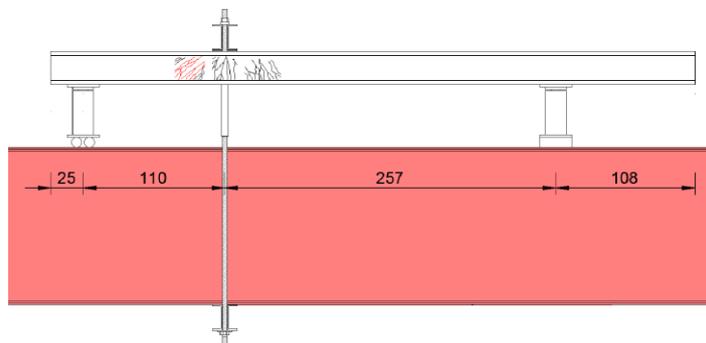
Druckfestigkeit	f <sub>cm,prism</sub> = 160,92	[N/mm <sup>2</sup> ]
Biegezugfestigkeit	f <sub>ct,fl,m</sub> = 9,86	[N/mm <sup>2</sup> ]
Elastizitätsmodul	E <sub>c,m</sub> = 51529	[N/mm <sup>2</sup> ]



V <sub>u,exp</sub> [kN]	M <sub>u,exp</sub> [kNm]	β <sub>r</sub> [°]	w <sub>u</sub> [mm]	SR <sub>0,u</sub> [mm]	SR <sub>G,u</sub> [mm]	Versagen
81,17	89,33	38	58,44	0,61	0,37	Versagen der Betondruckstrebe



Rissmodellierung CAD:



Rissbild im Bruchzustand:



V2- T10- Nr.10- L04

**Bewehrung:**

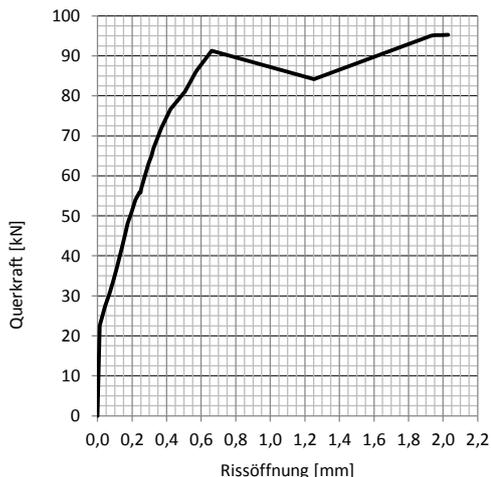
Querkraftbew.	Q95/Q95CCE38	
Biegebewehrung	Q142/Q145CCE25	
Druckbewehrung	Q142/Q145CCE25	
Bewehrungsgrad	$\omega_v = 2,52$	[%]

**Lastkonfiguration:**

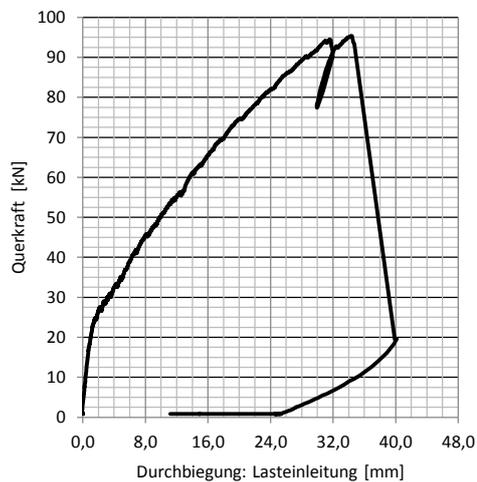
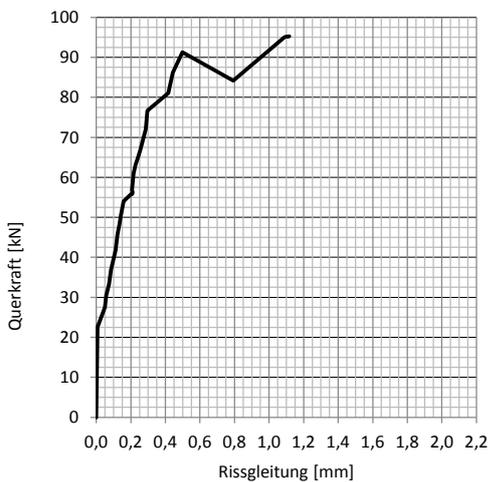
Abstand Last-Auflager	a = 830	[mm]
Statische Nutzhöhe	$d_m = 276,8$	[mm]
Schubslankheit	a/ $d_m = 3,0$	[-]

