

# ENDBERICHT

<b>FFG Projektnummer</b>	875532	<b>FörderungsnehmerIn</b>	Österreichische Bautechnik Veranstaltungs GmbH
<b>Bericht Nr.</b>	1	<b>Berichtszeitraum</b>	1.7.2019 – 30.9.2020
<b>Bericht erstellt von</b>	Michael Pauser, Nguyen Viet Tue, Bernhard Freytag, Joachim Juhart, Michael Huß, Roland Waldenhofer, Norbert Randl, Philipp Preinstorfer		

**Richtwert für den Umfang: 10-20 Seiten**

## 1. Ziele und Ergebnisse

Die antragsgemäßen Ziele sind das Schließen folgender Lücken:

- A Normative Regelungen bezüglich Materialherstellung und Bemessungsmodelle
- B Angebot an UHPC-Sorten in garantierter Qualität und die dafür notwendige Mischtechnologie
- C Know-How der Planer zur UHPC-gerechten Konstruktion von Bauwerken
- D Erfahrung der Bauunternehmer betreffend Kostenermittlung, Bauverfahren und Qualitätssicherung

Um die Ziele entsprechend **A** zu verfolgen, wurde im ersten Forschungsjahr an der Festlegung geeigneter UHPC-Sorten im AP3 und an der Erarbeitung einfacher Ingenieurmodelle zur Bemessung im AP 4 gearbeitet. Dank der Corona-bedingten Projektverlängerung um 3 Monate konnten die gesteckten Ziele erreicht werden. Es liegen nun 5 UHPC-Sorten vor, deren Herstellung umfassend erprobt wurde und deren mechanische Eigenschaften vollständig charakterisiert sind. Hinsichtlich Bemessung wurde im ersten Forschungsjahr besonderes Augenmerk auf Biegung + Längskraft bei kombinierter Bewehrung aus Fasern und Stabstahl, Ermüdung von gerissenem Faser-UHPC unter Zug, Torsion bei Trockenfugen und Verbund zwischen UHPC und Normalbeton gelegt. Als Highlight sei hier die überraschend hohe Ermüdungsfestigkeit erwähnt.

Um die Ziele entsprechend **B** zu verfolgen, wurden an praxistauglichen Prüfverfahren (AP3 und AP7) gearbeitet und ein umfangreiches Versuchsprogramm an Mischversuchen im Industrie-Maßstab gestartet (AP6). Es werden 6 unterschiedliche Mischsysteme (Mischertypen) untersucht, für die zwei unterschiedliche Mischregime erarbeitet werden. Dem Zeitplan entsprechend liegen die endgültigen Ergebnisse der Mischversuche noch nicht vor. Die Prüfverfahren und deren Auswerte-Algorithmen sind jedoch festgelegt und im Labor erprobt und werden im Zuge der Mischversuche noch in der Praxis verifiziert.

Um die Ziele entsprechend **C** zu verfolgen, wurde im ersten Forschungsjahr eine umfangreiche Recherche der bisherigen UHPC-Anwendungen weltweit durchgeführt. Daraus wurden 4 für Österreich besonders sinnvolle Anwendungsbereiche festgelegt (AP2). Diese Anwendungen bilden den Rahmen für alle Untersuchungen in diesem Projekt. Know-How zur UHPC-gerechten Konstruktion wird durch prototypische Herstellung ausgewählter Bauteile der festgelegten Anwendungsbereiche in AP5 generiert. Hier sind 5 Herstellungsversuche geplant, wovon 3 bereits in der Realisierungsphase sind, 2 noch in der Planungsphase. Die Herstellung des notwendigen Trockenmaterials und dessen Verteilung unter den mitwirkenden Industriepartnern ist bereits erfolgt. Die Ziele sind weiterhin realistisch und werden unverändert mit kleinem zeitlichen Verzug verfolgt.

Um die Ziele entsprechend **D** zu verfolgen werden einerseits die Misch- und Herstellungsversuche (AP5 und AP6) in engster Kooperation zwischen Uni- und Industriepartnern durchgeführt und andererseits weitere praxisrelevante Verarbeitungs- und Herstellungstests bei den beteiligten Bauunternehmern durchgeführt. Zb. Pumpversuche, Messung des Betonierdrucks, Verarbeitung mittels Straßenfertiger oder Herstellung einer Flachdachabdichtung aus UHPC. Das in AP7 ausgearbeitet QS-System wird bei allen Herstellungstests angewendet und verifiziert.

Alle Ziele des Vorhabens sind durch die Verlängerung weiterhin realistisch. Die bisherigen Ergebnisse deuten darauf hin, dass mit diesem Vorhaben die Voraussetzung für eine breite Anwendung von UHPC im Bereich Sanierung/Verstärkung und Neubau möglich ist.

## 2. Arbeitspakete und Meilensteine

### 2.1 Übersichtstabellen

**Erläuterung:**

Die Tabellen sind analog zum Förderungsansuchen aufgebaut.

Basistermin: Termin laut Förderungsansuchen bzw. laut Vertrag gültigem Projektplan

Aktuelle Planung: Termin laut zum Zeitpunkt der Berichtslegung gültiger Planung

**Tabelle 1: Arbeitspakete**

AP Nr.	Arbeitspaket Bezeichnung	Fertigstellungsgrad	Basistermin		Aktuell		Erreichte Ergebnisse / Abweichungen
			Anfang	Ende	Anfang	Ende	
1	Projektmanagement und wissenschaftliche Leitung	50 %	07/19	06/21	07/19	09/21	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Projektabwicklung</li> <li>- Kickoff Meeting</li> <li>- Zwischensitzung</li> <li>- Sicherstellung Projektfortschritt</li> </ul>
2	UHPC Anwendungen	60 %	07/19	09/19	05/20	12/20	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Analyse zu weltweiten UHPC Anwendungen</li> <li>- Gruppierung und Festlegung der UHPC Anwendungen</li> <li>-----</li> <li>- Aufschub der Arbeiten der UNI Innsbruck in das 2. Projektjahr</li> </ul>
3	UHPC Sorten	95 %	07/19	12/19	07/19	09/20	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Auswertung der internationalen Normen und Regelwerke</li> <li>- Definition von 5 UHPC Sorten</li> <li>- Entwicklung, Festlegung und Anwendung der Prüfmethode, (Frisch- und Festbeton)</li> <li>- Experimentell Ermittlung der Faserorientierung in den Prüfkörpern</li> <li>- Sammlung von Daten zur Streuung von Festigkeitswerten</li> </ul>
4	Bemessungsmodelle	50 %	10/19	03/20	10/19	04/21	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sicherheitskonzept teilweise</li> <li>- Erstellen von Werkstoffgesetzen</li> <li>- Bemessungskonzept für überwiegende Druckbeanspruchung</li> <li>- Bemessungsmodell Zug und Biegung mit Faser-Stabstahl-Kombination fast fertig, Verifikationsversuche (I-Träger) geplant (Versuchskörper bereits hergestellt)</li> <li>- Datenbank zum Verbundverhalten von UHPC</li> <li>- Eigene Verbundversuche</li> <li>- Planung, Durchführung und Auswertung von Ermüdungsversuchen</li> <li>- Modell für Torsion bei klaffender Trockenfuge in Arbeit (Modellversuch durchgeführt)</li> <li>- Faserorientierungszustände</li> <li>-----</li> <li>- Mit Ausnahme der ergänzenden I-Trägerversuche sind alle Daten und Versuchsergebnisse da. Die</li> </ul>

							Weiterverarbeitung zu validierten Bemessungsmodellen ist für mehrere Versagensformen noch erst fertigzustellen.
5	Herstellungstechnologie	30 %	1/20	06/20	01/20	10/20	- Planung größtenteils abgeschlossen. ----- - Durchführung in Kombination mit Mischversuchen - Umsetzung des Versuchsplans in Q4 2020 und Q1 2021
6	Misch- und Fördertechnik	50 %	04/20	09/20	01/20	12/20	- Rezepturenentwicklung für die Mischversuche abgeschlossen - Herstellung der Trockenpremixes abgeschlossen - 5 von 5 Mischversuchen durchgeführt - Pumpversuch durchgeführt ----- Die Auswertung erfolgt plangemäß im Folgejahr
7	QS-System	60 %	07/20	12/20	01/20	06/21	- Zusammenstellung und Entwicklung erforderlicher Maßnahmen für ein QS-System und deren Umfang sowie Tests im Labor ----- - Vorgezogen in das 1. Projektjahr
8	Auswertung und Empfehlung	20 %	10/20	06/21	01/20	09/21	Mit den Arbeiten wurde vorgezogen begonnen.

Ergänzend zu Tabelle 1 ist nachstehend der aktuell geplante Verlauf des gesamten Projekts dargestellt. Dieser dient der besseren Veranschaulichung der aktuellen Terminplanung. Er beinhaltet einerseits die durch COVID-19 entstandenen Verzögerungen andererseits auf Erkenntnissen, die durch die weiterführenden Planungen entstanden sind.

**Tabelle 2: Aktueller Zeitplan für das Gesamtprojekt**

AP Nr.	Arbeitspaket Bezeichnung	Q3 2019	Q4 2019	Q1 2020	Q2 2020	Q3 2020	Q4 2020	Q1 2021	Q2 2021	Q3 2021
1	Projektmanagement und wissenschaftliche Leitung									
2	UHPC Anwendungen									
3	UHPC Sorten									
4	Bemessungsmodelle									
5	Herstellungstechnologie									
6	Misch- und Fördertechnik									
7	QS-System									
8	Auswertung und Empfehlung									

Basierend auf den Ausführungen in Tabelle 1 und Tabelle 2 lassen sich folgende wesentliche Änderungen in der Arbeits- und Zeitplanung gegenüber dem Förderungsansuchen zusammenfassen:

- Fertigstellung des AP 2 (UHPC Anwendung) ist mit Ende Q4 2020 geplant. Dies beruht auf der teilweisen Verschiebung der Arbeiten der UNI Innsbruck in das 2. Projektjahr.
- Die Durchführung des AP 4 (Bemessungsmodelle) wird nach hinten verlängert, um alle Erkenntnisse der anderen Arbeitspakete berücksichtigen zu können.

- Die Durchführung von AP 5 (Herstellungstechnologie) und AP 6 (Misch und Fördertechnik) wird simultan erfolgen. Durch die Mischversuche werden große Mengen an UHPC produziert, welche anschließend für die Herstellungsversuche verwendet werden. Somit werden sinnvolle Synergieeffekte genutzt.
- Arbeiten zum QS-System sind teilweise in das 1. Projektjahr vorgezogen worden und kompensieren die teilweise Verschiebungen im AP2.
- Die Durchführung des AP 8 (Auswertung und Empfehlungen) wurde wie AP4 vorzeitig gestartet
- Gibt es (abseits der oben dargestellten Terminalsituation) Veränderungen im Arbeitsplan oder in der Methodik?

x	NEIN	Abgesehen von der bereits bewilligten kostenneutralen Verlängerung sind keine wesentlichen Veränderungen zu erwarten.
	JA	

## 2.2 Beschreibung der im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten

### AP 1 Projektmanagement

Die Abwicklung des Projekts wurde koordiniert, kontrolliert und dokumentiert.

