



Wolfgang Michael Ritter, B.Eng.

Schrittweise Entwicklung einer UHPC Rezeptur zur Reduzierung des autogenen Schwindens

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Nguyen Viet Tue

Institut für Betonbau

Fakultät für Bauingenieurwissenschaften

Mitbetreuer Assistent:

Dr.-Ing. Kim Huy Hoang

Dipl.-Ing. Michael Huß

Graz, im September 2019

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Graz, am 06.09.2019

Wolfgang Michael Ritter

(Unterschrift)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen mich bei allen Förderern und Unterstützern während meines Studiums zu bedanken.

Zuerst geht mein Dank an das Institut für Betonbau der Technischen Universität Graz, besonders an Professor Tue mit seinen Lehrveranstaltungen im Masterstudium, der mir ein vertieftes Verständnis des Betonbaus nahegebracht hat. Meinen Betreuern Dr. Hoang Kim und Michael Huß danke ich für ihre Geduld und Hingabe bei den Versuchen und der Ausarbeitung meiner Masterarbeit.

Ich möchte auch der Stadt Graz danken für die schöne Zeit, in der ich die Vielfalt der Kultur Österreichs erfahren durfte. Außerdem danke ich meinen Weggefährten aus dem Masterstudium und meinen Kollegen aus dem Geotechnik Zeichensaal.

Viele haben mir während meines Studiums geholfen: Meine Eltern, Ruth und Bazer, meine Geschwister Stefan, Ferdinand und Axel, sowie Andreas Makiola, Andreas Maurial, Eduardo Aragon und Mariella Checa. Ihnen allen spreche ich meinen tiefsten Dank aus.

Kurzfassung

Verbundstützen aus UHPC und Normalbeton sind besonders vorteilhaft für Hochhäuser oder Brücken, die hohen Druckbelastungen ausgesetzt sind. Für das Zusammenwirken des Außenmantels aus Normalbeton und dem UHPC-Kern ist das autogene Schwinden des UHPC-Kerns von großer Bedeutung. Je geringer das autogene Schwinden ist, desto besser ist das mechanische Verhalten der Verbundstütze.

In dieser Studie wird ein Ultra High Performance Concrete (UHPC) mit einem möglichst geringen autogenen Schwinden entwickelt. Dafür werden die Einflüsse der einzelnen Ausgangsstoffe sowie deren Proportionen untersucht, um die optimale Zusammensetzung der Leime, der Gesteinskörnungen sowie der kompletten UHPC-Rezeptur zu ermitteln. Mit einem geringen Leimvolumen und einem möglichst geringen Zementanteil, soll durch eine erhöhte Packungsdichte der Leime und Gesteinskörnungen ein geringes Schwinden, eine hohe Festigkeit und gleichzeitig eine gute Verarbeitbarkeit gewährleistet werden. Die vom Institut für Betonbau der Technischen Universität Graz entwickelte schrittweise Optimierungsmethode für UHPC [1] wurde angewendet, um die Ziele hinsichtlich der geforderten Frisch- und Festbetoneigenschaften von UHPC zu erreichen.

In dieser Studie wurden die am besten geeigneten, reaktiven/inerten, ultrafeinen Ausgangsstoffe in der Rezeptur-Entwicklung eingesetzt. Dabei wurde darauf geachtet, gesundheitsgefährdende Partikel zu vermeiden oder durch Suspensionen zu ersetzen. Die Verwendung der am meisten kompatiblen Materialien und Optimierung der Leim- und Kornzusammensetzung führten zu einem selbstverdichtenden UHPC mit einer maximalen Korngröße von 11 mm oder 16 mm, einem Setzfließmaß von 75-80 cm, einer guten Entmischungsbeständigkeit, einer Druckfestigkeit von 180-200 MPa und einem geringen autogenen Schwinden von 0,2-0,4‰. Das Hauptziel, die Entwicklung eines schwindarmen UHPC wurde durch die beschriebenen Ansätze erreicht. Die aktuellen Messmethoden des autogenen Schwindens konnten soweit angepasst werden, um auch Schwindmaße für einen UHPC mit einem Größtkorn von 16 mm, zu ermitteln.

Abstract

Composite columns made of UHPC and normal concrete are particularly advantageous for high-rise buildings or bridges exposed to high compressive loads. The autogenous shrinkage of the UHPC core is of great importance for the interaction of the outer shell of normal concrete and the UHPC core. The lower the autogenous shrinkage is, the better the mechanical behaviour of the composite column.

In this study, an Ultra High Performance Concrete (UHPC) with the lowest possible autogenous shrinkage is developed. For this purpose, the influences of the constituent components and their proportions are investigated in order to determine the optimum composition of the paste, the aggregates and the complete UHPC mixture. A low paste volume to aggregate volume and the smallest possible proportion of cement, the increased packing density of the binders and aggregates should ensure low shrinkage, high strength and at the same time good workability. The stepwise optimization method for UHPC developed by Institute of Structural Concrete [1] of the technical University of Graz was applied, ensuring the targets of the fresh and hardened properties of concrete.

The most suitable reactive/inert ultra-fine particle materials considering a good health in production were employed in this study. The use of the most compatible materials, the optimizations of binders and of aggregates resulted in self-compacting UHPCs with maximum grain sizes of 11 mm or 16 mm possessing a good slump-flow of 75-80 cm, a good segregation resistance, a compressive strength of 180-200 MPa and a low autogenous shrinkage of 0.2-0.4‰. The main objective, the development of a low-shrinkage UHPC, was achieved by the described approach. The current measurement methods for autogenous shrinkage could be adapted to determine shrinkage measures for a UHPC with a maximum grain size of 16 mm.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	I
Abstract.....	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	VIII
Formelverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	X
1 Einleitung	1
1.1 UHPC	1
1.2 IBB Projekt „Normalbeton-UHPC-Verbundstütze“	4
1.3 Zielsetzung und Umfang der Masterarbeit.....	6
2 Terminologie und Mechanismus von Schwinden	7
2.1 Definitionen.....	7
2.2 Von der Hydratation zum autogenen Schwinden	7
2.3 Chemisches Schwinden.....	9
2.4 Antreibenden Kräfte von autogenem Schwinden	10
2.5 Einfluss der Ausgangsstoffe auf das autogene Schwinden.....	11
2.6 Schwindreduzierung durch innere/äußere Nachbehandlung	13
2.7 Messmethoden des Schwindens	14
3 Materialien.....	16
3.1 Ausgangsstoffe.....	16
3.1.1 Zement.....	17
3.1.2 Zusatzmittel	17
3.1.3 Zusatzstoffe	17
3.1.4 Gesteinskörnungen.....	19
3.1.5 Wassergehalt und w/z-Wert	19
3.2 Kompatibilität Zement, Zusatzmittel und Zusatzstoffe	19
3.3 Zusammenfassung und Diskussion	20
4 UHPC Entwicklung.....	21
4.1 Konzept „Schrittweise Optimierung der Packungsdichte“	21
4.1.1 Leimzusammensetzung.....	22
4.1.2 Kornzusammensetzung der Gesteinskörnung im trockenen Zustand	24
4.1.3 UHPC-Zusammensetzung von Leim und Gesteinskörnungen	25

4.2	Entwicklung von UHPC Rezepturen	25
4.2.1	Referenzproben	27
4.2.2	Testprozeduren.....	28
4.2.2.1	Leimzusammensetzung.....	29
4.2.2.2	UHPC	30
4.2.3	Optimierung der Leimzusammensetzung	30
4.2.3.1	Kombination von Zement, Mikrosilika und Fließmittel.....	31
4.2.3.2	Optimale Leimsysteme	32
4.2.4	Optimierung der Kornzusammensetzung D_{MAX} 16 mm (Aggregat 1)	34
4.2.5	Optimierung der Kornzusammensetzung D_{MAX} 11 mm (Aggregat 2)	37
4.3	Zusammenfassung und Diskussion	39
5	Betoneigenschaften	42
5.1	Frischbetoneigenschaften	42
5.1.1	Setzfließmaß für selbstverdichtenden Beton	42
5.1.2	Kornverteilung und Verarbeitbarkeit.....	45
5.1.3	Auslauftrichterversuch	48
5.2	Festbetoneigenschaften.....	51
5.2.1	Druckfestigkeit	51
5.2.2	Elastizitätsmodul.....	53
5.3	Zusammenfassung und Diskussion	55
6	Untersuchung des autogenen Schwindens.....	56
6.1	Methoden zur Messung des autogenen Schwindens.....	56
6.1.1	Multiple Messmethoden.....	57
6.1.2	Time Zero.....	59
6.1.3	Korrelation der Messmethoden	61
6.2	Versuchsablauf und Ergebnisse	63
6.2.1	Setup und Messprozedur	63
6.2.2	Ergebnisse.....	64
6.3	Zusammenfassung und Diskussion	67
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	70
7.1	Zusammenfassung.....	70
7.2	Ausblick	71
8	Literaturverzeichnis.....	72
	Anhang A	75
	Anhang B.....	76

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich der Mischungszusammensetzung von normalfestem und unterschiedlichem Ultra-Hochleistungsbetonen [4 S. 142].....	1
Abbildung 2: Einfluss von packungsoptimierten Feinststoffgemischen unterschiedlicher Dichte auf die Druckfestigkeit (optimierte Walz-Kurve) [3 S. 123].....	2
Abbildung 3: Zusammenhang zwischen der Packungsdichte und Verarbeitbarkeit eines inerten Leims aus zwei unterschiedlich feinen Quarzmehlen [3 S. 126]	3
Abbildung 4: Schnitt UHPC-gefüllte-Verbundstütze [8].....	5
Abbildung 5: Die drei Phasen der Hydratation [10 S. 12]	8
Abbildung 6: Schematische Ansicht von Wasser in Porensystem des Zementleims [10 S. 14]...	8
Abbildung 7: Zusammenhang zwischen chemischem und autogenem Schwinden in Anlehnung an [9] von [12 S. 4].....	9
Abbildung 8: Autogenes Schwinden im Vergleich zum Trocknungsschwinden von grobkörnigen UHPC BQ5 [3 S. 147].....	9
Abbildung 9: Schematischer Aufbau von Größtkorn des hydratisierenden Zementleims. Links: niedriger Hydratationsgrad. Rechts: hoher Hydratationsgrad. Feststoffe in Dunkelgrau, Porenwasser in Hellgrau und Hohlräume in Weiß [13].....	10
Abbildung 10: Porendurchmesser zur relativen Luftfeuchtigkeit nach [14 S. 85]	11
Abbildung 11: Autogenes Schwinden in Abhängigkeit von w/z-Wert [18]	12
Abbildung 12: Autogenes Schwinden in Abhängigkeit von Leimvolumen [14 S. 89].....	12
Abbildung 13: Autogenes Schwinden von Zementleim in Abhängigkeit von Mikrosilikagehalt [14 S. 89].....	13
Abbildung 14: Links: Das Equipment für den „Superplasticizer-Water-Solution-Demand-test“. Rechts: Entwicklung der Mischungsenergie [1 S. 48]	22
Abbildung 15: Einfluss von Fließmittel auf Packungsdichte [28]	23
Abbildung 16: Schema zur Bestimmung der optimalen Leimzusammensetzung nach [28]	24
Abbildung 17: Schritt 1 und 2 der schrittweisen Optimierung der Packungsdichte	25
Abbildung 18: Ausbreitmaß mit Haegermann Konus [1].....	29
Abbildung 19: Schematischer Aufbau des Setztrichters	30
Abbildung 20: Exemplarisches Setzfließmaß	30
Abbildung 21: Einfluss von Hochleistungsfließmittel auf die Fließfähigkeit von Zementleim	31
Abbildung 22: Einfluss von SF_pow und SF_susp auf die Fließfähigkeit von Leimsystem.....	32
Abbildung 23: Ausbreitmaß der verschiedenen Leimsysteme.....	34
Abbildung 24: D _{MAX} = 16 Schritt 1: Kombination von Basalt 8/11 und 11/16. Mit dem experimentalen Ergebnis von 40 vol.% BS8/11 + 60 vol.% BS11/16	35
Abbildung 25: D _{MAX} = 16 Schritt 2: Kombination von Basalt 2/4 und (40 vol.% BS8/11 + 60 vol.% BS11/16). Mit dem experimentalen Ergebnis von 40 vol.% BS2/4 + 60 vol.% (40 vol.% BS8/11 + 60 vol.% BS11/16)	35

Abbildung 26: $D_{MAX} = 16$ Schritt 3: Kombination von Quarzsand 0.3/0.8 und (36 vol.% BS11/16 + 24 vol.% BS8/11 + 40 vol.% BS2/4). Mit dem experimentalen Ergebnis von 21.9 vol.% QS0.3/0.8 + 78.1 vol.% (36 vol.% BS11/16 + 24 vol.% BS8/11 + 40 vol.% BS2/4)	36
Abbildung 27: $D_{MAX} = 16$ Schritt 4: Kombination von Gebasand 0.06/0.3 und (28.1 vol.% S11/16 + 18.7 vol.% BS8/11 + 31.2 vol.% BS2/4 + 22 vol.% QS0.3/0.8). Mit dem experimentalen Ergebnis von 10 vol.% Gebasand + 90 vol.% (28.1 vol.% BS11/16 + 18.7 vol.% BS8/11 + 31.2 vol.% BS2/4 + 22 vol.% QS0.3/0.8).....	36
Abbildung 28 $D_{MAX} = 11$ Schritt 1: Kombination von Basalt 2/4 und 8/11. Mit dem experimentalen Ergebnis von 30 vol.% BS2/4 + 70 vol.% BS8/11.	37
Abbildung 29: $D_{MAX} = 11$ Schritt 2: Kombination von Quarzsand 0.3/0.8 und (70 vol.% BS8/11 + 30 vol.% BS2/4). Mit dem experimentalen Ergebnis von 30 vol.% QS0.3/0.8 + 70 vol.% (70 vol.% BS8/11 + 30 vol.% BS2/4)	38
Abbildung 30: $D_{max} = 11$ Schritt 3: Kombination von Gebasand 0.3/0.8 und (49 vol.% BS8/11 + 21 vol.% BS2/4 + 30 vol.% QS0.3/0.8). Mit dem experimentalen Ergebnis von 10 vol.% Gebasand + 90 vol.% (49 vol.% BS8/11 + 21 vol.% BS2/4 + 30 vol.% QS0.3/0.8).....	38
Abbildung 31: Festigkeitskriterium für die Auswahl der Mischung.....	39
Abbildung 32: Fließkriterium für die Auswahl der Mischung	39
Abbildung 33: Volumenanteile der Referenzrezepturen und der eigenen UHPC-Rezepturen...	40
Abbildung 34: Bild gefüllter Setztrichter für Setzfließmaßversuch	43
Abbildung 35: Schematischer Aufbau des Setztrichters	43
Abbildung 36 Exemplarisches Setzfließmaß mit Messung von d_i	43
Abbildung 37 Randbereich des Setzfließmaßes zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit der Mischung.....	45
Abbildung 38: 60 Liter Mischer von Elba.....	46
Abbildung 39: Festigkeitsentwicklung Mix_6 mit Wandeffekt, von 10 und 40 Liter Mischvolumen	47
Abbildung 40: Festigkeitsentwicklung Mix_4 mit Wandeffekt, von 10 und 40 Liter Mischvolumen	47
Abbildung 41: Druckfestigkeitsentwicklung Mix_4, mit und ohne Wandeffekt	48
Abbildung 42: Schematischer 3D Aufbau von Trichterauslaufversuch	48
Abbildung 43: Trichterauslaufversuch.....	49
Abbildung 44: Zugehöriges Setzfließmaß	49
Abbildung 45: Selbstverdichtender Beton Mix_4, Mix_6 und Mix_6 mit SF_susp_Neu	50
Abbildung 46: Festigkeitsentwicklung von Mix 1,4,6 und Ref 2.....	52
Abbildung 47: Druckfestigkeitsentwicklung Vergleich Suspensionen	53
Abbildung 48: Schematischer Aufbau der horizontalen Schwindmessung aus [7 S. 14] nach [9]	56

Abbildung 49: Vertikaler und horizontaler Schwindversuch.....	57
Abbildung 50: Detail des Stempels von horizontalem Schwindaufbau	58
Abbildung 51: Vertikaler Schwindaufbau	59
Abbildung 52: Einfluss von „Time Zero“ auf Schwindmaß [7 S. 17]	60
Abbildung 53: Vergleich von Dehnung und relativer Feuchtigkeit [37]	61
Abbildung 54: Korrelationsanalyse von Ref_2 für horizontalen und vertikalen Versuchsaufbau	62
Abbildung 55: Korrelationsanalyse von Mix_1 für horizontalen und vertikalen Versuchsaufbau	63
Abbildung 56: Ref_1 $D_{MAX} = 8$ [mm] mit 640 [kg/m ³] Zement.....	65
Abbildung 57: Mix_4 $D_{MAX} 16$ [mm] mit 600 [kg] Zement	66
Abbildung 58: Mix_6 $D_{MAX} 11$ [mm] mit 600 [kg] Zement	67
Abbildung 59: Vergleich der entwickelten Rezepturen zu den Referenzmischungen	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Zusammensetzung der Referenzmischungen aus dem Schwerpunktprogramm 1182 [3, 6]	4
Tabelle 2: Verwendete Materialien in dieser Studie	16
Tabelle 3: Verwendete Zementarten	17
Tabelle 4: Inerte Zusatzstoffe	18
Tabelle 5: Reaktive Zusatzstoffe	18
Tabelle 6: Eigenschaften der Feinstoffe und Gesteinskörnungen	19
Tabelle 7: Die Beziehung zwischen w/z-Wert und Festigkeit von Mörtel ohne zusätzliches zementhaltiges Material nach Powers [11]	23
Tabelle 8: Leimzusammensetzung	26
Tabelle 9: Gesteinszusammensetzung	26
Tabelle 10: Zusammensetzung von Binder + Aggregat	27
Tabelle 11: Referenzproben	28
Tabelle 12: Zusammensetzung der Leimsysteme	33
Tabelle 13: Ergebnisse des Setzfließmaßes von allen Mischungen	44
Tabelle 14: Ergebnisse Trichterauslaufversuch 30 und 90 Minuten	49
Tabelle 15: Zugehörige Setzfließmaße nach 30 und 90 Minuten	50
Tabelle 16: Druckfestigkeit und Setzfließmaß	51
Tabelle 17: E-Modul der ausgewählten Mischungen	54
Tabelle 18: Ergebnisse der Schwindversuche	68
Tabelle 19 Anhang A: Methoden zur Schwindmessung	75
Tabelle 20 Anhang B Festbetoneigenschaften	76
Tabelle 21 Anhang B: Festbetoneigenschaften	77
Tabelle 22 Anhang B: Festbetoneigenschaften unter Wärmebehandlung	78

Formelverzeichnis

Formel 1: Packungsdichte	21
Formel 2: Hohlraumanteil der Packungsdichte	21
Formel 3: Regel für Kombination der Leim- und Kornzusammensetzung.....	21
Formel 4: Setzfließmaß	42
Formel 5: Festigkeitsentwicklung nach EN 12390-3.....	52
Formel 6: Elastizitätsmodul nach [2]	53
Formel 7: Charakteristische Druckfestigkeit nach [44].....	76

Abkürzungsverzeichnis

ASTM	American Society of Test Methods
CSH	Calciumsilikathydrat
F_v	Feststoffvolumen
HPC	High Performance Concrete
JAC	Japan association of Concrete
LWA	Lightweight Aggregate
NSC	Normalbeton
Pow.	Powder englisch für Pulver
RILEM	Reunion ingenieure laboratory et methods
SCC	Self compacting concrete englisch für selbstverdichtender Beton
Susp.	Suspension
SAP	Superabsorbierende Polymeren
UHPC	Ultra High Performance Concrete
V_{Paste}	Leimvolumen
V_{Agg}	Gesteinsvolumen
w/z-Wert	Verhältnis von Wasser zu Zement
w/b-Wert	Verhältnis von Wasser zu Binderanteil
w/ F_v -Wert	Verhältnis von Wasser zu Feinstoffen

1 Einleitung

1.1 UHPC

„Ultra High Performance Concrete“ (UHPC) zählt zu den Hochleistungsbetonen. Zumeist ist er charakterisiert durch Druckfestigkeiten von rd. 150 bis 200 [N/mm²], einem w/z –Wert von 0,2 bis 0,3 und einem w/b-Wert um 0,2. Das stoffliche Konzept zur Herstellung von UHPC-Rezepturen beruht nicht mehr auf dem einfachen 3-Mehrkomponentenwerkstoffmodell (Zement/ Wasser/ Gesteinskörnungen) von Normalbeton. Es ist um zwei weitere Komponenten erweitert (Zuschlagsstoffe und Zusatzmittel), wodurch von einem „5-Stoff-System“ gesprochen werden kann [2].

Wesentliche Eigenschaften von UHPC sind hohe Druckfestigkeiten, die aus der sehr dichten Mikrostruktur der Matrix resultieren. Üblicherweise ohne oder mit wenigen Kapillarporen. Mit einem hohen Anteil an abgestimmten Feinstoffen wird eine hohe Packungsdichte in der Matrix erreicht. In Kombination mit einem geringen w/z- Wert führt dies zu einer hohen Festigkeit. Folgend sind typische UHPC-Rezepturen und eine Normalbetonrezeptur in ihrer volumenbezogenen Zusammensetzung für unterschiedliche Anwendungen exemplarisch dargestellt. Dort werden die unterschiedlichen Volumenanteile der einzelnen Komponenten sichtbar [3].

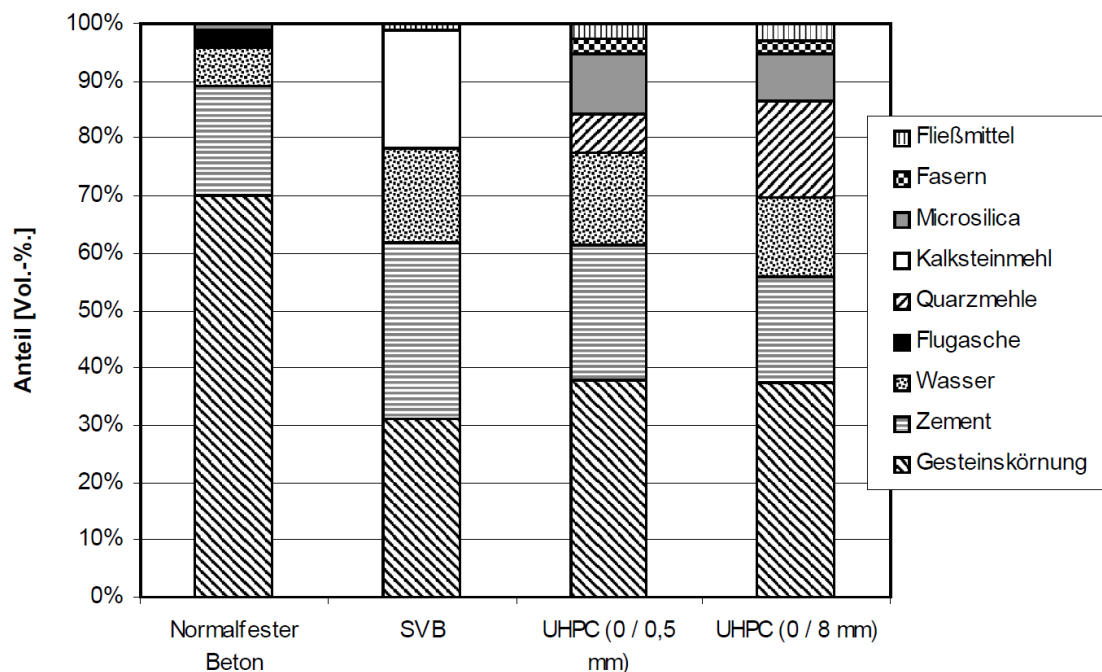


Abbildung 1: Vergleich der Mischungszusammensetzung von normalfestem und unterschiedlichem Ultra-Hochleistungsbetonen [4 S. 142]

Auffällig bei der volumenbezogenen Zusammensetzung ist der typisch geringe Anteil an Gesteinskörnungen und hohe Anteil an Feinstoffen in UHPC. Dies bedeutet, dass der UHPC einen hohen Anteil an Leimvolumen (Zement + Wasser + Zusatzmittel + Zusatzstoffe)

besitzt. Dadurch können selbstverdichtende Eigenschaften und hohe Festigkeiten erreicht werden. Nachteilig bei dieser Art von Rezeptur ist der üblicherweise hohe Anteil an Zement und reaktiven Stoffen, welche ein hohes Schwindmaß verursachen [5].

Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, gibt es zahlreiche Möglichkeiten UHPC-Rezepturen zu gestalten, um die Anforderungen verschiedener Anwendungsfälle zu erfüllen. Ein zentrales Thema bei der Zusammensetzung der Rezeptur besteht in der Abstimmung des Feinkornanteiles. Ebenso spielt der w/F_v – Wert (Wasser/Feinstoff-Verhältnis) eine entscheidende Rolle. Der hohe Wasseranspruch der Feinstoffanteile wird durch hochwirksame Fließmittel ausgeglichen. Für die gewünschte Viskosität, Sedimentationsstabilität und Homogenität des Leims müssen alle Anteile abgestimmt werden. Das Maß dafür sind die rheologischen Eigenschaften, die Festigkeit und die Gefügedichte von UHPC. Ein niedriger w/F_v –Wert stellt bei gleichbleibendem w/z -Wert eine höhere Druckfestigkeit und eine niedrige Porosität dar (Abb. 2). Somit ergänzt der w/F_v -Wert den w/z -Wert bzw. den w/b -Wert um die zu erwartende Festigkeit abzuschätzen [3].

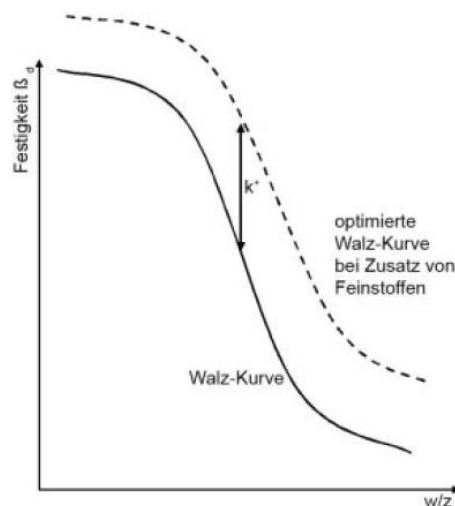


Abbildung 2: Einfluss von packungsoptimierten Feinststoffgemischen unterschiedlicher Dichte auf die Druckfestigkeit (optimierte Walz-Kurve) [3 S. 123]

Diese Betrachtungsweise stellt die Grundlage für die UHPC Werkstoffentwicklung dar [3]. Eine erhöhte Packungsdichte verringert die Hohlräume. Bei einem gleichbleibenden Wassergehalt führt die erhöhte Packungsdichte zu einem dickeren Wasserfilm zwischen den Partikeln. Es wird weniger Wasser in den Hohlräumen benötigt und somit entsteht ein dickerer Wasserfilm zwischen den Partikeln. Das ermöglicht ein besseres Gleiten oder Fließen des Leimes bzw. Frischbetons, welches unabdingbar für eine gute Verarbeitbarkeit und eine hohe Festigkeit ist.

Die Erhöhung der Packungsdichte durch die Optimierung der Korngrößenverteilung ist wesentlich für die Optimierung der Festigkeit. Durch die Reduktion des Anmachwassers zur Verminderung der durchgängigen Poren, sowie die Verwendung von hochfesten Gesteinskörnungen (z.B. Basalt) und feinen Zuschlagsstoffen, wird die zielgerechte Herstellung von UHPC ermöglicht [1].

Wegen der erhöhten Packungsdichte (Abb. 3) und der damit einhergehenden Agglomeration der Feinstoffe wird der Mischvorgang erschwert, weil mehr Energie zum Durchmischen notwendig ist als bei herkömmlichen Beton. Um dieser Tatsache entgegenzuwirken, wurden Hochleistungsverflüssiger entwickelt mit der Basis von Polycarboxylaten. Diese gewähren die Verarbeitbarkeit, Mischungsstabilität und das Entlüftungsverhalten von UHPC [4].

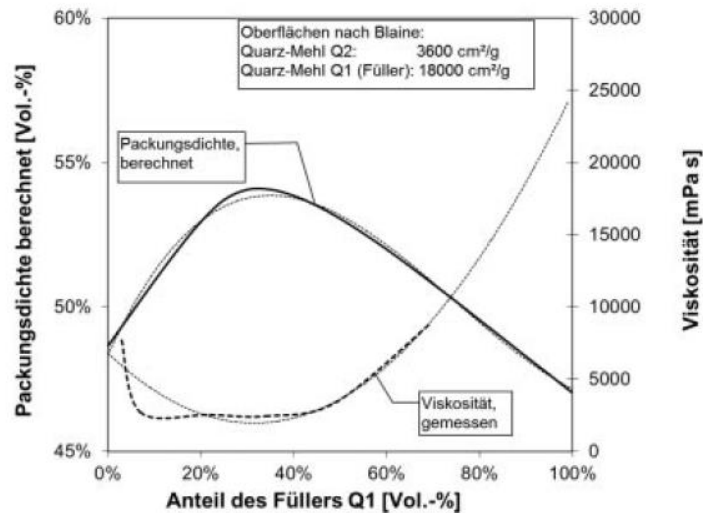


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen der Packungsdichte und Verarbeitbarkeit eines inertes Leims aus zwei unterschiedlich feinen Quarzmehlen [3 S. 126]

Für die vorliegende Arbeit sind die Mischungen M2Q und B5Q des Schwerpunktprogrammes 1182, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, als Referenz herangezogen worden [6] (Tab. 1). Zu diesen Rezepturen ist anzumerken, dass in den Mischungen Fasern verwendet werden. Laut [7] reduzieren Fasern das autogene Schwinden bis zu 10- 15 %. In dieser Studie wird ohne Fasern gearbeitet.

Tabelle 1 Zusammensetzung der Referenzmischungen aus dem Schwerpunktprogramm 1182 [3, 6]

	M2Q [kg/m³]	B5Q [kg/m³]
Wasser	166	158
Zement	832	650
Silikastaub	135 (16 % von Z)	177 (27 % von Z)
Fließmittel [%vol.]	29,4	30,3
Quarzpulver, fein	207	325
Quarzpulver, grob	-	131
Quarzsand 0.125/0.5	975	354
Basalt 2/8	-	597
Mikrofasern [%vol.]	2.5	2.5
$V_{\text{Paste}}/V_{\text{Agg}}$	1.25	0,98
w/z-Wert	0,22	0,28
w/b-Wert	0,19	0,22
Setzfließmaß [mm]	650	650
$f_{\text{cm}} 7\text{d}-(90^{\circ}\text{C}) [\text{MPa}]$	189	187

Die Mischungen M2Q und B5Q zeigen in ihrer Anwendung eine gute Verarbeitbarkeit. Sie sind sehr fließfähig, mit einen Setzfließmaß von über 650 mm. Auffällig ist der hohe Zementgehalt von 832 und 650 kg/m³. Genau dort befindet sich ein großes Potenzial für ein hohes Schwindmaß. Auch der hohe Anteil von Mikrosilika (27% vom Zementgehalt bei B5Q) ist zu beachten. Er führt einerseits zu erhöhten Festigkeit, andererseits aber auch zu einem höheren Schwinden [3].