**UHPC:**

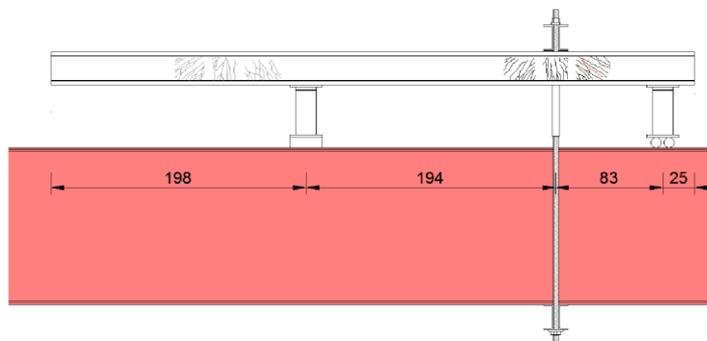
Druckfestigkeit	$f_{cm,prism} = 160,92$	[N/mm <sup>2</sup> ]
Biegezugfestigkeit	$f_{ct,fl,m} = 9,86$	[N/mm <sup>2</sup> ]
Elastizitätsmodul	$E_{c,m} = 51529$	[N/mm <sup>2</sup> ]



$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR0,u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
95,31	79,15	35	34,34	2,03	1,12	Versagen der Betondruckstrebe



Rissmodellierung CAD:



Rissbild im Bruchzustand:



V2- T11- Nr.11- L03

**Bewehrung:**

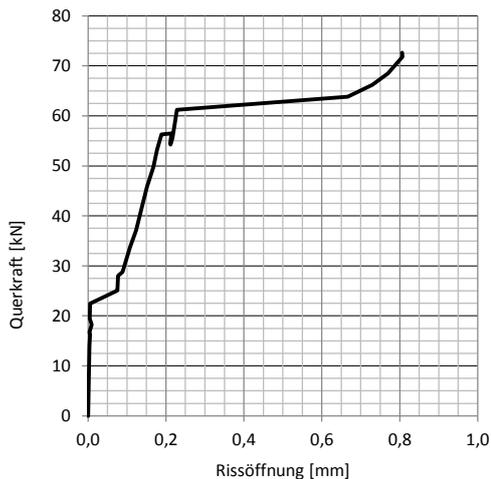
Querkraftbew.	Q142/Q142CCE38	
Biegebewehrung	Q142/Q142CCE38	
Druckbewehrung	Q142/Q142CCE38	
Bewehrungsgrad	$\omega_v = 3,30$	[%]