### AP 2 Definition funktionaler und herstellungstechnischer Anforderungen neuer UHPC Anwendungen

(Bearbeitung IBB)

Es wurden Recherchen zu weltweit realisierten UHPC-Projekten durchgeführt. Die Vorhaben wurden in Anwendungsgruppen eingeteilt und hinsichtlich Bauverfahren, Materialeigenschaften und Bemessungsverfahren analysiert. Ebenso wurden Vorteile, die durch die Verwendung von UHPC entstehen, aufgezeigt. Vom Gesamtkonsortium wurden folgende für das Projekt relevante Anwendungsgruppen festgelegt:

- Vorgefertigte Erzeugnisse aus UHPC mit untergeordneten statischen Anforderungen
- Konstruktive Fertigteile
- UHPC als Aufbeton (sowohl als Verstärkung als auch im Neubau)
- Ortbetonverstärkungen

Je Anwendungsgruppe wurden ausgewählte Anwendungsbeispiele näher beschrieben. Die Sammlung und Auswertung von Daten ist noch in Bearbeitung.

### AP 3 Definition von UHPC-Sorten und deren Werkstoffanforderungen

(Bearbeitung IBB, LKI, IMBT)

Es wurden internationale Normen und Richtlinien begutachtet. Aufgrund deren Entwicklungsstandard und zugrundeliegenden Forschungsergebnisse wurden folgenden Werke als wesentlich hinsichtlich einer möglichen Übertragung ihrer Inhalte eingestuft:

- Frankreich: NF P 18-710, NF P 18-470 und NF P 18-451
- Schweiz: SIA-Merkblatt 2052
- Deutschland: DAfStb-Richtlinie Ultrahochfester Beton (Teil 0 – Teil 3) - Entwurf

Basierend auf einer Evaluierung der angeführten Standards sowie der in Österreich verfügbaren und gebräuchlichen Prüfeinrichtungen (Input Industriepartner), wurde ein Konzept zur Prüfung der UHPC Eigenschaften ausgearbeitet.

Besondere Bedeutung ist der Prüfmethode zur Bestimmung der Zugtrageigenschaften von UHPRFC zuzuschreiben. Die zentrische Nachrisszugfestigkeit ist die wichtigste Festigkeitsgröße des zugbeanspruchten UHPFRC. Sie wird zumeist anhand von Biegezugversuchen indirekt abgeleitet. Zur Wahl eines geeigneten Prüfverfahrens samt Probekörpergeometrie und Herstellungsverfahren wurde ein umfangreiches experimentelles Versuchsprogramm durchgeführt (siehe Tabelle 3). Insgesamt wurden 152 Platten hergestellt, worin die Abhängigkeit von Prüfkörpergeometrie, Herstellungsmethode, Faserlänge, Fasergehalt und Größtkorn auf die Faserorientierung und die Zugtragfähigkeit in 4 – Punkt – Biegezugversuchen untersucht wurde. Die gesammelten Daten sollen in weiterer Folge zur Klassifizierung des UHPC beitragen. In Abbildung 2 und Abbildung 3 sind Ergebnisse zur Bestimmung der Faserorientierung und der Tragfähigkeit gesammelt dargestellt.

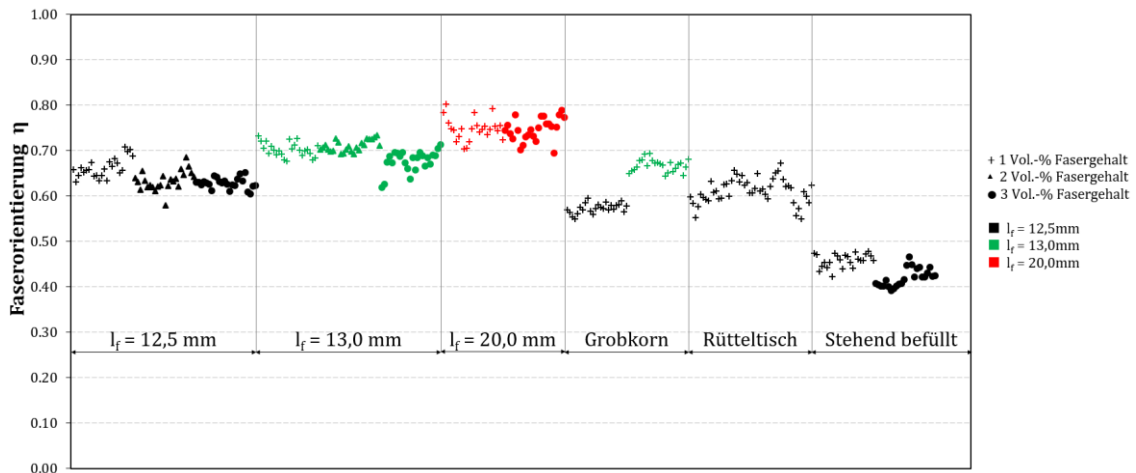
**Tabelle 3: Versuchsprogramm**

Nr.	Faser- gehalt [Vol.-%]	Faser l/d	Konsistenz	Größtkorn	4-Punkt-Biegezugversuche		
					Platten 150x50x550mm (liegende Herstellung)	Platten 150x50x550mm (stehende Herstellung)	Platten 450x450x50mm
1	1	12.5/0.192	scc	1mm	x		x
2	2	12.5/0.192	scc	1mm	x		x
3	3	12.5/0.192	scc	1mm	x		x
4	1	13/0.16	scc	1mm	x		
5	2	13/0.16	scc	1mm	x		
6	3	13/0.16	scc	1mm	x		
7	1	20/0.3	scc	1mm	x		x
8	3	20/0.3	scc	1mm	x		x
9	1	12.5/0.192	scc	8 mm	x		x
10	1	13/0.16	scc	8 mm	x		
11	1	12.5/0.192	F52	1mm	x		
12	1	12.5/0.192	F52	1mm	x		
13	1	12.5/0.192	scc	1mm		x	
14	3	12.5/0.192	scc	1mm		x	
15	0		scc.	8 mm	x		x
16	0		scc	1mm	x		x

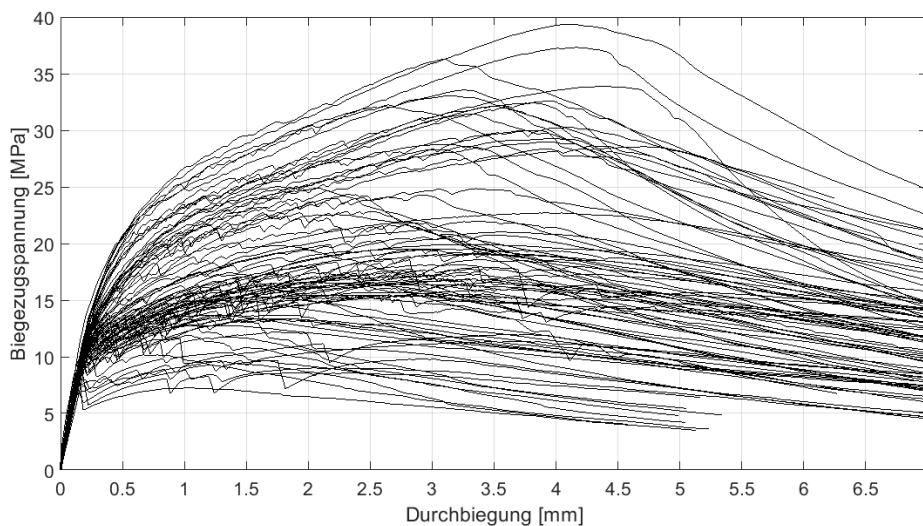


**Abbildung 1: Herstellung der Probekörper, Bestimmung der Faserorientierung und Prüfung des**

**Tragverhaltens**



**Abbildung 2: Faserorientierung in Längsrichtung der Platten (150x50x550 mm)**



**Abbildung 3: Ergebnisse aller Biegezugversuche an Platten (150x50x550) in Form von Biegezugspannung-Durchbiegungs-Kurven**

Ein weiterer Bestandteil des AP 3 ist die Festlegung der Prüfmethode hinsichtlich Verarbeitbarkeit, mechanischen und Dauerhaftigkeitseigenschaften. Die dazu ausgewählten Prüfverfahren zu den wesentlichsten Materialkennwerten sind nachstehend in einer Kurzbeschreibung zusammengefasst.

Prüfmethode - Frischbetoneigenschaften:

Die Konsistenz des UHPC wird mit dem Ausbreitmaß nach EN 12350-5 ermittelt. Abweichend von der Norm wird die Unterlagsplatte trocken anstatt matt-feucht verwendet. Bei selbstverdichtendem UHPC wird das Fließmaß und die Fließzeit  $t_{500}$  nach EN 12350-8 oder ÖBV Richtlinie für Selbst- und Leichtverdichtbarer Beton (SCC und ECC) bestimmt. Das Fließmaß wird in allen Fällen nach Stabilisierung des Betonflusses gemessen. Die Prüfung des Luftgehalts erfolgt nach EN 12350-7 und jene zur Frischbeton-Rohdichte nach EN 12350-6.

Für UHPC mit Größtkorn kleiner 4 mm können zur Bestimmung von Ausbreitmaß, Luftgehalt und Frischbeton-Rohdichte alternativ die Mörtelprüfverfahren nach EN 1015 angewendet werden. Für selbstverdichtendem UHPC kann EN 1015-3 angewendet werden, wobei das Fließmaß und die Fließzeit  $t_{200}$  ohne Hübe auf trockener Glasplatte ermittelt wird.

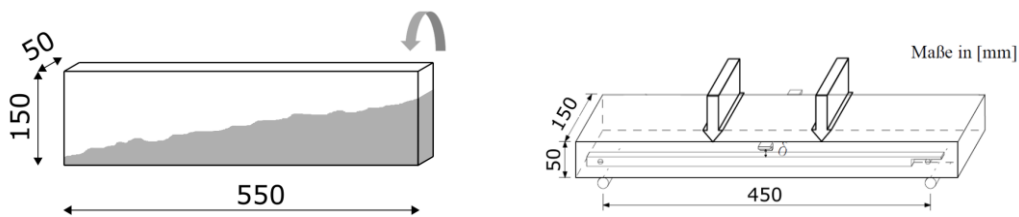
Die Homogenität des Frischbetons wird bei jeder Konsistenzbestimmung anhand des Ausbreitkuchens visuell kontrolliert. Die Sedimentationsstabilität wird anhand eines Betonprobekörpers gemäß Anhang 3 der

ÖBV Richtlinie für Selbst- und Leichtverdichtbarer Beton (SCC und ECC) nachgewiesen. Alternativ dazu können Bohrkern an entsprechenden Punkten an einem Versuchsbauteil (mock up) oder am Bauwerk entnommen werden. Die Homogenität bzw. Faserverteilung kann auch anhand des Stahlfasergehalts in 3 Frischbetonproben beurteilt werden. Die Teilproben werden dabei aus dem ersten, zweiten und dritten Drittel einer vorher bestimmten Gesamtmenge (zB. Ladung eines Fahrmischers) entnommen.

**Prüfmethoden - Festbetoneigenschaften:**

Die Zylinder und Würfeldruckfestigkeit wird gemäß EN 12390-3 im Prüfkörperalter von 28 Tagen bestimmt. Als Referenzprobekörper gelten Würfel mit einer Kantenlänge von 100 mm sowie Zylinder mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 200 mm. Der Elastizitätsmodul wird gemäß EN 12390-13 an Zylindern mit einem Durchmesser von 100 mm bestimmt. Für UHPC mit Größtkorn kleiner 4 mm dürfen alternativ Prismen mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls herangezogen werden.

Zur Prüfung des Zugtragverhaltens werden 4 - Punkt - Biegezugversuche durchgeführt, wobei die Kraft – Durchbiegungs – Beziehung aufgezeichnet wird. Die Abmessungen der Probekörper betragen 150 x 50 x 550 mm. Die Spannweite beträgt 450 mm wobei die Lasteinleitung in den Drittelpunkten erfolgt. Die Platten werden um ihre Längsachse um 90° gedreht hergestellt. Der UHPC wird bei selbstverdichtenden und nahezu selbstverdichtenden Eigenschaften von einer Seite aus in die Formen gefüllt. Der UHPC fließt somit von einer Seite zur anderen. Das Einbringen von Verdichtungsenergie ist hierbei verboten. Bei einer nicht selbstverdichtenden Konsistenz werden die Probekörper ebenso von einer Seite aus befüllt, jedoch ist während der Befüllung das Einbringen von Verdichtungsenergie erlaubt. Die Verwendung von Innenrüttler ist nicht zugelassen.



**Abbildung 4: Herstellung und Prüfung von Platten zur Bestimmung des Zugtragverhaltens**

Das Gesamtschwinden wird mittels Schwindrinnen aus U-förmigen Edelstahlprofilen mit einem Querschnitt von 60 x 100 mm und einer Messlänge von 1000 mm ermittelt. Die unbehinderte Längenänderung wird auf einer Seite anhand eines beweglichen Stempels gemessen. Die Messung wird ab Erstarrungszeit bis zu einem Alter von 90 Tagen durchgeführt. Für UHPC mit Größtkorn kleiner 4 mm können alternativ Querschnitte von 60 x 40 mm verwendet werden. Die Lagerung der Probekörper erfolgt bei Normklima 20°C / 65 % RF. Sie sind 24 Stunden vor Austrocknung zu schützen.

Die Haftzugfestigkeit wird gemäß EN 1542 geprüft. Die kapillare Wasseraufnahme wird an zylindrischen Scheiben mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Dicke von mindestens 20 mm bzw. mindestens das Dreifache des Größtkorns getestet. Es wird der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient ausgewertet.

**UHPC - Sorteneinteilung:**

Basierend auf den dargestellten Untersuchungsergebnissen und unter Berücksichtigung der Anforderungen von UHPC Anwendungen wurde eine Sorteneinteilung vorgenommen, siehe Tabelle 4. Diese ist grundsätzlich hinsichtlich der max. Gesteinskörnungsgröße unterteilt. Darin sind je Sorte die Mindestanforderungen hinsichtlich Nachrisszugtragverhalten, Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul angeführt.

**Tabelle 4: UHPC Sorten und Mindestanforderungen**

UHPC-Sorten	Feinkorn-UHPC			Grobkorn-UHPC	
	FN	FM	FH	GN	GM
Nachrisszugfestigkeit $f_{ctu}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	> 4	> 7	> 10	-	> 4
Druckfestigkeit $f_{ck}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	> 130	> 130	>130	> 150	>150

E-Modul $E_{cm}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	>42.000	> 42.000	> 42.000	> 48.000	> 48.000
---------------------------------------	---------	----------	----------	----------	----------

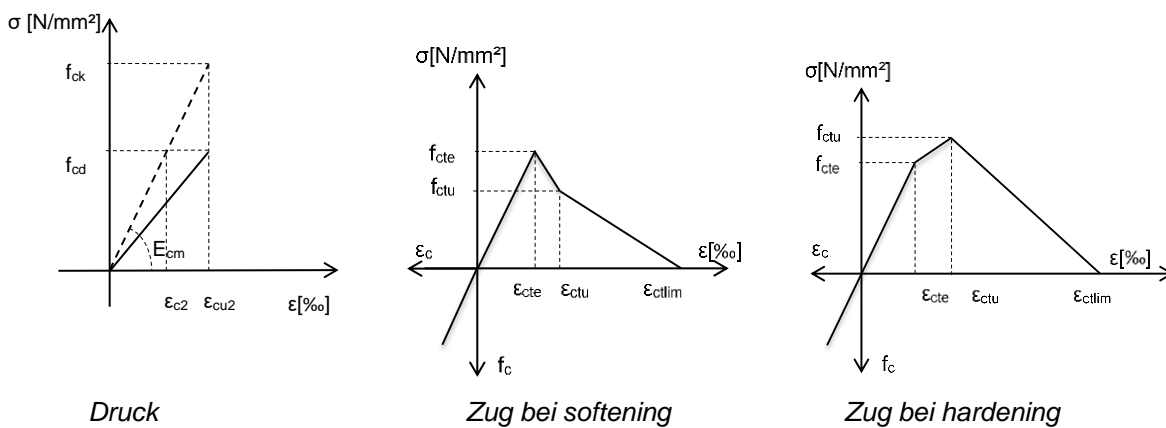
### AP 4 Bemessung von UHPC-Bauteilen

#### Sicherheitskonzept (IBB, LKI)

Ein wesentliches Merkmal des erarbeiteten Sicherheitskonzepts ist, dass der Faserorientierungsbeiwert  $E_{ta}$  als geometrische Größe und nicht als statistische Größe (Streuung) bei der Ermittlung der Nachrisszugfestigkeit Eingang findet.

Die eigentliche Streuung der Nachrisszugfestigkeit wird durch statistische Auswertung der in AP3 durchgeführten Biegezugversuche im 2. Forschungsjahr ermittelt werden.

Der aktuelle Stand der bei der Bemessung zu verwendeten Werkstoffgesetze ist wie folgt:



#### Biegung mit und ohne Längskraft (LKI, IBB)

Die anfängliche Analyse der bestehenden Bemessungsmodelle anderer Richtlinien bzw. Literatur auf Biegung und Längskraft hat ergeben, dass besonderes Augenmerk auf den Bemessungswert der Dehnung im Bruchzustand zu legen ist. Von diesem Wert hängt es ab, ob die Zugtragfähigkeit der Fasern und des Stabstahls gleichzeitig wirken und somit ohne Abschläge addiert werden dürfen.

Experimentelle Ergebnisse zeigen, dass die Nachrisszugfestigkeit nicht direkt proportional mit zunehmendem Fasergehalt steigen. Theoretische Analysen ergeben, dass die zur Nachrisszugfestigkeit zugeordnete Dehnung mit zunehmendem Fasergehalt kleiner sein muss. Zur Verifikation dieses Sachverhalts wurden Balkenversuche geplant (siehe unten)

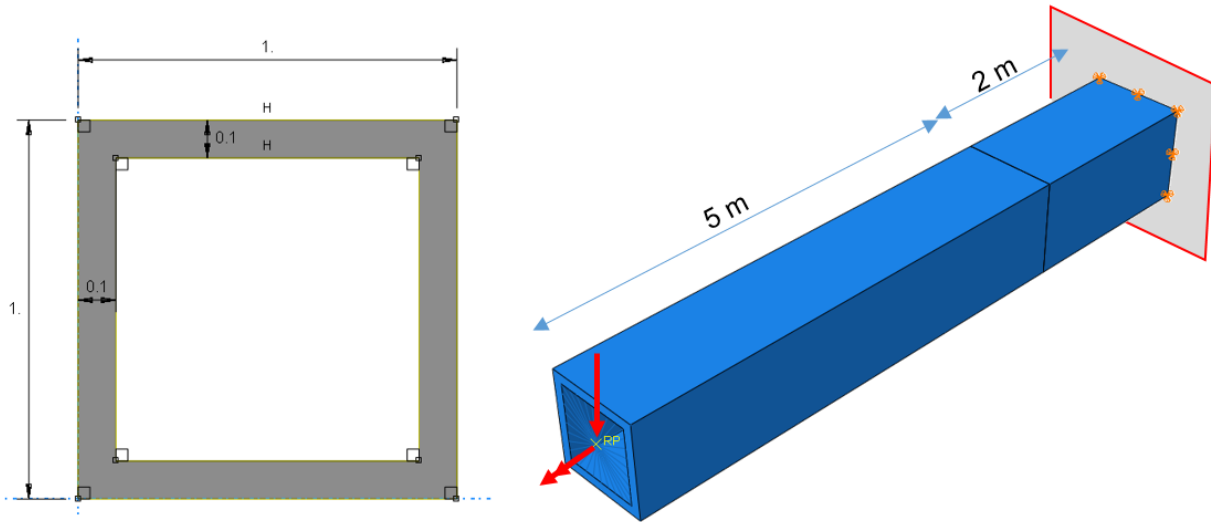


Abbildung 5: Versuchskörperabmessungen (links) und Probekörpererstellung (rechts).



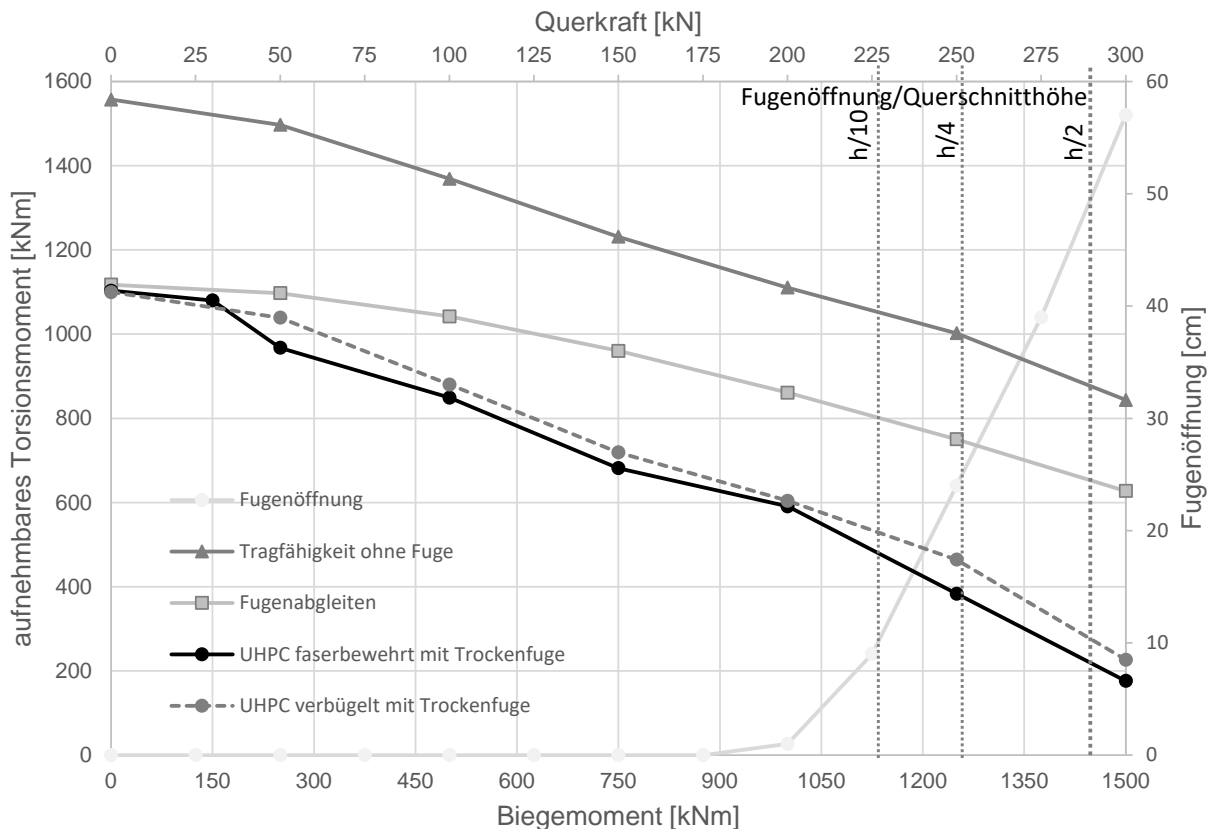
**Torsion bei Trockenfugen (LKI)**

Wenn sich Trockenfugen von bei Balken mit geschlossenem, dünnwandigem Querschnitt infolge Biegebeanspruchungen öffnen verändert sich der Torsionswiderstand im Fugenbereich drastisch. Um diesen Bemessungsfall sorgfältig beschreiben zu können, wurden mechanisch analytische, numerische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Es zeigt sich, dass die Störung durch die klaffende Fuge sehr schnell abklingt, und dass das Reibungsversagen in der Fuge nur in ganz seltenen Fällen maßgebend wird. Die hohe mehrachsige Beanspruchung des fugennahen UHPCs an der Wurzel der Fugenöffnung entpuppt sich als theoretischer Versagensmechanismus (siehe Abbildung unten)

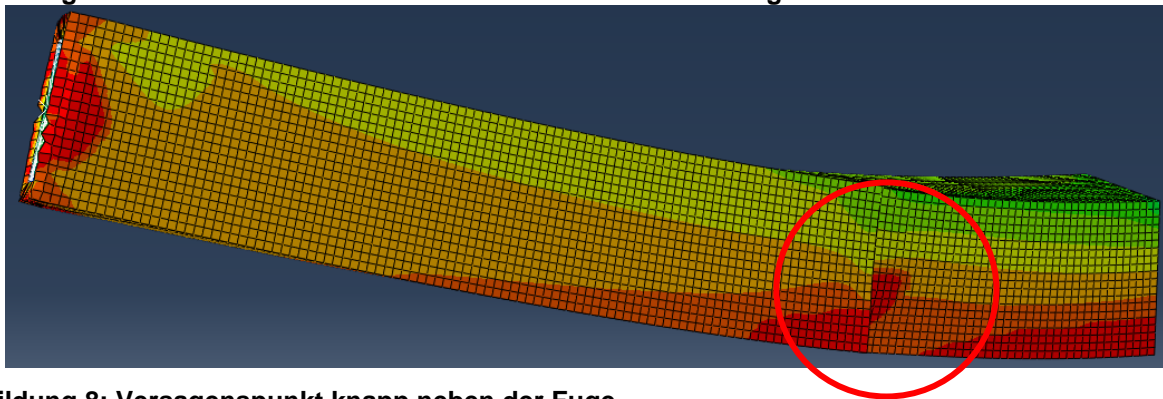


**Abbildung 6: Abmessungen untersuchter Kastenquerschnitt**

**TORSIONSTRAGFÄHIGKEIT BEI SICH ÖFFNENDER FUGE AM DÜNNWANDIGEN KASTENQUERSCHNITT**



**Abbildung 7: Studie des Einflusses der sich öffnenden Trockenfuge**



**Abbildung 8: Versagenspunkt knapp neben der Fuge**

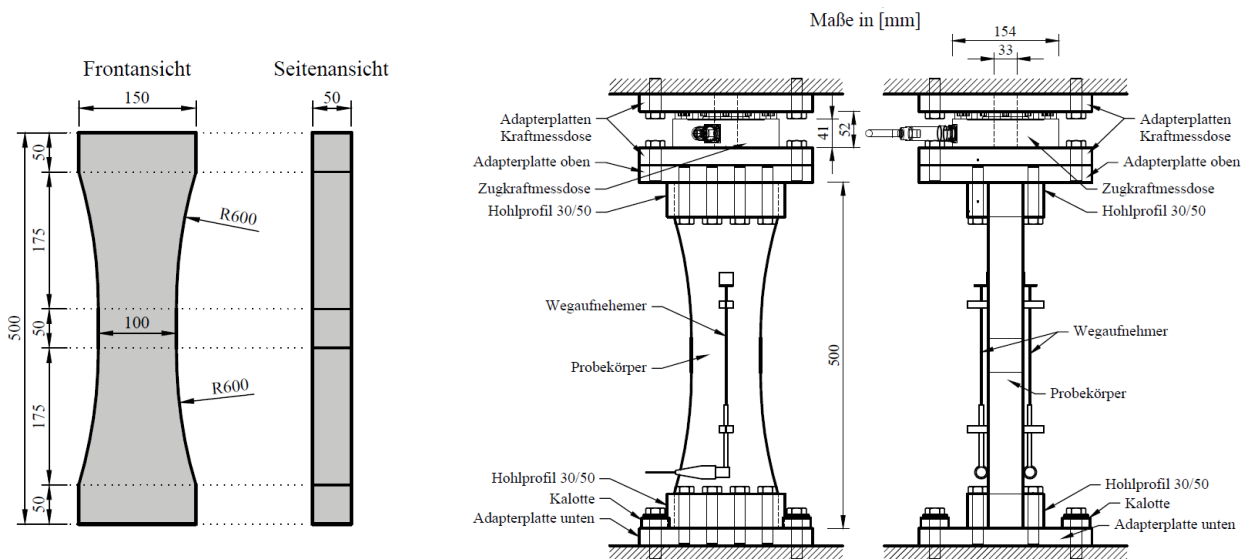
Wenn es die Projektressourcen zulassen, wird dieses Ergebnis noch experimentell nachgewiesen. Für die Torsionsbemessung wird im 2. Forschungsjahr ein Ingenieurmodell zur Aufteilung der Schubkräfte auf jene Querschnittsteile, bei denen die Fuge geschlossen bleibt, aus den vorliegenden Ergebnissen abgeleitet.

Ermüdung von gerissenem UHPFRC unter Zugbeanspruchung (TU-Wien)

Das Ermüdungsverhalten von UHPFRC unter Zugschwellbeanspruchung wurde an zwei unterschiedlichen Feinkorn-Mischungen untersucht.

Die Versuchskörper wurden als ungekerbte prismatische Plattenstreifen mit zur Mitte sich verjüngendem Querschnitt konzipiert. Die Dimensionierung des Plattenstreifens mit dem Umriss 150x500x50 erfolgte in Anlehnung an die für die Biegezuguntersuchung in AP3 verwendete Probekörpergeometrie. Zusätzlich erfolgte eine Verjüngung der Proben, dessen Dimensionierung an das Schwerpunktprogramms SSP 1182 in Deutschland<sup>1</sup> angelehnt wurde (siehe Abbildung 9 links).

Für die Versuchsdurchführung der Ermüdungsversuche wurde darauf geachtet eine rein axiale Beanspruchung aufzubringen. Die Probekörper wurden dazu an ihren jeweiligen Stirnseiten an Stahlplatten geklebt. Nach dem Aushärten wurde der Probekörper über die obere Stahlplatte an die Prüfmaschine gehängt, wobei etwaige Ungenauigkeiten über Futterbleche ausgeglichen wurden. Im Anschluss erfolgte die Befestigung am Prüfmaschinenboden direkt über Gewindestangen, deren Ankerkopf auf Kalotten gelagert wurde (siehe Abbildung 9 rechts).



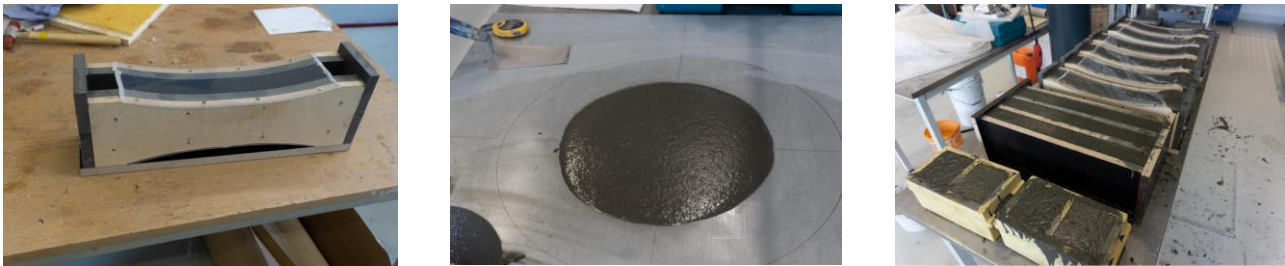
**Abbildung 9 Versuchskörperabmessungen (links) und Versuchsaufbau (rechts).**

Die Herstellung der Probekörper erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Forschungsbereich für Baustofflehre

<sup>1</sup> Birol Fitik, "Ermüdungsverhalten von ultrahochfestem Beton (UHPC) bei zyklischen Beanspruchungen im Druck-Zug-Wechselbereich" (doctoral thesis, Technische Universität München, 2012).

und Werkstofftechnologie der TU Wien. Vorab wurden die Schalungen mit einer CNC-Fräse hergestellt, um eine möglichst hohe Genauigkeit zu gewährleisten (siehe Abbildung 10 links). Die Herstellung des UHPFRC erfolgte in einem Intensivmischer. Es wurden zwei unterschiedliche Betonrezepturen, Sorte FM und FH verwendet. Diese unterscheiden sich im Wesentlichen durch den verwendeten Fasergehalt (1,5% und 2,5%). Die Rezeptur ist in AP6 ersichtlich. Insgesamt wurden zwei Serien (Sorte FM und FH) mit jeweils zwölf Probekörpern hergestellt. Die Herstellung pro Serie erfolgte anteilmäßig gleich in zwei Chargen. Zusätzlich wurden für jede Charge mehrere Probekörper zur begleitenden Bestimmung der Materialeigenschaften betoniert (siehe Abbildung 10 rechts):

Nach Herstellung des Frischbetons erfolgte die Überprüfung der Konsistenz mittels Hägermann-Konus, wobei ein Setzfließmaß im Bereich 250-280mm angestrebt wurde. Diese wurde bei allen Chargen erreicht (siehe exemplarisch dazu Abbildung 10 Mitte) Die Nachbehandlung nach Einbringen des Betons erfolgte durch Abdecken mit Folien. Die Probekörper wurden anschließend nach 24h ausgeschalt und bis zum Zeitpunkt des Prüfens in einer Klimakammer bei konstanter Raumtemperatur von 20°C und einer relativen Raumfeuchte von 60% gelagert.



**Abbildung 10: Herstellung der Versuchskörper: Schalung (links), Überprüfen des Setzfließmaßes mittels Hägermann-Konus (Mitte) und Einfüllen des Betons in die Schalung (rechts).**

Insgesamt wurden je Serie (Sorte FM und FH) mit jeweils 10 Versuchskörpern dynamisch getestet. Zusätzlich wurden je Serie 2 statische Zugversuche durchgeführt, um die Zugtragfähigkeit zu bestimmen. Für die Prüfung des Ermüdungsverhaltens wurden die Versuchskörper vorab soweit belastet, dass ein Riss entsteht (precracking). Im Anschluss erfolgte die Aufbringung der eigentlichen Ermüdungsbeanspruchung, wodurch die Fasern im Riss auf Ermüdung beansprucht werden. Die Ermüdungsbeanspruchung wurde variiert, um den Zeitfestigkeitsverlauf abbilden zu können, wobei die Unterlast konstant mit 5 kN gewählt wurde und nur die Oberlast entsprechend angepasst wurde.

Die Oberlast der Ermüdungsbeanspruchung wurde in Relation zur Bruchlast, welche vorab je Charge an einem statischen Zugversuch ermittelt wurde (siehe Tabelle 5), angesetzt. Bei der Festlegung der Oberlast je Versuchskörper wurde versucht eine Zeitverlaufskurve abzubilden. Die Durchführung der Ermüdungsversuche erfolgte mit einer Frequenz von 10Hz bis es entweder zum Versagen der Probe gekommen ist, oder die Grenzlastwechselzahl von  $2 \cdot 10^6$  erreicht wurde. Sofern dies der Fall war, wurde anschließend noch die Resttragfähigkeit der Probe anhand eines statischen Zugversuchs ermittelt. Zusätzlich wurde für den letzten Probekörper die Lastwechselzahl erhöht, um den weiteren Verlauf der Zeitfestigkeitsgerade über  $2 \cdot 10^6$  Lastwechsel hinaus zu überprüfen. In Tabelle 6 sind die zusammengefassten Ergebnisse der Serie FM ersichtlich.

**Tabelle 5: Zugfestigkeit je Charge ermittelt an statischen Zugversuchen.**

Probekörperbezeichnung	Betoniercharge	max. aufnehmbare Zugkraft	
		$F_{t,FM} / F_{t,FH}$	Zugfestigkeit <sup>1</sup>
		[kN]	$f_{ct,FM} / f_{ct,FH}$
			[kN/mm <sup>2</sup> ]
S2 FM	Charge 1 (FM)	48,2	9,6
S3 FM	Charge 2 (FM)	49,5	9,9
S4 FH	Charge 3 (FH)	52,5	10,5

<sup>1</sup>bezogen auf die schwächste Querschnittsfläche der Probekörper 100 x 50mm = 5000mm<sup>2</sup>

**Tabelle 6: Ergebnisse der Ermüdungsversuche für UHPC-Sorte FM.**

Probekörperbezeichnung	Vorbelastung (pre-cracking) [kN]	Bezogene Oberlast [%]	Bezogene Unterlast [%]	statische Resttraffähigkeit	Ertragene Lastwechsel [kN]
D1 FM 603	-	60 (28,9 kN) <sup>1</sup>	10,4 (5,0 kN) <sup>1</sup>	DL	48

D2 FM 60 PC	44	60 (28,9 kN) <sup>1</sup>	10,4 (5,0 kN) <sup>1</sup>	373113	-
D3 FM 40 PC	45	40 (19,3 kN) <sup>1</sup>	10,4 (5,0 kN) <sup>1</sup>	DL	46
D4 FM 50 PC	40,4	50 (24,1 kN) <sup>1</sup>	10,4 (5,0 kN) <sup>1</sup>	DL	46
D5 FM 70 PC	49,6	70 (34,7 kN) <sup>2</sup>	10,1 (5,0 kN) <sup>2</sup>	131601	-
D6 FM 55 PC	53,1	55 (27,2 kN) <sup>2</sup>	10,1 (5,0 kN) <sup>2</sup>	515701	-
D7 FM 50 PC	52,3	50 (24,8 kN) <sup>2</sup>	10,1 (5,0 kN) <sup>2</sup>	DL	50
D8 FM 52,5 PC	51,2	52,5 (26,0 kN) <sup>2</sup>	10,1 (5,0 kN) <sup>2</sup>	1055501	-
D9 FM 50 PC <sup>4</sup>	49,3	50 (24,8 kN) <sup>2</sup>	10,1 (5,0 kN) <sup>2</sup>	3162751	-

PC – bis zur Erstrissfestigkeit vorbelastete Probekörper (*pre-cracking*)

DL – Versuch nach  $2 \cdot 10^6$  Lastwechsel abgebrochen (Durchläufer)

<sup>1</sup> Bezugs-Zugtragfähigkeit der Charge 1 der FM-Rezeptur  $F_{t,FM} = 48,2$  kN

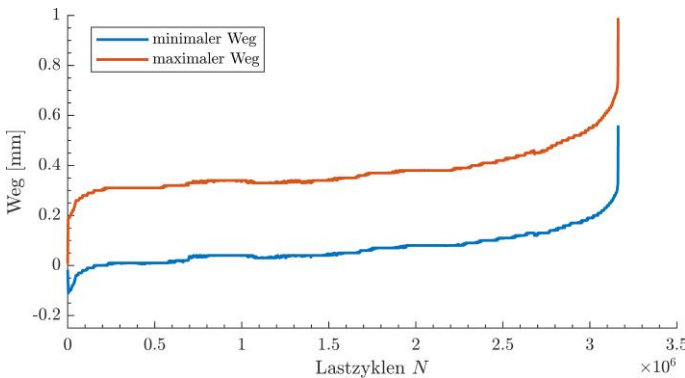
<sup>2</sup> Bezugs-Zugtragfähigkeit der Charge 2 der FM-Rezeptur  $F_{t,FM} = 49,5$  kN

<sup>3</sup> Versuch D1 FM 60 ohne *pre-cracking* durchgeführt

<sup>3</sup> Versuch D9 FM 50 PC ohne Lastwechselobergrenze durchgeführt

- Verformungsverhalten und Schädigungsverlauf

Der Schädigungsverlauf der Probekörper lässt sich anhand des Verformungsverhaltens ablesen. In Abbildung 11 ist die Verformungsmessung (Maschinenweg min/max) während der Prüfung von D9 FM 50 PC abgebildet. Gut zu erkennen sind die drei charakteristischen Phasen – Phase I Rissentstehung, Phase II Rissfortschritt und Phase III instabiles Risswachstum. Im Vergleich zu normalfesten Betonen sind für UHPFRC in diesem Fall Phase I und III weniger stark ausgeprägt.



**Abbildung 11 Verformungsverhalten während eines Ermüdungsversuches (D9 FM 50 PC).**

- Bruchbilder

Beim Vergleich der Bruchbilder lassen sich Unterschiede in Abhängigkeit der Ermüdungsbeanspruchung erkennen. Bei höherer Oberlast ist bei visueller Begutachtung ein hoher Anteil an ungerissenen, gebogenen Fasern und Abplatzungen des Betons erkennbar, was darauf schließen lässt, dass das Versagen durch Faserauszug induziert ist (siehe Abbildung 12 links, Effekt des Snubbing<sup>2</sup>). Bei kleiner Ermüdungsbeanspruchung hingegen ist ein höherer Anteil an gerissenen Fasern zu sehen. Zusätzlich sind rötliche Verfärbungen im Beton und an den gerissenen Fasern zu sehen, die auf eine reibinduzierte Korrosion (Tribokorrosion<sup>2</sup>), die zu einem Bruch der Fasern führt, schließen lässt. Die glatte Fläche Abbildung 12 rechts lässt auf den Ort der Rissentstehung schlussfolgern, wohingegen die rauere Fläche die Restbruchfläche beschreibt.



<sup>2</sup> Tohru Makita and Eugen Brühwiler, "Tensile fatigue behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)," *Materials and Structures* 47, no. 3 (2014).

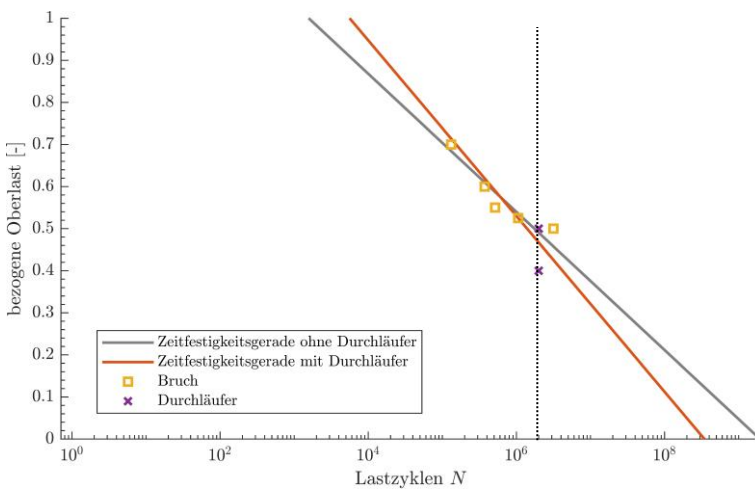
**Abbildung 12: Bruchbild: D5 FM 70 PC (links) und D9 FM 50 PC (rechts)**

- Zeitverlaufsfestigkeit

Die bestimmten Ermüdungsfestigkeiten der Serie FM sind nachfolgend in einem halblogarithmischen S-N (Bezogene Oberlast/Lastwechselzahl) Diagramm aufgetragen; Abbildung 13. Der Zeitfestigkeitsverlauf kann mit einer Regressionsgerade angenähert werden.

$$\log N = \log C - k \cdot S \tag{1}$$

Im Folgenden werden zwei Zeitfestigkeitsgeraden angegeben, wobei für erstere nur jene Versuche herangezogen werden, in denen ein Ermüdungsversagen bei  $N < 2 \cdot 10^6$  auftrat und im zweiten Fall alle Versuche herangezogen werden. Tendenziell ist eine Abflachung ab einer bezogene Oberlast  $S=50\%$  erkennbar, die auf das annähernde Erreichen der Dauerschwingfestigkeit schließen lässt.

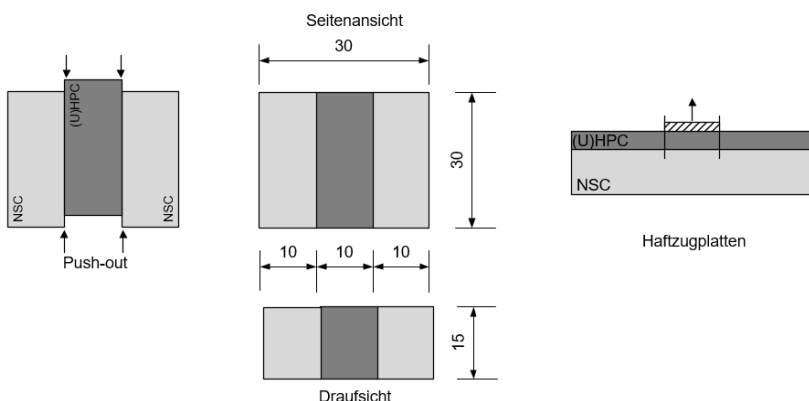


**Abbildung 13: Zeitfestigkeitsverlauf angenähert durch eine Regressionsgerade (Sorte FM)**

Verbund zwischen UHPC und Normalbeton (FH-Kärnten)

In diesem Forschungsjahr wurden bereits vorhandene Versuche aus der Literatur zur Untersuchung der Schubfuge in einer Datenbank zusammengefasst. Sie umfasst ca. 300 Versuche mit hoch- und ultrahochfesten Aufbetonen und ca. 200 Versuche mit normalfesten Aufbetonen auf hochfestem Untergrund. Ganzheitliche systematische Testserien auf internationaler Ebene sind derzeit nicht verfügbar, jedoch zahlreiche Einzelstudien die auf bestimmte Parameterkonfigurationen fokussieren.

Weiter erfolgte die Planung, Herstellung und Testung von ergänzenden Versuchskörperreihen zur Evaluierung der Verbundfuge zwischen Normalbeton und UHPC als Aufbeton und UHPC und Normalbeton als Aufbeton (Setup gem. Abbildung 14). Dazu wurden sogenannte Push-Out Körper (Abscherprismen mit vertikaler Fuge) und Haftzugplatten hergestellt und getestet. Die Haftzugfestigkeiten korrespondieren relativ gut mit den Ergebnissen aus den Push-Out Versuchen. Frühzeitige Brüche im Untergrund liefern zumindest eine untere Schranke für die Verbundfestigkeit der Fuge.



**Abbildung 14: Probekörperformen zur Untersuchung der Tragfähigkeit in Verbundfugen**

In Tabelle 7 sind die Push-Out Probekörper (Abscherprismen mit vertikaler Fuge) mit den unterschiedlichen Aufrauungsmethoden aufgelistet.

**Tabelle 7: Variation der hergestellten Push Out Kleinkörperversuche**

Verbundfuge	Aufrauungsmethode	Anzahl	Serie
<p>NSC   UHPC</p> 	sandgestrahlt	9	1
	Rechen	6	2
	Besenstrich	3	2
	wassergestrahlt	9	2
NSC   UHPC	wassergestrahlt	15	3
<p>UHPC   NSC</p> 	Oberflächenverzögerer	9	4

Zur Vorbereitung der Verbundfuge wurden die NSC Grundkörper durch Sandstrahlen, (Druck)Wasserstrahlen oder mechanische Bearbeitung aufgeraut. Die Aufrauung der UHPC Grundkörper erfolgte mittels Einsatz eines Oberflächenverzögerers, der auf die Schalung innenseitig vor der Betonage aufgetragen wurde. Nach dem Ausschalen (ca. 24h nach Betonage) wurde die Oberfläche mit einem Wasserstrahl abgespritzt. Die Würfeldruckfestigkeit (150mm) des NSC betrug generell ca. 50 N/mm<sup>2</sup>. Beim UHPC wurden Würfeldruckfestigkeiten (100mm) um die 170 N/mm<sup>2</sup> erreicht. In Serie 3 wurden Fasern mit 5 mm Länge verwendet. Fasergeometrie und Fasergehalt ist in Tabelle 8 ersichtlich. Die Messung der Rautiefe erfolgte, wie in Abbildung 15 dargestellt, mit dem Sandflächenverfahren nach Kaufmann.



**Abbildung 15: Rauigkeitsmessung mittels Sandflächenverfahren (links) und mechanische Aufrauung mittel Rechen (rechts)**

- Test-Setup

Bei den Versuchskörpern handelt es sich um dreiteilige Prismen mit einer Gesamtgrundfläche von 30 cm x 15 cm und einer Höhe h= 30 cm (Abbildung 14). Die Versuchskörper wurden durch vertikale Fugen in drei gleichartige Segmente geteilt. Die Dimensionen der einzelnen Abschnitte der Versuchskörper betragen im Grundriss 10 cm x 15 cm bei einer Höhe h= 30 cm. Die Push-Out Probekörper (Abscherprismen mit vertikaler Fuge) wurden an einer hydraulischen Presse (Abbildung 16) unter symmetrischer Lasteinleitung geprüft. Die Versuchskörper wurden hierzu auf 2 cm breiten Stahlplatten gelagert. Die Lasteinleitung in die Prüfkörper erfolgte entlang der Prüfkörperachse weggesteuert mit 0,25 mm/min.



**Abbildung 16: Test-Setup für Push-Out Tests (links), Push-Out Probekörper Bruch (mitte), Bruchbild der Serie 1 (rechts)**

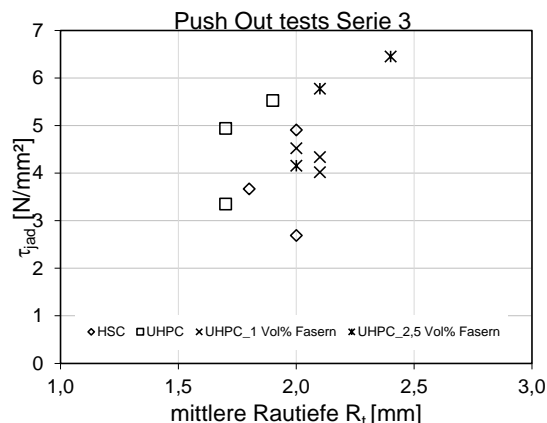
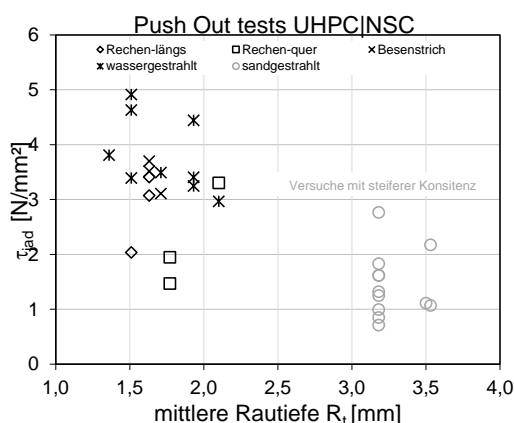
- Push-Out Versuchsergebnisse

Bei der Herstellung der Serie 1 war die Konsistenz des verwendeten UHPC mit einem gemessenen Ausbreitmaß von 26 cm weniger fließfähig bzw. etwas steifer als in den folgenden Serien. Dadurch war der Verbund zwischen NSC und UHPC Aufbeton in dieser Serie deutlich geringer, die Verbundwerte lagen teilweise unter jenem Niveau das mit NSC-Aufbeton und gleicher Aufrauung zu erwarten gewesen wäre und zeigten zudem große Streuungen. Die Verbundfestigkeiten, gelistet in Tabelle 8, erreichten im Mittel 1,4 N/mm<sup>2</sup>. An dem Bruchbild in Abbildung 16 ist zu erkennen, dass durch die steifere Konsistenz des UHPC kein ausreichender Verbund mit dem NSC Unterbeton erreicht wurde.

Die wesentliche Schlussfolgerung aus dieser Versuchsserie ist, dass der Verbund sensitiv auf die UHPC-Konsistenz reagiert und eine relativ fließfähige Konsistenz (hier: Ausbreitmaß mind. 30 cm gem. EN 1015-3:2007 05 (Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch)) wesentliche Voraussetzung zur Erreichung hoher Verbundfestigkeiten mit UHPC ist.

Bei der Serie 2 wurde die Oberfläche der Grundkörper auf unterschiedliche Weisen vorbehandelt. Der UHPC Aufbeton war fließfähiger mit einem Ausbreitmaß von 29 cm. Die erreichten Verbundschubspannungen waren deutlich höher und entsprechen Kennwerten wie sie bereits auch für hochfeste Aufbetone erreicht wurden. Die Probekörper mit der Aufrauungsmethode „Rechen längs“ erreichten im Mittel 2,8 N/mm<sup>2</sup>, die Serie mit „Rechen-quer“ lag im Mittel bei 2,2 N/mm<sup>2</sup>, die Oberfläche mit „Besenstrich“ erreichte im Mittel 3,4 N/mm<sup>2</sup> und die Verbundwerte der Serie mit wassergestrahelter Oberfläche erreichten 3,8 N/mm<sup>2</sup>. Der Verbundfestigkeit mit wassergestrahelter Oberfläche war durch die gleichmäßig gute Aufrauung und Verzahnungswirkung am besten. Die mechanische Aufrauungsmethode mittels Rechen (insbesondere quer) und einer Altbetonoberfläche mit schmalen Furchen führte zu größeren Streuungen und etwas schlechterem Verbund zwischen normalfestem Grundbeton und UHPC Aufbeton. Die Oberflächenbehandlung mittels Besenstrich liefert zwar etwas niedrigere Verbundwerte als die wassergestrahelte Oberfläche, die Werte lagen aber im obersten Bereich der mit Rechen erzielten (der Bruch erfolgte in der Verbundfuge wie in Abbildung 17 ersichtlich).

Bei den Versuchskörpern mit wassergestrahelter Oberfläche verlief das Versagen häufig von der Verbundfuge versetzt im NSC. Der limitierende Faktor für die Verbundfestigkeit ist in diesem Fall der niederfestere NSC Grundbeton.

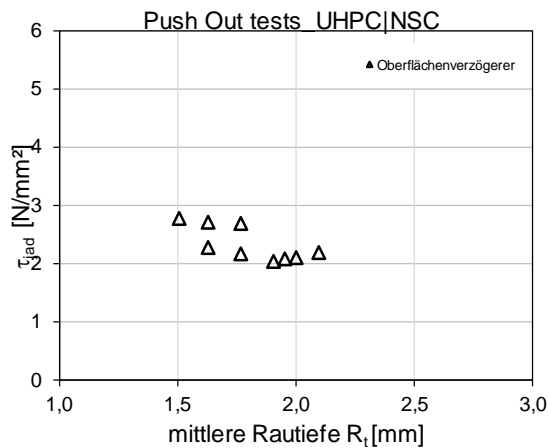




**Abbildung 17: Verbundwerte Serien 1, 2 (oben links), Verbundwerte Serie 3 (oben rechts) und Bruchbilder Serie 2 (Rechen quer/längs, Besenstrich, wassergestrahlt)**

Bei der Serie 3 wurden die Aufbetonfestigkeit und der Fasergehalt wie in Tabelle 8 ersichtlich variiert. Eine Versuchsreihe wurde mit HSC Aufbeton hergestellt. Die zweite wurde mit UHPC ohne Fasern betoniert. Bei der dritten Versuchsreihe war der Fasergehalt des UHPC 1,0 Vol.% und bei der vierten 2,5 Vol.%. Die Ergebnisse sind in Abbildung 17 dargestellt. Die erreichten Fugenschubspannungen sind im Vergleich zur Serie 2 höher. Ein Grund dafür ist offensichtlich die höhere Betonqualität des NSC Untergrundbetons. Der UHPC mit 2,5 Vol.% Fasern erreichte im Mittel die höchsten Verbundwerte.

Bei der Serie 4 wurde der Verbund zwischen UHPC Grundbeton und normalfestem Aufbeton untersucht. Die Herstellung einer geeigneten Oberflächenstruktur bei UHPC ist vergleichsweise schwieriger zu erreichen, da unter anderem das Größtkorn des UHPC viel kleiner ist als das des NSC. Bei den betonierten Probekörpern wurde die Rauigkeit mit Hilfe eines Oberflächenverzögerers und nachträglichem Wasserstrahlen wie vorab beschrieben hergestellt. Die gemessenen Rautiefen lagen im Mittel bei 1,8 mm. Das Größtkorn der UHPC Rezeptur war hierbei 2 mm. Ein geringerer Größtkorndurchmesser ist für die Herstellung einer geeigneten Rauigkeit (mind. ca. 1,5 mm mittlere Rautiefe) problematisch. Es kann dann die Möglichkeit einer geschalteten Oberflächenprofilierung (in Anlehnung an den EC 2) genutzt werden. Die Messung der Rauigkeit erfolgte durch das Sandflächenverfahren. Durch die Stahlfasern an der Betonoberfläche des UHPC wurde die Messung der Rauigkeit mittels Sandflächenverfahren erschwert. Die Versuchsergebnisse lagen im Mittel bei einer Verbundfestigkeit von 2,3 N/mm<sup>2</sup> wie in Abbildung 18 dargestellt.



**Abbildung 18: Fugenschubspannung (links) und Bruchbild der Serie 4 (rechts)**

- Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

**Tabelle 8: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse**

Probe Nr.	Aufrauungsmethode	Rauigkeit [mm]	Unterbeton [N/mm <sup>2</sup> ]	Aufbeton [N/mm <sup>2</sup> ]	Fasergehalt [Vol%] / Fasergeometrie l/d [mm] Aufbeton	Tatsächliche Bruchlast F [kN]	T <sub>jad</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Serie 1</b>							
P1	sandgestrahlt	3,2	47,6	169,9	2,5/	63,9	0,7



P2		3,2			5/0,2	145,5	1,6
P3		3,5				195,4	2,2
P4		3,2				248,7	2,8
P5		3,2				164,7	1,8
P6		3,5				100,0	1,1
P7		3,2				76,3	0,8
P8		3,2				112,3	1,2
P9		3,2				145,1	1,6
P10		3,2				89,3	1,0
P11		3,2				118,8	1,3
P12		3,5				96,0	1,1
<b>Serie 2</b>							
P1	Rechen längs	1,6	45,3	172,7	2,5 5/0,2	306,8	3,4
P2		1,6				276,4	3,1
P3		1,5				183,1	2,0
P4	Rechen quer	2,1				297,2	3,3
P5		1,8				175,3	1,9
P6		1,8				132,1	1,5
P7	Besenstrich	1,6				332,7	3,7
P8		1,7				279,6	3,1
P9		1,6				316,2	3,5
P10	wassergestrahlt	1,4				342,6	3,8
P11		1,5				416,8	4,6
P12		1,5				442,0	4,9
P13		1,7				313,9	3,5
P14		2,1				267,0	3,0
P15		1,9				399,9	4,4
P16		1,9				292,0	3,2
P17		1,9				306,4	3,4
P18		1,5				305,2	3,4
<b>Serie 3</b>							
P1	wassergestrahlt	2,0	76,7	101,6	0,0	441,6	4,9
P2		1,8				330,4	3,7
P3		2,0				242,3	2,7
P4		1,7				444,7	4,9
P5		1,9		162,9	0,0	497,5	5,5
P6		1,7		301,7	3,4		
P7		2,0		163,4	1,0 5/0,2	407,3	4,5
P8		2,1				390,3	4,3
P9		2,1				361,8	4,0
P10		2,0				374,0	4,2
P11		2,4		184,7	2,5 5/0,2	580,7	6,5
P12		2,1				519,8	5,8
<b>Serie 4</b>							
P1	Oberflächen- verzögerer	1,6	171,3	51,5	2,5 5/0,2	204,2	2,3
P2		1,6				242,7	2,7
P3		1,5				249,3	2,8
P4		2,1				196,0	2,2
P5		1,8				195,0	2,2
P6		1,8				242,3	2,7
P7		1,9				182,3	2,0
P8		2,0				185,7	2,1
P9		2,0				189,4	2,1

Anm.: Die angegebenen Festigkeiten sind Würfeldruckfestigkeiten, wobei UHPC am 100mm-Würfel getestet wurde.

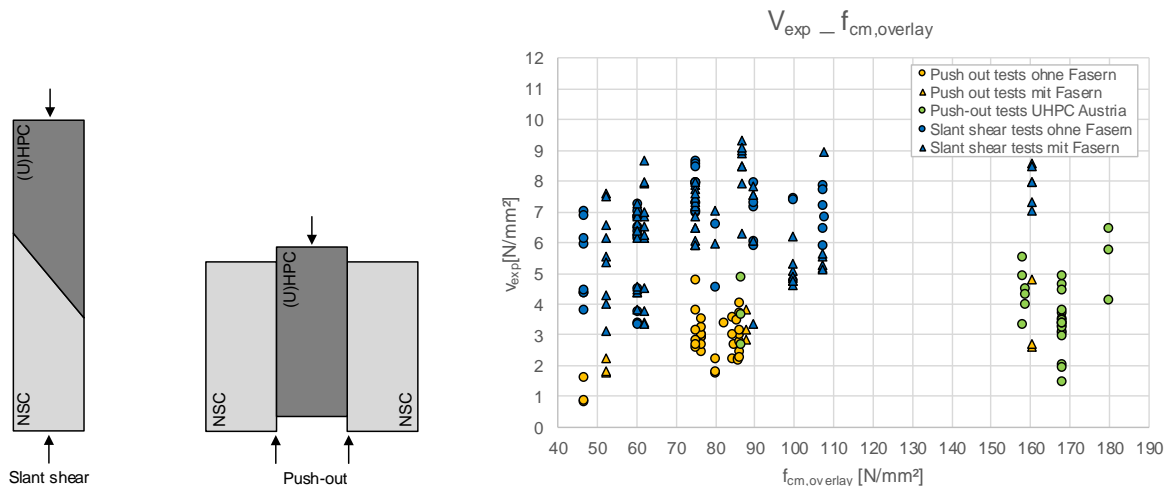
- Datenanalyse und Ausblick Bemessungsmodell

Für die Gesamtbewertung wurden Versuche aus der Literatur, Versuche aus anderen Forschungsprojekten der FH Kärnten und die zuvor beschriebenen Versuche für das Forschungsprojekt „UHPC Austria“ herangezogen. Als zielführend für die Bewertung haben sich Push-Out Probekörper (Abscherprismen mit vertikaler Fuge) und Slant Shear Probekörper (Abscherprismen mit schräger Fuge), wie in Abbildung 19 (links) dargestellt, erwiesen. Für die Slant Shear tests (Abscherprismen mit schräger Fuge) wurden die tatsächlichen adhäsiven Verbundfestigkeiten mit Hilfe der Versagenshypothese nach Mohr-Coulomb rückgerechnet.

Insgesamt zeigt sich ein sehr guter Verbund bei der Applikation von UHPC auf Normalbeton. Als

Aufrauungsmethode hat sich das (Hochdruck-)Wasserstrahlen oder das Sandstrahlen bewährt. Die Versuche aus der Literatur und die eigens durchgeführten experimentellen Untersuchungen bilden eine ausreichende Grundlage für die Ableitung von Bemessungsempfehlungen. Oben beschriebene Versuche mit Ausnahme der Serie 1 sowie Ergebnisse aus der Literatur und aus weiteren Forschungsprojekten der FH Kärnten sind in Abbildung 19 (rechts) gesamthaft für die Variante UHPC als Aufbeton auf NSC-Grundbeton dargestellt. Die Bezugswerte  $f_{cm,overlay}$  stellen im Gegensatz zur Tabelle 8 Zylinderdruckfestigkeiten dar, wobei die Umrechnung für UHPC von Würfel- auf Zylinderdruckfestigkeiten gemäß Lit. erfolgte. Die mittlere Rautiefe liegt zumeist im Bereich von 1,5-2 mm, teilweise auch darüber.

Wie erkennbar, liefert ultrahochfester Beton ähnlich hohe Verbundfestigkeiten wie hochfester Aufbeton, die bei mittlerer Rautiefe mind. etwa 20-30% höher liegen als mit normalfestem Beton. Eine weitere Steigerung der Verbundwerte gegenüber hochfesten Aufbetonen wurde nicht beobachtet und scheint durch den normalfesten Untergrund bzw. den Steifigkeitsunterschied UHPC – NSC limitiert.



**Abbildung 19: Probekörperformen für die Gesamtbewertung (links); Fugenschubspannungen für höherfeste Aufbetone in Abhängigkeit der Aufbetonfestigkeit (rechts)**

Als Bemessungskonzept bietet sich jenes des Modelcode 2010 als Ausgangsbasis an, da hier Einzelwirkungen getrennt betrachtet und zwischen starrem und verschieblichem Verbund unterschieden wird. Zu beachten ist, dass der NSC Untergrund in seiner reinen Scherfestigkeit eine Obergrenze für die max. erreichbaren Verbundschubfestigkeiten liefert. In der praktischen Umsetzung wird im Regelfall bei Applikation von UHPC-Aufbeton der starre Verbund angestrebt werden. Um die höheren Verbundfestigkeiten in der Bemessung ausnützen zu können, werden begleitend Haftzugprüfungen auf der Baustelle zum Nachweis des Verbundes zwischen Aufbeton und Untergrund empfohlen.

Die Anforderung hierfür ergeben sich aus den durchgeführten Paralleluntersuchungen (Schubverbund vs. Haftzugfestigkeit) und werden im 2. Projektjahr quantifiziert. Generell erwies sich eine ausreichend fließfähige Konsistenz, wie schon mit hochfestem Aufbeton, auch mit UHPC als wesentliche Voraussetzung für die Erzielung hoher Verbundfestigkeiten.

Bei der Variante NSC auf vorgefertigtem UHPC besteht die Besonderheit, dass aufgrund der feinen Kornstruktur des UHPC-Untergrundes ähnlich hohe Rauigkeiten wie im umgekehrten Fall in der Regel nicht erreichbar sind. Daher werden gewisse Verfahren, die zu einer mittleren Rautiefe von mindestens 1,5 mm führen, bzw. Profilierungen für diese Anwendung empfohlen, ansonsten sollten zur Absicherung eines anderen Profilierungstyps Abscherversuche (Push-Out Setup) durchgeführt und entsprechende Fraktilwerte des Schubwiderstandes nachgewiesen werden. Für die Bemessung können dann die der Rauigkeitsklasse entsprechenden Werte nach gültigem Regelwerk (EC 2 bzw. MC 2010) für den normalfesten Aufbeton herangezogen werden.

**AP 5 Herstellungstechnologie für UHPC-Konstruktionen**


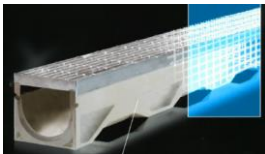


(Bearbeitung LKI, IBB, IMBT, Staretschek, Asamer, SSK, Oberndorfer, Kirchdorfer, Lafarge, BASF, BT3, Doka, Mandlbauer, Porr, Rohrdorfer, Alas Klösch, Habau, Graspöitner, Krampe Harex)

Im ersten Forschungsjahr wurden prototypische Herstellungsversuche geplant, um praxisrelevante herstellungstechnische Aspekte wie Befüllen, Nachbehandeln, besondere Anforderungen an Schalungen, Arbeitsfugen, Umgebungsbedingungen bei Ortbeton, Verdichtung und Entlüftung untersuchen zu können.

Die Durchführung aller Versuche ist als gemeinsame Aktivität zwischen Universitäten und Unternehmen geplant, um möglichst viel Erfahrung in der Bauindustrie aufzubauen.

In der folgenden Tabelle sind die einzelnen Herstellungsversuche und dessen aktueller Stand zusammengefasst.

**Tabelle 9: Überblick der Herstellungsversuche**

	Prototyp Herstellungsversuche	Projektleitung	Industriepartner	Stand		Ziele, Anforderungen
1	Dünngliedriges Fertigteil mittels Gießen, Pumpversuche	LKI	Kirchdorfer, Rauter	Realisierung bis Frühjahr 2021		Tragendes Fertigteil mit architektonischen Ansprüchen an die Oberfläche
2	Straßenbelag aus UHPC mittels Straßenfertiger	IBB	Porri/Schwarzl	Abgeschlossen am 15.09.20		Verarbeitbarkeit im Straßenfertiger (Konsistenzgrenzen), UHPC als Transportbeton (Verarbeitungsfenster)
3	Entwässerungsrinne & Lastverteilplatten mittels Gießen	IMBT	Graspointner	Abgeschlossen 22-24.09.20		Herstellungsversuch zur UHPC-Anwendung „Vorgefertigte UHPC Erzeugnisse“ Konsistenzgrenzen
4	Pumpversuche & Betonierdruck	IBB	Oberndorfer & Doka	Abgeschlossen 03.10.20		Pumpbarkeit von UHPC mit unterschiedlichen Faserlängen & Einfluss von Pumplängen und Pumpenbauart
5	Flachdachabdichtung als Ortbeton	LKI	Mandlbauer	Planung BVH Pinkafeld		UHPC Schicht als Sanierungsmaßnahme bei Flachdächern Rissbreitenbeschränkungen durch Faserzugabe
6	Wandpfeiler mittels Gießen	LKI	Mandlbauer	Planung abgeschlossen Realisierung bis Frühjahr 2021		Oberflächenqualität im Ortbeton, Blasenfreiheit an der Konter- und Wandschalung, keine Faserkorrosion
7	UHPC-Aufbeton bei Elementdecken	IBB	Staretscheck	Ausführung Frühjahr 2021		UHPC-Belag fugenlos als Abdichtung und Tragwerksverstärkung

In untenstehender Tabelle sind die von den Industriepartnern durchgeführten vorbereitenden Arbeiten zusammengefasst:

**Tabelle 10: Leistungen Industriepartner**

Staretscheck	Gesteinskörnungs-Bigbags
Lafarge	Zementlieferung
BASF	Mikrosilika, Hochleistungsfließmittel
BT3	Hochleistungsfließmittel
Doka	Schalmaterial für AP4 und AP5 sowie Schalungsdruckmessdosen
Rohrdorfer	Auslieferung Big-Bags

Asamer	Trockenmischen von Gesteinskörnung mit Mikrofasern
Alas Klöch	Grobe Gesteinskörnung (Basalt)
Krampe Harex	Mikrostahlfasern
SSK	Bindemittel-Bigbags

### **AP 6 Misch- und Fördertechnik**

(Bearbeitung LKI, IBB, IMBT)

Für die Umsetzung der Mischversuche wurden 5 Mischtechnologien (Mischertypen) festgelegt:

- 1 Konusmischer mit Wirbler (Rotoconix)
- 2 Intensivmischer mit geneigtem Teller
- 3 Rintrogmischer mit zwei Wirblern
- 4 Planetenmischer
- 5 Doppelwellenmischer

Die ausgewählten Mischsysteme wurden hinsichtlich der erforderlichen Mischzeit bei gleicher Qualität des Mischguts (Frisch- und Festbetoneigenschaften) untersucht. Diese Untersuchungen wurden für eine selbstverdichtenden Feinkorn UHPC durchgeführt. Als Beurteilungskriterien der Mischungsqualität wurden folgende Eigenschaften ermittelt:

- Rohdichte, Luftporengehalt
- Fließmaß und Fließzeit, bzw. Ausbreitmaß
- Betontemperatur
- Faserverteilung im Mischgut
- Sedimentationsverhalten (Fasern)
- Druckfestigkeit, Nachrisszugfestigkeit, E-Modul
- Matrixzugfestigkeit, Wassereindringtiefe
- Wasseraufnahme

Für das Versuchsprogramm wurden zwei unterschiedliche Mischregime festgelegt. Im Mischregime 1 werden in der ersten Stufe die Flüssigkeiten und Bindemittel samt Füllern zu einer Suspension gemischt und anschließend bei laufendem Mischer die Gesteinskörnungen samt Fasern eingemischt. Mischregime 2 sieht vor, dass alle trockenen Komponenten (Bindemittel, Füller, Gesteinskörnungen und Fasern) in den Mischer eingebracht werden und mit den danach zugegebenen Flüssigkeiten vermischt werden. Um die für die Mischversuche notwendigen großen Mengen an UHPC auch zu verwerten, werden die Mischversuche mit den Herstellungsversuchen aus AP 5 kombiniert durchgeführt.

Für die Durchführung der Misch- und Herstellungsversuche wurden UHPC – Rezepturen unter Verwendung der Ausgangsstoffe von Projektpartnern entwickelt. Die dafür ausgewählten Materialien sind in Tabelle 11 ersichtlich.

**Tabelle 11: Verwendete Ausgangsstoffe**

Bezeichnung	Hersteller	Kornbereich [µm]	Rohdichte [g/cm³]	Anmerkung
Contragress - CEM I 52,5 N	Lafarge (Werk Mannersdorf)	0,2 - 125	3,17	SR 0 WT 38 C3A-frei Blaine-Wert 4500 [cm²/g]
Microsilica - 920E D	Elkem (Vertrieb BASF)		2,2	
Quarzmehl - Dorsilit 16900	Dorfner (Vertrieb RS-Rohstoffe)	0,3 - 100	2,63	
Quarzsand - GEBA	Dorfner (Vertrieb RS-Rohstoffe)	60 – 250	2,65	
Quarzsand - Dorsilit Nr.8	Dorfner (Vertrieb RS-Rohstoffe)	300 - 800	2,65	
Basaltesdelsplitt 2/4	Alas	2000 - 4000	3,05	
Basaltesdelsplitt 4/8	Alas	4000 - 8000	3,05	
Fließmittel - Premment H500	BT3		1,07	Feststoffgehalt 30%

Fließmittel - MasterGlenium ACE 501	BASF		1,05	Feststoffgehalt 26%
Stahlfaser – DM15/0,2-0,22	KrampeHarex			

In Tabelle 12 ist jeweils eine selbstverdichtende Fein- und Grobkorn Rezeptur. Die erreichten Würfeldruckfestigkeiten liegen bei beiden Rezepturen über 170 N/mm<sup>2</sup>.

Zur Durchführung der Mischversuche wurden die granularen Ausgangsstoffe als Premix in 2 Big-Bags vorbereitet. Die Zusammensetzung der jeweiligen BigBags (Bindemittel Big-Bag und Gesteinskörnungs Big-Bag ist ebenso in Tabelle 12 ersichtlich. Zusätzlich wird an der Anlage von BG Graspointner aufgrund größerer Silokapazitäten und einer Dosiereinrichtung für Fasern eine Einzelrohstoffbeschickung getestet.

**Tabelle 12: Entwickelte UHPC Fein- und Grobkornrezeptur für die Misch- und Herstellungsversuche**

	Feinkorn	Grobkorn	
Lafarge Contragress 52.5N	750	640	Bindemittel BigBag
BASF Mikrosilika 920E D	90 12% v. ZG	76.8 12% v. ZG	
Quarzmehl Dorsilit 16900	300 40% v. ZG	256 40% v. ZG	
Wasser inkl. Anteil aus FM (W/Z)	202.5 (0.27)	172.8 (0.27)	
Fließmittel (BASF MasterGlenium ACE 501 / BT3 Premment H500)	27 / 24.8 (3.6% / 3.3%)	24.3 / 22.4 (3.8/3.5)	
Quarzsand Geba 0.1-0.2 mm	191 20% v. GK-Vol.		Gesteinskörnung BigBag
Quarzsand Dorsilit Nr. 8 0.3-0.8 mm	764 80% v. GK-Vol.	631 52% v. GK-Vol.	
Basalt 2-4 mm		343 32% v. GK-Vol.	
Basalt 4-8 mm		316 25% v. GK-Vol.	
Stahlfaser 15/0.2-0.22	157 (2 Vol.-%)	78.5 (1 Vol.-%)	
Fließmaß [mm] (EN 1015-3 - Hägermann)	275	235	
Fließzeit t <sub>200</sub> [s] (EN 1015-3 -Hägermann)	9	13	
Fließmaß [mm] (EN 12350-8)	810	750	
Fließzeit t <sub>500</sub> [s] (EN 12350-8)	6	8	
Würfeldruckfestigkeit f <sub>cm,cube,28d</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	174.0	179.3	

**AP 7 QS-System**

(Bearbeitung IBB, IMBT)

Die Qualitätssicherung betrifft die Festlegung, Produktionskontrolle sowie baupraktische Anwendung von UHPC. Sie stellt sicher, dass eingesetzter UHPC den Anforderungen an UHPC-Sorten der geplanten Richtlinie und den Objekt-spezifischen Anforderungen entspricht.

Es wurde ein Konzept der Qualitätssicherung (QS-System) aufbauend auf den Beispielen der SIA 2052 (UHFB – Baustoffe, Bemessung, Ausführung) und unter Einbeziehung der Regelungen der ÖNORM B4710-1 und internationalen Erfahrungen für UHPC ausgearbeitet und in einen Richtlinientextvorschlag eingefügt. Zudem wurden Prüferfahren für UHPC spezifiziert und Aspekte der Dauerhaftigkeit von UHPC gemäß internationaler Erfahrungen und deren Prüfungen dokumentiert.

**AP 8 Auswertung und Beurteilung mit Empfehlungen für die Praxis**

(IBB, LKI, IMBT, FH-K)

Alle Projekt-Ergebnisse, die bereits evaluiert und validiert wurden, wurden von den wissenschaftlichen Partnern laufend in ein Dokument mit Regelwerkcharakter eingepflegt.

**3. Projektteam und Kooperationen**

- Gibt es wesentliche Veränderungen im Projektteam (interne SchlüsselmitarbeiterInnen und externe Partner/Dritteleister)?
- Gehen Sie auf Änderungen in der Arbeitsaufteilung ein.  
Gibt es Auswirkungen auf die Kosten- / Finanzierungsstruktur und die Zielsetzung?

Bei JA: Beschreiben und begründen Sie die Änderungen und die eingeleiteten Maßnahmen

	NEIN	
	JA	<p>Das Projektteam der wissenschaftlichen Forschungseinrichtungen weist geringfügige Änderungen gegenüber dem Forschungsansuchen auf. Nachstehend sind diese angeführt:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Technische Universität Graz, Institut für Betonbau Dr.-Ing. Nguyen Duc Tung (Projektmitarbeiter) wurde ersetzt durch Dr. techn. Kim Huy Hoang (Projektmitarbeiter).</li> <li>• Technische Universität Graz, Labor für Konstruktiven Ingenieurbau Dipl.-Ing Roland Waldenhofer wurde dem Projektteam hinzugefügt.</li> </ul>

#### 4. Wirtschaftliche und wissenschaftliche Verwertung

- Beschreiben Sie die bisherigen Verwertungs- und / bzw. Weiterverbreitungsaktivitäten. Ist eine Verwertung möglich?
- Listen Sie Publikationen, Dissertationen, Diplomarbeiten sowie etwaige Patentmeldungen, die aus dem Projekt entstanden sind, auf.
- Welche weiterführenden F&E-Aktivitäten sind geplant?
- Wie werden die im Projekt geschaffenen Prototypen weiter verwendet?

Das gegenständliche Forschungsvorhaben wird in einem 2. Projektjahr fortgesetzt. Parallel dazu, wird eine Richtlinie für die Anwendung von UHPC erstellt. Dessen Inhalt stützt sich auf die Ergebnisse der beiden Forschungsjahre. Zusätzlich werden zwei Dissertationen (Michael Huß; Roland Waldenhofer) sowie mehrere Diplomarbeiten im Zuge des Vorhabens entstehen. Deren Ausarbeitungen sind in Bearbeitung.

#### 5. Erläuterungen zu Kosten & Finanzierung

- Die Abrechnung erfolgt direkt im eCall bzw. bei bis Sept. 2015 eingereichten Projekten via Excel. Im eCall wird ihnen automatisch die für Sie richtige Variante präsentiert.
- Beachten Sie den FFG Kostenleitfaden ([www.ffg.at/kostenleitfaden](http://www.ffg.at/kostenleitfaden)) und Ausschreibungsdokumente.
- Abweichungen vom Kostenplan sind an dieser Stelle zu beschreiben und zu begründen.

Hinsichtlich der Gesamtkosten gab es im 1. Projektjahr keine Abweichungen zu den im Förderungsvertrag angegebenen Daten. Es erfolgte lediglich eine Umschichtung bei den wissenschaftlichen Aufwendungen. Die UNI Innsbruck verschob einen Teil ihrer Arbeiten (14.000 €) vom 1. Projektjahr in das 2. Projektjahr. Deren Anteil im 1. Projektjahr wurde vom Institut für Betonbau der TU für vorgezogene Arbeiten im AP7 übernommen, der entsprechende Ausgleich folgt im 2. Projektjahr.

Weiters weisen wir darauf hin, dass wie aus den Finanzierungsbestätigungen ersichtlich, im ersten Projektjahr diverse Inkind-Leistungen geplant und zugesagt waren. Diese wurden allerdings im Antrag falsch dargestellt und schienen daher nicht gesondert auf. Dementsprechend wurden die Inkind-Leistungen im ersten Projektjahr auf das notwendige Minimum für den Projekterfolg reduziert und entsprechende ausstehende Inkind-Leistungen sollen im zweiten Forschungsjahr eingebracht werden. Auf die Einhaltung der Finanzierungsbedingungen wurde dabei penibel geachtet und diese sind für beide Projektjahre erfüllt.

#### 6. Projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen

- Gehen Sie auf projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen (laut §6 des

Förderungsvertrags) ein, sofern diese im Förderungs- bzw. Werkvertrag vereinbart wurden.

## **7. Meldungspflichtige Ereignisse**

Gibt es besondere Ereignisse rund um das geförderte Projekt, die der FFG mitzuteilen sind (siehe auch Richtlinien – Anhang zu 5.3., 5.3.5), z.B.

- Änderungen der rechtlichen und wirtschaftlichen Einflussmöglichkeiten bei dem/der Förderungsnehmer/in
- Insolvenzverfahren
- Ereignissen, die die Durchführung der geförderten Leistung verzögern oder unmöglich machen
- Weitere Förderungen für dieses Projekt