1.2 IBB Projekt „Normalbeton-UHPC-Verbundstütze“

Das Institut für Betonbau (IBB) der Technischen Universität Graz untersucht in Kooperation mit der *MABA Fertigteilindustrie GmbH*, aufbauend auf dem vorangegangenen Forschungsvorhaben *Substitution von Stahl durch UHPC* (No. 846023), das Verhalten von Normalbeton-UHPC-Verbundstützen (UHPC-filled NSC tube columns). Das Ziel dieser Kooperation ist es hoch effiziente und belastbare UHPC Produkte zu entwerfen, welche bisher vorwiegend aus Stahl gefertigt wurden. Die Verbundstützen bestehen aus einem Normalbetonmantel und einem UHPC-Kern. Der Mantel wird in Schleuderbetonweise hergestellt. Dadurch werden üblicherweise die Größtkörner des Normalbetons (NSC) durch Zentrifugalkräfte an den äußeren Rand des Stützenmantels gedrückt. Somit bilden zumeist feinkörnige Bestandteile eine Leimschicht (Schlempe) als Übergang zum Kern. Der Kern wird mit UHPC gefüllt. Die Verbundstütze ist bewehrt [8].

Der UHPC-Kern weist eine charakteristische Druckfestigkeit von mehr als 150 MPa auf. Die Bewehrung erhöht die Duktilität der Stütze. Der Normalbetonmantel führt zu einer Umschnürung des Kerns, wodurch die Tragfähigkeit des UHPC erhöht wird. Des Weiteren stellt der Mantel einen effektiven Feuerwiderstand dar. In der darauffolgenden Abbildung 4 ist der schematische Aufbau der Verbundstütze durch einen Schnitt dargestellt.

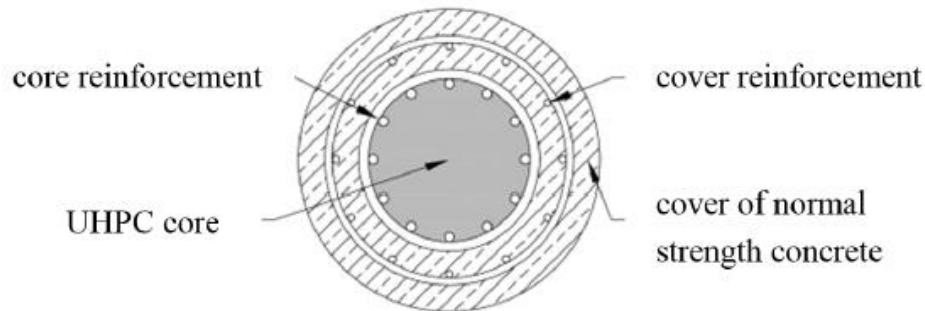


Abbildung 4: Schnitt UHPC-gefüllte-Verbundstütze [8]

Da sich der UHPC eingebettet von Normalbeton befindet, stellt diese Ausgangslage die idealen Voraussetzungen für ein reines autogenes Schwinden ohne Trocknungsschwinden dar. Der UHPC-Kern kann als geschlossenes System, ohne Feuchtigkeitsverlust betrachtet werden. Autogenes Schwinden, hat allgemein bei UHPC eine große Bedeutung, da es im Vergleich zu Normalbeton wesentlich höher ist [9]. Das wiederum hat die Folge, dass der Verbund von Normalbeton und UHPC geschwächt wird und sogar Lücken entstehen können. Diese Tatsache kann folgenschwere Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit von Verbundstützen haben. Dem entgegen zu wirken, ist das Ziel, mit geeigneten betontechnologischen Maßnahmen ein geringes Maß an autogenem Schwinden zu erreichen.

Folgende Anforderungen an die Verbundstütze sind durch die *MABA Fertigteilbau GmbH* vorgegeben:

- Verwendung von Zement und Hüttensand der *MABA Fertigteilbau GmbH*
- Vermeidung von pulverförmigen Mikrosilika und Quarzmehl aufgrund der Gesundheitsgefährdung
- Druckfestigkeit des UHPC nach 28 Tagen: $f_{ck} \geq 150 \text{ MPa}$ und $f_{cm} \geq 165 \text{ MPa}$
- Druckfestigkeit des UHPC nach 90 Tagen: $f_{ck} \geq 165 \text{ MPa}$ und $f_{cm} \geq 180 \text{ MPa}$
- Selbstverdichtende Eigenschaften nach 90 Minuten:
 - Setzfließmaß (Slump Flow) $\geq 700 \text{ mm}$
 - Segregationswiderstand (SR) $\leq 15 \%$
 - Trichterauslaufzeit (V-funnel-Test) = 9 – 25 Sek.
- Minimierung des autogenen Schwindens von UHPC
- Möglichkeit zur Anwendung eines Stahlfaseranteils von 0,5 bis 1,0 Vol. %
- Möglichkeit zur Anwendung eines Polypropylenfasergehalts von rd. 2-3 kg/m³ zur Verbesserung des Feuerwiderstands

Hauptbestandteil dieser Arbeit ist es das autogene Schwinden zu minimieren, um das Verbundverhalten zwischen Normalbeton und UHPC zu stärken. Eine Verbesserung der bisherigen Gegebenheiten wird einen positiven Einfluss auf zukünftige Projekte im Hoch- wie im Tiefbau haben. Zum Beispiel können durch das verbesserte Schwindverhalten und die höhere Festigkeit Stützkonstruktionen für Brückenbauwerke und Hochhausbauten verbessert werden [1].

1.3 Zielsetzung und Umfang der Masterarbeit

Diese Masterarbeit hat sich als Forschungsschwerpunkt die Entwicklung einer geeigneten Betonrezeptur für das gegenständliche IBB-Projekt und eine experimentelle Untersuchung des autogenen Schwindens des UHPC vorgenommen.

Es besteht das Ziel, das Zusammenwirken der Ausgangsstoffe von UHPC genauer zu verstehen, um die Einflüsse mit den heutigen Konzepten der Rezepturentwicklung auf die Mischungen besser zu deuten und einen möglichst schwindarmen aber gleichzeitig ultrahochfesten Beton zu erhalten. Mit der Ausgangsüberlegung der Reduzierung des Zementgehaltes für ein reduziertes Schwinden, dem Ansatz der schrittweisen Optimierung der Packungsdichte und der „Superplasticizer-Water -Solution-Demand“-Methode [1] wird der Einfluss von Zusatzstoffen in Verbindung mit Zement und Fließmittel genauer untersucht. Durch die Erhöhung der Packungsdichte können höhere Festigkeiten mit geringem Zementgehalt erreicht werden.

Der Kern dieser Studie fokussiert sich auf die Anwendung für den Praxisgebrauch und die Minimierung des autogenen Schwindens. Es sollen die geeigneten Materialien ausgewählt werden, um eine optimale Leimzusammensetzung und Kornzusammensetzung der UHPC-Rezeptur zu erhalten.

Das autogene Schwinden hat für UHPC eine große Bedeutung. Zur Reduzierung des Schwindens soll der Zementanteil und der Anteil an reaktiven Zusatzstoffen der UHPC-Rezeptur minimiert werden. Wegen der starken Wechselwirkung aller Bestandteile werden die Einflüsse der einzelnen Ausgangsstoffe überprüft.

Die Untersuchungen des autogenen Schwindens ist im Labor für konstruktiven Ingenieurbau an der Technischen Universität Graz durchgeführt worden. Hierfür werden zwei unterschiedliche Messaufbauten für das autogene Schwinden geprüft. In den Untersuchungen zum autogenen Schwinden werden die eigenen experimentellen Ergebnisse mit jenen von anderen wissenschaftlichen Arbeiten verglichen. Ergänzt wird die Arbeit mit der Bestimmung der Frisch- und Festbetoneigenschaften.

Die Arbeit zielt darauf ab die Verbundwirkung zwischen Normalbetonmantel und UHPC-Kern zu stärken. Durch das geringere Schwinden wird das mechanische Verhalten der Verbundstützen für die hohen Anforderungen in der Baupraxis verbessert.

2 Terminologie und Mechanismus von Schwinden

2.1 Definitionen

Schwinden ist die Volumenverringerung des Zementsteins. Es ist unter anderem abhängig von Alter, Größe und Umgebungsbedingung des Bauteils, vom Zement- und Wassergehalt des Betons, sowie der Art und Kornzusammensetzung der Gesteinskörnung [2].

Es wird grundsätzlich zwischen folgenden Schwindprozessen unterschieden:

- Chemisches Schwinden: Absolute Volumenreduktion entstehend durch die Hydratationsreaktion in einem zementhaltigen Material [10].
- Autogenes Schwinden: Das Schwinden eines geschlossenen, isothermen, zementhaltigen Materialsystems, das keinen äußeren Kräften ausgesetzt ist [10].
- Selbstaustrocknungsschwinden: Autogene Verformung eines zementhaltigen Materialsystems nach dem Abbinden durch chemisches Schwinden [10].
- Plastisches Schwinden: Kapillarschwinden, auch Fröhschwinden, äußere Verformung infolge von Wasserverlust des frischen Betons über die Betonoberfläche [2].
- Carbonatisierungsschwinden: Schwindverformung durch bei der Hydratation von Portlandzementklinker entstehendes Calciumhydroxid, gebildet mit aus der Luft eindiffundierten und im Porenwasser gelösten Kohlendioxid, Calciumcarbonat und Wasser [2].
- Trocknungsschwinden: Lastunabhängiges Schwinden durch Abgabe von Wasser (Verdunstung) über die Bauteiloberfläche an die Umgebung [2].

Da es sich bei dem vorliegenden Projekt um eine Verbundstütze handelt und der UHPC Kern ein geschlossenes System darstellt ohne nennenswerten Feuchtigkeitsverlust, sind einige Schwindprozesse von untergeordneter Bedeutung. Das Carbonatisierungsschwinden entfällt, da keine Luft den UHPC-Kern erreicht. Das Trocknungsschwinden und plastisches Schwinden werden vernachlässigt, da es zu keinen signifikanten Feuchtigkeitsverlusten an der Oberfläche kommt.

2.2 Von der Hydratation zum autogenen Schwinden

Es wird unterschieden zwischen der frühen (flüssiger Zustand), mittleren (semi-viskoser Zustand) und späten (erhärteter Zustand) Phase (siehe Abb. 5). In der frühen Phase beginnt der Zement mit dem Wasser zu reagieren. In der mittleren Phase reagieren Tricalciumsilikat (C_3S) und Dicalciumsilikat (C_2S) mit Wasser. Dabei bilden sich amorphe Calciumsilikathydrate (CSH) und kristallines Calciumhydroxid (CH). Aluminate formen Ettringit. Die frühen Hydratationsprodukte sind hauptsächlich lange Fasern, welche in die Hohlräume hineinwachsen. In der abschließenden späten Phase schließen sich dichte Schichten, welche den Reaktionsprozess verlangsamen [10].

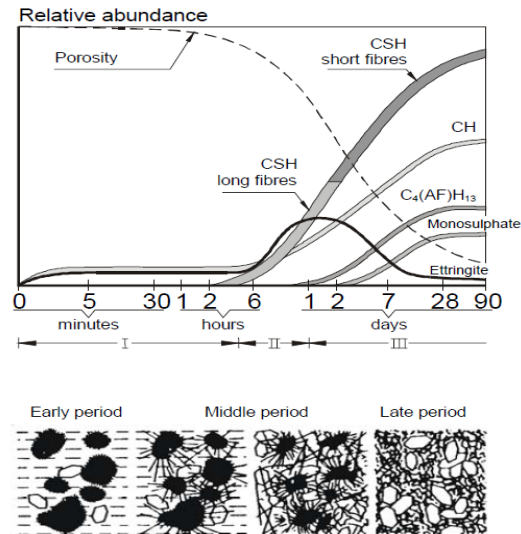


Abbildung 5: Die drei Phasen der Hydratation [10 S. 12]

Der Grad der vollen Hydratation, wird nach Power's [11] bei einem w/z-Wert von 0,42 erreicht. Wenn der w/z-Wert geringer ist, stoppt die Hydratation wegen Mangels an Wasser und es verbleibt im ausgehärteten Zustand eine erhebliche Menge an unhydratisiertem Zement. Bei Betrachtung der Mikrostruktur entwickelt sich beim Zement mit der Zugabe von Wasser eine kolloidale Suspension (Zementleim) zu einem porösem Feststoff. In der dritten Phase entleeren sich die mit Wasser gefüllten Poren (Abb. 6) [10].

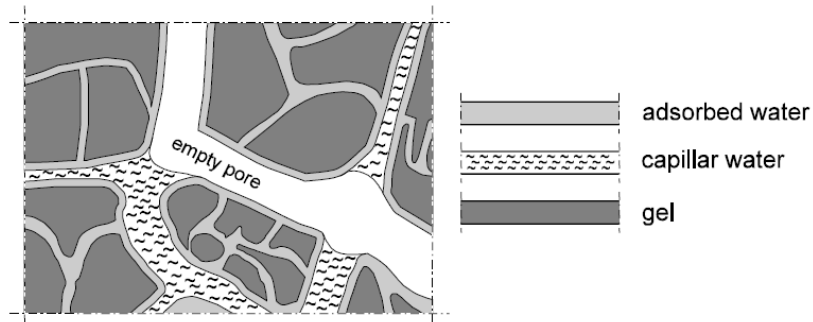


Abbildung 6: Schematische Ansicht von Wasser in Porensystem des Zementleims [10 S. 14]

Für UHPC wurde entdeckt, dass dieser sensibler gegen Mikrorissbildung in der frühen Phase des Erhärtens ist [5]. Diese Sensitivität wird auf das autogene Schwinden zurückgeführt, wobei die Summe der Volumina der Reaktionsprodukte kleiner ist als die der Ausgangsstoffe (Abb. 7). In der Abbildung 7 ist der Zusammenhang von chemischem und autogenem Schwinden nach [9] veranschaulicht.

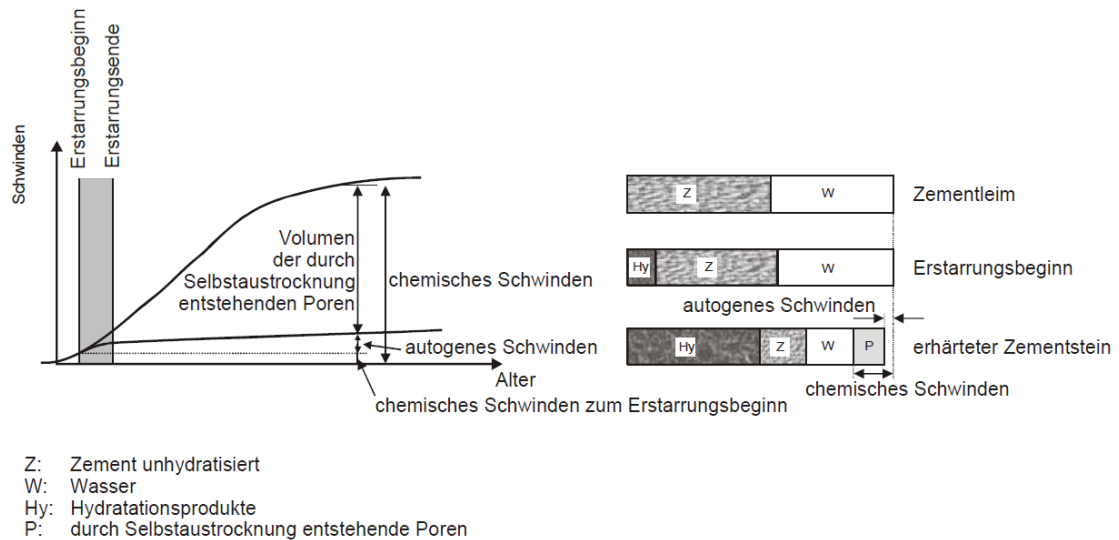


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen chemischem und autogenem Schwinden in Anlehnung an [9] von [12 S. 4]

In der Abbildung 8 ist das Schwindverhalten der Referenzmischung B5Q zu sehen. Wobei das Schwinden mit und ohne Feuchtigkeitsverlust an die Umgebung dargestellt ist. Es grenzt das autogene Schwinden von Trocknungsschwinden ab und verdeutlicht für UHPC den Anteil des Trocknungsschwindens und den hohen Anteil des autogenen Schwindens [6]. Die Mischung beinhaltet Fasern (2,5 Vol.-%). Deswegen sind die Endschwindmaße mit Vorsicht zu betrachten.

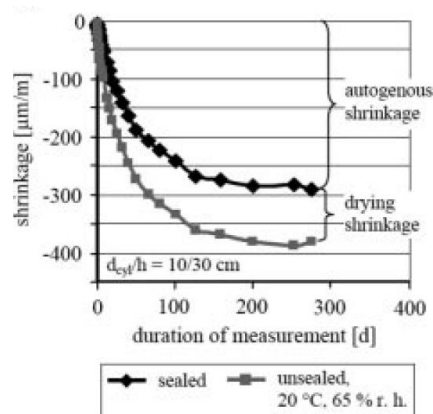


Abbildung 8: Autogenes Schwinden im Vergleich zum Trocknungsschwinden von grobkörnigen UHPC BQ5 [3 S. 147]

2.3 Chemisches Schwinden

Das chemische Schwinden ist eine Folge der Zementhydratation. Dieser Prozess lässt sich durch die geringeren Reaktionsproduktvolumen im Vergleich zu dem Ausgangsstoffvolumen erklären. Die Ursache hierfür wird durch den Einbau von Wassermolekülen in das Hydrationsproduktgitter beschrieben [10].

Für immer kleinere w/z - Werte führt die fortschreitende Hydratation dazu, dass dem vorhandenen Porenraum Wasser entzogen wird. Es entsteht eine innere Selbsttrocknung (Self desiccation), dies kann zu Mikrorissen im Inneren führen. So kommt es ohne Wasserverlust nach außen und trotz konstanter Temperatur zum autogenen Schwinden.

Die Änderung der inneren Feuchte führt zu Kapillarkräften und damit zum Schwinden. Diese physikalische Änderung wird als Ursache für Schwinden und Rissbildung vermutet [2, 9, 13].

2.4 Antreibenden Kräfte von autogenem Schwinden

Es existiert eine allgemeine Zustimmung über die Verbindung von autogenem Schwinden und Änderung der relativen Feuchte (RH) in den Poren von erhärtetem Zementleim [10]. Die Mechanismen, die zu autogenem Schwinden führen, sind Oberflächenspannungen von festen Gelpartikeln, Druckverlust und Spannungen in den Kapillarporen. Diese werden laufend diskutiert, da zurzeit noch keine allgemein gültige Definition existiert.

Innere Selbsttrocknung (Self-desiccation):

Das chemische Schwinden kann nur vollständig in eine äußere Volumenänderung umgewandelt werden, solange der Zementleim flüssig ist. Das heißt, dass der flüssige Leim die inneren Hohlräume, aufgrund der Kontraktionen durch das chemische Schwinden nicht aufrechterhalten kann.

Sobald der Leim erhärtet, nimmt die Steifigkeit zu und Luftblasen entstehen. Diese wachsen in den größeren Poren heran und bilden Wasser-Luft-Menisken. Dabei sinkt die relative Feuchte (Kelvin's Gesetz). Hydrostatische Zugspannungen entstehen in der Porenflüssigkeit aufgrund des Hydratationsprozesses (Laplace-Gesetz).

Die Abbildung 9 zeigt die Bildung eines leeren Porenvolumens (Hohlräume) aufgrund des chemischen Schwindens. Dies führt zu einer Verringerung des Krümmungsradius der Menisken und zu einem Schwinden aufgrund erhöhter Zugspannungen in der Porenflüssigkeit [14].

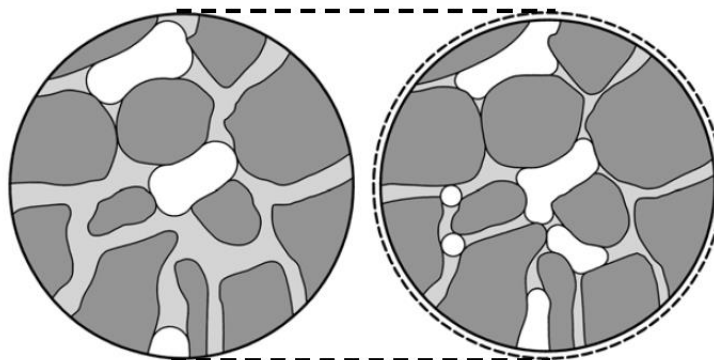


Abbildung 9: Schematischer Aufbau von Größtkorn des hydratisierenden Zementleims. Links: niedriger Hydratationsgrad. Rechts: hoher Hydratationsgrad. Feststoffe in Dunkelgrau, Porenwasser in Hellgrau und Hohlräume in Weiß [13]

Der Abfall der relativen Feuchte führt zu einer Änderung der Dicke, der auf den festen Oberflächen adsorbierten Wasserschicht. Wegen des frühen Stadiums der Hydratation ist der Leim zähflüssig, so dass eine geringe Belastung der Matrix zu einer starken Verformung führt. Dies geht mit Veränderungen sowohl der Oberflächenspannung der Feststoffe als auch des Spaltdrucks von adsorbiertem Wasser zwischen festen Oberflächen einher. Die daraus entstehenden Kapillarzugspannungen werden als Hauptursache für die autogene Verformung vermutet [13].

Kapillarzugspannungen

Nach [10] treten bei der Bildung von Wassermenisken in den Kapillarporen Kapillarzugspannungen auf. Die Porenwände haben das Bestreben sich zusammen zu ziehen und vermindern damit das Volumen.

In Abbildung 10 ist zu sehen, dass mit abnehmender relativer Feuchte und Volumenverringern des Porendurchmessers die Kapillarzugspannungen ansteigen, welche wiederum zu einer autogenen Verformung führen [14]. Dieser Kapillarspannungsansatz zeigt eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen von [15] und [10].

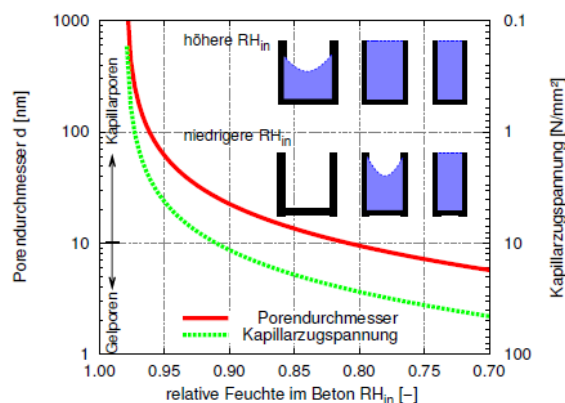


Abbildung 10: Porendurchmesser zur relativen Luftfeuchtigkeit nach [14 S. 85]

2.5 Einfluss der Ausgangsstoffe auf das autogene Schwinden

In diesem Unterkapitel werden folgende Einflüsse der Ausgangsstoffe und Beobachtungen zum Verhalten des autogenen Schwindens aufgelistet.

- Eine höhere Menge und Feinheit des Zements beschleunigt die Hydratation und erhöht das autogene Schwinden. Das Zementgrößtkorn und seine Verteilung beeinflussen das Porensystem. Feiner Zement in Verbindung mit Wasser weist eine niedrigere relative Feuchte auf, entsprechend entwickelt sich das autogene Schwinden schneller und erreicht einen größeren Endwert [10].
- Niedrige w/z-Werte weisen ein hohes autogenes Schwinden auf (Abb. 11). Die Begründung liegt in der inneren Selbstaustrocknung und den feinen

Kapillarporen. Es beginnt umso früher, je niedriger dieses Verhältnis ist [14, 16, 17].

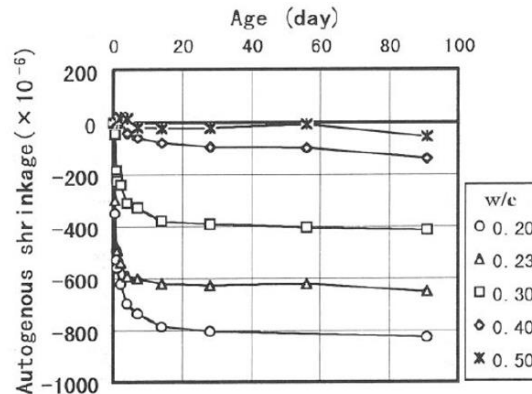


Abbildung 11: Autogenes Schwinden in Abhängigkeit von w/z-Wert [18]

- Ein erhöhtes autogenes Schwinden im Zementleim kann auch mit steigendem C_3A und C_4AF Gehalt festgestellt werden [14]. Ähnliche Ergebnisse in Bezug auf den Einfluss von C_3A wurden für ultrahochfesten Beton festgestellt [7].
- Ein erhöhtes Leimvolumen (Abb. 12) zeigt ein größeres autogenes Schwinden [16].

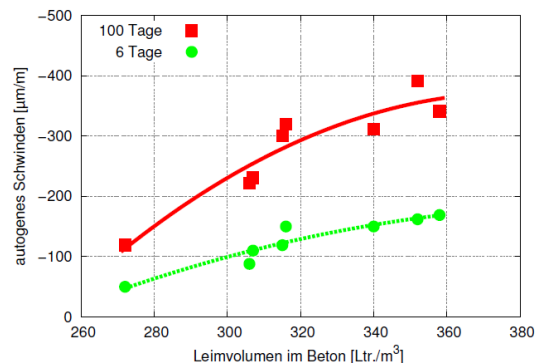


Abbildung 12: Autogenes Schwinden in Abhängigkeit von Leimvolumen [14 S. 89]

- Die puzzolanische Reaktion und der Füllungseffekt, die durch die Verwendung von Mikrosilika entstehen, verstärken das autogene Schwinden. (Abb. 15) [10, 14, 18, 19].

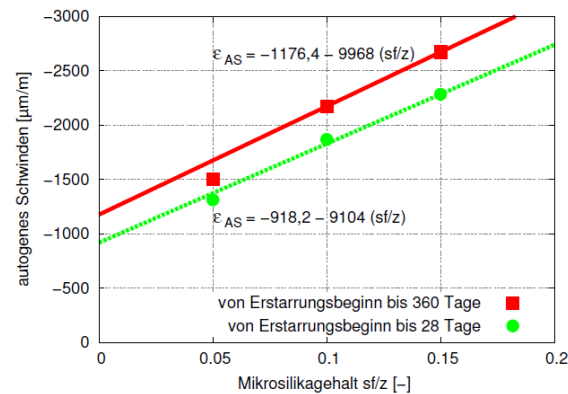


Abbildung 13: Autogenes Schwinden von Zementleim in Abhängigkeit von Mikrosilikagehalt [14 S. 89]

- Substitution von Zement durch gemahlene granulierte Hochofenschlacke (Hüttensand) führte tendenziell zu einem geringeren autogenen Schwinden als reiner Mikrosilika [7, 18]. Der alleinige Einsatz von Hüttensand erhöht den Effekt des autogenen Schwindens [20].
- In den Arbeiten von [9, 14] wurde eine anfängliche Expansion bei der Messung des Schwindverhaltens beobachtet. Dies beruht möglicherweise auf Ettringitbildung, welche sich im festen Gerüst des Zementleims bilden. Eine spätere Umwandlung dieses Ettringits in Monosulfat könnte zu einem zusätzlichen Schwinden führen [10].
- Fließmittel verzögern die Hydratation erheblich und beeinflussen das autogene Schwinden im frühen und sehr frühen Alter. Im späteren Verlauf ist das autogene Schwinden weniger abhängig von Art und Menge des Fließmittels [7].

2.6 Schwindreduzierung durch innere/äußere Nachbehandlung

Um das Schwindverhalten von UHPC zu reduzieren, werden in der Literatur verschiedene Ansätze von innerer Nachbehandlung diskutiert. Es hat einen großen Effekt welche Art von Schwindreduzierung verwendet wird [21].

Die äußere Nachbehandlung bei UHPC ist limitiert und für die Vermeidung der inneren Selbst austrocknung und das damit einhergehende autogene Schwinden nicht geeignet, weshalb innere Nachbehandlungen durch interne Wasserreservoirs effektiver sind. Die zwei gängigsten inneren Nachbehandlungen für UHPC sind LWA (Lightweight aggregate) und SAP (Superabsorbierende Polymere) [22]. Die Verlangsamung des Austrocknens des Zementsteins beschreibt die innere Nachbehandlung [10].

LWA sind poröse leichte Gesteinskörnungen. Sie werden verwendet um Gesteinskörnungen oder Sand zu ersetzen. Sie sind ein poröses Material, welches die Fähigkeit besitzt Wasser zu absorbieren und im Laufe der Hydratation wieder freizugeben. Der Effekt von LWA hängt von dem notwendigen Wassergebrauch, der Saugfähigkeit und der Verteilung von LWA in der Betonmischung ab. Beim Einsatz von LWA sind die Porosität und die Partikelgröße von entscheidender Bedeutung, um eine effektive innere Nachbehandlung zu gewährleisten [23].

Die zweite Möglichkeit besteht in der Zugabe von SAP. Diese superabsorbierenden Polymere können ein Vielfaches ihres Eigengewichts an Wasser aufnehmen. Während der

Hydratation geben sie das Wasser wieder ab. Dabei verbleiben luftgefüllte Poren (50 bis 1000 Mikrometer) in der Matrix von Beton [22].

Die innere Nachbehandlung hat ihre Kritikpunkte bei der Anwendung von UHPC. Die beim Einsatz von SAP entstandenen Luftporen, stellen Schwachstellen in der gesamten Matrix dar. Das führt tendenziell über die Zeit zu geringen Druckfestigkeiten. Hier gehen die Forschungsergebnisse weit auseinander. Diese reichen von einem großen Abfall der Festigkeit bis hin zu gleichbleibenden Druckfestigkeiten [23]. Im Falle von UHPC besteht eine sehr dichte Zementmatrix, welche den vorgesehenen Wassertransfer behindert, weil die Leimmatrix von UHPC eine hohe Dichte aufweist [23]. Auch ist eine geringere Fließfähigkeit zu beobachten, welche wiederum Gegenmaßnahmen benötigt, um die Verarbeitbarkeit zu gewährleisten [12]. Ebenfalls sind steifere UHPC-Mischungen beobachtet worden. Sie weisen zwar geringes Schwinden auf, aber in Bezug auf die selbstverdichtenden Eigenschaften, ist mit höherem Porenanteil zu rechnen.

Eine weitere Lösung ist die Zugabe von Fasern (10 bis 15 % weniger Schwinden). Die Verarbeitbarkeit wird mit zunehmendem Fasergehalt erschwert. Dem entgegen zu wirken, wird unter anderem das Leimvolumen erhöht, was allerdings zu erhöhtem Schwinden durch Hydratation führt [12, 24].

2.7 Messmethoden des Schwindens

In diesem Unterkapitel sind die aktuellen und gängigen Messmethoden für Schwinden und besonders für autogenes Schwinden aufgezeigt. Einige Messmethoden für autogenes Schwinden finden sich in der amerikanischen (ASTM) Norm für Zement und Mörtel wieder. In der Europäischen Norm gibt es noch keine allgemein gültige Regelung für das autogene Schwinden von UHPC. Zur weiteren Betrachtung findet sich im Anhang A eine zusammenfassende Tabelle mit Abbildungen sowie Vor- und Nachteilen der angeführten Messmethoden.

Nach der ASTM kann mit dem **Schwindring** eine Messung des behinderten Schwindens durchgeführt werden. Der Beton wird in eine ringförmige Stahlschalung eingefüllt. Die Messung ermöglicht auftretende Spannungen zu erfassen, wodurch auf das Schwinden zurückgeschlossen werden kann. Der Messverlauf gemäß ASTM C1581 zeigt den Zeitpunkt der Rissbildung, die Entwicklung der Zugspannungen und somit den Verlauf des Schwindens. [25] Bei diesem Versuchsaufbau kann ein Feuchtigkeitsverlust nicht komplett ausgeschlossen werden, somit ist es für die autogene Schwindmessung nur bedingt geeignet.