**Lastkonfiguration:**

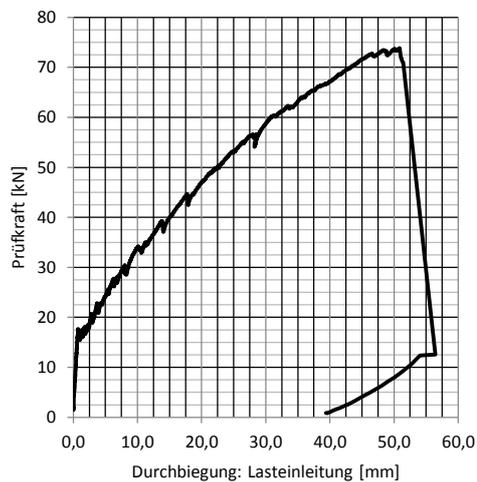
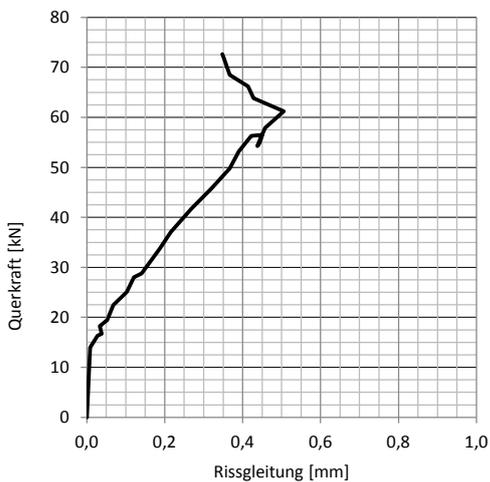
Abstand Last-Auflager	a = 1100	[mm]
Statische Nutzhöhe	$d_m = 276,8$	[mm]
Schubslankheit	a/d <sub>m</sub> = 4,0	[-]

**UHPC:**

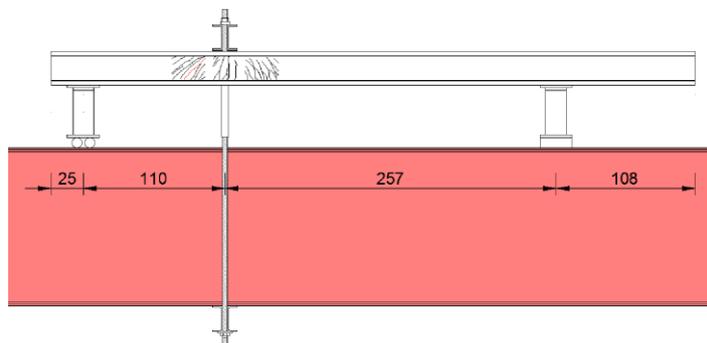
Druckfestigkeit	$f_{cm,prism} = 160,92$	[N/mm <sup>2</sup> ]
Biegezugfestigkeit	$f_{ct,fl,m} = 9,86$	[N/mm <sup>2</sup> ]
Elastizitätsmodul	$E_{c,m} = 51529$	[N/mm <sup>2</sup> ]



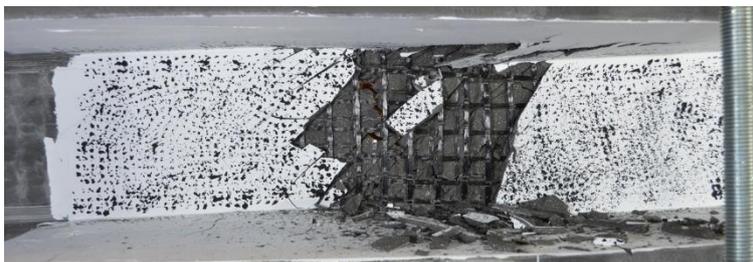
$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR\dot{0},u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
73,82	81,23	44	50,88	0,91	0,36	Versagen der Betondruckstrebe



Rissmodellierung CAD:



Rissbild im Bruchzustand:



## V2- T11- Nr.11- L04

### Bewehrung:

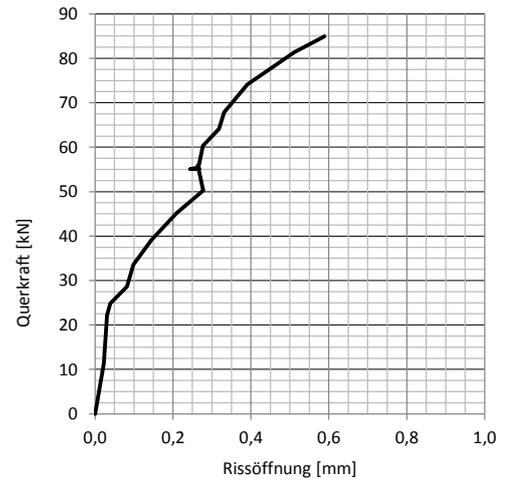
Querkraftbew.	Q142/Q142CCE38	
Biegebewehrung	Q142/Q142CCE38	
Druckbewehrung	Q142/Q142CCE38	
Bewehrungsgrad	$\omega_v = 3,30$	[%]