Die **Schwindrinne** beruht auf dem Konzept der horizontalen Schwindmessungen. Mit der Schwindrinne können die Längenänderungen durch einen Wegaufnehmer bestimmt werden. Dieses Messprinzip findet sich in der ÖNORM B3329 für Vergussmörtel und ist für die Aufzeichnung von Trocknungsschwinden vorgesehen. Für autogenes Schwinden wird der Prüfkörper vor Feuchtigkeitsverlust geschützt. Von dem Japan Concrete Institut (JCI) und RILEM (Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux) aus Frankreich wird dieser Messaufbau für die autogene Schwindmessung von grobkörnigen Materialien empfohlen.

Mit dem **Schwindkegel** können Frischbetoneigenschaften bestimmt werden. Durch diese Methode ist es möglich das Schwind- und Dehnverhalten nach Mischungsbeginn zu beschreiben. Von Vorteil bei dieser Untersuchungsmethode ist das Messsystem mit einem Lasersensor. [7] konnte die nachhaltigen isothermen Bedingungen aufzeigen und den Schwindkegel als Alternative für die folgenden gewellten Plastikrohre bewerten. Die autogene Schwindmessung ist möglich, aber wegen des Platzproblems nicht für ein Größtkorn von 16 mm geeignet.

Hansen und Jensen haben **gewellte Plastikrohre** entwickelt, um damit das autogene Verhalten von Mörtel und feinkörnigem Beton zu bestimmen. Von Vorteil ist die Genauigkeit der Messung. Die gewölbte Form der Rohre eignet sich nach Hansen und Jensen besonders gut, um kleinste Veränderungen des Schwindverhaltens zu bestimmen [13, 26]. Diese Methode ist in ASTM-C1698-09, "Standard test method for autogenous strain of cement paste and mortar", als Norm für die Bestimmung des autogenen Schwindens von Zementleim und Mörtel festgelegt. Der Versuchsaufbau eignet sich nicht für ein Größtkörn von 16 mm.

Für diese Arbeit wird wegen der Art der Mischung ($D_{\text{MAX}} = 16$ [mm]) die horizontale Schwindrinne und eine Abwandlung der gewellten Plastikrohre nach Hansen und Jensen verwendet. Für das autogene Schwinden ist es maßgebend, ein abgeschlossenes System zu schaffen, damit es zu keinem Feuchtigkeitsverlust kommt. Die Vorrichtung der Schwindrinne hat sich in anderen Forschungsarbeiten bewährt. In dieser Arbeit wird ein modifizierter Messaufbau nach dem Prinzip der vertikalen Schwindmessung auf ihre Brauchbarkeit und Korrelation zur Schwindrinne überprüft. In Kapitel 6 werden die Messaufbauten im Detail beschrieben und die wichtigsten Überlegungen diskutiert.

3 Materialien

3.1 Ausgangsstoffe

In diesem Kapitel werden die in dieser Studie verwendeten Materialien aufgezeigt und ihre Funktion und Wirkung auf das Endprodukt der Untersuchung beschrieben. In der Tabelle 2 ist eine Zusammenfassung der verwendeten Materialien zu sehen.

Tabelle 2: Verwendete Materialien in dieser Studie

Bezeichnung	Typ	Dichte [g/cm³]	Hersteller	Funktion
Kir_Cem	Cem I – 42.5 N SR 0 WT 27 - C ₃ A frei	3.1	Kirchdorfer Zement	Bindemittel
Laf_Cem	Cem I – 52.5 N – C ₃ A frei	3.1	Lafarge Zement Mannersdorf	Bindemittel
Kislag	Hüttensand	2.85	Kirchdorfer Zement	Reaktiver Füller
SF_susp.	Flüssiger Mikrosilika	2.2 mit 50% Wasseranteil	BASF	Reaktiver Ultra feiner Füller
SF_susp_Neu	Flüssiger Mikrosilika	2.2 mit 50% Wasseranteil	RW Silisium GmbH	Reaktiver Ultra feiner Füller
SF_Pow	Mikrosilika	2.2	RW Silisium GmbH	Reaktiver Ultra feiner Füller
BetowflowD	Kalksteinmehl	2.2	Omya Austria	Ultra feiner Füller
QP 16900	Quartzmehl	2.63	Dorfner GmbH	Feiner Füller
SP_BASF_ACE_417	Fließmittel	1.05	BASF	Dispersionsmittel
SP_BASF_ACE_501	Fließmittel	1.05	BASF	Dispersionsmittel
SP_BASF_MasterEase5037	Fließmittel	1.05	BASF	Dispersionsmittel
BT3_H500	Fließmittel	1.05	BT3 Beton Technik	Dispersionsmittel
Gebasand	Quarzsand 0.06- 0.3 mm	2.63	Dorfner GmbH	Feinstoffe
QS 0.3/0.8	Quarzsand 0.3- 0.8 mm	2.63	Dorfner GmbH	Feinstoffe
BS 2/4	Basalt	2.95	Appel Steinbruch GmbH	Gesteinskörnung
BS 4/8	Basalt	2.95	Appel Steinbruch GmbH	Gesteinskörnung
BS 8/11	Basalt	2.95	Appel Steinbruch GmbH	Gesteinskörnung
BS 11/16	Basalt	2.95	Appel Steinbruch GmbH	Gesteinskörnung

Für die Rezepturentwicklung sollen der C₃A-freie Zement (Kir_Cem), Hüttensand (Kislag) von dem Unternehmen *Kirchdorfer Zement* und eine Silikasuspension (SF_Susp) von *BASF* verwendet werden. Die vorhandene Suspension (SF_susp) wird zur Kontrolle mit einer anderen Suspension (SF_susp_Neu) verglichen.

3.1.1 Zement

Bei dem vom Unternehmen *Kirchdorfer Zementwerk* zur Verfügung gestellte Zement, handelt es sich um einen Portlandzement CEM I 42,5 N SR 0 -WT 27 C₃A-frei. Die Referenzproben sind mit *Lafarge Zement* der Mannersdorf Fabrik aus Niederösterreich, Österreich hergestellt (Tabelle 3).

Tabelle 3: Verwendete Zementarten

	Kir_Cem	Laf_Cem (Referenz)
Typ	CEM I 42,5 N SR 0 -WT 27 C ₃ A-frei	Cem I – 52,5 N – C ₃ A frei
C₃A [wt. %]	< 2,5	<2,5
mittlerer Vol. Durchmesser [µm]	18,24	16,64
Dichte [g/cm³]	3,10	3,10
28 Tage Druckfestigkeit [MPa]	57,3	56

3.1.2 Zusatzmittel

Fließmittel zählen zu den Zusatzmitteln. Für die Untersuchung ist das Fließmittel Premment H500 von *BT3 Betontechnik GmbH* (BT3_H500) verwendet worden. Des Weiteren sind SP_BASF_ACE_417, SP_BASF_ACE_501 und SP_BASF_MasterEase5037 von *BASF* für die Untersuchungen herangezogen worden. Die Kompatibilität der Fließmittel mit dem Zement wird in einer Voruntersuchung überprüft. (siehe Kapitel 4.2.4). Auf Polycarboxylatether basierende Fließmittel weisen eine starke Dispersionsfähigkeit auf. Sie ermöglichen die Verteilung der Feinstoffe, welche ansonsten durch eine elektrostatische Anziehungskraft (Van der Waals Kraft) Agglomerate bilden würden. Bei der Wahl des Fließmittels muss auf die Fließfähigkeit und auf die Hydratation aufgrund der verzögernden Wirkung durch das Fließmittel geachtet werden [1].

3.1.3 Zusatzstoffe

Die verwendeten Zusatzstoffe sind der inerte Füller Betoflow D (Kalksteinmehl) (0,45-12,5 µm) von *Omya Austria* und das Quarzmehl QP 16900 (0,45-87,5 µm) von der Firma *Gebrüder Dornier* (Tabelle 4). Diese sind für die Referenzmischungen verwendet worden. Inerte Stoffe sind reine Füllstoffe. Sie gehen eine begrenzte chemische Reaktion ein und sind somit nahezu inaktive Zusatzstoffe. Quarz- und Kalksteinmehl reagieren nicht mit Zement und Wasser. Deswegen haben sie keinen Einfluss auf die Hydratation. Sie wirken als Füller, durch ihrer Korngröße, -zusammensetzung und – form im Mehlkornbereich.

Tabelle 4: Inerte Zusatzstoffe

	QP16900	BetoflowD
SiO ₂ [wt.%]	99	k. A.
Dichte [g/cm ³]	2.63	2,70
D ₅₀ [µm]	13.13	2,17
mittlerer Vol. Durchmesser [µm]	18.28	2,95

Für das Projekt sind Mikrosilika in flüssiger Form und Hüttensand vom Hersteller bereitgestellt. Das Mikrosilika in flüssiger Form wird verwendet, um die Gesundheitsgefährdung der Pulverform zu vermeiden, deswegen ist es von MABA Kirchdorfer vorgegeben, um den Praxisgebrauch gesundheitsfördernder zu machen.

Zu den reaktiven Füllern zählen Kislag (Hüttensand), geliefert von MABA- Kirchhofer Österreich und das reaktive Pulver Silikafume Elkem 97U, von Elkem aus Norwegen. Der Mikrosilika in flüssiger Form kommt von BASF (Tabelle 5).

Die puzzolanischen Zusatzstoffe sind reaktiv, das Gegenteil von inert, sie reagieren leicht mit anderen Stoffen. Puzzolanische Zusatzstoffe sind Gesteinsmehle vulkanischen Ursprungs, Nebenprodukte aus der Herstellung von Siliciumlegierungen, Trass- oder Sedimentgesteine. Sie reagieren mit dem bei der Hydratation des Zementsteins entstehenden Calciumhydroxid und bilden dabei zementsteinähnliche Erhärtungsprodukte. Ihr Gehalt an reaktionsfähigem CaO ist gering. Der latent hydraulische Stoff Kislag (Hüttensand), benötigt einen Anreger (Calciumhydroxid oder –sulfat), um hydraulisch zu erhärten [27].

Tabelle 5: Reaktive Zusatzstoffe

	SF_Pow	SF_Susp	SF_susp_Neu	Kislag (Hüttensand)
mittlerer Vol. Durchmesser [µm]	1,839	-		15,45
Dichte (susp) [g/cm ³]	2,20	1,40	1,37	2,85
Aktivitätsindex (28 Tage) [%]	112,4	100	100	80
SiO ₂ [wt.%]	98,4	85	85	-
Loss on Ignition [wt. %]	0,5	3	4	-

Die Zusatzstoffe sind in erster Linie für eine höhere Packungsdichte, verbesserte Kornzusammensetzung als Füller, zur Bildung von zusätzlichen Calciumsilikathydrat-Phasen durch die puzzolanische Reaktion und zur Verbesserung der Kontaktzone (ITZ= Interfacial Transition Zone) durch Reduzierung des Porenvolumens gedacht. Es bildet sich damit ein Film um die Gesteinskörnungen, der es den kleinen Partikeln ermöglicht die Zwischenräume um die Gesteinskörnungen zu füllen und damit die rheologischen Eigenschaften mit dem sogenannten Schmierungeffekt zu verbessern [2].

3.1.4 Gesteinskörnungen

Zu den Gesteinskörnungen zählen die Quarzsande von Gebrüder *Dorfner GmbH* QS Geba (Gebasand) (64-304 μm) und Quarzsand QS_0.3/0.8, sowie der Basalt aus dem Steinbruch der *Steirischen Basalt und Hartgesteinwerke Appel* (Tabelle 6). Aufgrund seiner druckfesten Eigenschaften kann der Basalt die geforderten Druckfestigkeiten von größer als 150 N/mm² erreichen. Die Größen der Gesteinskörnungen sind mit 2/4, 4/8, 8/11 und 11/16 mm für die Optimierung der Packungsdichte gewählt.

Tabelle 6: Eigenschaften der Feinstoffe und Gesteinskörnungen

	SiO ₂ [wt.%]	Dichte [g/cm ³]	D ₅₀ [μm]	Mittlerer Vol. Durchmesser [μm]
QS Gebasand	99	2,63	103,30	152,63
QS 0.3/0.8	99	2,63	515.80	693.88
BS 0/2	-	2,95	-	5872,8
BS 2/4	-	2,95	-	2812,4
BS 8/11	-	2,95	-	-
BS 11/16	-	2,95	-	-

3.1.5 Wassergehalt und w/z-Wert

Das Anmachwasser setzt sich aus dem Zugabewasser, dem Wasseranteil von Fließmittel (70 %), der Feuchtigkeit der Zuschläge, sowie dem Wassergehalt der Suspension (50 %) zusammen. Um exakte Aussagen der Wassermenge zu treffen, wurden die Gesteinskörnungen im Trockenofen getrocknet. Die restlichen Ausgangsstoffe sind bis zur Anwendung trocken und luftdicht gelagert. Der W/Z-Wert wird für alle Untersuchungen konstant gehalten. Er wird so ausgewählt, dass er nicht nur niedrig genug für eine Betondruckfestigkeit von 180 MPa ist, begünstigt durch die Festigkeitsverbesserung der puzzolanischen Reaktion von Mikrosilika, sondern auch hoch genug, um eine gute Verarbeitbarkeit zu gewährleisten [1].

3.2 Kompatibilität Zement, Zusatzmittel und Zusatzstoffe

Die Kompatibilität von Zement und Fließmittel bestimmt stark die Fließfähigkeit von UHPC. Dies ist abhängig von der Zusammensetzung des Zementklinkers und der chemischen Struktur des Fließmittels. Die Kompatibilität von Zement und Fließmittel wird hier experimentell durch den „Superplasticizer-Water-Solution-Demand-Test“ bewertet [1].

Ultrafeine, hochreaktive Zusatzstoffe sind bei der Herstellung von UHPC mit ihrer puzzolanischen Reaktion zur Verbesserung der Mikrostruktur und die damit einhergehende Verringerung der Gesamtporosität notwendig [10]. Sie haben einen Füllstoffeffekt aufgrund der Partikelgröße, wobei die durchschnittliche Partikelgröße kleiner ist als die der

Zementpartikel [27]. Außerdem stärken sie die Kontaktzone (ITZ) der Zuschlagstoffe und des Zementleims [10]. Die zusätzliche Menge an reaktiven Zusatzstoffen, die nur eine Rolle als Füllstoff spielt, wenn zu wenig Ca(OH)_2 zur Reaktion vorhanden ist, kann durch einen effektiven inerten Füllstoff zur Reduzierung der Materialkosten ersetzt werden [1].

Der verwendete Hüttensand benötigt Zement zur Reaktion. Die Hydratation verläuft langsamer, dadurch wird in der Anfangserhärtung weniger Hydrationswärme frei. Der Hüttensand verbessert durch die chemische Reaktion die Matrix des Leims und führt zu höheren Festigkeiten.

BetoflowD, der verwendete inerte Zusatzstoff, erhöht den Mehlkorngesamt und verringert die Porosität. Durch die Verwendung von BetoflowD wird der Leim fließfähiger. Zu viel BetoflowD ist nachteilig, da der Pulver- und Wassergehalt steigt und damit auch mehr Energie für den Mischvorgang notwendig wird [1].

3.3 Zusammenfassung und Diskussion

Die Ausgangsstoffe wurden in diesem Kapitel aufgezeigt. Zusammenfassend sind die zu diskutierenden Punkte für die UHPC-Rezeptur aufgelistet:

- Der vorgegebene Zement (Kir_Cem) muss auf seine Leistungsfähigkeit überprüft werden. Dafür wird eine Referenzmischung mit Lafarge Zement (Laf_Cem) herangezogen. Hiermit kann eine gute Abschätzung über die Eigenschaften von Kirchdorfer Zement getroffen werden.
- Die Mikrosilika als Suspension (SF_susp) und pulverförmig (SF_pow) werden ebenfalls auf ihre Leistungsfähigkeit überprüft. Wobei die Suspension zusätzlich mit einem neuen Produkt (SF_susp_Neu) verglichen wird.
- Durch einen konstant gehaltenen w/z-Wert lässt sich das Zusammenwirken aller Leimbestandteile vergleichen.
- Die Kompatibilität des Fließmittels mit den inerten und reaktiven Stoffen wird über die „Superplasticizer-Water-Solution-Demand“ - Methode genauer untersucht. Hierbei liegt der Fokus auf einer hohen Packungsdichte, ausreichenden Festigkeit, und einer ausreichenden Verarbeitbarkeit. Der zu hohe Anteil an reaktiven Stoffen kann schrittweise durch inerte Stoffe ersetzt werden.

4 UHPC Entwicklung

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie eine geeignete UHPC-Rezeptur für die geforderten Anforderungen des Verbundstützen-Projektes entwickelt wird. Dabei wird die betontechnologische Herangehensweise der Dissertation „Ein Beitrag zur systematischen Rezepturentwicklung von Ultra-Hochleistungs-Faserbeton“ [1, 28] verfolgt. Darin wird ein Ansatz beschrieben, wie die Packungsdichte durch den Einfluss der einzelnen Materialien, schrittweise verbessert wird.

4.1 Konzept „Schrittweise Optimierung der Packungsdichte“

Die „Superlasticizer-Water-Solution-Demand“ - Methode berücksichtigt die Kompatibilität der Rohmaterialien und die Packungsdichte. Das Ergebnis ist ein nachhaltiges Konzept, um ressourcenschonend die Materialien auszuwählen und die optimale Zusammensetzung einer UHPC-Rezeptur zu bestimmen.

Mit der einfachen Idee, Hohlräume zwischen großen Körnungen mit kleineren Körnungen und nochmals kleineren Körnungen aufzufüllen, um die Packungsdichte zu verbessern, entstand die schrittweise Optimierung der Packungsdichte. Der bekannte Zusammenhang zwischen Dichte ist gleich Masse durch Volumen, hilft die Gleichung der Packungsdichte zu beschreiben. Die Packungsdichte ($\beta_{mix-actual}$) ergibt sich aus dem Verhältnis von Feststoffvolumen (V_{solid}) zu Gesamtvolumen des Partikelgemisches (V_{bulk}):

$$\beta_{mix-actual} = \frac{V_{solid}}{V_{bulk}} = \frac{\frac{M}{\rho_{solid}}}{\frac{M}{\rho_{bulk}}} = \frac{\rho_{bulk}}{\rho_{solid}} \quad (1)$$

Dabei stehen M für Masse und ρ für Dichte. Daraus resultiert der Hohlraumanteil des Partikelgemisches (\emptyset):

$$\emptyset = 1 - \beta_{mix-actual} \quad (2)$$

Mit einer höheren Packungsdichte benötigt es weniger Leim, um die Hohlräume zwischen den Gesteinskörnungen zu füllen. Das hilft, um eine gute Fließfähigkeit zu erhalten.

Die Regel für die Kombination der Leim- und Kornzusammensetzung wird mit der folgenden Gleichung nach [29] ausgedrückt. Sodass mit einem konstant gehaltenem Leimgehalt (V_{paste}) das Gesteinsvolumen ($V_{Aggregate}$) bestimmt werden kann. Dabei wird postuliert, dass der typischerweise 2 % Luftgehalt von Beton (V_{Air}) vernachlässigbar gering ist ($V_{Air} = 0$ [Vol.%]):

$$V_{paste} + V_{Aggregate} + V_{Air} = 1 [m^3] \quad (3)$$

Die Kombination von Leim und der günstigsten Zusammensetzung der Gesteinskörnungen (vgl. 4.1.2.) wird hinsichtlich Viskosität, selbstverdichtende Eigenschaften, Fließfähigkeit (Setzfließmaß) und der 28 Tage Druckfestigkeit getestet.

Für UHPC mit einem hohen Gesteinsvolumen ist die Verbesserung der Verarbeitbarkeit abhängig von der Größe der Leimschicht zwischen den Körnern, welche bei einer Erhöhung der Packungsdichte zunimmt. Es kann davon ausgegangen werden, dass je höher die Packungsdichte der Gesteinskörnungen ist, ein desto geringeres Leimvolumen benötigt wird, um eine bessere Verarbeitbarkeit zu erzielen [28].

4.1.1 Leimzusammensetzung

Für die Leimbestandteile wird die optimale Zusammensetzung im nassen Zustand mit Wasser und Fließmittel bestimmt. Für die Gesteinskörnungen (größer als 125 μm) wird die Packungsdichte im trockenen Zustand bestimmt.

Das tatsächliche Verhalten von Leimvolumen kann bisher, wegen der physikalischen-chemischen Wechselwirkung der feinen Bestandteile, nicht ausreichend mit den vorhandenen Modellen zur Berechnung der Packungsdichte realitätsnah abgebildet werden. Experimentelle Ergebnisse erzielen bisher bessere Ergebnisse als die berechneten.

Aufbauend auf der „Water-Demand-Measurement“-Methode nach Marquart [30] wird die Packungsdichte für die Feinstoffkomponenten unter nassen Bedingungen bestimmt. Die Methode von Marquart besagt, dass Feinstoffe mit kontinuierlicher Wasserzugabe (W) gemischt werden. Dabei wird der Energieverbrauch der Mischprozedur gemessen. Mit fortlaufender Mischdauer steigt der Energieverbrauch mit zunehmendem Anteil an Flüssigkeit, durch die sich einstellende Oberflächenenergie der Partikel an. Bei 100% Wassersättigung der Hohlräume bildet sich ein dünner Wasserfilm um jedes einzelne Partikel. Bei einer weiteren Zugabe von Wasser ist der Spitzenwert der Mischenergie überschritten und es kommt zu einem rapiden Abfall des Energieverbrauches (Abb. 14).

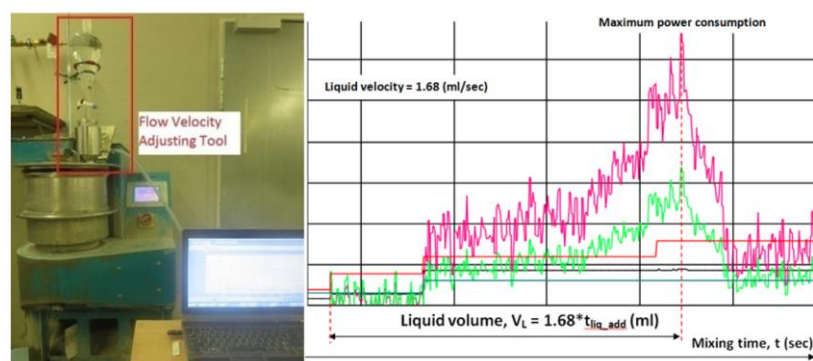


Abbildung 14: Links: Das Equipment für den „Superplasticizer-Water-Solution-Demand-test“. Rechts: Entwicklung der Mischungsenergie [1 S. 48]

Die experimentellen Untersuchungen in [1] haben gezeigt, dass sich die wirkliche Packungsdichte der Feinstoffe erst unter Berücksichtigung der Kompatibilität von Fließmittel und Feinstoffen einstellt. Diese Beobachtung führte zum „Superplasticizer-Water-Solution-

Demand-Test“. Die Prozedur ist dieselbe wie bei Marquart, jedoch wird anstatt von Wasser ein Fließmittel/Wasser Gemisch verwendet (ein SP/W-Anteil von 10 Gew. % wird vorgeschlagen).

Ein entscheidender Punkt für die Rezepturentwicklung ist die Bestimmung des w/z-Wertes. Für die Wahl des w/z-Wertes wurde auf die Studie von [11] zurückgegriffen. Darin ist die Beziehung zwischen w/z-Wert und Druckfestigkeit von Mörteln kalkuliert worden (Tabelle 7). Der w/z-Wert wird derart gewählt, so dass sich mit der Reaktion von Mikrosilika eine ausreichend hohe Festigkeit ergibt. Gleichzeitig soll sich eine gute Fließfähigkeit einstellen.

Tabelle 7: Die Beziehung zwischen w/z-Wert und Festigkeit von Mörtel ohne zusätzliches zementhaltiges Material nach Powers [11]

w/z-Wert	0,29	0,28	0,27	0,26	0,25	0,24	0,23	0,22	0,21
f _c [MPa]	135	141	146	152	158	164	170	177	185

Die folgenden Schritte beschreiben das Vorgehen mit der „Superplasticizer-Water-Solution-Demand“-Methode. Zuerst wird die Wirkung unterschiedlicher Fließmittel in Verbindung mit Zement auf ihre Packungsdichte (Abb. 15a) getestet. Weiters wird der Einfluss verschiedener Zemente in Verbindung mit Fließmittel auf die Festigkeit aufgezeigt (Abbildung 15b). Abschließend wird die Kombination von Fließmittel, Mikrosilika und Zement auf ihre Festigkeit verglichen (Abb. 15c).

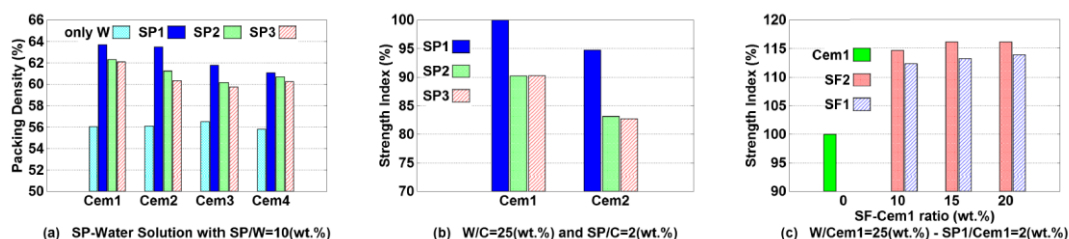


Abbildung 15: Einfluss von Fließmittel auf Packungsdichte [28]

Es soll sich beim Leim eine hohe Packungsdichte einstellen. Dafür müssen die optimalen Anteile der einzelnen Komponenten für Leimsysteme, unter Berücksichtigung der Packungsdichte bestimmt werden. Die Ergebnisse der Studie von [28] für die optimalen Anteile von inerten Zusatzstoffen (QP, Abb. 16a), reaktiven Zusatzstoffen (SF2, Abb. 16b) und des Fließmittels (SP1, Abb. 16c) können in der folgenden Abbildung nachvollzogen werden.

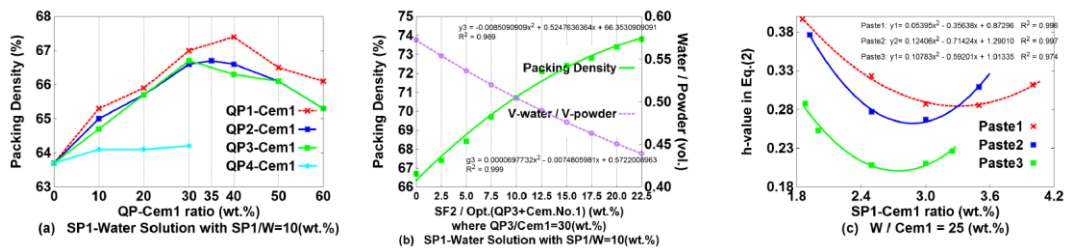


Abbildung 16: Schema zur Bestimmung der optimalen Leimzusammensetzung nach [28]

Die erzielten Ergebnisse aus [28] für die idealen Anteile von inerten/ reaktiven Stoffen und Fließmittel werden für diese Studie adaptiert. Dabei liegt der inerte Füllstoffanteil zwischen 30 und 40 [wt.%], der Mikrosilikaanteil zwischen 10 und 15 [wt.%] und der Fließmittelanteil bei 3,5 [wt.%] von Zementgehalt. Diese Werte stellen eine gute Ausgangslage für eine UHPC-Rezeptur dar.

Die „Superplasticizer-Water-Solution-Demand“-Methode lässt erkennen, dass durch die Optimierung der Packungsdichte die Anzahl und die gesamte Oberfläche der kleineren Gesteinskörnungen signifikant ansteigen. Die plastische Viskosität, Fließfähigkeit und Druckfestigkeit verbessern sich deutlich durch die erhöhte Packungsdichte.

4.1.2 Kornzusammensetzung der Gesteinskörnung im trockenen Zustand

Die Packungsdichte der groben Partikel (Quarzsande und Basalt) werden wie folgt bestimmt. Mit einem Zylinder (Durchmesser 150 mm und Höhe von 300 mm) werden groben Partikel schrittweise durch nächst kleinere Partikel ersetzt und mit einem Rütteltisch nachverdichtet.

Die Regel der Kombination zur Optimierung der Kornzusammensetzung [1], damit Hohlräume von großen Körnungen mit kleineren Körnungen aufgefüllt werden können (Abb.17), um die Packungsdichte der Kornzusammensetzung zu verbessern, ist folgend aufgeführt:

- Zuerst werden die zu verwendeten Korngrößen in r Gruppen erfasst (z.B hier: Gruppe 1 D_{max} 16mm = BS 11/16). Die Korngröße der Gruppe (i+1) ist kleiner als die der Gruppe(i). Die maximale Korngröße entspricht Gruppe (i) mit $i=1$.
- Schritt 1: Gruppe (i) wird schrittweise durch die nächste Gruppe, Gruppe (i+1) ersetzt. Es wird jeweils die Packungsdichte gemessen. Die kleineren Körnungen füllen die Hohlräume auf. Die höchste Packungsdichte entspricht der optimalen Kombination aus Gruppe (i) und Gruppe (i+1). Wenn keine höhere Packungsdichte erzielt wird, dann bedeutet das, dass diese Kombination nicht geeignet ist. Dann wird die Gruppe(i+2) mit der Gruppe (i) überprüft. Schlussendlich wird die optimale Zusammensetzung der Gruppe (i) und einer weiteren Gruppe (i+k) festgehalten.
- Schritt 2: Gruppe (i) und Gruppe (i+k) entsprechen dem neuen Ausgangsverhältnis der Gruppe (i). Wie im Schritt 1 wird dann die neu entstandene Gruppe (i) mit der nächst kleineren Körnung, Gruppe (i+k+1), aufgefüllt.
- Mit der kleinsten Körnung, Gruppe (n), wird der Prozess abgeschlossen

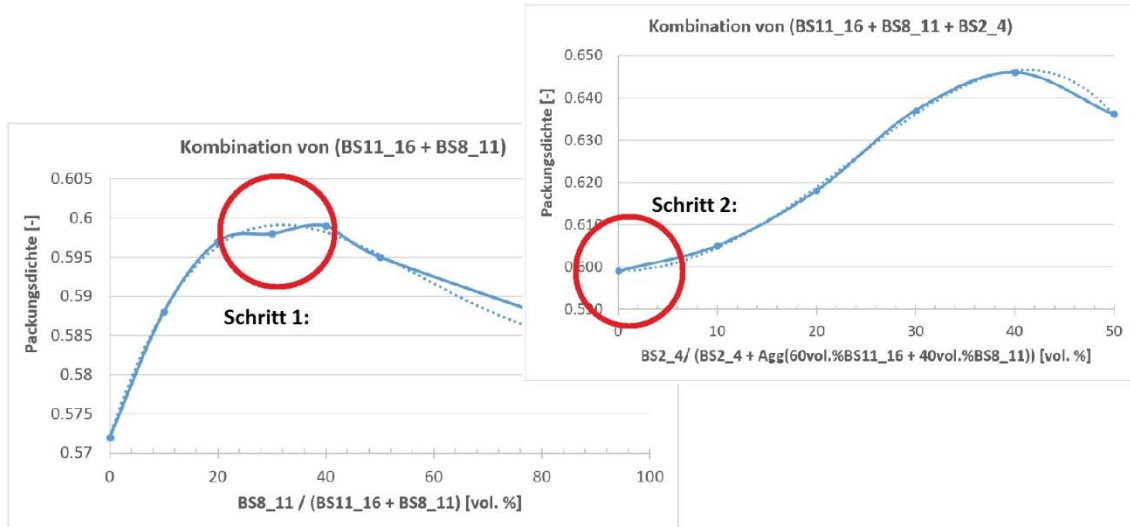


Abbildung 17: Schritt 1 und 2 der schrittweisen Optimierung der Packungsdichte

Mit zunehmender Packungsdichte nimmt die Druckfestigkeit tendenziell zu. Es ist aber nicht daraus zu schließen, dass der UHPC mit der höchsten Packungsdichte die höchste Festigkeit aufweist [1]. Die Ergebnisse für diese Arbeit nach der „Schrittweisen Optimierung der Packungsdichte“ kann in Kapitel „4.2.5 Optimierung der Kornzusammensetzung“ für ein Größtkorn von 16 mm und in 4.2.6. für ein Größtkorn von 11 mm nachvollzogen werden.

4.1.3 UHPC-Zusammensetzung von Leim und Gesteinskörnungen

Die optimale Zusammensetzung der Gesteinskörnungen wird mit der optimalen Zusammensetzung der Leimsysteme zusammengeführt. Es wird ein Zementgehalt gewählt. Die Grenzwerte für die Leimbestandteile werden aus 4.1.1 übernommen. Der Zementgehalt wird als Ausgangswert verwendet, um die Massenanteile der Zusatzstoffe und Zusatzmittel zu erhalten. Durch die Modifizierung des Zementgehalts kann dann versucht werden die gewünschten Frisch- und Festbetoneigenschaften zu erzielen.

Mit einem konstant gehaltenen Leimvolumen wird das Gesteinsvolumen, nach Gleichung 3, ermittelt. Die Ergebnisse aus 4.2.4 und 4.2.5 werden herangezogen, um die Gesteinsanteile zu bestimmen.

Für jeden entwickelten UHPC werden die Frisch- und Festbetoneigenschaften ermittelt. Die UHPC-Zusammensetzungen mit nicht ausreichenden Eigenschaften werden für die weitere Versuchsreihe endgültig ausgeschlossen.

4.2 Entwicklung von UHPC Rezepturen

Für die folgenden Untersuchungen werden fünf unterschiedliche Leimzusammensetzungen (Tabelle 8) geprüft. Die Leime (Binder1 bis Binder 4) sind zusammengesetzt aus den

vorgegebenen Materialien für das Projekt. Der letzte Leim (Binder 5) wird für die Referenzmischungen verwendet.

Tabelle 8: Leimzusammensetzung

Leimnummer	Zusammensetzung
Binder 1	Kir_Cem + Kislak + BetoflowD
Binder 2	Kir_Cem + Kislak + SF_Susp
Binder 3	Kir_Cem + SF_Susp + QP16900
Binder 4	Kir_Cem + SF_Susp. + BetoflowD
Binder 5	Laf_Cem + SF_Pow + QP16900

In Tabelle 9 werden die Gesteinszusammensetzungen (Aggregat 1 und 2) aufgezeigt. Die Tabelle beinhaltet bereits die Ergebnisse, die in Kapitel 4.2.4 und 4.2.5 im Detail beschrieben sind.

Tabelle 9: Gesteinszusammensetzung

	Zusammensetzung	Anteile in vol. %
Aggregat 1	BS11/16; BS8/11; BS2/4; QS0.3/0.8; Geba	25.3; 16.8; 28.1; 19.8; 10
Aggregat 2	BS8/11; BS2/4; QS0.3/0.8; Geba	44.1; 18.9; 27; 10

Die Grenzen der Mischungsverhältnisse der einzelnen Komponenten werden wie bereits erwähnt aus [1] übernommen. Ausgehend vom Zementvolumen werden 20-40 % für den inerten Füller und 12-18% vom reaktiven Füller angesetzt. Für den latent hydraulischen Hüttensand werden 40% verwendet. Der w/z-Wert ist auf 0.28 festgelegt. Die Kompatibilität der Ausgangsstoffe wird in den folgenden Unterkapiteln genauer untersucht. Die Leimsysteme werden wie folgt mit den Aggregatsystemen zusammengesetzt.

Tabelle 10: Zusammensetzung von Binder + Aggregat

Bezeichnung	Zusammensetzung
Mix_1_16mm	Binder 1 + Aggregat 1
Mix_2_16mm	Binder 2 + Aggregat 1
Mix_3_16mm	Binder 3 + Aggregat 1
Mix_4_16mm	Binder 2 + Aggregat 1
Mix_5_16mm	Binder 2 + Aggregat 1
Mix_6_11mm	Binder 2 + Aggregat 2
Mix_7_16mm	Binder 4 + Aggregat 1
Mix_8_16mm	Binder 4 + Aggregat 1
Mix_9_11mm	Binder 4 + Aggregat 2
Ref_1_8mm	Binder 5 + Aggregat aus [1]
Ref_2_16mm	Binder 5 + Aggregat 1

4.2.1 Referenzproben

Der Vollständigkeit halber, um für die spätere Analyse ausreichend Daten zu Verfügung zu haben, sind an dieser Stelle die verwendeten Referenzmischungen (Tabelle 11) mit ihren anteiligen Bestandteilen aufgezeigt und miteinander verglichen.

B5Q hat einen hohen Zementanteil. Dieses wird benötigt, um die Fließfähigkeit wegen des Fasergehalts zu gewährleisten. Der Mikrosilikaanteil (Silikastaub) ist im Vergleich zu Ref_2 sehr hoch. Für die Mischung Ref_2 ist der überflüssige Anteil an reaktiven Stoffen durch einen inerten Stoff (Quarzmehl) ersetzt worden. Außerdem ist für Ref_2 der Fließmittelanteil nach [1] optimiert worden. In B5Q ist mehr Fließmittel notwendig, um die Dispergierung des höheren Anteils an feinen Partikeln sicherzustellen. Die Kornzusammensetzung in Ref_2 wurde schrittweise optimiert (QSI, QS III, BS2/4, BS8/11 und BS11/16).

Tabelle 11: Referenzproben

	Einheit	B5Q [6]	Ref_2
Wasser	[kg/m ³]	158	140,3
Zement	[kg/m ³]	650	550
Silikastaub	[kg/m ³]	177	66
Quarzmehl	[kg/m ³]	-	165
Fließmittel	[kg/m ³]	30,4	19,2
QS I	[kg/m ³]	325	283,5
QS II	[kg/m ³]	131	-
QS III (Gebasand) 0.125/0.5 mm	[kg/m ³]	354	143,23
BS 0/2	[kg/m ³]	-	-
BS 2/8	[kg/m ³]	597	-
BS 2/4	[kg/m ³]	-	448
BS 8/11	[kg/m ³]	-	274,6
BS11/16	[kg/m ³]	-	404,77
Fasern	[%vol.]	2,5	-
w/z-Wert	[-]	0,28	0,28
W/B-Wert	[-]	0,22	0,19
f_{c28d}	[N/mm ²]	187	172,5
SF	[mm]	650	760

B5Q besitzt eine 28 Tage Druckfestigkeit von 187 [MPa]. Dies resultiert aus dem hohen Zement- und Silikagehalt. Das Setzfließmaß muss Einbußen wegen der Faserzugabe hinnehmen. Die Mischung Ref_2 wurde schrittweise optimiert. Sie besitzt in Bezug auf diese Studie eine ausreichende Festigkeit und die gewünschte Fließfähigkeit.

4.2.2 Testprozeduren

Für alle anfallenden UHPC-Rezepturen werden die Frischbetoneigenschaften mit dem Setzfließmaß [31] überprüft. Außerdem werden für jede anfallende UHPC-Mischung sechs Würfel mit einer Kantenlänge von 100 mm für eine schnelle Druckfestigkeitsprüfung hergestellt, welche im Wasserbad bei 85 ° C für 48 Stunden wärmebehandelt werden.

Für die ausgewählten Mischungen kommt die Untersuchung der Trichterauslaufzeit hinzu [32]. Zusätzlich werden 18 weitere Probewürfel und jeweils drei Zylinder mit einem Durchmesser von 100 [mm] und einer Höhe von 200 mm hergestellt. Die Würfel werden für

die Druckfestigkeitsprüfungen nach 28, 60, 90 und 120 Tagen verwendet. Die Zylinder werden zur Bestimmung des E-Moduls gebraucht. Die Prüfkörper werden nach dem Befüllen der Probeformen mit einer Plastikfolie abgedichtet und bei Raumtemperatur für 24 Stunden gelagert. Nach 24 Stunden werden die Schalungen entfernt. Die Probekörper werden für sechs Tage bei einer Temperatur von 20°C in Wasser gelegt und anschließend bei Raumtemperatur für die restliche Zeit bis zum Testzeitpunkt aufbewahrt. Druckfestigkeitsprüfungen werden nach [33] und die E-Modul-Prüfung nach [34] durchgeführt. Bevor die Probekörper getestet werden, werden die Belastungsflächen glattgeschliffen, um eine gleichmäßige Belastung sicherzustellen. Die Prüfkörper sind ohne Verdichtung hergestellt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im Kapitel 5 genau beschrieben.

4.2.2.1 Leimzusammensetzung

Für den ersten Schritt der Leimoptimierung ist ein Hobart Mischer (5 Liter Fassungsvermögen) verwendet worden. Dieser hat ein starkes Getriebe mit drei Wirblern, um die nötige Kraft aufzubringen den Zementleim zu mischen. Der Leim wird nach dem Mischen auf seine Frischleimeigenschaften und im späteren Verlauf auf seine Festleimeigenschaften geprüft. Es werden 1 bis 1.2 Liter Materialien für jeden Mischvorgang vorbereitet. Damit wird ein homogenes Leimgefüge erreicht.

Bei der Zubereitung der Mischung ist auffällig, dass Zement, Wasser und Fließmittel nach zwei Minuten bei mittlerer Geschwindigkeit zu einem flüssigen Leim umgewandelt werden. Er wird weitere drei Minuten bei hoher Intensität gemischt. 60 Sekunden nach Ende des Mischvorgangs werden die Frischleimeigenschaften mit dem Hägermann Konus (Abb. 18) getestet.

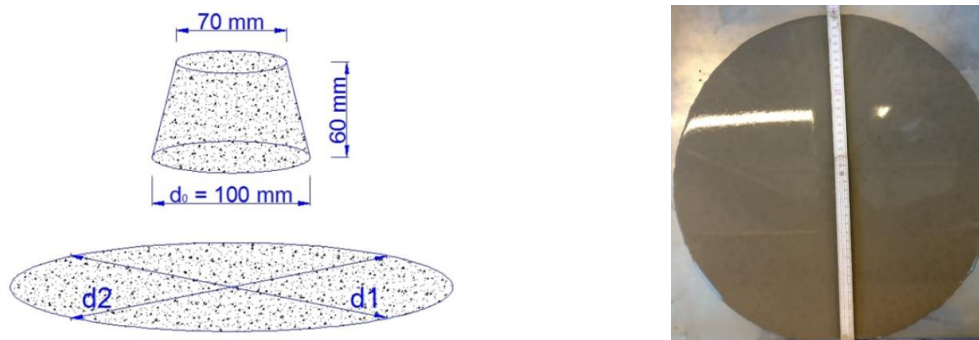


Abbildung 18: Ausbreitmaß mit Hägermann Konus [1]

Um die richtige Zusammensetzung der Leime zu erhalten, empfiehlt sich eine schrittweise Erhöhung des Fließmittels, um einen überflüssigen Verbrauch von Fließmittel zu vermeiden.

4.2.2.2 UHPC

Für den UHPC mit all seinen Komponenten wird ein Erich-Mischer mit einem Fassungsvermögen von zehn Litern verwendet. Hierbei werden die zuvor entwickelten Leimsysteme (Binder 1 bis 5) und die Kornzusammensetzung (Aggregat 1 und 2) zusammengeführt. Das fertige UHPC-Produkt kann dann auf seine Frisch- und Festbetoneigenschaften geprüft werden.

Mit dem Erich-Intensivmischer werden 6-7 Liter Frischbeton hergestellt. Zunächst werden alle Feinstoffe zwei Minuten lang mit Wasser bei einer Mischgeschwindigkeit von 200 U/min gemischt. Dann wird das Fließmittel zugegeben und für weitere dreißig Sekunden gemischt. Die Geschwindigkeit wird auf 450 U/min erhöht. Damit wird der Zementleim drei Minuten lang homogenisiert. Nach dem Homogenisierungsprozess des Leimes werden alle Zuschlagstoffe bis zu einer Korngröße von 5 mm hinzugefügt und bei 200 U/min vier Minuten lang durchmischt. Daraufhin wird der Mischbehälter herausgenommen und es werden alle Gesteinskörnungen größer als 5 mm in den Behälter zugegeben, da das Mischen dieser Korngruppe mit dem verwendeten Mischer nicht erlaubt ist. Nach dem abschließenden Zugeben wird die Mischung weitere 2 Minuten mit einem elektrischen Handmixer vermischt.

Die fertige Mischung wird nun auf seine Frisch- und Festbetoneigenschaften getestet. Die Fließfähigkeit und Entmischungsbeständigkeit von Frischbeton sind gemäß [31] durch das Setzfließmaß, wie in Abbildung 19 und 20 dargestellt, überprüft. Der verwendete Beton für das Setzfließmaß wird zurück in den Behälter gegeben und mit einer Spachtel erneut verrührt. Der Frischbeton wird dann in die Formen für die Festbetonprüfungen gefüllt.

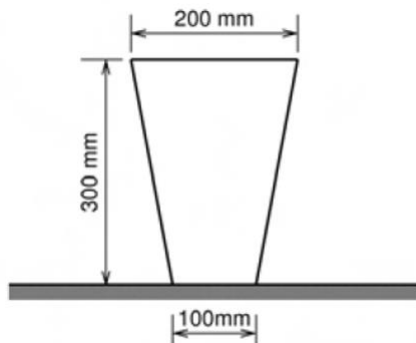


Abbildung 19: Schematischer Aufbau des Setztrichters



Abbildung 20: Exemplarisches Setzfließmaß

4.2.3 Optimierung der Leimzusammensetzung

Bei der Optimierung der Leimzusammensetzung wird nach dem Konzept aus 4.1 vorgegangen. Zuerst wird ein Zement in Verbindung mit Mikrosilika, Fließmittel und Wasser geprüft. Dabei können bereits die Eigenschaften des Mikrosilikas in fester und flüssiger Form beurteilt werden.

Im zweiten Schritt werden die Leimsysteme mit QP16900, Kislag und BetoflowD kombiniert. Daraus lassen sich die zu erwartenden Fließ- und Festigkeitseigenschaften der UHPC-Mischungen einschätzen.

4.2.3.1 Kombination von Zement, Mikrosilika und Fließmittel

Der Mischanteil des Zementleims ist mit Zement/Wasser/Fließmittel = 1/0,25/0,005 gewählt. Der Zementausgangswert hat 1800 Gramm. Es werden Lafarge Zement (Laf_Cem) als Referenz und Kirchdorfer Zement (Kir_Cem) untersucht.

Der erste Schritt zielt darauf ab, die Kompatibilität von den vorhandenen Fließmitteln mit den vorhandenen Zementen zu testen, um die fließfähigste Leimzusammensetzung für die weiteren Untersuchungen zu bestimmen. Im folgenden Diagramm (Abb. 21) ist die Fließfähigkeit der verschiedenen Zementleime zu sehen. Das Fließmittel SP_BT3_H500 erreicht in Verbindung mit Laf_Cem und Kir_Cem ein Ausbreitmaß von 270 mm. Im Vergleich zu den anderen Fließmitteln ist das die höchste Ausbreitung der Leime. Die weiteren Fließmittel haben einen schwachen Effekt auf das Ausbreitmaß. Deswegen wird das Fließmittel SP_BT3_H500 für die weiteren Untersuchungen verwendet und die restlichen Fließmittel werden nicht weiter berücksichtigt.

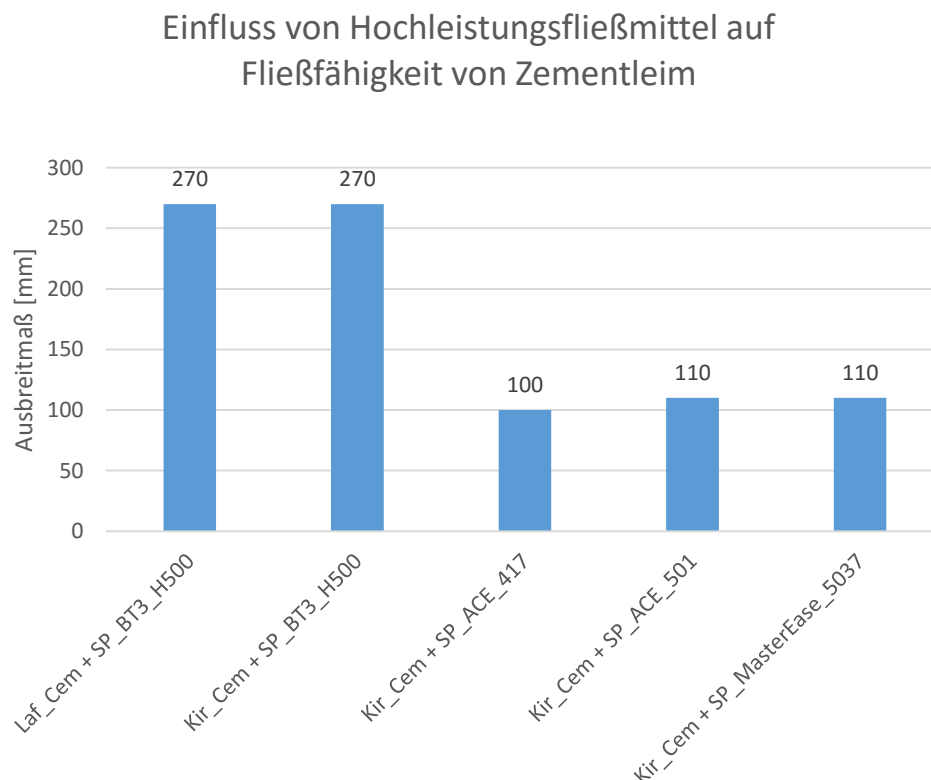


Abbildung 21: Einfluss von Hochleistungsfließmittel auf die Fließfähigkeit von Zementleim

Im nächsten Schritt wird der Einfluss der unterschiedlichen Mikrosilika (SF_pow und SF_susp) auf die Fließfähigkeit des Leims untersucht. Der Anteil der Stoffe liegt bei Zement/

Wasser/ Fließmittel/ Mikrosilika. = 1/0,25/0,011/0,15. Das Ausgangsmaß liegt diesmal bei 1500 Gramm Zement. Die Ergebnisse in Abbildung 22 zeigen einen klaren Unterschied zwischen der Verwendung von flüssigen (SF_susp) und pulverförmigen (SF_pow) Mikrosilika. Die Kombination mit der Suspension erzielt schwächere Ausbreitmaße als das pulverförmige Mikrosilika.

Es ist bekannt, dass die Fließfähigkeit des Leims (Cem + SF + W + SP) signifikant von dem Gehalt an Ca(OH)_2 durch die Reaktion von Wasser und Zement abhängt. Außerdem vom Gehalt an Ca(OH)_2 , das von der Mikrosilikaoberfläche absorbiert wird. Fließmittel absorbiert Ca(OH)_2 sehr stark. Dieser Hintergrund hilft zu erklären, dass bei der Verwendung von SF_Susp das Fließmittel weniger Ca(OH)_2 absorbieren kann, weil die Suspension mehr Ca(OH)_2 bindet als das Pulver. Die Suspension verursacht demnach eine schlechtere Fließfähigkeit des Leims.

Des Weiteren ist zu erkennen, dass Laf_Cem günstiger wirkt als Kir_Cem. Die Fließeigenschaften von Laf_Cem in Verbindung mit SF_Susp sind sogar genauso hoch wie Kir_Cem mit SF_pow.

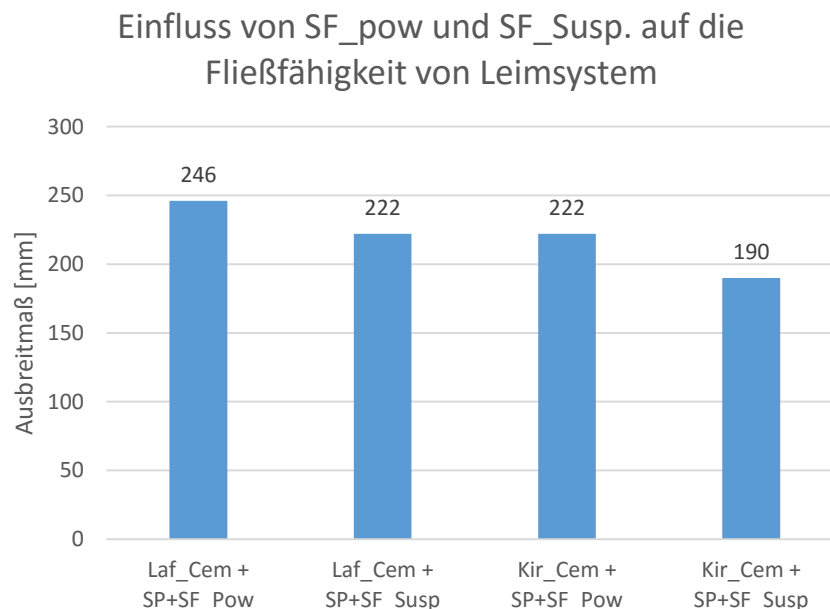


Abbildung 22: Einfluss von SF_pow und SF_susp auf die Fließfähigkeit von Leimsystem

4.2.3.2 Optimale Leimsysteme

Abschließend wurde die Fließfähigkeit von verschiedenen Leimsystemen untersucht. In der Tabelle 12 sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Zusammensetzungen der Leimsysteme abgebildet. Es wird von einem Zementgehalt von 1200 Gramm ausgegangen. Der Wasser- und Fließmittelgehalt wird konstant gehalten, um die Ergebnisse zu vergleichen.

Tabelle 12: Zusammensetzung der Leimsysteme

Zusammensetzung	$V_{\text{flüssig}} / V_{\text{fest}} [-]$	Ausbreitmaß [mm]
Laf_Cem + SF_Susp. + QP16900 + W* + SP = 1/0.12/0.4/0.25/0.02	0,508	295
Laf_Cem + Kislac + BetoflowD + W + SP. = 1/0.4/0.20/0.25/0.02	0,498	415
Kir_Cem + SF_Susp. + Kislac + W* + SP = 1/0.12/0.4/0.25/0.02	0,517	245
Kir_Cem + Kislac + BetoflowD + W + SP = 1/0.4/0.20/0.25/0.02	0,498	400
Kir_Cem + SF_Susp. + QP16900 + W* + SP = 1/0.40/0.20/0.25/0.02	0,508	230

*beinhaltet den Wasseranteil von flüssigen Mikrosilika, ohne Wasseranteil von SP

Die Ausbreitmaße der untersuchten Leime zeigen (Abb. 23), dass Laf_Cem bessere Fließeigenschaften als Kir_Cem aufweist. Außerdem ist es auffällig, dass die Fließeigenschaft der Leimzusammensetzung mit BetoflowD höher ausfällt als ohne. Das lässt darauf schließen, dass eine gute Fließfähigkeit mit dieser Art von Leimzusammensetzung (Cem+Kislac+BetoflowD+W+SP) erreicht werden kann. Die Suspension verringert das Ausbreitmaß, wie in Kapitel 4.2.3.1 beschrieben. Für die Suspension ist ein höheres Leimvolumen von Zement und Wasser notwendig, um die Fließfähigkeit zu verbessern.

Der Gehalt von BetoflowD ist mit 20 % an seiner Grenze, für einen höheren Anteil von BetoflowD wäre mehr Zement notwendig, um einen weiteren Effekt auf das Ausbreitmaß zu erhalten. Ebenfalls wird der Gehalt an Mikrosilika mit 12 % begrenzt, weil mehr Mikrosilika mehr Zement und Wasser benötigen würde. Gemäß der Arbeit von Kim [1] wird mit einem 12%tigen Mikrosilikagehalt eine ausreichende festigkeitssteigernde Wirkung erzielt. Ein höherer Gehalt würde einen negativen Einfluss auf die Fließfähigkeit der UHPC-Mischungen bewirken. Der Fließmittelgehalt mit 2 % ist auf ein Minimum reduziert, so dass jedoch eine ausreichende Dispergierung der Agglomerate gewährleistet werden kann. Für die UHPC-Mischungen wird der Fließmittelgehalt schrittweise erhöht auf 3,5 %.

Ausbreitmaß der Leimsysteme

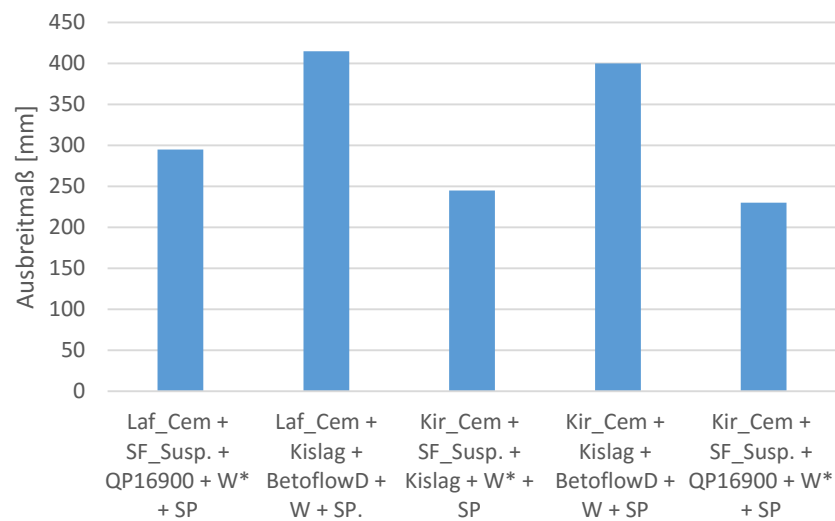


Abbildung 23: Ausbreitmaß der verschiedenen Leimsysteme

4.2.4 Optimierung der Kornzusammensetzung D_{MAX} 16 mm (Aggregat 1)

Die Kornzusammensetzung der Gesteinskörnungen wird nach dem Konzept der schrittweisen Optimierung der Packungsdichte, wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben, bestimmt. Das Größtkorn BS11/16 wird schrittweise durch die nächst kleinere Gesteinskörnung ersetzt. Dadurch kann bei fortlaufender Messung die höchste Packungsdichte erzielt werden. In den darauffolgenden Graphen ist der Ablauf nachvollziehbar dargestellt (Abb. 24 bis 27).

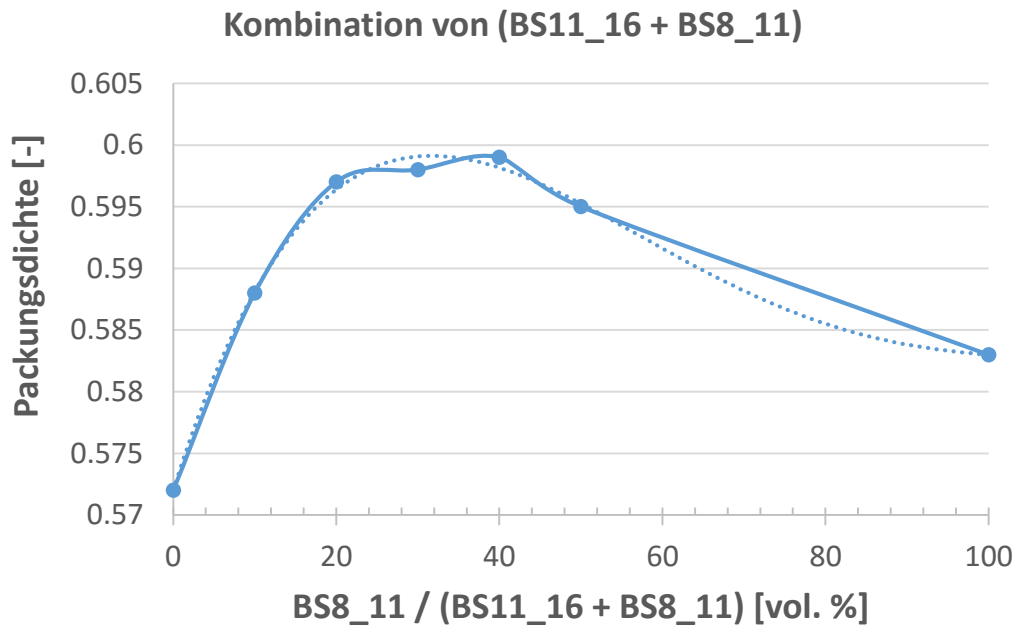


Abbildung 24: $D_{MAX} = 16$ Schritt 1: Kombination von Basalt 8/11 und 11/16. Mit dem experimentalen Ergebnis von 40 vol.% BS8/11 + 60 vol.% BS11/16

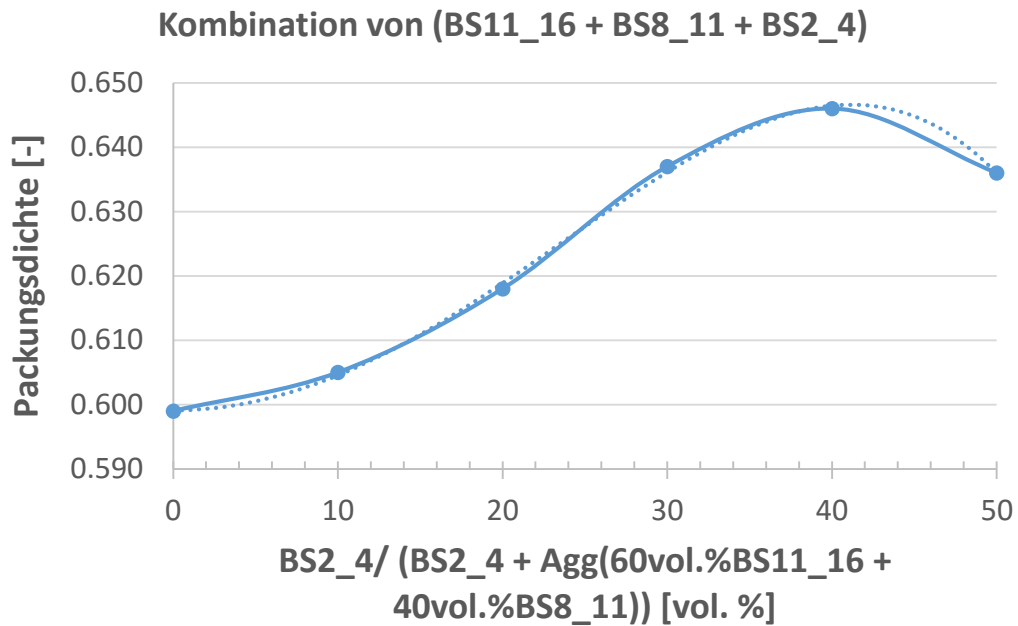


Abbildung 25: $D_{MAX} = 16$ Schritt 2: Kombination von Basalt 2/4 und (40 vol.% BS8/11 + 60 vol.% BS11/16). Mit dem experimentalen Ergebnis von 40 vol.% BS2/4 + 60 vol.% (40 vol.% BS8/11 + 60 vol.% BS11/16)

**Kombination von (BS11_16 + BS8_11 + BS2_4 +
QS0.3_0.8)**

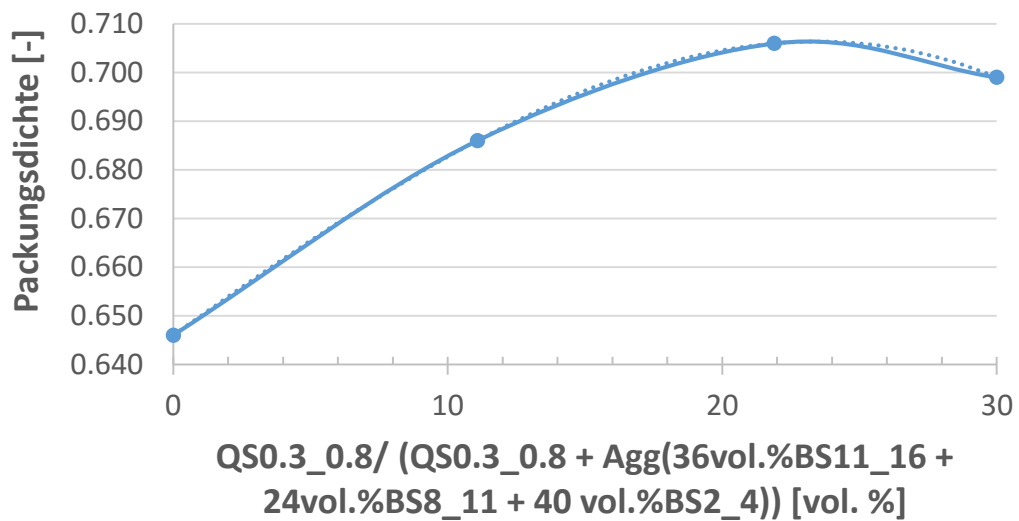


Abbildung 26: $D_{MAX} = 16$ Schritt 3: Kombination von Quarzsand 0.3/0.8 und (36 vol.% BS11/16 + 24 vol.% BS8/11 + 40vol.% BS2/4). Mit dem experimentalen Ergebnis von 21.9 vol.% QS0.3/0.8 + 78.1 vol.% (36 vol.% BS11/16 + 24 vol.% BS8/11 + 40 vol.% BS2/4)

**Kombination von (BS11_16 + BS8_11 + BS2_4 +
QS0.3_0.8 + Geba)**

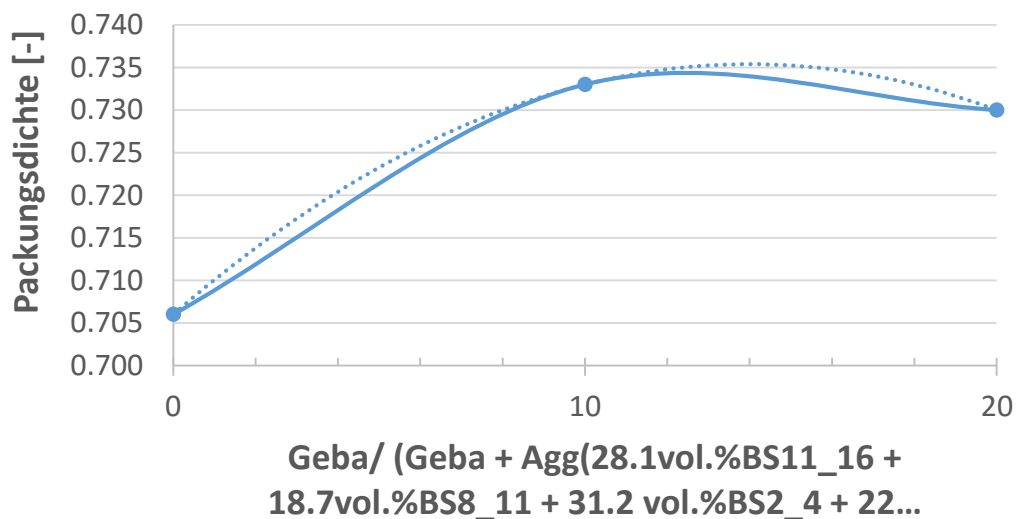


Abbildung 27: $D_{MAX} = 16$ Schritt 4: Kombination von Gebasand 0.06/0.3 und (28.1 vol.% S11/16 + 18.7 vol.% BS8/11 + 31.2 vol.% BS2/4 + 22 vol.% QS0.3/0.8). Mit dem experimentalen Ergebnis von 10 vol.% Gebasand + 90 vol.% (28.1 vol.% BS11/16 + 18.7 vol.% BS8/11 + 31.2 vol.% BS2/4 + 22 vol.% QS0.3/0.8).

Die Kornzusammensetzung mit $D_{MAX} = 16$ mm wurde mit der schrittweisen Optimierung der Packungsdichte bestimmt. Das Ergebnis der Verteilung der einzelnen Kornzusammensetzung ist **25.3 vol.% von BS11/16, 16.8 vol.% BS8/11, 28.1 vol.% BS2/4, 19.8 vol.% QS0.3/0.8** und **10 vol.% von Gebasand**.

4.2.5 Optimierung der Kornzusammensetzung D_{MAX} 11 mm (Aggregat 2)

Mit der gleichen Prozedur wie in Kapitel 4.2.4, wird nun mit einem Größtkorn D_{MAX} von 11 mm die schrittweise Optimierung der Packungsdichte vorgenommen. An den folgenden Graphen sind die Ergebnisse der Zusammensetzung der optimalen Packungsdichte zu erkennen (Abb. 28 bis 30).

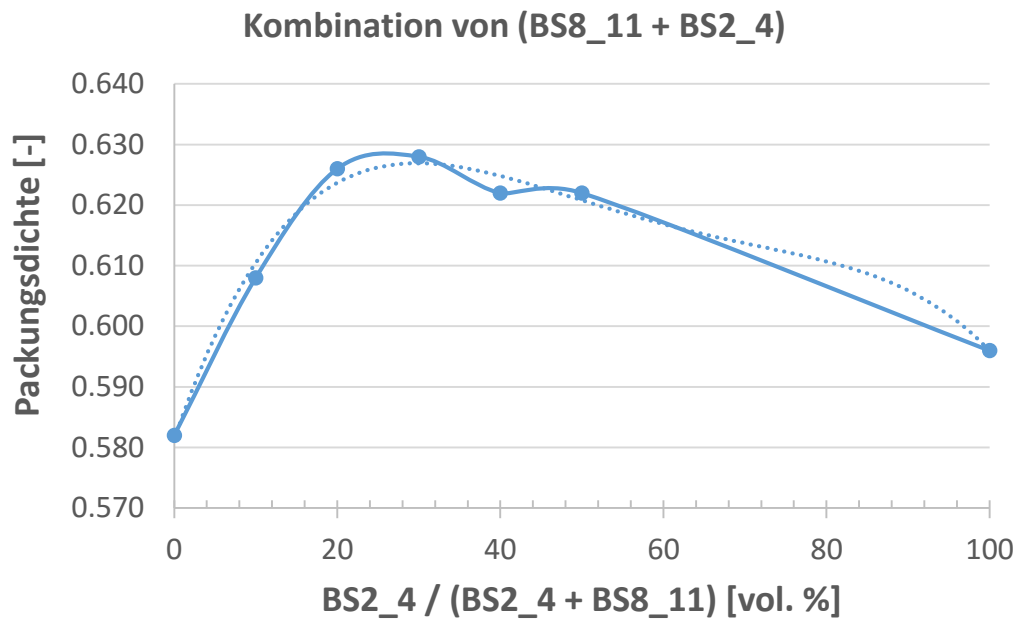


Abbildung 28 $D_{MAX} = 11$ Schritt 1: Kombination von Basalt 2/4 und 8/11. Mit dem experimentalen Ergebnis von 30 vol.% BS2/4 + 70 vol.% BS8/11.

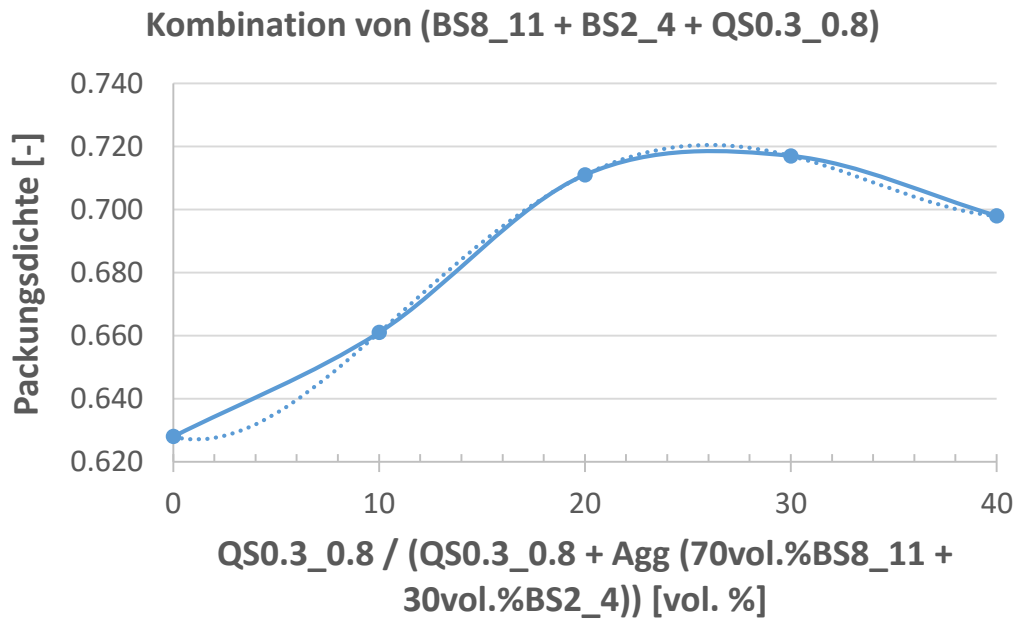


Abbildung 29: $D_{MAX} = 11$ Schritt 2: Kombination von Quarzsand 0.3/0.8 und (70 vol.% BS8/11 + 30 vol.% BS2/4). Mit dem experimentalen Ergebnis von 30 vol.% QS0.3/0.8 + 70 vol.% (70 vol.% BS8/11 + 30 vol.% BS2/4)

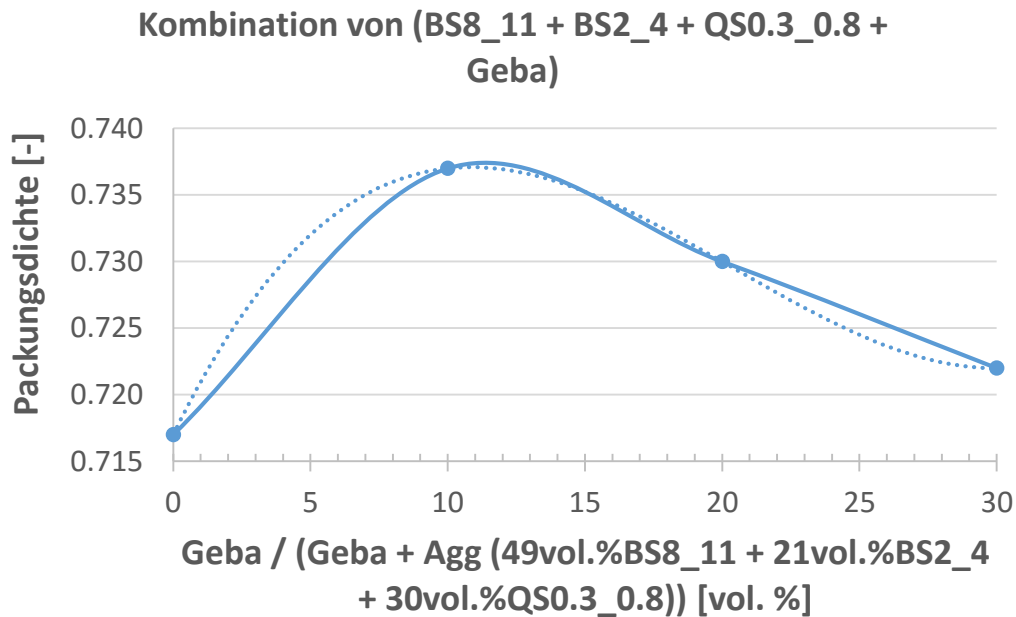


Abbildung 30: $D_{max} = 11$ Schritt 3: Kombination von Gebasand 0.3/0.8 und (49 vol.% BS8/11 + 21 vol.% BS2/4 + 30 vol.% QS0.3/0.8). Mit dem experimentalen Ergebnis von 10 vol.% Gebasand + 90 vol.% (49 vol.% BS8/11 + 21 vol.% BS2/4 + 30 vol.% QS0.3/0.8).

Das Endprodukt für die Optimierung der Packungsdichte mit einen Größtkorn von 11 mm hat eine Verteilung der Kornzusammensetzung von **44.1 vol. % BS8/11 + 18.9 vol. % BS2/4 + 27 vol. % QS0.3/0.8 + 10 vol. % Gebasand** ergeben.

4.3 Zusammenfassung und Diskussion

Aus den vorhandenen Materialien sind verschiedene UHPC-Rezepturen erarbeitet worden. Mit der schrittweisen Optimierung der Packungsdichte und der „Superplasticizer-Water-Solution-Demand“-Methode konnte ein Hochleistungsprodukt entwickelt werden. Es besteht eine gute Kompatibilität zwischen den Bestandteilen des Leims. Außerdem konnte eine optimierte Packungsdichte der Gesteinskörnungen erzielt werden. In den folgenden Abbildungen (Abb. 31 und 32) sind die Ergebnisse der Voruntersuchung zur Bestimmung der geeignetsten Mischungszusammensetzung aufgeführt. Die Anforderungen an das Verbundstützen Projekt sind mit orangenen Linien gekennzeichnet. Die Auswahl der Mischungen wurde mit den Kriterien eines geringen Schwindens, ausreichender Festigkeit und einer guten Verarbeitbarkeit getroffen.

Mix_1 zeigt mit seinem hohen BetoflowD-Anteil die erwartete Fließfähigkeit. Der Effekt von latent hydraulischem Zusatzstoff von Hüttensand verpasst knapp die gewünschte Festigkeit. Hier wird mit einem weiteren Zuwachs der Festigkeit gerechnet. Mix_1 wird für weitere Untersuchungen ausgewählt.

Mischung 2 und 3 sind aufgrund der schlechten Fließfähigkeit für weitere Untersuchungen ausgeschlossen.

Die Mischungen 4, 5 und 6 bestehen aus der gleichen Leimzusammensetzung. Mix_6 hat eine andere Kornzusammensetzung ($D_{MAX} = 11$ mm). Mix_5 hat im Vergleich zu 4 und 6 einen höheren Zementanteil. Mischung 4 und 6 erfüllen die Anforderungen an das Projekt. Mix_5 wird wegen des hohen Zementgehalts nicht weiter berücksichtigt, da dadurch ein höheres Schwinden vermutet wird. Mix_4 und Mix_6 sind für weitere Untersuchungen ausgewählt.

Die Mischungen 7 bis 9 sind wegen der nur mittelmäßigen Ergebnisse und dem schlechten Zusammenwirken von SF_susp und BetoflowD für weitere Untersuchungen ausgeschlossen.

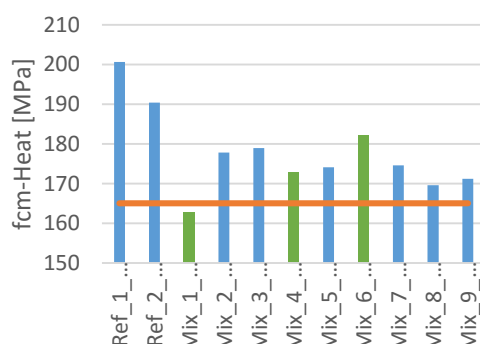


Abbildung 31: Festigkeitskriterium für die Auswahl der Mischung

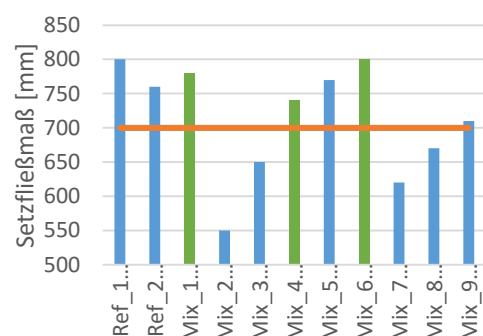


Abbildung 32: Fließkriterium für die Auswahl der Mischung

In Abbildung 33 sind die Volumenanteile der ausgewählten Mischungen den Referenzmischungen (B5Q und Ref_2) gegenübergestellt. Dabei ist gut zu erkennen, dass

die einzelnen Bestandteile von Ref_2, Mix_1, Mix_4 und Mix_6 im Vergleich zu B5Q optimiert sind. Der Zementgehalt konnte reduziert werden, auch der Fließmittelanteil ist auf ein Minimum reduziert. Der überflüssige Mikrosilikaanteil, wegen des sonst höheren Zement- und Wasseranspruchs, ist durch einen Inerten Zusatzstoff ersetzt. Die optimierte Packungsdichte der Gesteinskörnungen ermöglicht einen hohen Anteil an Gesteinen größer als 1 mm.

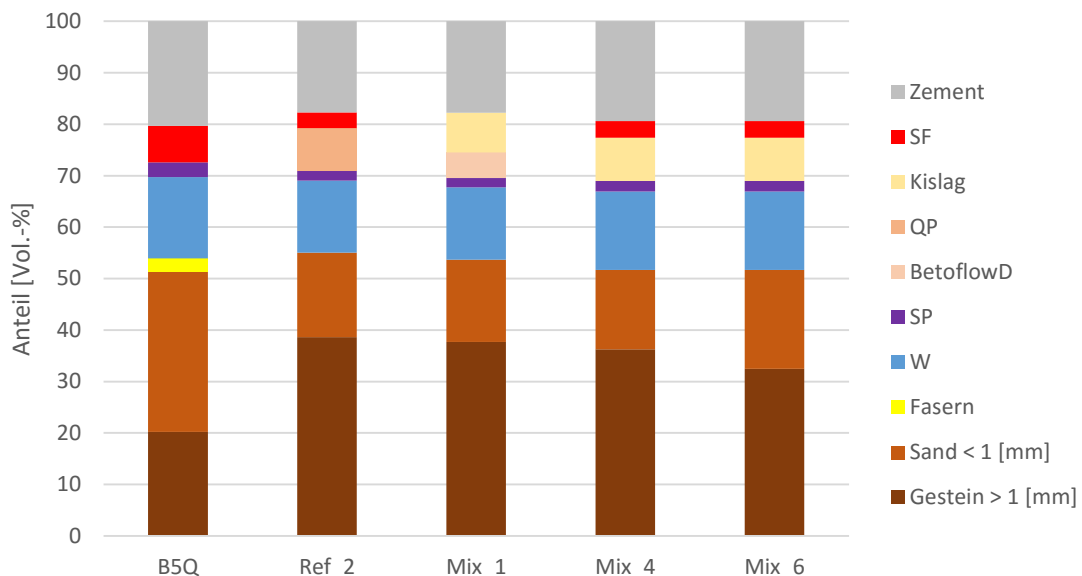


Abbildung 33: Volumenanteile der Referenzrezepturen und der eigenen UHPC-Rezepturen

Abschließend sind die wesentlichen Erkenntnisse aus dem Kapitel 4 der „UHPC-Entwicklung“ in der folgenden Auflistung zusammengefasst:

- Mit dem vorliegenden Konzept ist ein vielversprechender Ansatz zur UHPC-Entwicklung verfolgt worden. Die Ergebnisse können leicht nachvollzogen werden und die Entwicklungsschritte sind klar aufgezeigt.
- Unter Berücksichtigung der höchsten Fließfähigkeit und niedrigsten plastischen Viskosität kann die optimale Leimzusammensetzung, mit der „Superplasticizer-Water-Solution-Demand“-Methode, herausgefunden werden. Diese Methode hat sich als sehr effizient und nachhaltig bewährt. Sie spart Materialien und verbessert die Eigenschaften des UHPC.
- Die Optimierung der Leime im nassen Zustand ermöglicht die Kompatibilität der einzelnen Bestandteile genau zu beobachten. Die Zusammenwirkung der Materialien wird klar aufgezeigt. Dadurch lässt sich sehr anschaulich, schrittweise, die perfekte Kombination mit ihren Anteilen entwickeln.
- Die Optimierung der Packungsdichte von den Gesteinskörnungen beruht auf der einfachen Idee der schrittweisen Optimierung der Packungsdichte, womit Rezepturen mit einem hohen Anteil an großen Körnungen erstellt werden können.
- Das Zusammenführen von den Leimsystemen und Gesteinskörnungen wird durch eine einfache Modifizierung des Zementgehalts gesteuert. Die entwickelten UHPC-Rezepturen können durch Modifizierung des Zementgehaltes leicht an neue Anforderungen, wie Fließfähigkeit oder Druckfestigkeit, angepasst werden.

- Durch den konstant gehaltenen w/z-Wert, Fließmittelanteil, sowie reaktiven und inerten Zusatzstoffanteile, ist eine gute Ausgangslage für eine gezielte Modifizierung gegeben.

Das Erhöhen des Gesteinsvolumens bzw. die Verringerung des Leimvolumens stellt einen guten Ansatz zum Erreichen der Anforderungen dar. Durch das geringere Leimvolumen kommt es vermutlich zu einer geringeren chemischen Reaktion und zu dem gewünschten geringeren Schwinden. Gleichzeitig ist die Leimschicht um alle Partikel und Gesteinskörnungen soweit gegeben, damit eine hohe Verarbeitbarkeit erzielt werden kann. Die Leime schließen sich perfekt um die optimierte Packungsdichte der Gesteinskörnungen. Das führt zu einer erwarteten hohen Festigkeit, die durch die puzzolanische Reaktion auch die 180 MPa erreichen kann

5 Betoneigenschaften

Um die Anforderungen an das Projekt nach Festigkeit und Verarbeitbarkeit zu erfüllen, wurden für jede Mischung Frisch- und Festbetoneigenschaften getestet. Anhand des Setzfließmaßes und der gemessenen Druckfestigkeit mit wärmebehandelten Probewürfeln konnte eine erste Beurteilung der Mischungen durchgeführt werden. Nach den Prüfungen ist eine Auswahl der geeigneten Mischungen vorgenommen worden (Kapitel 4.3). Für die ausgewählten Mischungen sind weiterführende Untersuchungen für Fest- und Frischbetoneigenschaften zur detaillierten Beschreibung durchgeführt worden. Die verwendete Silikasuspension (SF_susp) wurde im Laufe der Untersuchung durch ein neues Produkt (SF_susp_Neu) ersetzt, um die Qualität der vorhandenen Suspension zu überprüfen.

5.1 Frischbetoneigenschaften

Die Frischbetoneigenschaften sind nach ÖNORM EN12350 untersucht worden. Dabei sind die Teile 8 und 9 verwendet worden.

5.1.1 Setzfließmaß für selbstverdichtenden Beton

Die Prüfung des Setzfließversuches von selbstverdichtenden Betonen wird nach ÖNORM EN 12350-8 getätigt. Es wird ein Behälter in Kegelform auf eine angefeuchtete Stahlplatte mit ebenem Boden mittig positioniert. Der Kegel ist mit dem schmalen Ende nach unten ausgerichtet (Abb. 34 und 35). Diese Ausrichtung ist abweichend von der Norm, weil so das Abnehmen des Kegels beim Befüllen vermieden werden kann. Wenn der Kegel randvoll befüllt ist, wird er langsam hochgestemmt, bis zu einer Höhe von 20 bis 30 cm, damit der UHPC selbstständig aus der Form fließen kann. Wenn der UHPC sich nach circa zwei Minuten komplett ausgebreitet hat und das Ende des Fließvorgangs erreicht ist, wird das Ergebnis des Setzfließmaßes (d_i) längs und quer gemessen. Das Ergebnis wird mit der folgenden Gleichung angegeben:

$$SF = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \text{ [mm]} \quad (4)$$

- d_1 steht für das erste gemessene Setzfließmaß und d_2 für das senkrecht dazu zweite gemessene Setzfließmaß
- Das Setzfließmaß (SF) wird in Millimeter angegeben.



Abbildung 34: Bild gefüllter Setztrichter für Setzfließmaßversuch

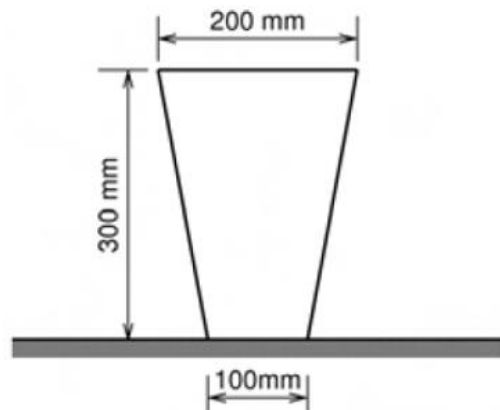


Abbildung 35: Schematischer Aufbau des Setztrichters

Nur die Mischungen, die die gewünschten Ergebnisse erzielten ($SF > 750$ mm) und durch eine erste Sichtprüfung ein homogenes und vielversprechendes Bild (Abb. 36) abgegeben haben, sind für weitere Untersuchungen relevant.

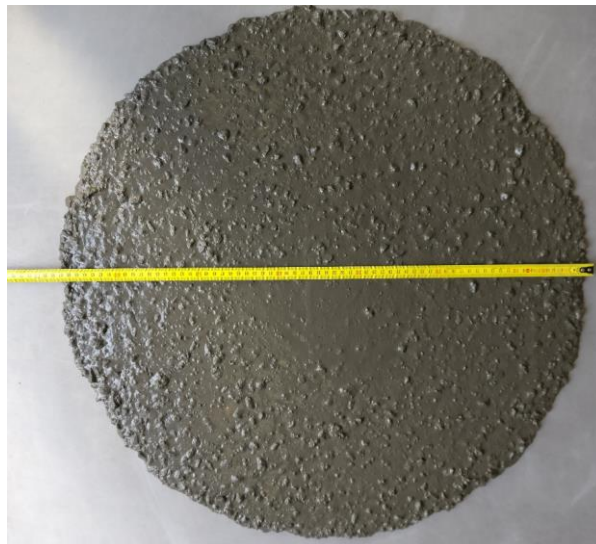


Abbildung 36 Exemplarisches Setzfließmaß mit Messung von d_i

Die Ergebnisse von allen Mixturen sind in der folgenden Tabelle 13 abgebildet. Ein erstes Merkmal ist das Leimvolumen (V_{Paste}) zu Feststoffvolumen (V_{solid}). Ein sehr niedriges Verhältnis lässt ein geringes Setzfließmaß erwarten. Die Mischungen in blauer Schrift sind die Referenzmischungen. Die grün markierten Mischungen sind bei der Voruntersuchung ausgewählt worden.

Tabelle 13: Ergebnisse des Setzfließmaßes von allen Mischungen

Mix	$V_{\text{paste}}/V_{\text{solid}}$	Setzfließmaß [mm]
Ref_1_8mm	0,920	800
Ref_2_16mm	0,817	760
Mix_1_16mm	0,835	780
Mix_2_16mm	0,801	550
Mix_3_16mm	0,817	650
Mix_4_16mm	0,942	740
Mix_5_16mm	1,022	770
Mix_6_11mm	0,942	800
Mix_7_16mm	0,793	620
Mix_8_16mm	0,933	670
Mix_9_11mm	0,933	710

Der Vergleich mit den markierten und ausgewählten Mischungen lässt vermuten, dass eine Abweichung der Stabilität in der Pulverzusammensetzung besteht. Diese ist auf die Feinheit von Zement, Mikrosilika und Quarzmehl zurückzuführen. Trotz niedriger Wasserzugabe ist bei großer Feinheit eine hohe Viskosität zu beobachten. Die ausgewählten grün markierten Mischungen erreichten erst mit höherem $V_{\text{paste}}/V_{\text{solid}}$ –Verhältnis die gewünschten Setzfließmaße. Die Referenzproben hingegen zeigen bereits mit niedrigerem Leimvolumen ein hohes Setzfließmaß. Für eine gute Verarbeitung ist ein Setzfließmaß von mehr als 730 mm notwendig. Das hilft für eine ausreichende Entlüftung des Frischbetons. Ein zu großes Setzfließmaß ist nicht empfehlenswert, da sonst die Sedimentationsbeständigkeit beeinträchtigt ist.

Abschließend wurde die Homogenität begutachtet. Im Randbereich (Abb. 37) ist gut zu erkennen ob sich die Körnungen gleichmäßig verteilt haben. Für die ausgewählten Mischungen sind zufriedenstellende Verteilungen erreicht. Darüber hinaus war die Luftblasenbildung beim vollgefüllten Trichter zu erkennen, welches ein Indiz für die Entlüftung des Betons darstellt.



Abbildung 37 Randbereich des Setzfließmaßes zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit der Mischung

5.1.2 Kornverteilung und Verarbeitbarkeit

Die Prüfung der Kornverteilung und der Verarbeitbarkeit wurde nur für ausgewählte Mischungen (**Mix_4** und **Mix_6**) durchgeführt. Die Mischungen wurden für die Untersuchung in einem 60 Liter Mischer (Abb. 38) mit einem Mischvolumen von 40 Litern vorbereitet. Auffällig ist dabei der hohe Anteil an Zementleim, der sich in den Wänden des Mischungsbehälters absetzt (Wandeffekt). Die Fließfähigkeit des Frischbetons wurde jeweils nach 30 und 90 Minuten getestet. Bei der Untersuchung sind der Trichterauslaufzeitversuch, das Setzfließmaß, wie weitere Sichtprüfungen vorgenommen worden. Die zusätzliche Überprüfung des Setzfließmaßes dient dazu, den Vergleich von einem hohen Mischungsvolumen (40 Liter) zu einem kleinen Mischungsvolumen (10 Liter) zu erhalten.



Abbildung 38: 60 Liter Mischer von Elba

Beim Mischen von 40 Litern ist ein deutlicher Unterschied zu dem kleinen Mischungsvolumen aufgefallen. Zu Beginn ist das Leimvolumen des Frischbetons sehr fließfähig. In diesem Zustand kann Segregation, das Absetzen der großen Körnungen, nicht ausgeschlossen werden. Das kann auf die geringere Leistungsfähigkeit des 60 Liter Mixers im Vergleich zum kleinen Mischer zurückgeführt werden oder auf einen überproportionalen Effekt des Fließmittelgehalts. Die vermutete geringere Homogenisierung durch die Mischungsenergie, im Vergleich zum Erich Intensiv Mischer, zeigt am Beispiel der Festigkeitsentwicklung von Mix_6, dass die Größe und Stärke des Mixers keinen großen Einfluss auf die Homogenisierung der Mischung mit einem Größtkorn von 11mm hat (Abb. 39). Bei einem Größtkorn von 16 mm ist eine klare Abweichung, am Beispiel der Festigkeitsentwicklung von Mix_4 mit Wandeffekt, zu erkennen (Abb. 40). Das größere Mischungsvolumen wirkt sich, entgegen der Vermutung, positiv auf die Festigkeit aus. Gleiche Ergebnisse sind bei der Festigkeitsentwicklung von Mix_4 ohne Wandeffekt zu beobachten. Bei der Festigkeitsentwicklung ohne Wandeffekt ist das Ansetzen des Leimes im Wandinneren nicht gegeben. Weil die Mischung nach einer anderen Mischung gemischt wurde, wobei sich die Wandinnenseite bereits mit dem Leim, durch die vorhergehende Mischung beschichtet hat. Die höheren Festigkeiten könnten mit der Befüllungsart zusammenhängen. Beim manuellen Befüllen der Probekörper aus dem 60 Liter Mischer kann es sein, dass die Größtkörner sich an die Unterseite des Behälters abgesetzt haben und somit nicht so gleichmäßig, wie bei den 10 Liter Mischungen, verteilt sind.

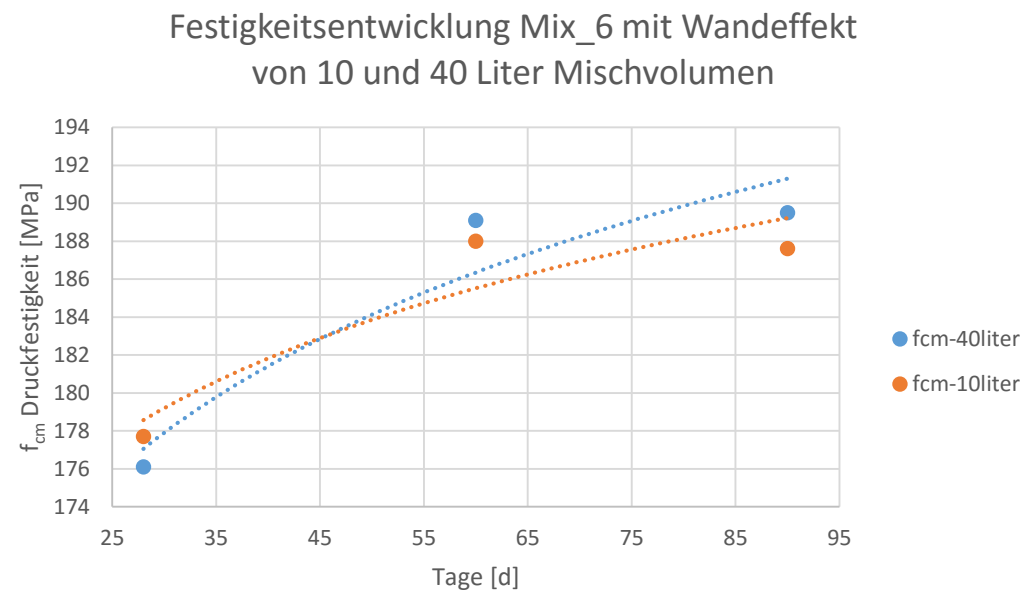


Abbildung 39: Festigkeitsentwicklung Mix_6 mit Wandeffect, von 10 und 40 Liter Mischvolumen

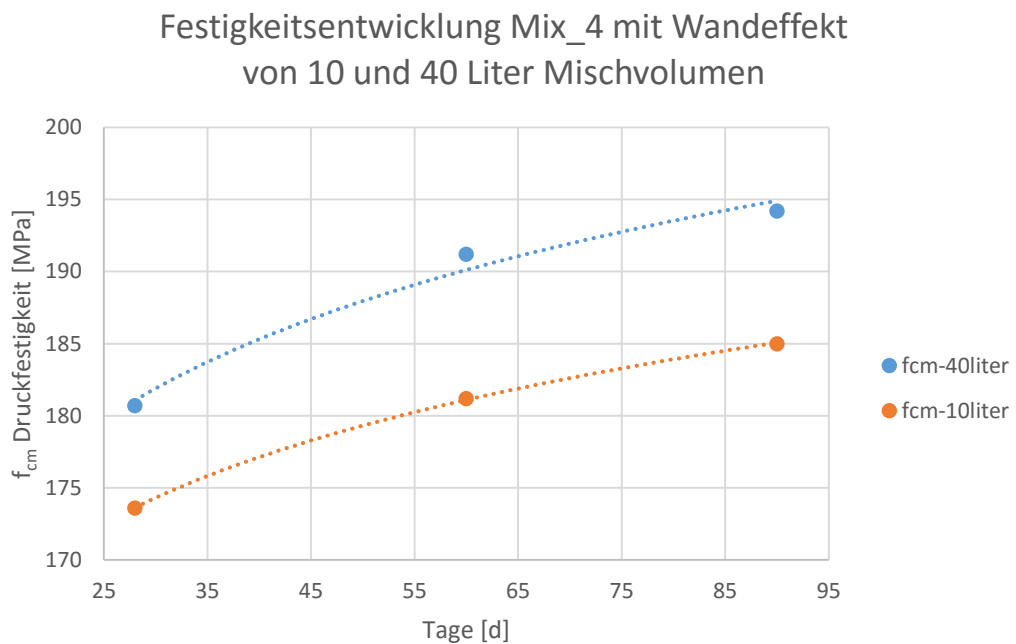


Abbildung 40: Festigkeitsentwicklung Mix_4 mit Wandeffect, von 10 und 40 Liter Mischvolumen

Nach 60 Minuten stabilisiert sich die Konsistenz des Frischbetons zu einem homogenen Frischbeton. Das kann daran liegen, dass sich der Zementleim an der Innenwand des großen Mixers absetzt oder dass der UHPC steifer wird und somit viskoser. Der Effekt der Wandfläche wird anhand der Festigkeitsentwicklung aufgezeigt, es verdeutlicht eine geringere Festigkeitsentwicklung durch den Verlust des Leimes am Wandinneren (Abb. 41).

Druckfestigkeitsentwicklung mit f_{cm} von Mix_4, mit und ohne Wandeffect

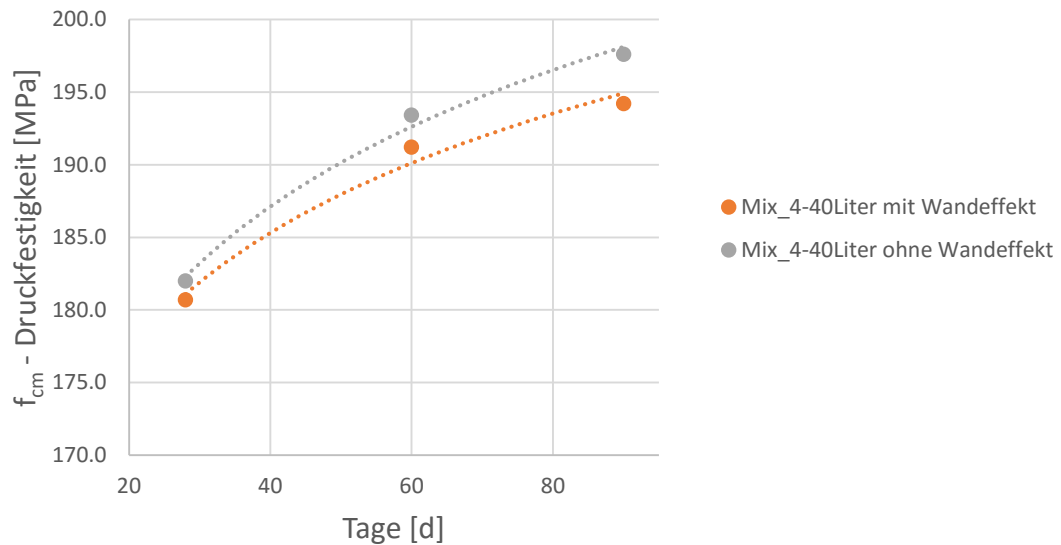


Abbildung 41: Druckfestigkeitsentwicklung Mix_4, mit und ohne Wandeffect

5.1.3 Auslauftrichterversuch

Für **Mix_4** und **Mix_6** wird die Auslauftrichterzeit gemessen, um das plastische Verhalten für die UHPC-Rezepturen abzuschätzen. Zur Bewertung der Viskosität und Fließfähigkeit von selbstverdichtenden Beton, wird der Auslauftrichterversuch mit einem Fassungsvermögen von 10 Litern (Abb. 42) nach [32] verwendet und anschließend wird das Setzfließmaß gemessen (Abb.43 und 44).

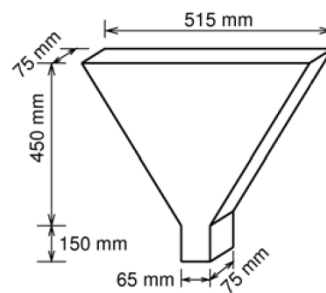


Abbildung 42: Schematischer 3D Aufbau von Trichterauslaufversuch

Dieser Versuch dient dazu die Viskosität des UHPC's abzuschätzen. Bei einer niedrigen Viskosität fließt der UHPC schneller durch den Trichter. Bei einer hohen Viskosität stellt sich ein langsames Fließen ein. Das kann zu hohen lokalen Gesteinsansammlungen führen, weil sich die Körnungen verzahnen. Ein langsames Durchfließen ist die Folge.



Abbildung 43: Trichterauslaufversuch



Abbildung 44: Zugehöriges Setzfließmaß

Die Trichterauslaufzeit ist bei beiden Mischungen sehr lange. Das ist ein Indiz für eine hohe plastische Viskosität. Es ist auch ein Maß für einen hohen Widerstand gegen die Sedimentation. Einerseits haben wir eine niedrige Fließgrenze, welche für ein ausreichendes Setzfließmaß sorgt und damit für eine ausreichende Fließfähigkeit. Andererseits ist die Auslaufzeit sehr lange, wodurch ein Absetzen der Gesteinskörnungen verhindert wird.

Die Ergebnisse der ausgewählten Mischungen sind in der folgenden Tabellen 14 eingetragen. Die neue Suspension hat mit Mix_6 einen deutlich stabileren Eindruck hinterlassen. Es kam zu einem signifikant positiven Effekt der Fließeigenschaften. Die Kornverteilung im Setzfließmaß war sehr gut. Die zusätzlichen Werte zeigen im Vergleich mit dem Produkt von *BASF* eine niedrigere Fließgrenze und niedrigere Viskosität, was sich am größeren Setzfließmaß und der kürzeren Trichterauslaufzeit entnehmen lässt.

Tabelle 14: Ergebnisse Trichterauslaufversuch 30 und 90 Minuten

Mischung	T _{30min}	T _{90min}
Mix_4_16mm	43 sek.	62 sek.
Mix_6_11mm (mit Wandeffekt)	50 sek.	69 sek.
Mix_6 mit SF_susp_Neu	40 sek.	55 sek.

In Tabelle 15 sind die Ergebnisse der Setzfließmaße für ein hohes Mischungsvolumen nach 30 und 90 Minuten aufgelistet.

Tabelle 15: Zugehörige Setzfließmaße nach 30 und 90 Minuten

Mischung	SF _{30min}	SF _{90min}
Mix_4_16mm	770	690
Mix_6_11mm (mit Wandeffekt)	730	670
Mix_6 mit SF_susp_Neu	800	750

In der folgenden Grafik (Abb. 45) ist die Trichterauslaufzeit dem Setzfließmaß gegenüber - gestellt. Der abgegrenzte blau gestrichelte Bereich stellt ideale Bedingungen für selbstverdichtenden Beton dar. Die Messungen ergaben eine Abweichung von diesem Bereich wegen des viskosen Verhaltens des UHPC's. Das kann eine Beeinträchtigung der Entlüftung nach sich ziehen. Dennoch ist das Ergebnis soweit für die Anforderungen zufriedenstellend, da mit diesen Mischungen die Festbetoneigenschaften erreicht werden und bei den autogenen Schwindversuchen ein geringes Schwindmaß erwartet wird.

Im Wandinneren ist durch den Leimverlust ein klarer Effekt von Mix_6 zu erkennen, wobei Mix_6 zuerst gemischt wurde. Der danach gemischte Mix_4 hat keinen signifikanten Leimverlust am Wandinneren. Der Vergleich von Mix_6 mit der vorgegebenen und der neuen Suspension lässt auf die besseren Eigenschaften der neuen Suspension schließen.

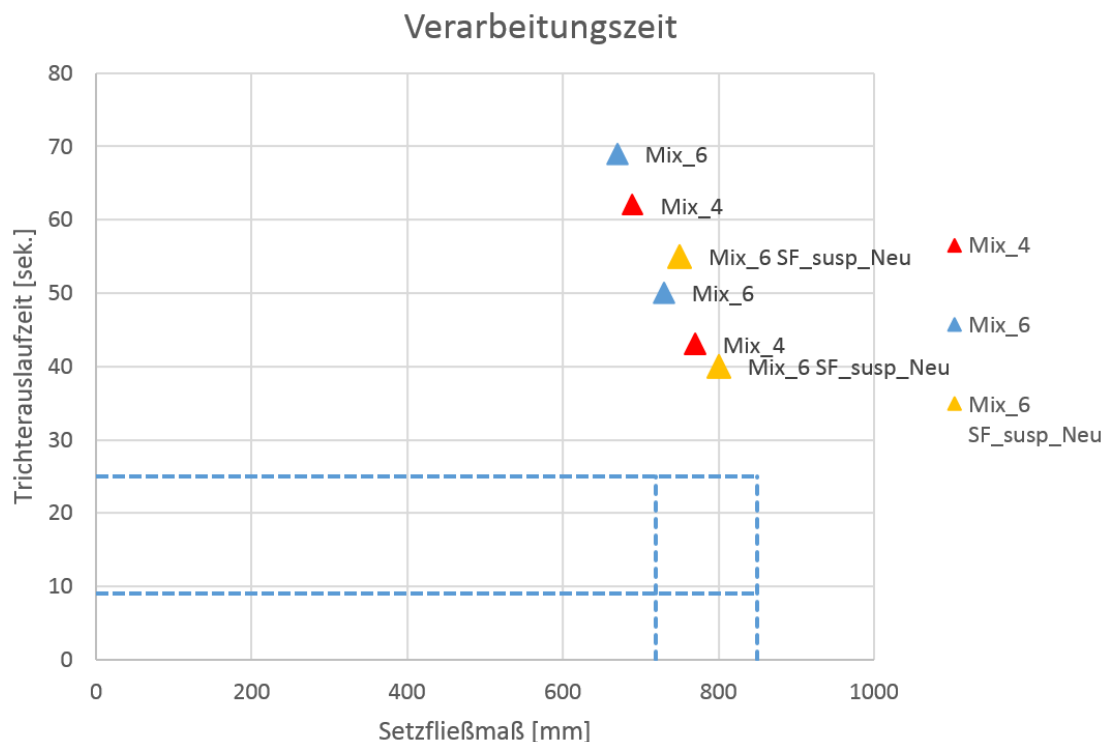


Abbildung 45: Selbstverdichtender Beton Mix_4, Mix_6 und Mix_6 mit SF_susp_Neu

5.2 Festbetoneigenschaften

In diesem Unterkapitel werden die Eigenschaften der UHPC-Mischungen unter Druckbeanspruchung charakterisiert. Dafür sind Würfel für die Druckfestigkeitsbestimmung und Zylinder für die E-Modul-Bestimmung hergestellt worden. Die Festbetoneigenschaften sind nach ÖNORM EN12390 untersucht. Dabei sind die Teile 1, 2, 3 und 13 verwendet worden.

5.2.1 Druckfestigkeit

Für die Druckfestigkeit sind Probewürfel mit 100 mm Kantenlänge hergestellt worden [35]. Die Probewürfel (f_{c-Heat}) für eine erste Abschätzung der Druckfestigkeit sind 48 Stunden in Wasser bei 85°C im Ofen behandelt. Die Lagerung der Probekörper gemäß [36] für die Druckfestigkeit nach 28 Tagen (f_{c-28d}), wurde stets eingehalten. Dafür sind die Würfel mindestens 16 Stunden bei 20± 5 °C und nicht länger als 24 Stunden in der Schalung gelagert. Die Probekörper sind vor Stößen, Rütteln und Austrocknung geschützt. Nach dem Entfernen der Schalung werden die Proben 6 Tage in Wasser gelagert. Alle Probekörper wurden abgeschliffen. Die Schleifbehandlung erfolgte mit Wasser. Bei der Prüfung sind die Würfel zentrisch in der Prüfmaschine ausgerichtet.

In der folgenden Tabelle werden die Ergebnisse (vgl. Kapitel 4.3) der Fest- und Frischbetonprüfungen aller Mischungen aufgelistet, die zur ersten Beurteilung herangezogen wurden. Anhand der Fest- und Frischbetoneigenschaften aller Mischungen wurde eine Vorauswahl getätigt. Die Druckfestigkeit wird mit 0,1 MPa angegeben.

Tabelle 16: Druckfestigkeit und Setzfließmaß

	V_{paste}/V_{solid}	SF	$f_{cm-Heat}$
	[-]	[mm]	[MPa]
Ref_1_8mm	0,92	800	
Ref_2_16mm	0,817	760	190,4
Mix_1_16mm	0,835	780	162,7
Mix_2_16mm	0,801	550	177,8
Mix_3_16mm	0,817	650	178,9
Mix_4_16mm	0,942	740	172,7
Mix_5_16mm	1,022	770	174,1
Mix_6_11mm	0,942	800	182,1
Mix_7_16mm	0,793	620	174,6
Mix_8_16mm	0,933	670	169,6
Mix_9_11mm	0,933	710	171,2

Bei den Druckfestigkeitsprüfungen sind für die ausgewählten Mischungen stets zufriedenstellende Bruchbilder [33] bemerkt worden. Wobei die Kontaktflächen mit der Druckplatte kaum geschädigt sind und der Rissbefall der freiliegenden Flächen in etwa übereinstimmenden ist.

In dem folgenden Diagramm (Abb. 46) sind die Druckfestigkeitsentwicklungen der ausgewählten Mischungen abgebildet. Die rote Linie stellt die Anforderungen aus dem Verbundstützenprojekt dar. Ref_2 dient wie zuvor als Kenngröße für die weitere Entwicklung. Mix_4 und Mix_6 zeigen, wie aus der Voruntersuchung vermutet, eine ausreichende Festigkeitsentwicklung. Die Mischung 6 verhält sich durch ihre Kornzusammensetzung und der stärkeren Kontaktzone der Matrix (ITZ) etwas besser als Mix_4. Die erwartete festigkeitssteigernde Wirkung durch Hüttensand von Mischung 1 war nicht hoch genug, um die Anforderungen zu erfüllen.

Die rote Linie in Abbildung 46 ist mit $f_{cm}(t)$ nach [33] bestimmt. Der f_{c28d} -Wert wurde entsprechend der Anforderungen gewählt, um zu veranschaulichen welche Mischungen die Anforderungen erfüllen. Die Festigkeitsentwicklung kann mit folgender Formel angesetzt werden:

$$f_c(t) = \exp\left(s \left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^n\right]\right) * f_{c28d} \quad (5)$$

Diese Formel ist für UHPC anwendbar. Der Wert s für die Zementaktivität ist entsprechend der Zementart anzupassen. Für den verwendeten Cem 52.5 N ist ein Wert von $s = 0,2$ vorgesehen. Der n -Wert für den Verlauf der Festigkeitsentwicklung liegt bei 0,5.

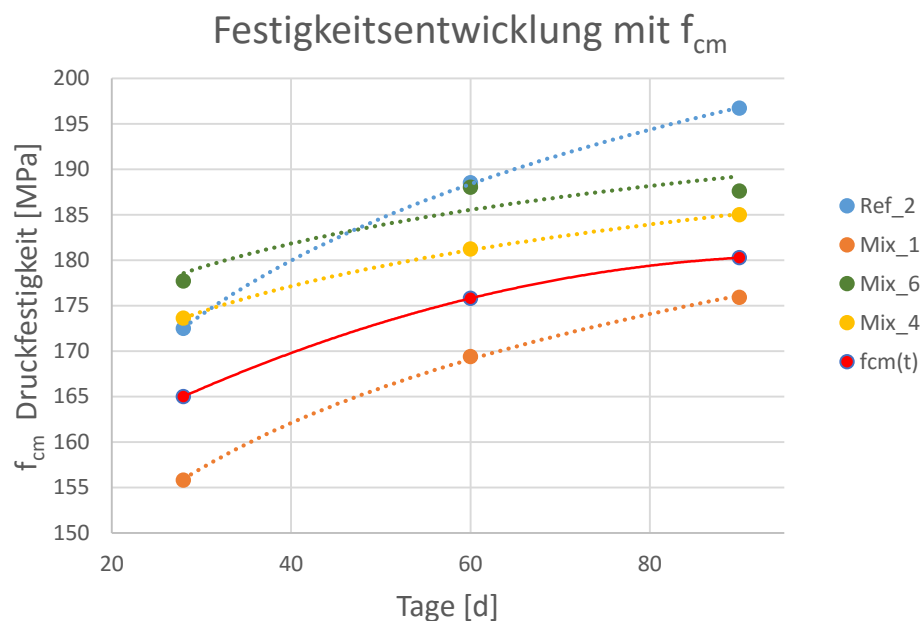


Abbildung 46: Festigkeitsentwicklung von Mix 1,4,6 und Ref 2

Die Druckfestigkeitsentwicklung der Mischung Mix_6_SF_susp_Neu wurde der herkömmlichen Mischung Mix_6 gegenübergestellt (Abb. 47). Die neue Suspension erzielte positivere Ergebnisse, wie bei allen bereits angeführten Vergleichen. Die Tendenz in der Festigkeitsentwicklung zeigt dies erneut.

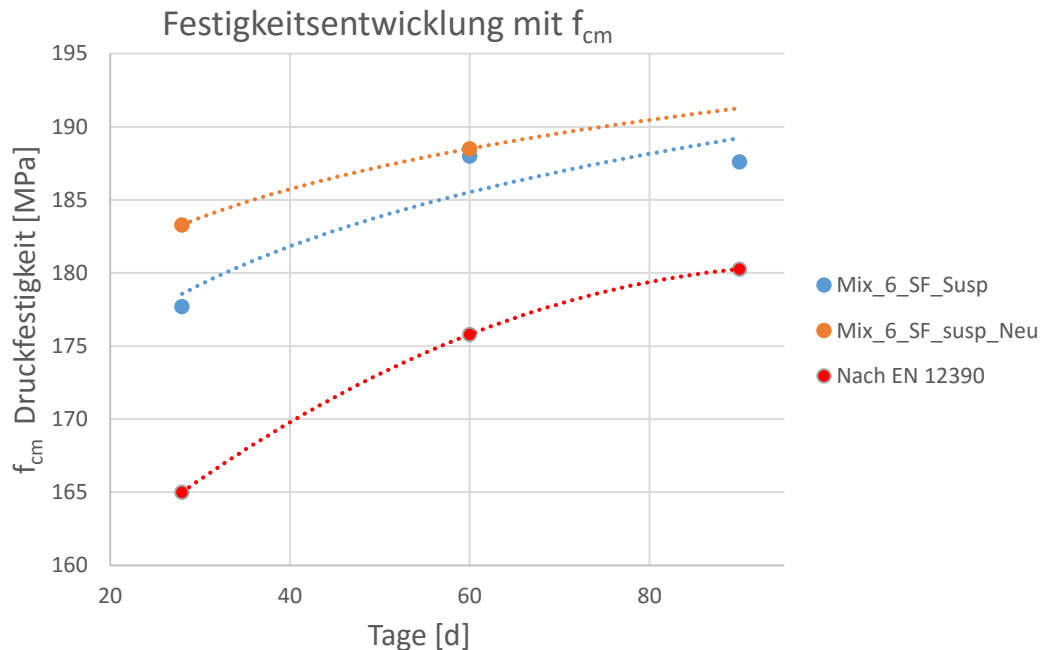


Abbildung 47: Druckfestigkeitsentwicklung Vergleich Suspensionen

Die Mischungen Mix_4 und Mix_6 erweisen sich als brauchbare Mischungen. Sie erfüllen die Anforderungen des Projekts und haben bei den Frischbetonprüfungen gute Ergebnisse erzielt.

5.2.2 Elastizitätsmodul

Das Elastizitätsmodul beschreibt die Steifigkeit des umgerissenen UHPC unter Kurzzeitbelastung. Es ist abhängig von der Zementmatrix und Art der Zuschläge (Qualität und Menge). Für gebrochene Zuschläge, wie Basalt, werden im Allgemeinen größere E-Module erzielt. Es kommt nur zu einer unterproportionalen Zunahme des E-Moduls mit steigender Druckfestigkeit. Der E-Modul wird für die Verformungsberechnung verwendet und um die Spannungs-Dehnungslinie zu beschreiben. Es gilt als Basis für die relative Vergrößerung der Verformung durch Kriechen [2].

Das Elastizitätsmodul [34] wurde nur für die ausgewählten Mischungen (Mix_1, Mix_4 und Mix_6) und zum Vergleich für die Referenzprobe (Ref_2) erhoben. Nach [2] lässt sich das E-Modul mit der Gleichung 6 von grobkörnigen UHPC aus der Druckfestigkeit ableiten.

$$E_{C,0} = 10200 * f_c^{1/3} \quad (6)$$

In der folgenden Tabelle 17 sind die abgeleiteten E-Module den experimentell bestimmten E-Modulen gegenübergestellt. Dabei sind Über- und Unterschätzungen von bis zu 12% zu sehen. Wie sich aus der Ableitung des E-Moduls von Druckfestigkeit erwarten lässt, hat sich ein E-Modul um die 50 GPa eingestellt.

Tabelle 17: E-Modul der ausgewählten Mischungen

Mischung	Alter E-Modul [d]	f_{ck28d}	$E_{c,0}$ nach DIN EN 1045	E-Modul (gemessen)	Über-/Unterschätzung
Mix_1	28	138,4	52760,9	49941,5	+ 5,6 %
Mix_4	72	168,2	56304,4	52089,7	+ 8,1 %
Mix_6	72	175,6	57118,3	51221,2	+11,5%
Ref_2	28	150,5	54255,7	50533,3	+7,4 %

5.3 Zusammenfassung und Diskussion

Die Mischzusammensetzungen von Mix_4 und Mix_6 konnten die Anforderungen an Frisch- und Festbetoneigenschaften erfüllen. Die schrittweise Optimierung der Packungsdichte hat einen klaren Effekt auf die Verarbeitbarkeit und Festigkeit gezeigt.

Die Referenzmischung Ref_2 hat wesentlich bessere Eigenschaften als alle entwickelten Mischungen für das Projekt. Deshalb liegt es nahe, dass der Zement Kir_Cem und die Silikasuspension SF_susp, im Vergleich zu Laf_Cem und dem pulverförmigen Mikrosilika SF_pow, eine geringere Qualität aufweist.

Der Mikrosilikaanteil und die damit einhergehende festigkeitssteigernde Wirkung erfüllen ihren Zweck. Die latent hydraulische Wirkung von Hüttensand zeigt in Kombination mit Mikrosilika keinen nachhaltigen Einfluss (Mischung 7 bis 9). Der alleinige Einfluss von Hüttensand hingegen sehr wohl, erkennbar an den Ergebnissen von Mix_1.

Wegen des erhöhten Zement- und Wasseranspruchs müssen bei der Suspension geringere Einbußen bei der Verarbeitbarkeit hingenommen werden.

Die inerten Zusatzstoffe ersetzen den übermäßigen Anteil an reaktiven Zusatzstoffen und tragen durch ihre Feinheit zu einer erhöhten Packungsdichte bei. Der daraus resultierende Vorteil für die Verarbeitbarkeit hat seine Grenzen. Zum Beispiel wird bei einer erhöhten Zugabe von BetoflowD mehr Zement benötigt, um die bessere Fließfähigkeit zu gewährleisten.

Die Verzögerung der Erstarrung, durch das Fließmittel hilft bei der Verarbeitung im Frischbetonzustand.

Der Fließmittelgehalt hat für große Mischungsvolumen von 40 Litern einen anfänglich überproportionalen Einfluss auf die Konsistenz. Mit andauernder Mischzeit hat sich die Konsistenz stabilisiert und weist ähnliche Ergebnisse auf wie bei geringem Mischungsvolumen.

Da die Stützen im Fertigteilwerk produziert werden, sollte es keinerlei Bedenken über die Verarbeitungszeit geben. Die Konsistenz sowie die Verteilung der Gesteinskörnungen muss in weiteren Untersuchungen vertieft werden. Bei den Mischungen mit einer Größtkörnung von 16 mm ist mit Setzungen zu rechnen. Dennoch ist eine gleichmäßige Verteilung gegeben und die Gesteinskörnungen sind von der Leimmatrix umfasst. Außerdem konnten ausreichende Festigkeitswerte erzielt werden.

6 Untersuchung des autogenen Schwindens

In Kapitel 6 wird die Untersuchung des autogenen Schwindens behandelt. Es werden zwei Versuchsaufbauten auf ihre Korrelation hin untersucht. Einmal ein vertikaler Messaufbau und zum anderen ein horizontaler Messaufbau. Dabei wird näher auf die Messprozedur eingegangen. Abschließend werden die Ergebnisse der entwickelten UHPC-Rezepturen gegenübergestellt und analysiert. In der europäischen Norm sind Prüfungen des autogenen Schwindens an UHPC nicht festgehalten, weil noch kein geeigneter Maßstab zur Bestimmung des autogenen Schwindmaßes gefunden wurde.

6.1 Methoden zur Messung des autogenen Schwindens

Die in dieser Arbeit verwendete lineare Messmethode zum Erfassen von autogenen Schwinden beruht auf dem Konzept von Tazawa (Abb. 48) [9]. Die Längenveränderung hervorgerufen aus dem Schwinden des UHPC wird durch einen Wegaufnehmer ermittelt.

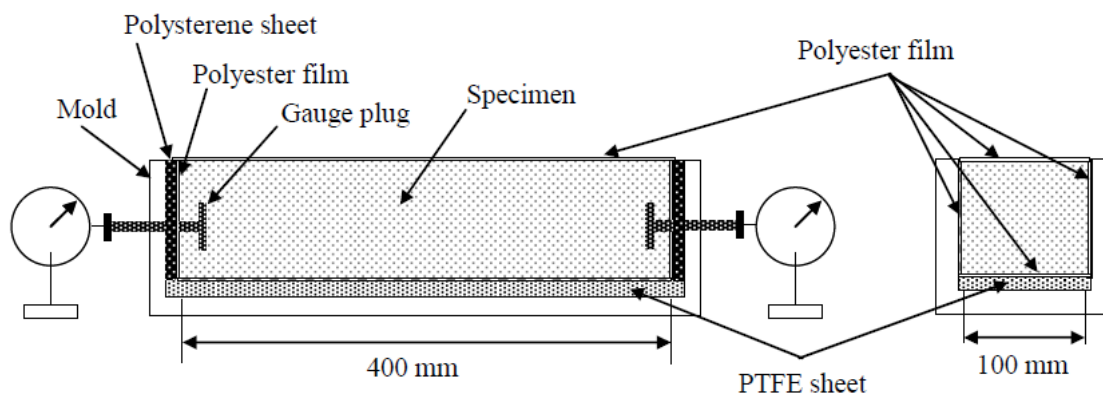


Abbildung 48: Schematischer Aufbau der horizontalen Schwindmessung aus [7 S. 14] nach [9]

Der flüssige UHPC wird in die Schalung gegossen. Sobald sich der selbstverdichtende Beton in der Schalung ausgebreitet hat, wird dieser mit einer Folie abgedichtet. Die Folie hat den Zweck den Feuchtigkeitsverlust so gering wie möglich zu halten, damit das Ergebnis der autogenen Schwindmessung, nicht durch andere Phänomene wie dem Trocknungsschwinden, beeinflusst wird. Der Beginn der Messung erfolgt sobald die richtige Anfangssteifigkeit erreicht ist. Da der Beton bei der Hydratation expandiert und gleichzeitig schwindet, ist hier die sogenannte Time Zero (beschrieben in Kapitel 6.2.1) abzuwarten. Der Wegaufnehmer ermittelt von diesem Zeitpunkt an das Schwindmaß des UHPC's. Das verwendete Messsystem entspricht dem handelsüblichen LDTV-Wegaufnehmer. Der Messbereich liegt bei bis 50 mm. Die Linearitätsabweichung liegt unter 0,1 %. Der Messvorgang wird unter gleichen äußeren Bedingungen gefahren. Die Versuchsaufbauten sind in einem geregelten Klimaraum positioniert. Dieser hat eine konstante Temperatur von 20°C und 65% Luftfeuchtigkeit.

6.1.1 Multiple Messmethoden

Es wird zwischen dem horizontalen und vertikalen Versuchsaufbau (Abb. 49) unterschieden. Der Beton wird in beiden Fällen versucht so abzudecken, dass die wirklichen Bedingungen eines isothermen Systems wie im Kern der Verbundstütze entstehen. Dafür wird der Beton in eine handelsübliche Frischhaltefolie gepackt und alle restlichen Schlitzte und kleinen Öffnungen mit einem Fett abgedichtet.



Abbildung 49: Vertikaler und horizontaler Schwindversuch

Ein ähnlicher Versuchsaufbau existiert bereits für Trocknungsschwindmessungen. Um dieses System so abzuwandeln, damit es das autogene Schwinden simuliert, wurde ein isothermes System durch die abschließende Wirkung einer Folie geschaffen.

Der **horizontale Versuchsaufbau** („Schwindrinne“) besteht aus einem u-förmigen, meterlangen Edelstahlprofil. Der Querschnitt ist 100 mm breit und 60 mm hoch. Auf dem einen Ende ist ein beweglicher Stempel angebracht, um die Verkürzung/ Verlängerung durch einen Wegaufnehmer zu erfassen. Das gegenüberliegende Ende ist mit einem Anker versehen, damit sich der Beton nur in eine Richtung bewegen kann. Außerdem ist das Edelstahlprofil mit einer Folie ausgekleidet, die die Reibung zwischen Beton und Schalung minimiert, damit sich der Beton reibungsfrei bewegen kann (Abb. 50).

Hierbei handelt es sich um den momentan gängigen Versuchsaufbau zur Ermittlung des autogenen Schwindens von UHPC. Dieser Versuchsaufbau wird vom ACI („American Concrete Institute“) aus den Vereinigten Staaten von Amerika, RILEM („Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux“) aus Frankreich und von dem Forschungsvorhaben 1182 aus Deutschland, vorgeschlagen.



Abbildung 50: Detail des Stempels von horizontalem Schwindaufbau

Beim **vertikalen Schwindversuch** orientiert sich das System an dem Prinzip der Messuhr und dem Versuchsaufbau nach Hansen und Jensen, wie im Kapitel 2.7 beschrieben ist. Diese Systeme mussten modifiziert werden, damit sie für die autogene Schwindmessung von UHPC mit einem Größtkorn von 16 mm funktionieren.

Die vertikale Schwindeinrichtung (Abb. 51) besteht aus zwei Stahlsäulen mit einer hohen Steifigkeit, um thermische Längenänderungen zu minimieren und eine maximale mechanische Stabilität zu erreichen. Die Fundamentplatte bietet eine Befestigung für die Abschlussplatte (Zylinderförmige Stahlplatte) des Probekörperbehälters, die eine Verankerung der Probe vorsieht. In die Betonprobe wird in das obere Ende eine Schraube mit einbetoniert, welche bis zur „Time Zero“ durch eine Vorrichtung bewegungsfrei gehalten wird. Darauf ist ein Wegaufnehmer (in Abb. 51 in Form eines Stiftes zu erkennen) installiert. Sobald die notwendige Steifigkeit erreicht ist, kann über den Anker das autogene Schwinden gemessen werden. Der einbetonierte Anker ist an der Stelle, wo er sich mit dem Wegaufnehmer trifft, plan geschliffen.



Abbildung 51: Vertikaler Schwindaufbau

Der Behälter ist ein handelsübliches Abflussrohr aus PVC. Er ist auf einer Höhe von 25 cm abgeschnitten. Der Durchmesser beträgt 15 cm. Somit entspricht das einem Volumen von knapp 4500 cm³. Das neu entwickelte Messsystem stellt eine gute Methode mit Anlehnung an den Messuhrständer und den Versuchsaufbau nach Hansen und Jensen dar [13].

6.1.2 Time Zero

Um ein aussagekräftiges Endschwindmaß zu erhalten, besteht eine große Unstimmigkeit in der Literatur über den geeigneten Ausgangspunkt zur Bestimmung des autogenen Schwindens [16, 37, 38]. Dieser Ausgangspunkt wird in der Literatur als Zeitpunkt Null („Time Zero“) bezeichnet. Die Problematik dabei besteht darin, dass ein zu früher Zeitpunkt Null zu einem erhöhten Schwindmaß und umgekehrt ein zu später Zeitpunkt Null zu einem niedrigen Schwindmaß führt (Abb. 52).

Die Diskussion um den Nullzeitpunkt ist abhängig vom Beginn des chemischen Schwindens. Dieses startet mit dem Hydratationsprozess durch die Verbindung von Wasser mit Zement. Das autogene Schwinden ist Teil des chemischen Schwindens (siehe Kapitel 2) und ist maßgeblich mit der Abnahme der relativen Luftfeuchtigkeit in der Porenstruktur verknüpft. Beim Erstarrungsprozess ist es nahezu unmöglich den genauen Beginn zu bestimmen, da die Abnahme der relativen Luftfeuchtigkeit und die langsame Änderung des Kapillardrucks gleichzeitig ablaufen. [7]

Der Versuch ein Null-Zeit-Kriterium zu finden bereitet einige Schwierigkeiten. Der häufigste Ansatz und von Japan Concrete Institution (JCI) vorgeschlagen, ist der Übergang von viskos

zu fest. Somit der Erstarrungsbeginn (Initial Setting) und das –ende (final setting). Diese können mit dem Vicat-Nadelpenetrationstest bestimmt werden. Die Literatur lässt auch hier weitere Fragen offen, da sich die Autoren uneins sind, welcher Zeitpunkt der endgültige zur Bewertung des autogenen Schwindens sein soll. Wird der Erstarrungsbeginn herangezogen, so werden rissrelevante Dehnungen nicht übersprungen. Allerdings kann mit dem Erstarrungsbeginn als Time Zero das autogene Schwinden erheblich überschätzt werden. Das Erstarrungsende hingegen unterschätzt das autogene Schwinden [7].

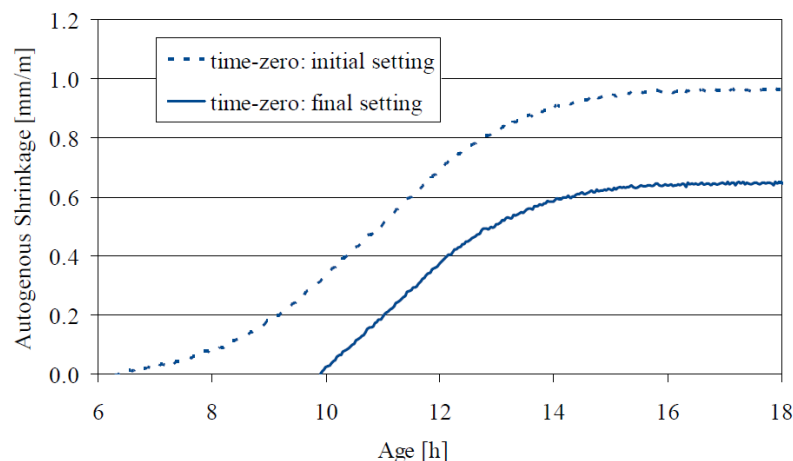


Abbildung 52: Einfluss von „Time Zero“ auf Schwindmaß [7 S. 17]

Das Diagramm (Abb. 52) aus den Untersuchungen mit einem UHPC, von [7] verdeutlicht die Problematik mit dem Null-Zeit-Kriterium. Nach 18 Stunden hat das autogene Schwinden einen Unterschied von ca. 20% oder 350 $\mu\text{m/m}$. Das entspricht 50 % der Schwinddehnung nach der Endaushärtung. Für sinnvolle Vergleiche ist es deswegen unabdingbar ein geeignetes Nullzeitkriterium zu definieren, um Ergebnisse vernünftig vergleichen zu können [7].

Einen neuen vielversprechenden Ansatz konnte Huang [37] aufzeigen. Mit einer neuen Methode zur Bestimmung der Rissgefahr, konnte er einen sinnvollen Nullzeitpunkt für die autogene Schwindmessung demonstrieren. Er beruft sich auf die Beziehung zwischen Dehnung und Änderung der relativen Feuchte (RH) (Abb. 53) beim Aushärten der Zementmatrix. Mit einem verbesserten Hygrometer wird der Wechsel von interner RH aufgezeichnet. Diese Methode zeigt, dass nach dem Erhärtungsende die interne RH nicht sofort absteigt. Auch Lura und Wyrzykowski erzielten ähnliche Ergebnisse [39].

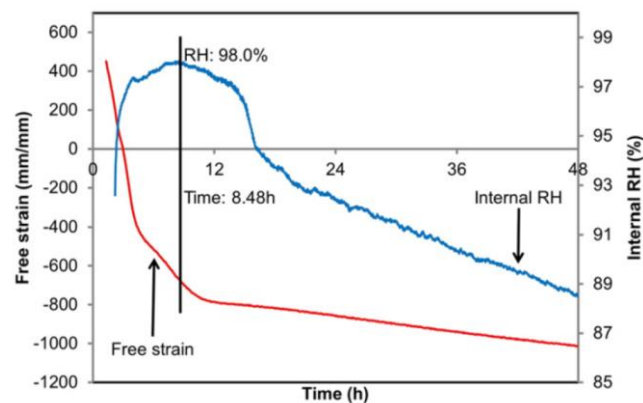


Abbildung 53: Vergleich von Dehnung und relativer Feuchtigkeit [37]

Die damit bestimmte „Time Zero“ benutzt den Beginn von internen RH-Abfall. Der RH-Wechsel ist mit dem Start der Selbstaustrocknung und deswegen auch mit dem autogenen Schwinden verbunden, womit dieser zweckmäßiger für die Ansetzung des „Time Zero“ ist als der bisherige Erhärtungsbeginn und das Erhärtungsende[37].

Zum Vergleich stellt beim Vicat-Test der fehleranfällige Handbetrieb ein schwerwiegendes Hindernis dar. Dennoch gilt der Penetrationstest weiterhin als geeignetes Maß als Null-Zeit-Kriterium. Eine automatische Vorrichtung zur Bestimmung des Nullzeitpunktes, welche eine ausreichende Genauigkeit besitzt, ist noch nicht bekannt [7].

6.1.3 Korrelation der Messmethoden

Die unterschiedlichen Messaufbauten wurden auf ihre Übereinstimmung überprüft. Bei den ersten Versuchsmessungen konnte gezeigt werden, dass durch sorgfältiges Arbeiten annähernd gleiche Ergebnisse erzielt werden können.

Für die Korrelationsanalyse sind Ref_2 (Abb.54) und Mix_1 (Abb.55) ausgewählt worden, um die Unterschiede zwischen dem vertikalen und horizontalen Versuchsaufbau zu erkennen.

An der Mischung Ref_2 lässt sich deutlich eine Übereinstimmung der Messergebnisse zwischen horizontalem und vertikalem Versuchsaufbau feststellen. Der Verlauf bis 24 Stunden nach Messbeginn zeigt eine gleiche Steigung des autogenen Schwindens. Ebenso ist die Tendenz des Schwindverlaufes ab 3 Tagen in allen Messungen gleich. Auffallend ist der Anfangsspitzenwert nach 24 Stunden beim horizontalen Messaufbau. Beim vertikalen Versuchsaufbau tritt dieser mit anschließender Expansion nicht oder nicht ausgeprägt genug auf, um ihn zu erkennen. Die Ursache dafür könnte am Eigengewicht des Betons liegen, dessen Kraft gleich der Expansionskraft ist. Deswegen kommt es bei der vertikalen Messung nicht zu einer deutlich erkennbaren Expansion und dem damit einhergehenden Anfangsspitzenwert in der Messkurve. Der Anfangsspitzenwert beim horizontalen Messverlauf wird mit dem Spitzenwert der Hydratationswärme erklärt [17, 18, 40].

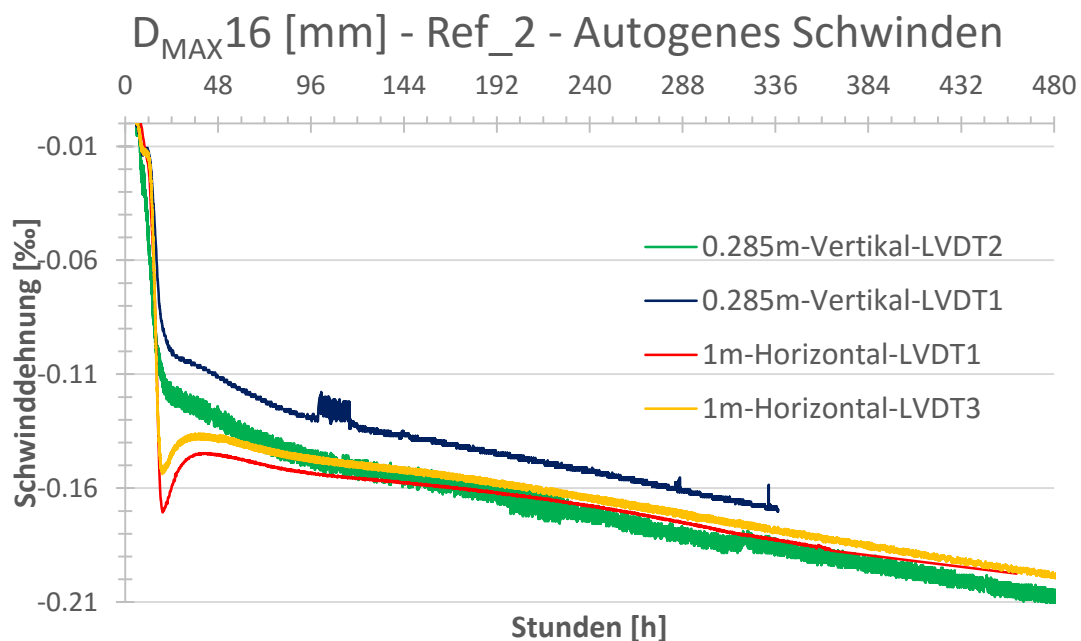


Abbildung 54: Korrelationsanalyse von Ref_2 für horizontalen und vertikalen Versuchsaufbau

Bei der zweiten Korrelationsüberprüfung mit Mix_1 sind starke Abweichungen zwischen den zwei Versuchsaufbauten festzustellen. Klar erkennbar ist der ähnliche Verlauf der Kurven wie bei Ref_2. Beim horizontalen Versuchsaufbau stellt sich nach 24 Stunden der typische Spitzenwert im Messverlauf ein, gefolgt von einer Expansion. Bei der vertikalen Messmethode kommt es zu einem kleinen, aber deutlich weniger ausgeprägtem Peak.

Die Abweichungen und die deutlich höheren Werte der vertikalen Messung lassen die Vermutung zu, dass die größere Steigung an einer nicht gut eingestellten Messvorrichtung liegt. Es ist möglich, dass das Messsystem nicht vollständig geschlossen war. Aufgrund des damit einhergehenden Feuchtigkeitsverlustes kam es zum größeren Schwinden. Das könnte eine gute Erklärung für die Abweichung darstellen. Vor allem da sonst das Kurvenbild, die Steigungen und der Zuwachs nach 24 Stunden eine klare Parallelität aufweisen. Ebenfalls ist die Neigung nach dem Peak parallel.

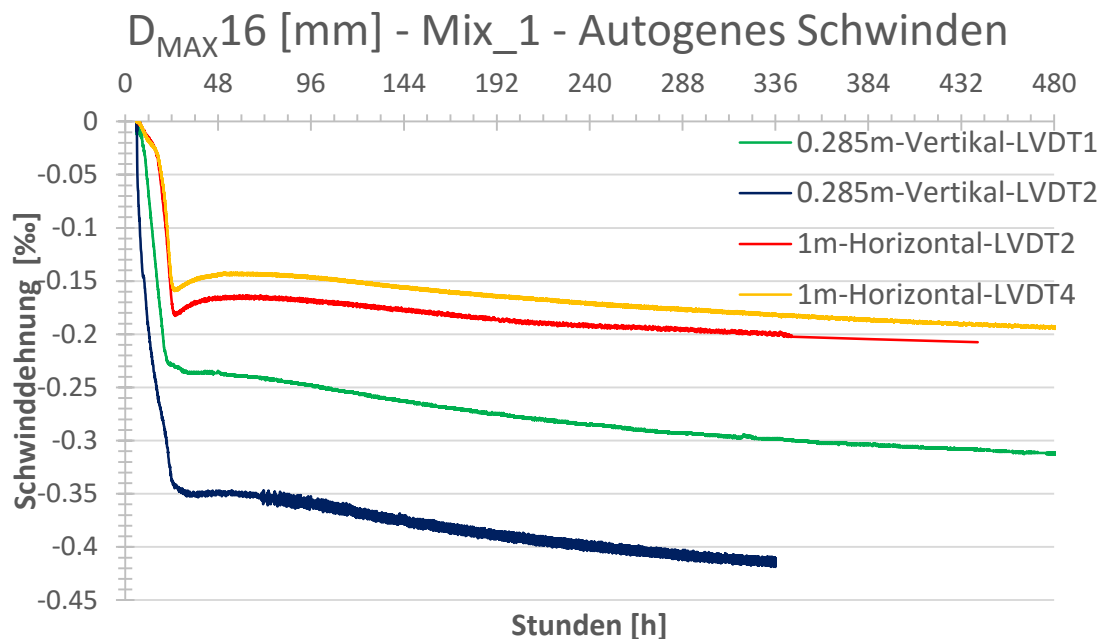


Abbildung 55: Korrelationsanalyse von Mix_1 für horizontalen und vertikalen Versuchsaufbau

6.2 Versuchsaufbau und Ergebnisse

Das Messverfahren ist einfach gehalten und benutzt die gängigen Versuchsaufbauten. Somit können die erzielten Werte mit bisherigen Forschungsergebnissen besser verglichen werden. Es ist darauf zu achten, dass die absoluten Werte gewisse Fehlerquellen aufweisen können. Einmal muss auf den Startpunkt der Messung geachtet werden, erklärt im Kapitel „Time Zero“. Außerdem muss der Feuchtigkeitsverlust mit sorgfältigen Vorbehandlungen und Nachbearbeitungen minimiert werden.

Die Messmethoden stellen nach der vorhergehenden Überprüfung eine ausreichende Korrelation dar. Somit kann simultan für mehrere Mischungen gleichzeitig gemessen werden.

6.2.1 Setup und Messprozedur

Um eine gute Veranschaulichung der Graphen zu erhalten, ist der Startpunkt der Messergebnisse von Null aus gewählt. Die befüllten Versuchsaufbauten sind vor Feuchtigkeitsverlust geschützt. Erstens durch Fette in den kleinen Löchern und Schlitten, zweitens ist der offenliegende Beton mit einer Folie überzogen. Die Folie im Inneren der horizontalen Messeinrichtung dient dazu, die Reibungsverluste auf ein Minimum zu reduzieren. Der Beton wird selbstverdichtend ohne Einwirkung von außen in die Form gegossen. Dabei beginnt man bei der horizontalen Vorrichtung im mittleren Bereich der Schalung. Es muss nicht auf die Fließrichtung geachtet werden, da keine Fasern in UHPC vorhanden sind. Bei der vertikalen Vorrichtung wird der Beton behutsam in die obere Öffnung

gegossen, auch hier ohne zu verdichten. Die Messaufbauten sind vor äußerer Einwirkung geschützt. Der Wegaufnehmer ist zum Zeitpunkt Null installiert und übernimmt ab dann die Messung automatisch. Dafür wurde manuell der Nullzeitpunkt des autogenen Schwindens abgewartet. Die Ergebnisse sind zeitweise überprüft worden. Die Messdauer ist auf 7 und 21 Tage beschränkt, da 60% des autogenen Schwindens in den ersten 2 Tagen abgeschlossen ist [18, 41].

6.2.2 Ergebnisse

Ausschlaggebend für das autogene Schwinden von UHPC ist der w/z-Wert. Wenn weniger Wasser als für eine vollständige Hydratation (w/z -Wert = 0,4 bis 0,45) vorhanden ist, tritt ein signifikantes autogenes Schwinden auf [7, 17, 42].

Die übliche Analysetechnik für das autogene Schwinden beruht sich auf den w/z-Wert, Grad der Hydratation, w/b-Wert (abhängig von reaktiven Stoffen) und den Eigenschaften der Gesteinskörnungen (Form, Dichte, ...) [7, 17, 42]. Des Weiteren wird auf die einzelnen Bestandteile der Mischung eingegangen. Angefangen mit dem Verhältnis von Leim- zu Aggregatvolumen, hin zum gesamten Überblick der zu erreichenden Anforderungen an das Projekt, mit Festigkeitsentwicklung und Verarbeitbarkeit. Anfangs werden die Referenzmischungen aufgezeigt.

In Abbildung 56 ist die Mischung Ref_1 mit einem hohen Zementgehalt und Leimvolumen zu sehen. Die Zusammensetzung der Mischung verursacht das typische, hohe autogene Schwinden von UHPC. Sie entspricht einer typischen UHPC Mischung (vgl. M2Q aus Kapitel 1.1) mit sehr hohen Festigkeitswerten, durch die festigkeitssteigernde Wirkung der Mikrosilikas und Erhöhung der Packungsdichte mit Quarzmehl. Sie ist charakterisiert durch einen hohen Zementgehalt von 640 kg/m^3 , einem kleinen w/b-Wert von 0,19, sowie einem hohen Leimvolumen, welches für eine gute Verarbeitbarkeit sorgt. Diese Eigenarten sind zielführend für einen ultrahochfesten Beton, aber eben auch charakteristisch für ein sehr starkes Schwinden des UHPC. Eine Schwinddehnung von 0.45 ‰ ist nach 24 Stunden erreicht. Das Ergebnis von Ref_1 mit dem hohen Schwindmaß, verdeutlicht im späteren Verlauf der Diskussion den Mehrwert der entwickelten Rezepturen mit ebenfalls hohen Festigkeiten, guter Verarbeitbarkeit, aber gleichzeitig einem geringen Schwinden.

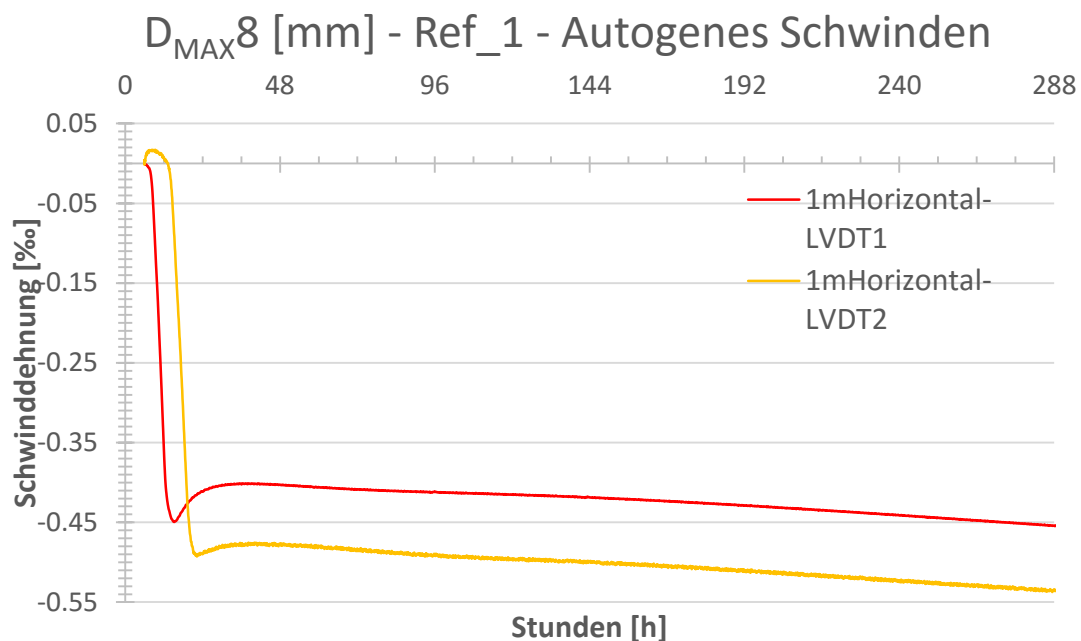


Abbildung 56: Ref_1 $D_{MAX} = 8$ [mm] mit 640 [kg/m³] Zement

Die Mischung Ref_2 (Abb. 54) demonstriert die Wirksamkeit der Rezepturentwicklung. Sie erfüllt die Festigkeits- und Verarbeitungsanforderungen an das Verbundstützenprojekt. Es wurde ein ausreichendes Setzfließmaß, 28 Tage Druckfestigkeit und ein geringes Schwinden im Vergleich zu Ref_1 erzielt. Hier lässt sich der Effekt der unterschiedlichen Mischungen und der Einfluss der einzelnen Bestandteile sehr gut im Vergleich zu den Mischungen Mix_1, Mix_4 und Mix_6 darstellen. Ref_2 ist mit Laf_Cem hergestellt. Sie hat einen geringen Zementgehalt von 550 kg/m³, 12 % Mikrosilika und 40 % QP16900, einen Fließmittelanteil von 3.5 % und einen Wasseranteil von 28 % vom Zementgehalt. Das Schwindmaß nach 21 Tagen beläuft sich auf 0.21 ‰ oder 210 µm/m. Das entspricht einem sehr geringen autogenen Schwinden. Das Resultat bestätigt die vorhergehende Überlegung der Rezeptur. Der Effekt der optimierten Packungsdichte, das damit einhergehende geringere Zementvolumen und der Ersatz der überflüssigen reaktiven Zusatzstoffe durch inerte Zusatzstoffe, sorgt für eine hohe Festigkeit und gute Verarbeitbarkeit.

Abschließend sind hier die drei ausgewählten Rezepturen (Mix_1, Mix_4 und Mix_6) mit Kir_Cem aus der UHPC-Entwicklung aufgeführt. In Bezug auf die Referenzmischungen ist bei allen drei ausgewählten Mischungen ein positiver Effekt hinsichtlich der Minimierung des Schwindens zu sehen.

Mix_1 (Abb. 55) mit $D_{MAX} = 16$ mm, einem geringen Zementvolumen von 550 kg/m³ und einem latent hydraulischen Zusatzstoff zeigt ein geringes autogenes Schwinden wegen der schwachen chemischen Reaktion. Dies ergibt eine Schwinddehnung von 0.17 ‰, ausgehend von den horizontalen Messungen. Das entspricht 170 µm/m nach 24 Stunden. Es kommt zu keinem starken Zuwachs über die Zeit, bis zu einer Schwinddehnung von 0.21

‰ (210 $\mu\text{m/m}$) nach 21 Tagen. Die erhöhten Schwindwerte der vertikalen Messung wurden bereits in der Korrelationsanalyse diskutiert und deswegen nicht bei der Analyse verwendet. Die Mischung hatte bei den Frisch- und Festbetoneigenschaften eine gute Fließfähigkeit, durch den Effekt von BetoflowD gezeigt. Die Festigkeit nach 28 Tagen ist nicht so hoch wie bei Ref_2, vermutlich wegen der fehlenden Mikrosilika und dem nur latent hydraulischen reaktiven Zusatzstoff.

Mix_4 (Abb. 57) $D_{\text{MAX}}=16$ mm hat einen höheren Zement-Gehalt im Vergleich zu Mix_1 und Ref_2, mit 600 kg/m^3 . Nach 24 Stunden sind 0,22 ‰ erreicht, nach 21 Tagen 0,3 ‰ (300 $\mu\text{m/m}$). Dabei ist nach der Tendenz der schwachen Steigung zum Ende der Aufzeichnung hin kein höherer Zuwachs zu erwarten. Im Vergleich zu Ref_2 liegt eine höhere Schwinddehnung vor. Das liegt am hohen Zementgehalt und Leimvolumen, welche für die Verarbeitbarkeit und die Festigkeit notwendig sind.

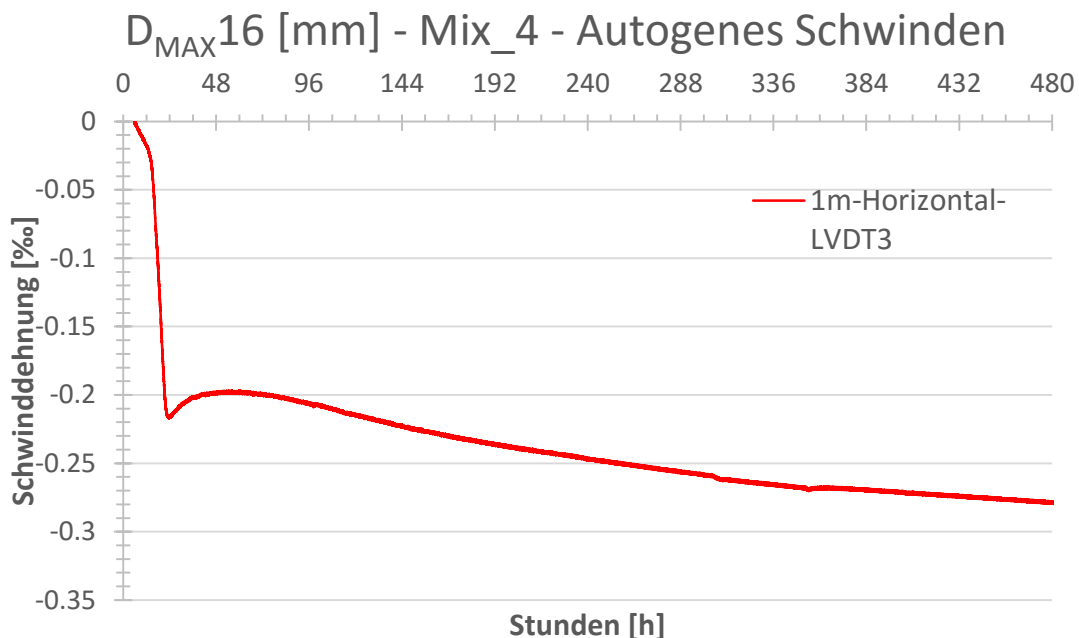


Abbildung 57: Mix_4 D_{MAX} 16 [mm] mit 600 [kg] Zement

Mix_6 (Abb. 58) mit $D_{\text{MAX}}=11$ mm und einem Zementgehalt von 600 kg/m^3 verhält sich etwas günstiger als Mix_4. Nach 24 Stunden hat sie eine Schwinddehnung von 0,15 ‰ (150 $\mu\text{m/m}$) und ein Schwindmaß von 250 $\mu\text{m/m}$ (0,25 ‰) nach 21 Tagen. Das könnte an der höheren Reibung beim Mischen und der daraus resultierenden Wärmeentwicklung von Mix_4 liegen. Das führt zu einem höheren Schwinden bei Beginn der Messung. Der in der Literatur diskutierte Einfluss der Korngrößen wird hier ebenso vermutet. Mix_6 hat wie Mix_4 die gleiche Leimzusammensetzung. Jedoch ist der Einfluss der Kornzusammensetzung von Mix_6 in der etwas besseren Verarbeitbarkeit, höheren Festigkeit und dem geringeren Schwindmaß tendenziell zu erkennen.

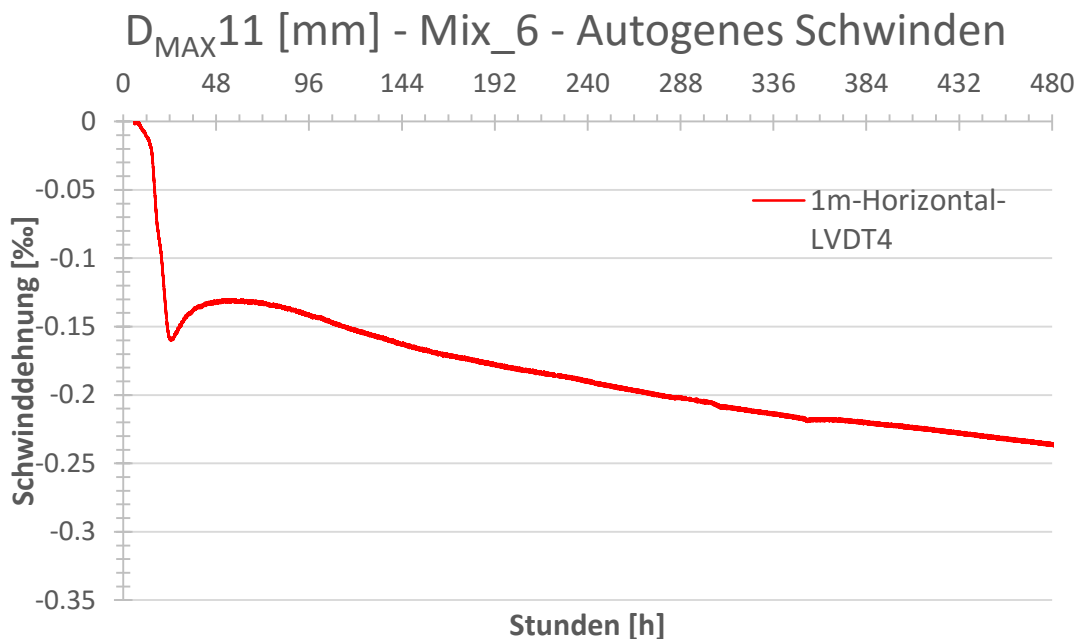


Abbildung 58: Mix_6 $D_{MAX} 11$ [mm] mit 600 [kg] Zement

6.3 Zusammenfassung und Diskussion

Die zwei Versuchsaufbauten zeigen ähnliche Schwindverläufe. Das Verhalten nach den ersten Tagen ist ähnlich. Es wird gezeigt, dass die lineare Messung mit gleichen Anfangsbedingungen nicht von der Richtung der Schwindmessung abhängt.

Der horizontale Messaufbau entspricht dem gängigen Modell der autogenen Schwindmessung. Der Reibungsfehler kann mit einer Folie vermieden werden. Das System ist durch das Abdecken mit einer Folie vor Feuchtigkeitsverlust geschützt und entspricht somit einer autogenen Schwindmessung.

Mit dem vertikalen Versuchsaufbau können, wie bei den horizontalen Messungen, annähernd gleiche Ergebnisse erzielt werden. Der Feuchtigkeitsverlust kann mit sorgfältigen Vorarbeiten weitestgehend minimiert werden. Der vertikale Versuchsaufbau stellt einen guten Vergleichsaufbau dar.

Für die abschließende Analyse des Schwindverlaufs und der Schwindmaße sind in der Tabelle 18, die wesentlichen Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 18: Ergebnisse der Schwindversuche

	$V_{\text{Paste}}/$ V_{Agg}	Z [KG/M³]	Kislag [WT.%]	SF [WT.%]	Füller [WT.%]	ϵ_{CS} [‰] nach 24 Stunden	ϵ_{CS} [‰] nach 21 Tagen
REF_1	0,92	640		12	30	0,42	0,50
REF_2	0,82	550		12	40	0,13	0,21
MIX_1	0,84	550	40		20	0,16	0,2
MIX_4	0,94	600	30	12		0,21	0,28
MIX_6	0,94	600	30	12		0,15	0,24

Der Verlauf der Schwindkurven (Abb. 59) zeigt die wesentlichen Prozesse des autogenen Schwindens. Die starke Steigung der Dehnung in den ersten 24 Stunden wird mit dem Hydratationsprozess und dem Einbinden der Ausgangsstoffe in die Matrix erklärt. Der Entwicklungsprozess des Schwindens nach 24 Stunden hängt mit der Wärmeentwicklung des UHPC zusammen und zeigt als Resultat eine Dehnungsspitze in der Schwindkurve mit der folgenden Expansion.

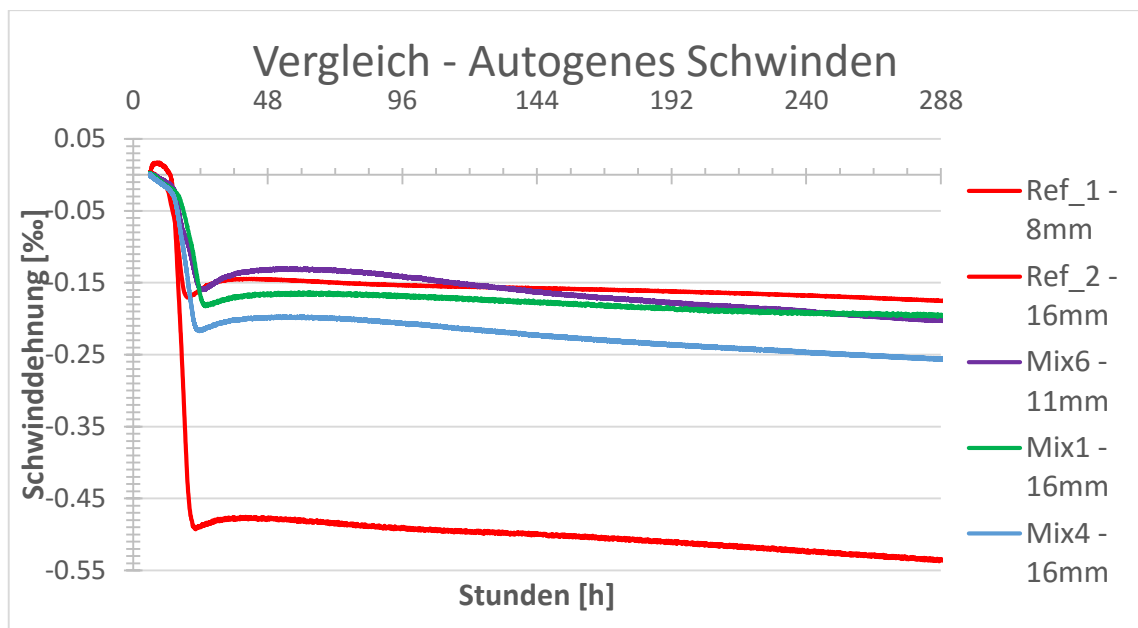


Abbildung 59: Vergleich der entwickelten Rezepturen zu den Referenzmischungen

Der Ansatz dieser Arbeit hat seine Brauchbarkeit klar aufgezeigt. Umso geringer der Zementgehalt, desto geringer das Schwinden (Vergleich Ref_1 und Ref_2). Im Vergleich zu den Referenzmischungen aus den deutschen Forschungsvorhaben (siehe Kapitel 1.1) ist eine positive Tendenz zu sehen.

Die Ausgangsstoffe verursachen die vermuteten Wirkungen. Neben dem starken Einfluss von Zementgehalt zeigen die reaktiven Zusatzstoffe ihre typische schwindsteigernde Wirkung. Mix_1 mit einem latent hydraulischen Zusatzstoff weist geringeres Schwinden auf als das stark reaktive Mikrosilika (Vergleich Mix_1 zu Mix_4). Durch den Ersatz der reaktiven Stoffe, durch inerte Füller, konnte das Schwinden vermindert werden.

Die Korngröße zeigt ebenfalls einen Einfluss. Bei Mix_6, mit einem kleineren Größtkorn von 11 mm, verhält sich das Schwinden gutmütiger als bei Mix_4, mit einem Größtkorn von 16 mm.

Zusammenfassend konnte durch die optimierte Packungsdichte an Leimvolumen gespart, aber die gewünschten Festigkeiten und die Verarbeitbarkeit erzielt und gleichzeitig das Schwindmaß verringert werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

In dieser Masterarbeit sind verschiedenen UHPC Rezepturen entwickelt worden, wobei der Schwerpunkt auf der Reduzierung des autogenen Schwindens lag. Der Hochleistungsbaustoff verspricht, eine tragende Rolle für zukünftige Bauprojekte zu bekommen. Für die Anforderungen an das Verbundstützenprojekt liegen aussagekräftige und vielversprechende Ergebnisse vor.

Es wurde eine systematische Herangehensweise der UHPC-Entwicklung verfolgt. Die Eigenschaften der neu entwickelten Rezepturen wurden umfassend charakterisiert. Der Ansatz mit einem geringen Zementgehalt, der optimalen Zusammensetzung der Leime und einer hohen Packungsdichte der Gesteinskörnungen, ermöglicht eine zielgerechte und zufriedenstellende UHPC-Entwicklung. Damit konnte der schwierigen Problematik des autogenen Schwindens entgegenwirkt werden und gleichzeitig konnten alle Anforderungen an das Baustoffverhalten in frischem wie im festen Zustand sichergestellt werden.

Neben den positiven sind die negativen Aspekte zu ergänzen. Durch das Heranziehen der Referenzmischungen ist deutlich zu sehen, wie sich die unterschiedliche Qualität der einzelnen Materialien auswirkt. Bei den vorgegebenen Materialien sind einige Indizien, auf eine nicht ausreichende Qualität aufgetaucht. Der verwendete Zement (Kir_Cem) hat nicht die Qualität wie der der Referenzmischung (Laf_Cem). Durch die Verwendung des Mikrosilika in flüssiger Form (SF_susp) ist der UHPC weniger fließfähig im Vergleich zum festen Produkt (SF_pow). Ebenfalls hat die Suspension (SF_susp_neu) klare Verarbeitungs- und Festigkeitsvorteile aufgezeigt. Mit Hinblick auf die Gesundheitsgefährdung durch pulverförmiges Mikrosilika ist der Gebrauch einer Suspension zu empfehlen.

Bei der Zusammensetzung der Leime ist ein Gehalt an reaktiven Stoffen für eine ausreichende Festigkeitsentwicklung unabdingbar. Das verwendete Kalksteinmehl (BetowflowD) erfüllt den Zweck für eine höhere Fließfähigkeit. In Kombination mit Hüttensand ist die gewünschte Endfestigkeit des UHPC nicht erreicht worden.

Der Fließmittelgehalt wurde für geringe Mischungsvolumen optimal eingestellt, wobei für größere Mischungsvolumen ein überproportional starker Effekt des Fließmittels festgestellt wurde. Erst bei längerer Mischungsdauer von über 60 Minuten hat sich der gewünschte Effekt des Fließmittelgehalts wieder eingestellt. Deswegen wird für große Mischungsvolumen eine schrittweise Herabsetzung des Fließmittelgehalts vorgeschlagen.

Die Analyse der für das Projekt vorgeschriebenen Materialien (Kir_Cem und SF_susp) lässt den Schluss zu, dass diese in ihrer Qualität verbessert werden sollten. Die Materialien der Referenzmischungen demonstrieren diesen Umstand.

Die angepassten Messmethoden für die autogene Schwindmessung funktionieren für grobkörnige Mischungen. Die aufgetretenen Messwertabweichungen von Mix_1 konnten ausreichend analysiert werden. Die horizontal und vertikal ausgerichteten linearen Messsysteme können für weitere Untersuchungen herangezogen werden. Das Schwindverhalten wird durch die Messergebnisse gut wiedergespiegelt. Es entspricht dem allgemeinen Verständnis über die Mechanismen des autogenen Schwindens. Das Ziel des geringen Schwindens ist durch die schrittweise Rezepturentwicklung erreicht worden.

Die Analyse konnte den Einfluss der einzelnen Ausgangsstoffe auf das autogene Schwinden erklären. Es wurde ein wissenschaftlicher Ansatz für das Verbundstützenprojekt gefunden, mit dem Kompromiss zwischen einem schwindarmen UHPC, guter Verarbeitbarkeit und hoher Festigkeit.

Zusammenfassend hat die Masterarbeit einige Fragen zur Herstellung eines schwindarmen UHPC beantworten können. Die Zielsetzung an das Verbundstützenprojekt wurde erreicht. Die ausgewählten Mischungen haben die Anforderungen an Frisch- und Festbetoneigenschaften erfüllt. Dennoch sollten in zukünftigen Untersuchungen die Mischungen (Ref_2, Mix_4 und Mix_6) weiterentwickelt werden.

7.2 Ausblick

In dieser Studie konnten systematische moderne Ansätze der UHPC-Entwicklung angewendet werden. Weitere Untersuchungen sind wünschenswert, um die stetige Entwicklung des Hochleistungsproduktes UHPC zu verbessern. Alleine das wissenschaftliche Feld des autogenen Schwindens kann weiter in seine kleinsten Bereiche zerlegt werden, um die Mechanismen noch besser zu verstehen. Der bisherige Stand des Wissens liefert bereits vielversprechende Aspekte für die fachgerechte Anwendung von UHPC. Damit der Baustoff auch in zahlreicheren weiteren Anwendungen zum Tragen kommt, ist eine Regelung der europäischen Norm für die Baupraxis notwendig. Einheitliche Messverfahren zur detaillierten Bestimmung der Mechanismen sind anzustreben. Die amerikanische Norm könnte dafür eine gute Hilfestellung leisten, um erzielte Forschungsergebnisse mit internationalen Studien vergleichen zu können.

Des Weiteren sind die ausgewählten Mischungen weiter zu entwickeln, um auch PP-Fasern für einen hohen Feuerwiderstand, oder Stahlfasern für ein duktilen Verhalten des UHPC verwenden zu können. Um den Anforderungen an Verarbeitbarkeit, Festigkeit und geringes autogenes Schwinden zu genügen, ist eine angepasste Leimzusammensetzung notwendig.

Abschließend sind für die fortlaufende Entwicklung der UHPC-Rezepturen Versuche an einer Verbundstütze notwendig, um die erzielten Ergebnisse zu überprüfen. Dafür ist eine mikroskopische Untersuchung der Kontaktstelle zwischen Normalbeton und UHPC angedacht. Ein Push Out Versuch könnte die Ergebnisse vervollständigen.

8 Literaturverzeichnis

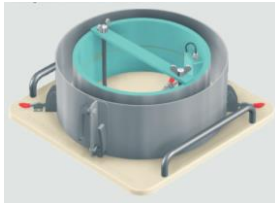
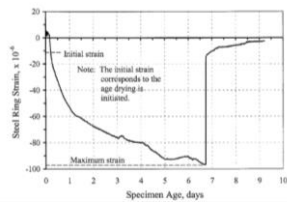

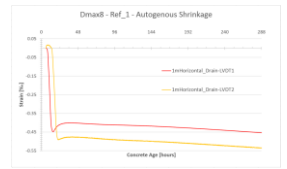

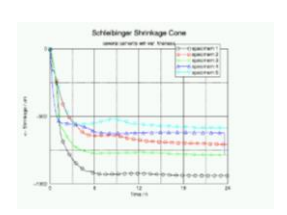
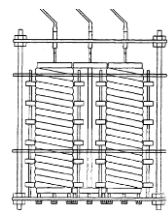
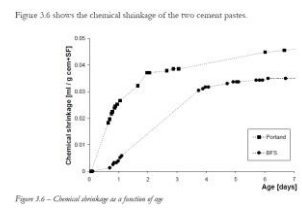
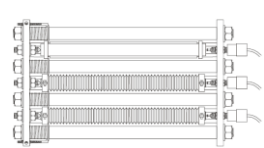
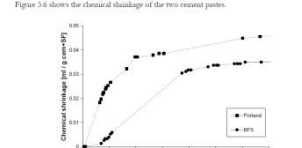
- [1] HOANG, Kim Huy: *A systematic mix design approach for ultra high performance fibre reinforced concrete*. Graz, Technische Universität Graz, Institut für Betonbau. Dissertation. 2017
- [2] KÖNIG, Gert ; TUE, Nguyen Viet ; ZINK, Martin: *Hochleistungsbeton: Bemessung, Herstellung und Anwendung*. Berlin : John Wiley & Sons, 2001
- [3] FEHLING, Ekkehard ; SCHMIDT, Michael ; WALRAVEN, Joost ; LEUTBECHER, Torsten ; FRÖHLICH, Susanne: *Beton-Kalender 2013: Ultra-High Performance Concrete UHPC*. 102. Jahrgang. Berlin : Ernst & Sohn, 2013
- [4] FEHLING, Ekkehard (Hrsg.); SCHMIDT, Michael: *Ultra high performance concrete (UHPC)*. Kassel : Kassel University Press, 2007 (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau H. 7)
- [5] FEHLING, Ekkehard (Hrsg.); SCHMIDT, M. (Hrsg.); STÜRWALD, S.: *Ultra high performance concrete (UHPC)*. Kassel : Kassel University Press, 2008 (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Heft 10)
- [6] SCHMIDT, Michael: *Nachhaltiges Bauen mit ultra-hochfestem Beton : Ergebnisse des Schwerpunktprogrammes 1182 = Sustainable building with ultra-high performance concrete*. Kassel : Kassel Univ. Press, 2014 (Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau 22)
- [7] EPPERS, Sören: *Assessing the autogenous shrinkage cracking propensity of concrete by means of the restrained ring test*. Dresden, Technische Universität Dresden. Dissertation. 2010
- [8] HADL, Philipp ; VOJVODIC, G. ; KIM, H. ; TUE, Nguyen Viet: *Substitution of steel components by UHPC*. In: *Insights and innovations in structural engineering, mechanics and computation* (2016), S. 1386-1391
- [9] TAZAWA, Ei-ichi: *Autogenous shrinkage of concrete*. London und New York : Taylor & Francis, 1999
- [10] LURA, Pietro: *Autogenous deformation and internal curing of concrete*. Delft, Technische Universiteit Delft. Dissertation. 2003
- [11] POWERS, T. C. ; BROWNYARD, T. L.: *Studies of the physical properties of hardened portland cement*. In: *Journal of The American Concrete Institute* 43 (1947), S. 249–336
- [12] SCHÄFFEL, Patrick: *Zum Einfluss schwindreduzierender Zusatzmittel und Wirkstoffe auf das autogene Schwinden und weitere Eigenschaften von Zementstein*. Weimar, F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde Weimar. Dissertation. 2009
- [13] JENSEN, Ole Mejlhede ; HANSEN, Per Freiesleben: *Autogenous deformation and RH-change in perspective*. In: *Cement and Concrete Research* 31 (2001), S. 1859–1865
- [14] MA, Jianxin: *Faserfreier ultrahochfester Beton - Entwicklung und Materialeigenschaften*. Leipzig, Universität Leipzig, Fakultät der Wirtschaftswissenschaften. Dissertation. 2010

- [15] JENSEN, Ole Mejlhede ; HANSEN, Per Freiesleben: *Autogenous Deformation and Change of the Relative Humidity in Silica Fume-modified Cement Past*. In: *Materials Journal* 93 (1996), Nr. 6, S. 539–543
- [16] TAZAWA, Ei-ichi ; MIYAZAWA, Shingo: *Experimental study on mechanism of autogenous shrinkage of concrete*. In: *Cement and Concrete Research* 25 (1995), S. 1633–1638
- [17] LURA, Pietro ; JENSEN, Ole Mejlhede ; VAN BREUGEL, Klaas: *Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: An evaluation of basic mechanisms*. In: *Cement and Concrete Research* 33 (2003), S. 223–232
- [18] TAZAWA, Ei-ichi ; MIYAZAWA, Shingo: *Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste*. In: *Cement and Concrete Research* 25 (1995), S. 281–287
- [19] ZHANG, M. H. ; TAM, C. T. ; LEOW, M. P.: *Effect of water to cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete*. In: *Cement and Concrete Research* 33 (2003), S. 1687–1694
- [20] LEE, K. M. ; LEE, H. K.: *Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag*. In: *Cement and Concrete Research* 36 (2006), S. 1279–1285
- [21] HASHOLT, Marianne Tange ; JENSEN, Ole Mejlhede: *Can superabsorbent polymers mitigate autogenous shrinkage of internally cured concrete without compromising the strength?* In: *Construction and Building Materials* 31 (2012), S. 226–230
- [22] ASSMANN, Alexander: *Physical properties of concrete modified with superabsorbent polymers*. Stuttgart, Universitätsbibliothek der Universität Stuttgart. Dissertation. 2013
- [23] LURA, Pietro ; WYRZYKOWSKI, Mateusz: *Internal curing with lightweight aggregate produced from biomass-derived waste*. In: *Cement and Concrete Research* 59 (2014), S. 24–33
- [24] LIU, Kaizhi: *Effects of combined expansive agents and supplementary cementitious materials on the mechanical properties, shrinkage and chloride penetration of SCC*. In: *Construction and Building Materials* 211 (2019), S. 120–129
- [25] KANAVARIS, Fragkoulis ; AZENHA, Miguel ; SOUTSOS, Marios ; KOVLER, Konstantin: *Assessment of behaviour and cracking susceptibility of cementitious systems under restrained conditions through ring tests: A critical review*. In: *Cement and Concrete Composites* 95 (2019), S. 137–153
- [26] WYRZYKOWSKI, Mateusz ; HU, Zhangli ; GHOURCHIAN, Sadegh ; SCRIVENER, Karen ; LURA, Pietro: *Corrugated tube protocol for autogenous shrinkage measurements: review and statistical assessment*. In: *Materials and Structures* 50 (2017), Nr. 1, S. 1633
- [27] KLAUSEN, Dietmar ; HOSCHIED, Rudolf ; LIEBLANG, Peter: *Technologie der Baustoffe : Handbuch für Studium und Praxis*. 15., neu bearbeitete und erweiterte Aufl. Berlin : VDE Verlag, op. 2013
- [28] HOANG, Kim Huy (Hrsg.); HADL, Philipp (Hrsg.); TUE, Nguyen Viet: *A New Mix Design Method for UHPC based on Stepwise Optimization of Particle Packing Density*. Kassel, 2016

- [29] LARRARD, François de: *Concrete mixture proportioning : A scientific approach*. London : E % FN Spon, 1999 (Modern concrete technology 9)
- [30] MARQUARDT I: *Determination of the composition of self-compacting concretes on the basis of the water requirements of the constituent materials - Presentation of a new mix concept*. In: *Betonwerk + Fertigteiltechnik - BFT* 11 (2002), S. 22–30
- [31] ÖNORM EN 12350-8. 2017. *Prüfung von Frischbeton Teil 8: Selbstverdichtender Beton — Setzfließversuch* : Österreichisches Normungsinstitut. Wien
- [32] ÖNORM EN 12350-9. 2010. *Prüfung von Frischbeton Teil 9: Selbstverdichtender Beton — Auslauftrichterversuch* : Österreichisches Normungsinstitut. Wien
- [33] ÖNORM EN 12390-3. 2018. *Prüfung von Festbeton Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern* : Österreichisches Normungsinstitut. Wien
- [34] ÖNORM EN 12390-13. 2018. *Prüfung von Festbeton Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul)* : Österreichisches Normungsinstitut. Wien
- [35] ÖNORM EN 12390-1. 2018. *Prüfung von Festbeton Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen* : Österreichisches Normungsinstitut. Wien
- [36] ÖNORM EN 12390-2. 2018. *Prüfung von Festbeton Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen* : Österreichisches Normungsinstitut. Wien
- [37] HUANG, Hao ; YE GUANG: *Examining the "time-zero" of autogenous shrinkage in high/ultra-high performance cement pastes*. In: *Cement and Concrete Research* 97 (2017), S. 107–114
- [38] LURA, Pietro ; JENSEN, O. M.: *Early-age acoustic emission measurements in hydrating cement paste*. In: *Cement and Concrete Research* 39 (2009), S. 861–867
- [39] WYRZYKOWSKI, Mateusz ; LURA, Pietro: *Effect of relative humidity decrease due to self-desiccation on the hydration kinetics of cement*. In: *Cement and Concrete Research* 85 (2016), S. 75–81
- [40] YOO, Sung Won ; KWON, Seung-Jun ; JUNG, Sang Hwa: *Analysis technique for autogenous shrinkage in high performance concrete with mineral and chemical admixtures*. In: *Construction and Building Materials* 34 (2012), S. 1–10
- [41] SHEN, Dejian ; JIANG, Jinliang ; SHEN, Jiabin ; YAO, Panpan ; JIANG, Guoqing: *Influence of curing temperature on autogenous shrinkage and cracking resistance of high-performance concrete at an early age*. In: *Construction and Building Materials* 103 (2016), S. 67–76
- [42] WU, Linmei ; FARZADNIA, Nima: *Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review*. In: *Construction and Building Materials* 149 (2017), S. 62–75
- [43] TEUBERT, Oliver ; GREIM, Markus: *Schleibinger Testing Systems*. URL <http://www.schleibinger.com/cmsimple/?Schwinden> – Überprüfungsdatum 2019-09-03
- [44] ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL: *Documents scientifiques et techniques: Bétons fibrés à ultra-hautes performances - Recommandations*. Paris, Edition révisé, 2013

Anhang A

Tabelle 19 Anhang A: Methoden zur Schwindmessung

Messmethode	Abbildung Versuchsaufbau	Messergebnisse	Vor- und Nachteile
Schwindring ¹			<ul style="list-style-type: none"> ✓ hohe Genauigkeit ✓ gut für Rissbildung - umständlich für autogene Schwindmessung - Aufwendige Messung welche Spannungen und nicht Schwindmaße angibt
Schwindrinne ¹			<ul style="list-style-type: none"> ✓ gängige Messmethode für UHPC und autogenes Schwinden - nur lineare Messung
Schwindkegel ¹			<ul style="list-style-type: none"> ✓ hohe Genauigkeit ✓ autogene Schwindmessung (Mörtel) - sehr aufwendig - keine großen Körnungen möglich
Gewellte vertikale Plastikrohre ²			<ul style="list-style-type: none"> ✓ hohe Genauigkeit ✓ autogene Schwindmessung (Mörtel) - Nur für feine Mischungen wie Zement und Mörtel
Gewellte Horizontale Plastikrohre ²			<ul style="list-style-type: none"> ✓ hohe Genauigkeit ✓ autogene Schwindmessung (Mörtel) - Nur für feine Mischungen wie Zement und Mörtel

¹ Abbildungen entnommen aus [43].

² Abbildungen entnommen aus [15].

Anhang B

Druckfestigkeitsprüfungen und E-Modulprüfungen der Mischungen. Unter Druckbeanspruchung nach [44] mit 6 Tage in Wasser- und 21 Tage Luftlagerung, hergestellt mit dem Erich Intensiv Mischer.

Tabelle 20 Anhang B Festbetoneigenschaften

Mix	Herstellungsdatum	Alter [d]	Geometrie	n	$f_{cm} = x_m$ [MPa]	s_n	f_{ck}	E-Modul [MPa]
Ref_1		28	Würfel		191,2			
Ref_1			Zylinder		185,6			57000,00
Ref_2	20_02_2019	28	Würfel	3	169,6	4,2	157,3	
Ref_2	22_02_2019	28	Würfel	3	174,9	5,4	159,1	
Ref_2	18_04_2019	60	Würfel	4	188,5	7,8	172,8	
Ref_2	18_04_2019	90	Würfel	4	196,7	5,8	185,0	
Ref_2	20_02_2019	28	Zylinder		150,5			50533,32
Mix_1	20_02_2019	28	Würfel	3	156,2	2,2	149,8	
Mix_1	22_02_2019	28	Würfel	3	155,3	2,7	147,4	
Mix_1	18_04_2019	60	Würfel	4	169,4	3,3	162,8	
Mix_1	18_04_2019	90	Würfel	4	175,9	4,4	167,1	
Mix_1	20_02_2019	28	Zylinder		138,4			50181,44
Mix_1	22_02_2019	28	Zylinder					49941,51
Mix_6	28_03_2019	28	Würfel	4	177,7	1,1	175,1	
Mix_6	28_03_2019	60	Würfel	4	188,0	5,3	175,5	
Mix_6	28_03_2019	90	Würfel	4	187,6	2,0	182,9	
Mix_4	28_03_2019	28	Würfel	4	173,6	2,9	166,8	
Mix_4	28_03_2019	60	Würfel	4	181,2	4,0	171,8	
Mix_4	28_03_2019	90	Würfel	4	185,0	1,2	182,2	

$$f_{ck} = x_m - \lambda * s_n \quad (7)$$

Mit:

f_{ck} = Nennwert der Betonfestigkeit

x_m = Mittelwert einer Stichprobe mit n Werte

s_n = Standardabweichung einer Stichprobe mit n Proben

λ = Beiwerte nach [44], für n= 6 λ = 2,015; n=4 λ = 2,353; n=3 λ = 2,920

Unter Druckbeanspruchung mit 6 Tage in Wasser- und 21 Tage Luftlagerung, hergestellt mit dem Elba Mischer mit 60 Liter Fassungsvermögen.

Tabelle 21 Anhang B: Festbetoneigenschaften

Mix	Herstellungs- datum	Alter [d]	Geometrie	n	$f_{cm} = X_m$ [MPa]	S_n	f_{ck}	E-Modul [MPa]
Mix_6 SF_Neu	29_05_2019	28	Würfel	4	183,3	4,2	173,4	
Mix_6 SF_Neu	29_05_2019	60	Würfel	4	188,5	2,3	183,1	
Mix_6 SF_Neu	29_05_2019	90	Würfel	4	k. A.			
Mix_4- 40Liter	06_05_2019	28	Würfel	4	180,7	4,2	170,8	
Mix_4- 40Liter	06_05_2019	60	Würfel	4	191,2	1,6	187,4	
Mix_4- 40Liter	06_05_2019	90	Würfel	4	194,2	4,6	183,4	
Mix_4- 40Liter	06_05_2019	72	Zylinder	2	177,0	1,21		52089,7
Mix_6 – 40Liter	08_05_2019	28	Würfel	4	176,1	4,4	165,8	
Mix_6 – 40Liter	08_05_2019	60	Würfel	4	189,1	5,3	176,6	
Mix_6 – 40Liter	08_05_2019	90	Würfel	4	189,5	4,5	178,9	
Mix_6 – 40Liter	08_05_2019	72	Zylinder	1	170,5			51221,18
Mix_4 - 40Liter	08_05_2019	28	Würfel	4	182,0	4,0	172,6	
Mix_4 - 40Liter	08_05_2019	60	Würfel	4	193,4	6,6	177,9	
Mix_4 - 40Liter	08_05_2019	90	Würfel	4	197,6	4,8	186,3	
Mix_4 - 40Liter	08_05_2019	72	Zylinder	1	171,3			52532,25

Druckfestigkeitsprüfung und E-Modulprüfung der ausgewählten Mischungen unter Wärmebehandlung (48h-80°C)

Tabelle 22 Anhang B: Festbetoneigenschaften unter Wärmebehandlung

Mix	Herstellungs- datum	Alter [d]	Geometrie	n	f _{cm} [MPa]	s _n	E-Modul [MPa]
Mix_1	05_02_2019	4	Würfel	6	162,7	4,0	
Mix_2	11_02_2019	7	Würfel	6	177,8	3,3	
Mix_3	11_02_2019	7	Würfel	6	178,9	1,6	
Mix_4	18_02_2019	7	Würfel	6	172,7	3,9	
Mix_5	18_02_2019	7	Würfel	6	174,4	3,1	
Mix_6	09_04_2019	7	Würfel	6	182,1	3,0	
Mix_7	09_04_2019	7	Würfel	6	174,6	1,9	
Mix_8	21_03_2019	7	Würfel	6	169,6	2,6	
Mix_9	21_03_2019	7	Würfel	6	171,2	3,6	
Ref_2	10_02_2019	4	Würfel	4	190,4	3,4	
Ref_2	31_05_2019	4	Zylinder	1	190,5		52916,89
Mix_4-40Liter	06_05_2019	7	Würfel	4	184,8	4,6	
Mix_4-40Liter	06_05_2019	7	Zylinder	1			51105,41