### Lastkonfiguration:

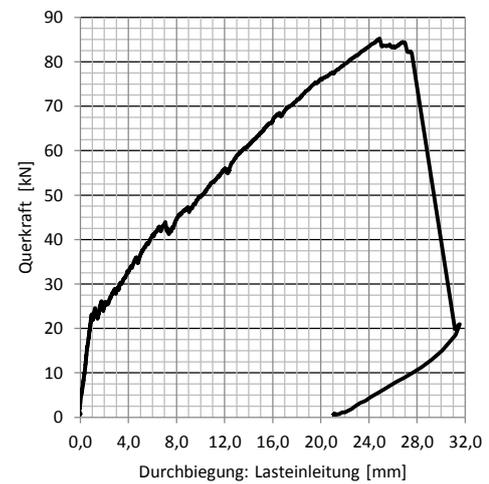
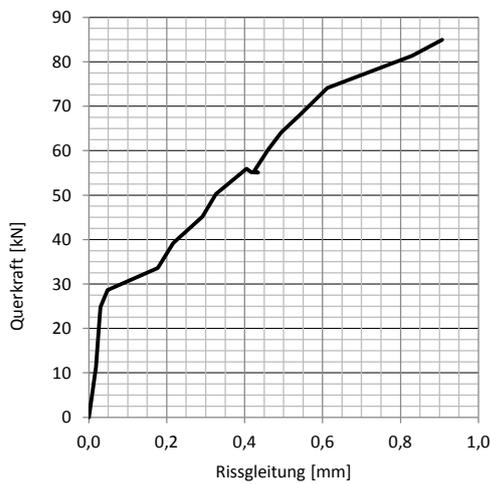
Abstand Last-Auflager	$a = 830$	[mm]
Statische Nutzhöhe	$d_m = 276,8$	[mm]
Schubslankheit	$a/d_m = 3,0$	[-]

### UHPC:

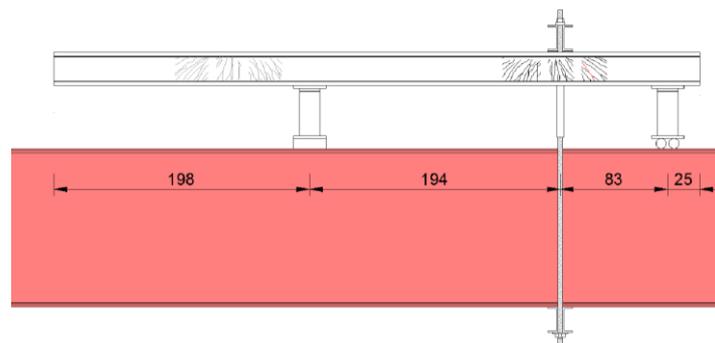
Druckfestigkeit	$f_{cm,prism} = 160,92$	[N/mm <sup>2</sup> ]
Biegezugfestigkeit	$f_{ct,fl,m} = 9,86$	[N/mm <sup>2</sup> ]
Elastizitätsmodul	$E_{c,m} = 51529$	[N/mm <sup>2</sup> ]



$V_{u,exp}$ [kN]	$M_{u,exp}$ [kNm]	$\beta_r$ [°]	$w_u$ [mm]	$SR\bar{0},u$ [mm]	$SRG,u$ [mm]	Versagen
85,16	70,72	55	24,87	0,59	0,91	Versagen der Betondruckstrebe



### Rissmodellierung CAD:



### Rissbild im Bruchzustand:

