



Andreas Innerhofer, BSc

# **Entwicklung eines Premix zur Herstellung von Ultra-Hochleistungsbeton**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

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

Dipl.-Ing. BSc Baumeister Philipp Hadl

Institut für Betonbau

Graz, Januar 2015

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

### ***AFFIDAVIT***

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 indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.*

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature

# Danksagung

Zunächst möchte ich mich an dieser Stelle bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt haben.

Auf universitärer Seite möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Nguyen Viet Tue danken, welcher es mir ermöglicht hat, diese Arbeit am Institut für Betonbau der TU Graz zu verwirklichen. Besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Dipl.-Ing. BSc Baumeister Philipp Hadl, der mir in zahlreichen Diskussionen mit wertvollen Anregungen hilfreich zur Seite stand.

Daneben gilt mein Dank allen Freunden und Studienkollegen, welche mich während meiner gesamten Studienzzeit begleitet und unterstützt haben.

Nicht zuletzt gebührt der größte Dank meiner Familie, allen voran meinen Eltern, welche mir das Studium finanziell ermöglicht haben und deren Unterstützung ich mir weiterhin sicher sein kann.

# Kurzfassung

Für die Herstellung von Ultra-Hochleistungsbeton (UHPC) kommen in der Regel neben Zement, Wasser, Fließmittel und Gesteinskörnung verschiedene Feinstoffe, wie Mikrosilika und Quarzmehl zur Anwendung. Diese Materialien müssen trocken gelagert werden und dafür kommen nur Silos in Frage. Das erschwert die industrielle Herstellung von UHPC in den bestehenden Mischanlagen, insbesondere da die Anzahl der Silos und der zugehörigen Dosiereinrichtungen begrenzt ist. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Premix, welcher die Herstellung von UHPC deutlich erleichtern soll.

Zu Beginn der Arbeit wurden in Absprache mit einem Industriepartner geeignete Ausgangsstoffe ausgewählt. Anschließend wurde aufbauend auf einer theoretischen Sieblinie eine erste Nullbetonrezeptur entwickelt. Diese wurde anhand von experimentellen Kleinversuchen verifiziert und verbessert. Aus den Ergebnissen der Versuche wurden zwei verschiedene Premixzusammenstellungen konzipiert. Eine im Anschluss durchgeführte Parameterstudie mit verschiedenen Zementarten verdeutlicht das große Potential des erarbeiteten Premix. In einem weiteren Schritt wurden die Eigenschaften und die Anwendbarkeit des entwickelten Produktes untersucht und der Einfluss von Stahlfasern und Basaltsplitt auf die Betoneigenschaften bestimmt.

Das Ergebnis dieser Arbeit ist ein Premix, bestehend aus Mikrosilika und Quarzmehl, welcher in der vorgeschlagenen Zusammensetzung mit ausgewählten Zementen die Herstellung von UHPC mit Druckfestigkeiten über  $180 \text{ N/mm}^2$  und selbstverdichtenden Eigenschaften erlaubt.

# Abstract

For the production of Ultra High Performance Concrete (UHPC) one needs in addition to cement, water, superplasticizer and aggregate fine materials like microsilica and quartz powder. These materials have to be stored under dry conditions and therefore only silos are appropriate. This complicates the industrial production of UHPC in the existing concrete mixing plants, particularly because of the limitation of the quantity of silos and of appropriate metering units. This master's thesis describes the development of a premix which aims to facilitate the production of UHPC.

Initially, different basic materials were chosen after a discussion with an industrial partner. It was then developed a basic mixture based on a theoretical particle size distribution. This mixture was improved by experimental small-scale tests. From the results of these experiments two different premix compositions have been developed. Within the scope of a parameter study with different types of cement it shows the potential of the developed product. In a further step, the characteristics and the applicability of the premix were investigated and the influence of steel fibre and basalt on the fresh and hardened concrete properties was determined.

The result of this master's thesis is a premix, consisting of microsilica and quartz powder which allows the production of a self-compacting UHPC with a compression strength of about  $180 \text{ N/mm}^2$  using selected cements.

# Inhaltsverzeichnis

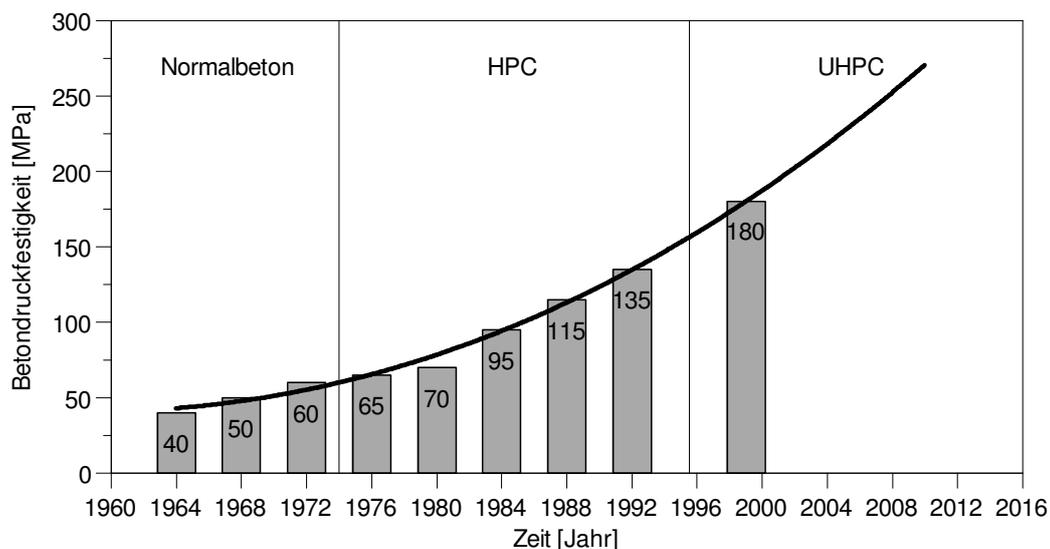
<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
1.1	Einleitung . . . . .	1
1.2	Problemstellung und Zielsetzung . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>4</b>
2.1	Baustoff UHPC . . . . .	4
2.1.1	Grundprinzip . . . . .	5
2.1.2	Mechanische Eigenschaften und Dauerhaftigkeit . . . . .	6
2.1.3	Nachhaltigkeit . . . . .	7
2.2	Packungsdichte . . . . .	7
2.2.1	Experimentelle Optimierung der Packungsdichte . . . . .	8
2.2.2	Theoretische Optimierung der Packungsdichte . . . . .	8
2.3	Typische Mischungen für UHPC . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Ausgangsstoffe</b>	<b>12</b>
3.1	Zement . . . . .	13
3.2	Mikrosilika . . . . .	13
3.3	Quarzmehl . . . . .	14
3.4	Gesteinskörnung . . . . .	15
3.5	Fließmittel . . . . .	15
3.6	Stahlfasern . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Entwicklung des Premix</b>	<b>17</b>
4.1	Sieblinienoptimierung . . . . .	17
4.2	Betonrezepturenentwicklung . . . . .	19
4.2.1	Prüfkörper und Prüfverfahren . . . . .	19
4.2.2	Einfluss des Fließmittels . . . . .	23
4.2.3	Theoretische Optimierung . . . . .	24
4.2.4	Einfluss des Mikrosilikas . . . . .	26
4.2.5	Einfluss des Quarzmehles . . . . .	28
4.2.6	Einfluss der Gesteinskörnung . . . . .	32
4.3	Untersuchungen Leimzusammensetzung . . . . .	34
4.4	Premixzusammenstellung . . . . .	35
<b>5</b>	<b>Eigenschaften und Anwendung des Premix</b>	<b>37</b>
5.1	Eigenschaften des Premix . . . . .	37
5.2	Großversuch Graspointner . . . . .	38
5.2.1	Zeitliche Festigkeitsentwicklung . . . . .	40
5.2.2	Materialcharakterisierung . . . . .	42
5.3	Einfluss verschiedener Materialien . . . . .	44

5.3.1	Einfluss verschiedener Mikrosilika . . . . .	44
5.3.2	Einfluss des Basaltsplitts . . . . .	46
5.3.3	Einfluss der Stahlfasern . . . . .	48
5.3.4	Zugabe von Stahlfasern und Basaltsplitt . . . . .	49
5.4	Zementparameterstudie . . . . .	50
5.5	Kostenschätzung . . . . .	56
5.6	Herstellung von HPC . . . . .	57
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>59</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>61</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>64</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>66</b>
<b>A</b>	<b>Anhang - Datenblätter Zemente</b>	<b>70</b>
<b>B</b>	<b>Anhang - Datenblätter Quarzmehle</b>	<b>77</b>
<b>C</b>	<b>Anhang - Algorithmus zur Sieblinienoptimierung</b>	<b>85</b>
<b>D</b>	<b>Anhang - Übersicht der durchgeführten Versuche</b>	<b>90</b>

# 1 Einleitung und Zielsetzung

## 1.1 Einleitung

Im Bereich der Betontechnologie gab es in den letzten Jahrzehnten enorme Fortschritte. In der Mitte des 20. Jahrhunderts wurde Beton noch als Dreistoffgemisch aus Wasser, Zement und Zuschlag verstanden. Ausgehend von diesem relativ einfachen Baustoff hat sich Beton heutzutage zu einem kompliziertem System aus fünf Komponenten (Zement, Wasser, Zuschlag, Zusatzstoff und Zusatzmittel) entwickelt, wobei das Zusammenspiel der einzelnen Stoffe nicht mehr so einfach zu verstehen ist. Maßgebend für diese Neuerungen in der Betontechnologie war das Streben nach immer höheren Festigkeiten, leichter Verarbeitbarkeit und höherer Dauerhaftigkeit, welches durch die Entdeckung und Entwicklung immer leistungsfähiger Zusatzstoffe bzw. -mittel ermöglicht wurde. Als Beispiel für den Einsatz von Beton mit immer höheren Festigkeiten zeigt Abb. 1.1 die Entwicklung der Druckfestigkeit im Hochhausbau in den letzten Jahrzehnten. Des Weiteren führt im Allgemeinen eine Erhöhung der Druckfestigkeit auch zu einer längeren Nutzungsdauer und geringeren Instandhaltungskosten. Der bislang letzte Fortschritt in der Betontechnologie konnte durch den Einsatz von Mikrosilika und hoch wirksamen Fließmitteln auf Basis von Polycarboxylatether erzielt werden. Durch diese beiden Materialien ist man nun im Stande neben selbstverdichtendem Beton (SCC = Self Compacting Concrete) auch Ultra-Hochleistungsbeton (UHPC = Ultra High Performance Concrete) mit Druckfestigkeiten über 200 N/mm<sup>2</sup> herzustellen. [1, 2, 3, 4, 5]



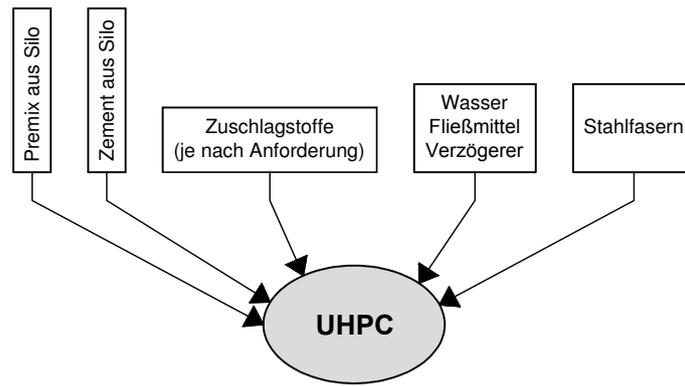
**Abb. 1.1:** Entwicklung der Betondruckfestigkeit im Hochhausbau [4]

## 1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Der Baustoff UHPC stand in den letzten Jahren im Fokus mehrerer Forschungsarbeiten. Die Publikationen legen dabei ihr Hauptaugenmerk auf die Zusammensetzung, die mechanischen Eigenschaften und die Bemessung von UHPC-Bauteilen. Obwohl in diesen Forschungsgebieten große Fortschritte gemacht werden konnten, wurde der innovative Baustoff bisher nur in wenigen Pilotprojekten eingesetzt. Grund dafür ist hauptsächlich die mangelnde Erfahrung bei der Berechnung und Anwendung von UHPC in den planenden sowie ausführenden Unternehmen. Auch auf der Auftraggeberseite besteht zur Zeit nur wenig Interesse diesen Baustoff zu nutzen. Ein weiteres Argument das bislang gegen den Einsatz von UHPC in der Praxis spricht, sind die hohen Kosten in der Herstellung, welche auf die teuren Ausgangsstoffe und auf die fehlenden Strukturen in der Produktion zurückzuführen sind.

Für die hohe Festigkeit, welche mit UHPC erreicht werden kann, müssen Feinstoffe wie Mikrosilika und Quarzmehl verwendet werden. Aufgrund der wasserabsorbierenden Eigenschaften dieser Stoffe müssen sie in Silos trocken gelagert oder händisch beigegeben werden. Angesichts der Tatsache, dass in den Betonwerken die Lagerungsmöglichkeiten in Silos häufig begrenzt sind, werden häufig Fertigmischungen, sogenannte Premixe, verwendet. Zur Zeit befinden sich auf dem Markt verschiedenste solcher Produkte; erwähnenswert sind die Fabrikate der Firma Lafarge (Ductal [6]), der Firma Sika (Ceracem [7]) und der Firma Dyckerhoff (Nanodur Compound 5941 [8]). Viele der aktuell im Handel befindlichen Premixe beinhalten neben den Feinstoffen auch Zement und sogar Zuschlagstoffe. Dies hat zum Nachteil, dass die verwendeten Materialien oft aus dem Ausland importiert werden müssen und somit hohe Transportkosten anfallen. Des Weiteren ist mit solchen Fertigmischungen eine Anpassung an den jeweiligen Anwendungszweck kaum möglich und aus technischer Sicht auch nicht sinnvoll. Auf Grund dessen können die Wirtschaftlichkeit bzw. die Bauwerkseigenschaften unter Anwendung solcher Premixe nicht gezielt gesteuert werden.

Die vorliegende Arbeit setzt sich zum Ziel einen Premix zu entwickeln, welcher die Herstellung von UHPC mit örtlichen Ausgangsstoffen erlaubt. Der Premix selbst soll nur aus Mikrosilika und Quarzmehl zusammengesetzt werden und unter Verwendung von örtlichen Zementen und Zuschlagstoffen die Produktion eines kostengünstigen und anwenderfreundlichen Hochleistungs- bzw. Ultra-Hochleistungsbeton ermöglichen. Die Abbildung 1.2 zeigt eine schematische Darstellung der Überlegungen zur Herstellung von UHPC mit dem zu entwickelnden Premix. Durch den Einsatz regionaler Ausgangsstoffe kann dem Problem der langen Transportkosten und somit im Sinne der Nachhaltigkeit höherem CO<sub>2</sub>-Ausstoß, als auch der geringeren Flexibilität zufolge des hohen Grades an Vormischung entgegengewirkt werden.



**Abb. 1.2:** Ausgangsstoffe zur Herstellung von UHPC mit dem vorgestellten Premix

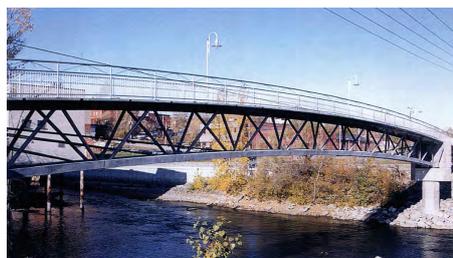
Der erste Teil der Arbeit wird im Rahmen der Literaturrecherche abgehandelt (Kapitel 2). Zu diesem Zweck wird der Werkstoff UHPC, dessen Herstellung und dessen Anwendung in der Praxis näher beschrieben. Des Weiteren wird die Theorie der Packungsdichte und der Sieblinienoptimierung dargelegt. In einem zweiten Schritt werden jene Ausgangsstoffe mit den jeweiligen Eigenschaften und Besonderheiten näher beschrieben, welche zur Produktion von UHPC verwendet werden können (Kapitel 3). Mit Hilfe der Sieblinienoptimierung und der Theorie der Packungsdichte wird in einem weiteren Abschnitt die theoretisch optimale Zusammensetzung der gewählten Ausgangsmaterialien für eine UHPC-Rezeptur ermittelt. Anhand von begleitenden Laborversuchen wird ein Premix entwickelt, mit welchem UHPC mit einer ausreichend hohen Festigkeit und genügender Fließfähigkeit produziert werden kann (Kapitel 4). Im selben Kapitel werden auch die Einflüsse der einzelnen Inhaltsstoffe dargestellt und interpretiert. Im letzten Teil der Arbeit werden die Eigenschaften und die Anwendbarkeit des fertigen Premixes näher beleuchtet. Betrachtet werden dabei neben der zeitlichen Festigkeitsentwicklung und dem Einfluss verschiedener Zementtypen auch der Einsatz des Premix zur Herstellung von Hochleistungsbeton (HPC = High Performance Concrete) und die anfallenden Kosten (Kapitel 5).

## 2 Theoretische Grundlagen und Stand der Technik

### 2.1 Baustoff UHPC

Laut Schmidt [9] und Juhart [10] ist UHPC ein sehr gefügedichter, fein- oder grobkörniger Beton mit einer charakteristischen Druckfestigkeit über der in DIN bzw. ÖNORM EN 206-1 definierten höchsten Druckfestigkeitsklasse für Hochfesten (Normal-) Beton C 100/115. Je nach Kombination der Ausgangsstoffe können Druckfestigkeiten zwischen 150 und 250 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden. Grundsätzlich kann zwischen feinkörnigem UHPC mit einem Größtkorn bis zu 1 mm und grobkörnigem UHPC mit einem Größtkorn zwischen 1 mm und 8 mm unterschieden werden. Durch den Einsatz von UHPC ist es möglich Bauwerke, die bisher überwiegend dem Stahlbau vorbehalten waren, in filigraner und leichter Bauweise mit hohen Tragfähigkeiten zu errichten. [9]

Die ersten Forschungsarbeiten zum Thema UHPC wurden in den 1970er Jahren in den USA durchgeführt. Dabei konnten Zementleime mit Druckfestigkeiten von bis zu 440 N/mm<sup>2</sup> im Labor hergestellt werden. In den folgenden Jahren kam es zu mehreren patentrechtlichen Anmeldungen, darunter jene für das Produkt DENSIT<sup>®</sup> 1986 in Dänemark und eine weitere 1992 durch die Firma Bouygues für das Produkt DUCTAL<sup>®</sup>. Die Anwendung des neuartigen Baustoffes fand erstmals im Zuge des Pilotprojektes zur Errichtung einer Fußgängerbrücke in Sherbrooke, Kanada im Jahre 1997 statt. Daraufhin wurde UHPC bei einigen weiteren Bauwerken eingesetzt, unter anderem bei der Instandsetzung des Kühlturmes im Atomkraftwerk Cattenom in Frankreich, sowie bei der Errichtung mehrerer Fußgängerbrücken, unter anderem in Japan (Sakata-Mirai-Brücke), Südkorea (Seonyu-Brücke) und Deutschland (Gärtnerplatzbrücke in Kassel). In Österreich wurde 2010 die weltweit erste mittelgroße Straßenbrücke aus UHPC gebaut. Es handelt sich dabei um die WILD-Brücke in der Gemeinde Völkermarkt. [3, 11]



a) Sherbrooke-Brücke, Kanada [12]



b) Seonyu-Brücke, Südkorea [13]

**Abb. 2.1:** Fußgängerbrücken ausgeführt in UHPC

Mittlerweile gibt es mehrere nationale Richtlinien zur Bemessung von UHPC, unter anderem in Deutschland [9], Frankreich [14], Japan [15] und Italien [16].

### 2.1.1 Grundprinzip

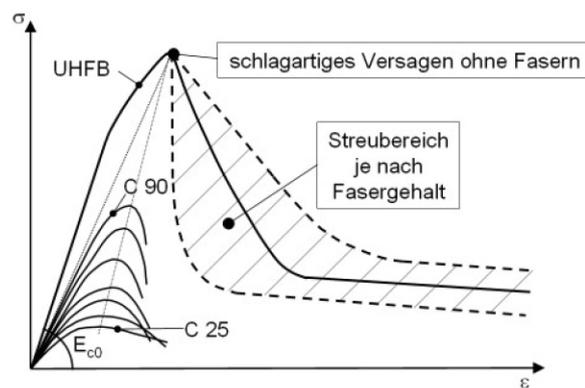
Erhärteter Beton besteht grundsätzlich aus drei Phasen: der zementgebundenen Matrix, der Gesteinskörnung und der Kontaktzone, welche zwischen den beiden anderen Phasen liegt. Die erhärtete Zementmatrix setzt sich aus Hydratationsprodukten, Poren und nicht hydratisierten Kernen der Zementpartikel zusammen. Die Haupthydratationsprodukte sind dabei die Calciumsilicathydrate (CSH; ca. 60 Vol.-%), das Calciumhydroxid ( $\text{CA(OH)}_2$ ; ca. 22 Vol.-%) und die Calciumaluminatsulfathydrate. CSH ist für die Festigkeit des Betons maßgeblich und ist deshalb wünschenswert. Das Calciumhydroxid dagegen hat wegen seiner viel geringeren spezifischen Oberfläche ein deutlich kleineres Vermögen zur Festigkeitsbildung. Es stellt somit eine Schwachstelle im Betongerüst dar, weshalb eine Verringerung des Gehaltes an  $\text{CA(OH)}_2$  angestrebt werden sollte. Auch die Calciumaluminatsulfathydrate, wie zum Beispiel Ettringit und Monosulfat sind Kristalle mit geringer Eigenfestigkeit und somit zur Erhöhung der Matrixfestigkeit nicht geeignet. Die Kontaktzone, welche den Bereich der Matrix in der Nähe der Gesteinspartikel bezeichnet, stellt wegen ihrer hohen Porosität und der Anreicherung an  $\text{CA(OH)}_2$  und Ettringit die schwächste Stelle der Betonstruktur dar. [3]

Die Reduzierung dieser Schwachstellen im Betongefüge stellt das Grundprinzip dar, welches dem Baustoff UHPC zu Grunde liegt. Eine Absenkung des Wasser-Bindemittelwertes (w/b-Wert) unter 0,25 führt zu einer starken Abnahme der Kapillarporen und der mit Hydratphasen zu füllenden Gefügaporen. Zugleich wird die Breite der Kontaktzone verkleinert und somit der Verbund zwischen der zementgebundenen Matrix und der Gesteinskörnung erhöht. Durch die Optimierung der Kornzusammensetzung, vor allem im Bereich des Feinanteils, kann eine möglichst dichte Kornpackung erreicht werden. Somit wird weniger Wasser benötigt, um die Zwischenräume der Feststoffpartikel zu füllen. Das führt bei gleichbleibendem w/b-Wert zu einer Erhöhung der Verarbeitbarkeit. Durch den Einsatz von hochwirksamen Fließmitteln, wie Polycarboxylate und Polycarboxylatether (PCE), können trotz des geringen Wasser-Bindemittelwertes sehr fließfähige und sogar selbstverdichtende Betone hergestellt werden. [2, 3, 9, 11]

Des Weiteren kann eine Umwandlung von Calciumhydroxid in Calciumsilicathydrate, welche eine höhere Festigkeit aufweisen, durch eine Reaktion mit puzzolanischen bzw. latent-hydraulischen Zusatzstoffen erzielt werden. Bei der Herstellung von UHPC hat sich dabei der Einsatz von Mikrosilika bewährt, das neben der puzzolanischen Reaktion noch einen Füller- und Kugellagereffekt aufweist. Auf diese zusätzlichen Eigenschaften von Mikrosilika wird im Kapitel 3.2 noch näher eingegangen. [3]

### 2.1.2 Mechanische Eigenschaften und Dauerhaftigkeit

UHPC hat wie zuvor schon erwähnt eine Druckfestigkeit zwischen 150 und 250 N/mm<sup>2</sup>. Der Elastizitätsmodul liegt für UHPC mit solchen Druckfestigkeiten im Bereich zwischen 43.000 und 55.000 N/mm<sup>2</sup>. Unter Druckbeanspruchung verformt sich UHPC bis zu einem Niveau von 80 bis 90% der Festigkeit linear elastisch und speichert dabei sehr viel Energie, welche bei Erreichen der Höchstlast schlagartig freigesetzt wird. Angesichts der hohen Matrixfestigkeit und des guten Verbunds zwischen der Gesteinskörnung und der zementgebundenen Matrix kommt es bei Versagen zu einer Bruchfläche durch die Zuschlagkörner. Um dem spröden Bruchverhalten, welches sowohl bei Druck- als auch bei Zugbeanspruchung auftritt, entgegenzuwirken, können Fasern - meistens Stahlfasern - hinzugegeben werden. Neben der Erhöhung der Duktilität führt die Zugabe von Stahlfasern zu Biegezugfestigkeiten von bis zu 50 N/mm<sup>2</sup>. Mit Hilfe des Fasergehaltes lässt sich das duktile Nachbruchverhalten steuern (siehe Abbildung 2.2). Neben dem Einsatz von Fasern kann die Duktilität durch eine Umschnürung, wie zum Beispiel bei mit Beton gefüllten Rohren, erhöht werden. [9, 17, 18]



**Abb. 2.2:** Qualitativer Vergleich der Spannungs-Dehnungsbeziehung unter Druck verschiedener Betonfestigkeitsklassen [17]

Die einaxiale Zugfestigkeit der UHPC-Matrix ohne Fasern beträgt zwischen 7 und 11 N/mm<sup>2</sup>. Dabei lassen sich keine größeren Unterschiede zwischen fein- und grobkörnigem UHPC erkennen. Die Rohdichte von UHPC liegt mit Werten zwischen 2,40 bis 2,70 kg/dm<sup>3</sup> im Bereich jener von Normalbeton. Aufgrund der höheren Packungsdichte und somit auch höheren Festigkeit ergibt sich für UHPC im Vergleich zu anderen Baustoffen, wie zum Beispiel Stahl, ein sehr günstiges Verhältnis von Druckfestigkeit zu Gewicht [17, 18]

Mittels einer Wärmebehandlung von UHPC lassen sich die Zementhydratation und die puzzolanische Reaktion stark beschleunigen und verstärken. Durchgeführte Versuche zeigen, dass bei einer Wärmenachbehandlung zwischen 65 und 450 °C schon nach zwei Tagen Druckfestigkeiten von bis zu 250 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden können. [11]

Durch seine äußerst dichte Struktur weist UHPC eine sehr geringe Porosität auf. Dies hat eine Steigerung des Widerstands gegen chemische Angriffe, wie das Eindringen von

Chloriden, Gasen und korrosiven Flüssigkeiten, wie auch gegen physikalische Einwirkungen, wie Abwitterung infolge Frost-Tausalz-Beanspruchung und somit eine Erhöhung der Dauerhaftigkeit des Betons zufolge. [17]

### 2.1.3 Nachhaltigkeit

In den vergangenen Jahren wurde intensiv an der Umweltverträglichkeit und Ökobilanz von UHPC geforscht, unter anderem von Randl et al. [19]. Erwähnenswert ist bei UHPC die Komponente Mikrosilika, welches als Nebenprodukt bei der Siliziumherstellung anfällt und somit keine negativen Einflüsse im Sinne der Umweltbelastung hat. Demgegenüber steht der erhöhte Zementgehalt im Vergleich zu Normalbeton, denn bei der Produktion von einer Tonne Portlandzement werden rund 0,8 Tonnen CO<sub>2</sub> ausgestoßen. Andererseits können durch die hohen Festigkeiten des UHPC kleinere Bauteilabmessungen realisiert und somit in der Summe der CO<sub>2</sub>-Ausstoß gesenkt werden. Der Vergleich dreier Lösungen für die Fußgängerbrücke von Sherbrooke hinsichtlich der Umweltverträglichkeit zeigt, dass durch den Einsatz von UHPC eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um rund ein Drittel ermöglicht wurde. [9]

		Normalbeton	HPC	UHPC
äquivalente Dicke	[mm]	500	400	150
Volumen	[m <sup>3</sup> ]	126	100	33
Zementgehalt	[kg/m <sup>3</sup> ]	330	450	700
Zementverbrauch+ CO <sub>2</sub> -Emission	[t]	44	48	28
Zuschlagverbrauch	[t]	225	170	60

**Tab. 2.1:** Vergleich Umweltverträglichkeit, Brücke von Sherbrooke [9]

## 2.2 Packungsdichte

Die Optimierung der Kornzusammensetzung bzw. die Erhöhung der Packungsdichte ist, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, von fundamentaler Bedeutung bei der Entwicklung einer UHPC-Rezeptur. Unter der Packungsdichte  $D$  eines Korngemisches versteht man den Anteil des Feststoffvolumens am Gesamtvolumen. Den restlichen Anteil am ausgefüllten Volumen bezeichnet man als Hohlraumgehalt  $\varepsilon$ . Das bedeutet, je höher die Packungsdichte, umso geringer ist der Hohlraumgehalt. [20, 21]

$$D = 1 - \varepsilon \quad (2.1)$$

Die Packungsdichte ist eine Funktion der Kornzusammensetzung, -verteilung, -größe, -form und -rauheit. Weitere Einflussgrößen sind zum Beispiel die interpartikulären Kräfte und der Wandeffekt. Die interpartikulären Kräfte können die Wahrscheinlichkeit zur Bildung von Agglomeraten stark erhöhen. Der Wandeffekt bewirkt hingegen, dass im Bereich der Oberfläche grober Partikel die feineren Teilchen in ihrer räumlichen

Anordnung gestört werden und somit einen größeren Hohlraumgehalt aufweisen. Diese zusätzlichen Einflussgrößen sind mit ein Grund, weshalb die theoretische Packungsdichte von der tatsächlichen abweichen kann. Eine Optimierung der Kornzusammensetzung lässt sich auf theoretischem Wege oder auf experimenteller Weise erzielen. [21, 22]

### 2.2.1 Experimentelle Optimierung der Packungsdichte

Zwei weit verbreitete experimentelle Methoden zur Bestimmung der Packungsdichte sind das Verfahren nach Puntke [23], sowie jenes von Okamura [24, 25]. Beim Verfahren von Puntke wird der Hohlraumgehalt des Stoffgemisches bei definierter Verdichtung bestimmt. Somit kann ein minimaler Wasseranspruch bzw. eine maximale Packungsdichte ermittelt werden. Beim Verfahren von Okamura wird jenes Volumenverhältnis  $\beta_p$  von Wasser zu Mehlkorn ermittelt, bei welchem der Sättigungspunkt mit Wasser gerade erreicht wird. [21]

### 2.2.2 Theoretische Optimierung der Packungsdichte

Die theoretischen Methoden zur Berechnung der maximalen Packungsdichte können in drei Gruppen eingeteilt werden. Zum Ersten sind das die sogenannten Kurvenoptimierungsmethoden, welche die Ausgangsstoffe so kombinieren, dass die Kornverteilung sich möglichst nah an eine optimale Referenzkurve annähert (z.B Fuller and Thompson [26]; Dinger und Funk [27]). Die zweite Gruppe sind sogenannte Packungsmodelle, welche mit mathematischen Verfahren die maximale Packungsdichte bestimmen. Der Vorteil dieser Methoden gegenüber der Kurvenoptimierungsmethoden ist jener, dass zusätzliche Einflüsse, wie zum Beispiel die Interaktion der Partikel untereinander, der Wandeffekt und die zusätzlich eingebrachte Verdichtungsenergie berücksichtigt werden können. Solche Methoden wurden unter anderem von Furnas [28], Schwanda [29] und Fennis [30] entwickelt. Der dritte Typ sind die diskreten Modelle, welche auf Basis von computergestützten Verfahren die effektive Kornverteilung in einem vorgegebenen Raum vollständig simulieren. Beispielhaft dafür ist der von Stroeven und Stroeven [31] entworfene Algorithmus. [32]

#### Kurvenoptimierungsmethode

Eine der ersten Methoden zur Bestimmung einer optimalen Kornverteilungskurve geht auf eine Publikation von Fuller und Thompson [26] aus dem Jahre 1907 zurück. Die aus experimentellen Versuchen gewonnene Fuller-Parabel wird noch heutzutage in der Betontechnologie verwendet. Sie ergibt die optimale Packungsdichte für einen stetigen Verlauf der Korngrößenverteilung von ideal kugelförmigen Partikel mit einem begrenzten Feinkornanteil auf Grundlage der Gleichung 2.2 mit der Hochzahl  $q = 0,5$ . Die Theorie von Fuller und Thompson wurde von Andreasen und Andersen [33] aufgegriffen und

modifiziert. Sie verwendeten die selbe Gleichung, variierten allerdings die Hochzahl  $q$  zwischen 0,33 und 0,50.

$$D_i = \left( \frac{d_i}{d_{max}} \right)^q \quad (2.2)$$

mit

$D_i \dots$  kumulativer Anteil des Korndurchmessers  $d_i$

$d_{max} \dots$  maximaler Korndurchmesser

$q \dots$  Parameter, welcher die Kurve justiert

Das Andreasen-Modell wurde 1992 von Dinger und Funk [27] insofern verändert, dass ein minimaler Korndurchmesser eingeführt wurde. Dies führt dazu, dass der Bereich des Mehlkorns besser abgebildet werden kann. Der Parameter  $q$  in der Gleichung 2.3 wird für eine optimale Packungsdichte auf einen Wert von 0,37 festgelegt. Laut Vogt [34] sollte die Hochzahl  $q$  je nach gewünschter Fließfähigkeit des Betons variiert werden. [32, 35]

$$D_i = \frac{d_i^q - d_{min}^q}{d_{max}^q - d_{min}^q} \quad (2.3)$$

mit

$D_i \dots$  kumulativer Anteil des Korndurchmessers  $d_i$

$d_{max} \dots$  maximaler Korndurchmesser

$d_{min} \dots$  minimaler Korndurchmesser

$q \dots$  Parameter, welcher die Kurve justiert

### Mathematische Packungsmodelle

Die mathematischen Packungsmodelle beruhen auf der Beschreibung der Interaktionen zwischen den Partikeln mit unterschiedlicher Kornform und -größe. Die geometrisch dichtest mögliche Packung der einzelnen Partikel ist theoretisch erreicht, wenn die Hohlräume zwischen den größeren Körnern optimal mit Körnern kleineren Durchmessers ausgefüllt sind und diese wiederum von Partikeln mit noch kleineren Durchmesser usw. Die ersten Gleichungen zur mathematischen Beschreibung der Optimierung wurden von Furnas 1929 [28] eingeführt. Schwanda (1966) [29] verbesserte das Verfahren, indem er den Einfluss der großen Partikel auf die kleineren (Wandeffekt) und die umgekehrte Interaktion (Lockerungseffekt) in seinem Modell berücksichtigte. Heutzutage existieren zahlreiche verschiedene mathematische Packungsmodelle, darunter unter anderem das Linear Packing Density Model (LPDM, Stovall et al., 1986 [36]), das Compressive Packing Model (CPM, de Larrard 1999 [37]), das Compaction Interaction Packing Model (CIPM, Fennis 2011 [30]) und verschiedene Variationen des Schwanda-Modells (Geisenhanslücke 2008 [38], Reschke 2000 [39]). [21, 32, 34]

## Diskrete Modelle

Die diskreten Modelle generieren eine virtuelle Struktur anhand der vorgegebenen Korngrößenverteilung. Erste Überlegungen führten zu einem statischen Modell, bei welchem jeder Partikel an einen Ort im Raum platziert und nicht mehr verschoben wird. Die Weiterentwicklung eines solchen statischen Modells ist der von Stroeven und Stroeven im Jahre 1999 [31] aufgestellte Algorithmus, welcher das Problem als dynamisches System löst. Das Resultat einer jeden Simulation ist eine Kornpackung, bei der jedes einzelne Korn anhand von Position, Größe und Oberfläche beschrieben werden kann. Mit Hilfe solcher diskreten Modelle ist es dem Anwender möglich, spezielle Eigenschaften des Systems, wie zum Beispiel den Widerstand gegen externe Lasten oder die Simulation eines flüssigen Betons zu ermitteln. Um die optimale Packungsdichte zu erhalten, müssen viele verschiedene Kornpackungen generiert werden, was sehr zeit- und rechenaufwendig ist. Daher werden diese Modelle nur selten in der Praxis verwendet. [32]

## 2.3 Typische Mischungen für UHPC

In den Tabellen 2.2 und 2.3 sind einige exemplarische Betonrezepturen für UHPC aus der Literatur aufgelistet. Dargestellt sind neben den Rezepturen mit Fertigmischungen (Ceracem und Ductal [40]) auch weitere Mischungen, die unter anderem an der Universität Kassel [11], an der Technischen Universität München [2], an der Universität Leipzig [3] und am Royal Institute of Technology in Stockholm [34] entwickelt wurden. Je nach Zusammensetzung konnten Druckfestigkeiten von 140 bis weit über 200 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden.

Bezeichnung		M1Q	M2Q	M1	B3Q	B2Q	B1Q
Zement	kg/m <sup>3</sup>	733 <sup>1</sup>	832 <sup>1</sup>	900 <sup>1</sup>	580 <sup>1</sup>	723 <sup>1</sup>	630 <sup>1</sup>
Mikrosilika	kg/m <sup>3</sup>	230	135	225	177	118	197
Quarzmehl	kg/m <sup>3</sup>	183	207	-	456	181	158
Wasser	l/m <sup>3</sup>	161	166	185	141	157	151
Fließmittel	kg/m <sup>3</sup>	28,6	29,4	28,2	30,4	25,6	24,7
Quarzsand	kg/m <sup>3</sup>	1008	975	1016	354	425	433
Basalt	kg/m <sup>3</sup>	-	-	-	711	850	867
Stahlfasern	kg/m <sup>3</sup>	192	192	192	194	192	192
Größtkorn	mm	0,5	0,5	0,5	8,0	8,0	8,0
Ausbreitmaß	cm	55	65	55	65	65	55
Druckf. 28d	N/mm <sup>2</sup>	150 (195) <sup>2</sup>	189 <sup>2</sup>	155 <sup>2</sup>	225 <sup>2</sup>	194 <sup>2</sup>	164 (205) <sup>2</sup>
Quelle		[11]	[11]	[11]	[11]	[11]	[11]

<sup>1</sup> CEM I 52,5R HS    <sup>2</sup> Wärmebehandlung 90 °C für 2d

**Tab. 2.2:** Typische Betonrezepturen für UHPC (1)

Bezeichnung		B1	I/1	III	RPC1	RPC2	UHFB1
Zement	kg/m <sup>3</sup>	800 <sup>1</sup>	866 <sup>2</sup>	868 <sup>2</sup>	788 <sup>4</sup>	788 <sup>5</sup>	665 <sup>3</sup>
Mikrosilika	kg/m <sup>3</sup>	200	220	191	142	236	200
Quarzmehl	kg/m <sup>3</sup>	-	195	199	108	108	285
Wasser	l/m <sup>3</sup>	165	198	193	186	256	178
Fließmittel	kg/m <sup>3</sup>	25,0	19,0	27,0	16,1	3,5	38,3
Quarzsand	kg/m <sup>3</sup>	440	929	948	986	782	1019
Basalt	kg/m <sup>3</sup>	870	-	-	-	-	-
Stahlfasern	kg/m <sup>3</sup>	192	-	-	228	228	-
Größtkorn	mm	8,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8
Ausbreitmaß	cm	55	32 <sup>9</sup>	19 <sup>9</sup>	SCC	SCC	22,5 <sup>9</sup>
Druckf. 28d	N/mm <sup>2</sup>	135 (183) <sup>8</sup>	201	172	158,2	154,8	144,1
Quelle		[11]	[2]	[2]	[34]	[34]	[3]
Bezeichnung		000	200	500	Q(c)	Ceracem	Ductal
Zement	kg/m <sup>3</sup>	728 <sup>6</sup>	709 <sup>6</sup>	680 <sup>6</sup>	680 <sup>7</sup>	10	710
Mikrosilika	kg/m <sup>3</sup>	233	227	218	138	10	230
Quarzmehl	kg/m <sup>3</sup>	307	298	286	360	10	11
Wasser	l/m <sup>3</sup>	204	199	191	164	195	160
Fließmittel	kg/m <sup>3</sup>	21,2	21,0	20,1	35,0	44,6	13
Quarzsand	kg/m <sup>3</sup>	919	893	858	990	-	11
Basalt	kg/m <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	11
Stahlfasern	kg/m <sup>3</sup>	-	200	500	-	195	157
Größtkorn	mm	1,0	1,0	1,0	0,5	0,7	k.A.
Ausbreitmaß	cm	k.A.	k.A.	k.A.	29 <sup>9</sup>	k.A.	k.A.
Druckf. 28d	N/mm <sup>2</sup>	164	200	260	212,5	199	160-240
Quelle		[41]	[41]	[41]	[42]	[40, 43]	[40]

<sup>1</sup> CEM I 52,5R HS    <sup>2</sup> CEM I 42,5 R/HS    <sup>3</sup> CEM I 42,5 R    <sup>4</sup> CEM I 42,5-MH/SR/LA

<sup>5</sup> CEM I 52,5-SR/LA    <sup>6</sup> C<sub>3</sub>A-frei    <sup>7</sup> CEM I 42,5N    <sup>8</sup> Wärmebehandlung 90 °C für 2d

<sup>9</sup> Setzfließmaß    <sup>10</sup> 2355 kg/m<sup>3</sup>: Premix aus CEM I, MS, Zuschlag aus Bauxit

<sup>11</sup> 1330 kg/m<sup>3</sup>: QM + Zuschläge

**Tab. 2.3:** Typische Betonrezepturen für UHPC (2)

### 3 Ausgangsstoffe

Für die Herstellung von UHPC werden vorwiegend folgende Ausgangsstoffe verwendet, deren Eigenschaften in den nächsten Abschnitten erläutert werden:

- Zement;
- Mikrosilika;
- Quarzmehl;
- Gesteinskörnung;
- Fließmittel;
- Stahlfasern;
- Wasser.



**Abb. 3.1:** Übersicht Ausgangsstoffe: Zement (1), Mikrosilika (2), Quarzmehle (3,4), Quarzsande (5,6), Basaltsplitt (7), Fließmittel (8), Wasser (9)

Zur Anwendung kommen auch weitere Materialien, wie zum Beispiel Flugasche, Matakaolin, Feinhüttensande, Polypropylenfasern und Glasfasern. Diese Ausgangsstoffe sind nicht Teil dieser Untersuchung und werden daher nicht näher betrachtet. [9]

### 3.1 Zement

Für die Herstellung von UHPC muss eine Auswahl des Zementes bezüglich Zementart, Zementfestigkeit und Mahlfineinheit getroffen werden. Bisherige Forschungsergebnisse zeigen, dass gute Ergebnisse mit  $C_3A$ -armen Portlandzementen CEM I mit einem geringen Wasseranspruch erreicht werden können. Daher haben sich  $C_3A$ -freie Zemente bewährt. In der Literatur wird der Einsatz von Zementen mit geringem  $C_3A$ -Gehalt anhand von mehreren Kriterien gerechtfertigt. Der kleinere Anteil an Sulfatträgern in  $C_3A$ -armen Zementen bewirkt einen geringeren Wasseranspruch, das Fließmitteladsorptionsvermögen der übrigen Klinkerphasen ist deutlich geringer, die Bildung von sekundärem Ettringit bei Wärmebehandlung wird vermieden und die Wärmeentwicklung solcher Zemente ist im Allgemeinen kleiner. Zemente mit hohen Blaine-Werten sind aufgrund ihres hohen Wasseranspruchs in der Regel für die Herstellung von UHPC nicht geeignet. [2, 4, 11, 41]

In der vorliegenden Arbeit wurden die Zemente aus Tabelle 3.1 verwendet:

Hersteller	Zementtyp	Mahlfineinheit	Normdruckfest. 28d
		[ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]	[MPa]
W&P	CEM I 42.5R $C_3A$ -frei	4300	57,0
Lafarge	CEM I 52.5N $C_3A$ -frei	4500	61,0
Aalborg	CEM I 52.5R $C_3A$ 5%	3900	72,0
Kirchdorfer	CEM I 52.5R	5000	62,0
W&P	CEM II/A-M(S-L) 42.5N	4400	55,0
Lafarge	CEM II/A-S 52.5N	4600	62,0
W&P	CEM II/A-S 52.5N	4300	60,0

**Tab. 3.1:** Verwendete Zemente und Eigenschaften

Im Anhang A sind die Datenblätter der benutzten Zemente zu finden. Für den Zement der Firma Kirchdorfer wurden die Eigenschaften telefonisch erhoben und deswegen liegt kein Datenblatt vor. Falls nichts anderes angegeben ist, wurde für die Untersuchungen der Zement CEM I 42.5R des Unternehmens Wietersdorfer & Peggauer Zementwerke (W&P) verwendet.

### 3.2 Mikrosilika

Mikrosilika ist ein puzzolanischer Zusatzstoff, welcher durch Kondensation aus dem Filterstaub bei der Ferrosilizium- bzw. Siliziummetallherstellung entsteht. Es weist im Allgemeinen einen Gehalt an reaktivem  $\text{SiO}_2$  von über 90% auf. Mikrosilikapartikel haben eine kugelige Form und weisen in der Regel einen Durchmesser zwischen 0,1 und 1  $\mu\text{m}$  auf. Mikrosilika wird aufgrund des Füllereffektes, des Kugellagereffektes und der puzzolanischen Reaktion zur Herstellung von UHPC verwendet. Unter dem Füllereffekt versteht man die Eigenschaft eines Partikels mit kleinem Durchmesser (Mikrosilika) die Zwischenräume der größeren Partikel (Zement und Quarzmehl) zu füllen und somit

die Packungsdichte zu erhöhen. Der Kugellagereffekt bewirkt, dass durch die kugelige Form der Mikrosilikapartikel die Reibung zwischen den kantigen Körnern des Zementes und der Gesteinskörnung vermindert und somit die Fließfähigkeit erhöht wird. Die puzzolanische Reaktion von Mikrosilika zusammen mit dem  $\text{CA}(\text{OH})_2$  bewirkt die Bildung von CSH-Phasen, welche eine höhere Festigkeit aufweisen.

Im Handel sind zur Zeit kompaktierte und unkompaktierte Mikrosilika zu finden. Im Allgemeinen ist den unkompaktierten der Vorzug zu geben, da zum einen die Agglomerate in kompaktierten Mikrosilika deutlich größer sind und somit der Füllereffekt beeinträchtigt wird und zum anderen weisen sie eine geringe puzzolanische Reaktivität auf. Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass Mikrosilika mit erhöhtem Kohlenstoffgehalt, erkennbar durch die dunklere Farbe, einen schlechten Einfluss auf die Fließfähigkeit des Betons haben. [2, 3, 41]

In der vorliegenden Arbeit wurden folgende Mikrosilika verwendet:

- RW silicium GmbH „RW-Füller“
- RW silicium GmbH „RW-Füller Q1“
- Elkem Microsilica<sup>®</sup> Grade 971U

### 3.3 Quarzmehl

Quarzmehl wird durch eisenfreie und trockene Vermahlung von Quarzsand hergestellt. Im Normalfall reagiert das Quarzmehl als inerte, anorganischer Zusatzstoff nicht mit Wasser und Zement. Der Verwendungszweck für Quarzmehl ist zum einen die Erhöhung der Packungsdichte und zum anderen die Reduzierung des Zementgehaltes. Quarzmehl kann als Füllkorn zwischen Mikrosilika und Zement bzw. Zement und Gesteinskörnung dienen. Wird ein Teil des Zementes durch Quarzmehl ersetzt, kann unter Beibehaltung derselben Festigkeit der Wasser-Zementwert erhöht werden, was wiederum zu einer Verbesserung der Fließfähigkeit führt. Besonders beim Einsatz einer Wärmebehandlung kann ein positiver Effekt für die Festigkeit erreicht werden. [2, 3, 9, 41]

In der vorliegenden Arbeit wurden folgende Quarzmehle verwendet:

- QM 1; 0 - 160  $\mu\text{m}$
- QM 2; 0 - 125  $\mu\text{m}$
- QM 3; 0 - 90  $\mu\text{m}$
- QM 4; 0 - 71  $\mu\text{m}$
- QM 5; 0 - 63  $\mu\text{m}$
- QM 6; 0 - 40  $\mu\text{m}$
- QM 7; 0 - 20  $\mu\text{m}$
- QM 8; 0 - 20  $\mu\text{m}$

- QM 9; 0 - 10  $\mu\text{m}$
- QM 10; 0 - 10  $\mu\text{m}$

Im Anhang B sind die Datenblätter der benutzten Quarzmehle zu finden.

### 3.4 Gesteinskörnung

Die gebräuchlichste Gesteinskörnung, welche bei der Herstellung von UHPC verwendet wird, ist Quarzsand. Quarzite Zerschläge haben mehrere Vorteile gegenüber anderen Zerschlägen. Sie haben eine hohe Festigkeit, sind relativ günstig und leicht verfügbar und die Kontaktzone zwischen dem Korn und der Zementmatrix ist sehr dicht und fest. Quarzsande mit runden Partikeln sind jenen mit gebrochenen bzw. kantigen Oberflächen vorzuziehen. Eine weitere Gesteinskörnung, die in mehreren Forschungsarbeiten zusammen mit dem Quarzsand verwendet wurde, ist der Basalt. Die Festigkeit des UHPC hängt neben der Festigkeit der Gesteinskörnung und der Bindemittelmatrix auch vom Verhältnis der Steifigkeiten zueinander ab. Cheyrezy und Richard empfehlen die Verwendung einer Gesteinskörnung mit einem Elastizitätsmodul, welcher das 1,4-fache des E-Moduls der Zementmatrix nicht übersteigt. [2, 4, 41]

In der vorliegenden Arbeit wurden folgende Gesteinskörnungen verwendet:

- QS 1; 0,06 - 0,25 mm
- QS 2; 0,1 - 0,5 mm
- QS 3; 0,3 - 0,8 mm
- Basaltsplitt; 0 - 2 mm
- Basaltsplitt; 2 - 4 mm

### 3.5 Fließmittel

Zur Herstellung von UHPC kommen sehr feine Partikel, wie zum Beispiel Mikrosilika und feine Quarzmehle zum Einsatz. Diese Feinstoffe neigen zur Bildung von Agglomeraten. Damit sie im Betonvolumen gleichmäßig verteilt werden, braucht es Stoffe mit einer hohen Dispergierungsfähigkeit. Diese weisen Fließmittel auf Basis von Polycarboxylateher (PCE) auf, welche aus einer kammartigen Molekülstruktur aufgebaut sind. PCE-Fließmittel zeichnen sich durch eine hohe Wassereinsparung und eine längere Konsistenzerhaltung aus. Sie verändern das Oberflächenpotential einiger Klinkerphasen dahingehend, dass eine elektrostatische Abstoßung zwischen den Zementkörnern erfolgt und somit Agglomerationen vermieden werden. Die längere und intensivere Mischung von UHPC im Vergleich zu herkömmlichen Beton und der dadurch hohe Temperaturanstieg bewirkt ein schnelles Ansteifen. Deswegen sollten die eingesetzten Fließmittel eine angemessene Verzögerungswirkung auf die Zementhydratation aufweisen. Die Wahl des

Fließmittels sollte immer in Relation mit dem verwendeten Zement getroffen werden. [2, 3, 4]

In der vorliegenden Arbeit wurden folgende Fließmittel verwendet:

- BASF Master Glenium ACE 430
- BT3 Premment H500
- Sika Viscocrete 20 Gold
- Saning Supla P20 (noch in der Entwicklung)

### 3.6 Stahlfasern

UHPC ohne Fasern hat in der Regel ein linear elastisches Verformungsverhalten und ein sehr sprödes Bruchverhalten. Um die Duktilität des Baustoffes zu erhöhen, werden dünne Stahlfasern mit einer Zugfestigkeit von 2000 - 2500 N/mm<sup>2</sup> eingesetzt, wobei stets der Verbund zwischen Stahl und Beton versagt und nicht die Faser selbst. Die Stahlfasern dienen zum einen zur Erhöhung der Bruchenergie und zum anderen kann die Biegezugfestigkeit von UHPC deutlich gesteigert werden. Die Mikrorisse im Beton, welche von den Stahlfasern zu überbrücken sind, bestimmen maßgeblich die Geometrie der Fasern. Der Faserdurchmesser sollte den Abmessungen der Risse im Mikrobereich angeglichen werden. Die Faserlänge beeinflusst stark das Frischbetonverhalten; kurze Fasern sind besser für die Verarbeitbarkeit, lange Stahlfasern hingegen verbessern das Nachbruchverhalten. Durch die Kombination verschiedener Fasertypen und -längen kann ein besseres Nachbruchverhalten erzielt werden. Die Stahlfasern weisen meist eine Länge von 6 bis 20 mm und einen Durchmesser zwischen 0,15 und 0,30 mm auf. Der Gehalt an Stahlfasern im UHPC liegt im Allgemeinen zwischen 1,5 und 3 Vol.-%. Zu beachten ist bei der Wahl der geeigneten Stahlfasergeometrie auch der Größtkorndurchmesser, da bei Einsatz von langen Stahlfasern in Grobkorn-UHPC die Verarbeitbarkeit oft sehr eingeschränkt ist. [2, 4]

In der vorliegenden Arbeit wurden folgende Stahlfasern verwendet:

- Bekaert OL 13/0,2 mm
- Stratec 9/0,15 mm

## 4 Entwicklung des Premix

Die Entwicklung des Premix zur Herstellung von UHPC erfolgte im Rahmen dieser Arbeit in zwei Schritten. In der ersten Phase wurde unter Einsatz von ausgewählten Ausgangsstoffen, welche im Kapitel 3 näher beschrieben sind, eine theoretische Optimierung anhand der Kurvenoptimierungsmethode durchgeführt. Daraus ergab sich eine ideale Zusammensetzung, welche in einem zweiten Schritt mittels chemischer Optimierung unter Berücksichtigung der puzzolanischen und hydraulischen Reaktion und experimenteller Kleinversuche verifiziert und angepasst wurde. Die einzelnen Schritte werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

### 4.1 Sieblinienoptimierung

Die Sieblinienoptimierung wurde im Zuge dieser Arbeit anhand von zwei verschiedenen Referenzsieblinien durchgeführt. Die erste Referenzsieblinie ergab sich durch die Auswertung der Gleichung 2.3 nach Dinger und Funk (DF), wobei die Hochzahl  $q$  auf einen Wert von 0,30 festgelegt wurde. Die weiteren Eingangsparameter für die Gleichung wurden aufgrund der Sieblinien der Ausgangsstoffe auf  $d_{min} = 0,04 \mu\text{m}$  und  $d_{max} = 1000 \mu\text{m}$  festgelegt.

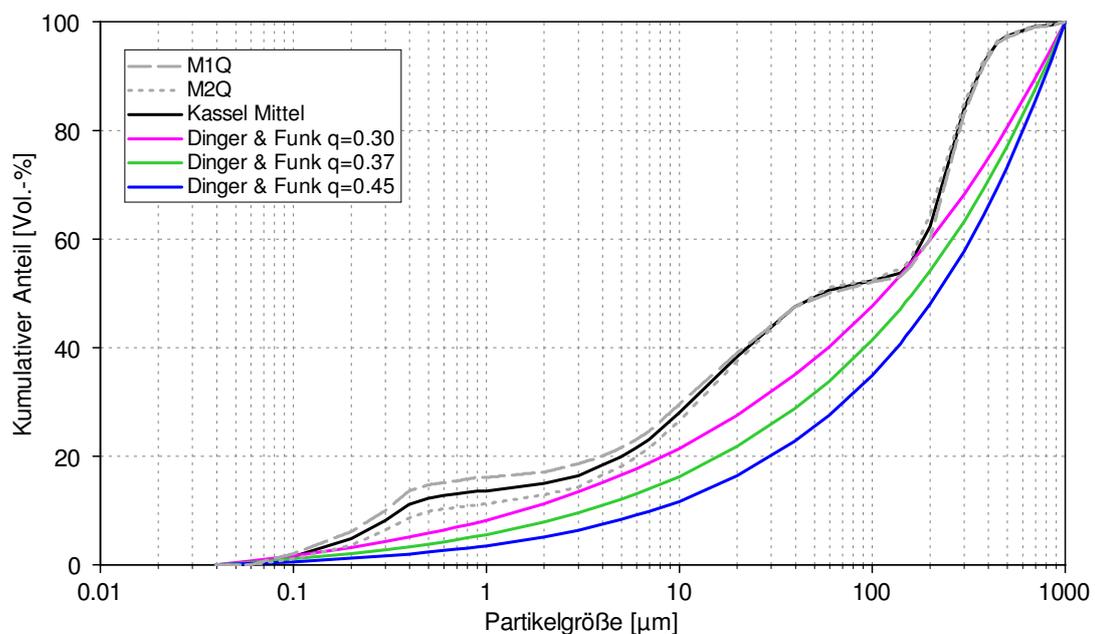


Abb. 4.1: Referenzsieblinien zur Sieblinienoptimierung

Als Grundlage für die zweite Referenzkurve dienten zwei Mischungen (M 1Q und M 2Q), welche an der Universität Kassel entwickelt wurden. Aus den jeweiligen Sieblinien (laut Schmidt [44]) wurde ein Mittelwert gebildet, welcher als Referenz für die weiteren Untersuchungen benutzt wurde. Die Zusammensetzungen der Rezepturen sind im Kapitel 2.3 in Tabelle 2.2 aufgelistet.

Als nächster Schritt wurde mit Hilfe der kommerziellen Software MATLAB ein Algorithmus zur Berechnung der optimalen Anpassung an die beiden Referenzsieblinien erstellt (siehe Anhang C). Eingabedaten waren dabei die Sieblinien und Rohdichten der Ausgangsstoffe gemäß den Herstellerangaben, der w/z-Wert, der Fließmittelgehalt, der Luftporenanteil, der Zement- und der Mikrosilikagehalt. Folgende Werte wurden für die Auswertung benutzt:

Parameter	Wert
CEM-Gehalt	700-850 kg/m <sup>3</sup>
w/z-Wert	0,25
Fließmittel	4,5 % <sup>1</sup>
MS-Gehalt	17-23 % <sup>1</sup>
Luftporen	2,0 Vol.-%

<sup>1</sup> Gewichtsprozent vom CEM-Gehalt

**Tab. 4.1:** Eingabedaten Sieblinienoptimierung

Die Optimierung selbst wurde mit Hilfe der Funktion „quadprog“ implementiert. Die benutzte Funktion ist Teil der „Optimization-Toolbox“ von MATLAB und sie löst mit Hilfe der Gleichung 4.1 quadratische Optimierungsaufgaben [45].

$$\min_x \frac{1}{2} x^T H x + f^T x \quad \text{sodass} \quad \begin{cases} A \cdot x \leq b, \\ Aeq \cdot x = beq, \\ lb \leq x \leq ub. \end{cases} \quad (4.1)$$

mit

$H \dots$	quadratischer Ausdruck der Gleichung $\frac{1}{2} x^T H x + f^T x$
$f \dots$	linearer Ausdruck der Gleichung $\frac{1}{2} x^T H x + f^T x$
$A \dots$	lineare Koeffizienten der Bedingung $A \cdot x \leq b$
$b \dots$	konstanter Vektor der Bedingung $A \cdot x \leq b$
$Aeq \dots$	lineare Koeffizienten der Bedingung $Aeq \cdot x \leq beq$
$beq \dots$	konstanter Vektor der Bedingung $Aeq \cdot x \leq beq$
$lb \dots$	untere Grenze
$ub \dots$	obere Grenze

In einem ersten Berechnungsdurchgang wurden alle Quarzmehle und Quarzsande verwen-

det, welche im Kapitel 3 aufgelistet sind. Es zeigte sich, dass einige wenige Materialien für eine optimale Sieblinienanpassung ausreichen. Aufgrund dieser Tatsache wurden in einem zweiten Durchlauf nur mehr folgende Materialien für die Optimierung benutzt:

- QM 2; 0 - 125  $\mu\text{m}$ ,
- QM 6; 0 - 40  $\mu\text{m}$ ,
- QS 1; 0,06 - 0,25 mm,
- QS 3; 0,3 - 0,8 mm.

Die Ergebnisse dieser Sieblinienoptimierung lieferten je nach Zementgehalt eine theoretisch optimale Zusammensetzung der Mischrezeptur einerseits für die Referenzsieblinie nach Dinger und Funk und andererseits für jene nach Kassel. Für diese optimalen Mischungen wurden anhand von Kleinversuchen die Druckfestigkeit und die Fließfähigkeit des Betons bestimmt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im Kapitel 4.2.3 zusammengestellt.

## 4.2 Betonrezepturentwicklung

### 4.2.1 Prüfkörper und Prüfverfahren

#### Herstellen und Lagerung der Prüfkörper

Alle Serien, mit Ausnahme der Vorserie zur Zementparameterstudie und des Großversuchs im Unternehmen Graspöckner, wurden mit einem Intensivmischer (Eirich RV01) und einem Sternwirbler im Labor des Bautechnikzentrum der TU Graz hergestellt. Die Mischabfolge für die Versuche wurde wie folgt festgelegt:

Zeitpunkt [min]	Dauer [min]	Vorgang	Wirbler+Trommel [U/min]
0	0,5	Vormischen CEM+MS+QM+QS 1	100
0,5	6	Zugabe Wasser+FM	450
6,5	5	Zugabe Gesteinskörnung <sup>1</sup>	100
11,5	1	Zugabe Stahlfasern	100
12,5	-	Herstellung Prüfkörper	-

<sup>1</sup> Dauer 6 min, wenn keine Stahlfasern

**Tab. 4.2:** Mischabfolge im Intensivmischer

Zur Erstellung der Versuchskörper für die Vorserie zur Zementparameterstudie wurde ein Mischer der Firma Hobart mit einem Planetenrührsystem verwendet (Hobart A120). Das Mischschema wurde gegenüber jenem des Eirich-Mischers nicht verändert (siehe Tabelle 4.2).



a) Intensivmischer Eirich RV01



b) Planetenrührmischer Hobart A120

Abb. 4.2: Verwendete Mischer

Die Versuchskörper der letzten Serie wurden in einem Großversuch im Unternehmen Graspöckner mit einem Eirich Werksmischer hergestellt. Sie dienten zur Ermittlung der Festigkeitsentwicklung, des E-Moduls und der Spaltzugfestigkeit des entwickelten Premix. Hierbei wurden folgende alternative Zeitabläufe eingehalten:

Zeitpunkt [min]	Dauer [min]	Vorgang	Wirbler+Trommel [U/min]
0	6	Leim	280
6	5	Zugabe Gesteinskörnung	150
11	1	Zugabe Verzögerer	150
12	-	Herstellung Prüfkörper	-

Tab. 4.3: Mischabfolge Großversuch, Mischung M1

Zeitpunkt [min]	Dauer [min]	Vorgang	Wirbler+Trommel [U/min]
0	6	Leim	280
6	4	Zugabe Gesteinskörnung	150
10	1	Zugabe Stahlfasern	150
11	-	Herstellung Prüfkörper	-

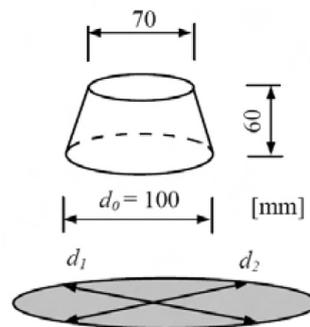
Tab. 4.4: Mischabfolge Großversuch, Mischung M2

Die Oberfläche aller Versuchskörper wurde nach dem Verfüllen sofort mit Wasser

behandelt, um die sogenannte „Elefantenhaut“ zu vermeiden. Unter dem Begriff „Elefantenhaut“ versteht man die Bildung einer klebrigen Schicht auf der Betonoberfläche, aufgrund des raschen Austrocknens. Diese Schicht verhindert das Entlüften des Betons. Anschließend wurden die Prüfkörper mit einer Folie abgedeckt und bis zum Ausschalen luftdicht verschlossen. Alle Probekörper wurden nach einem Tag ausgeschalt und anschließend bei Raumklima mit einer Temperatur von ca. 22 °C gelagert. Die Prismen für die Messung der Druckfestigkeit zweier Serien wurden nach dem Ausschalen für drei Tage mit einer Lufttemperatur von 90 °C wärmebehandelt.

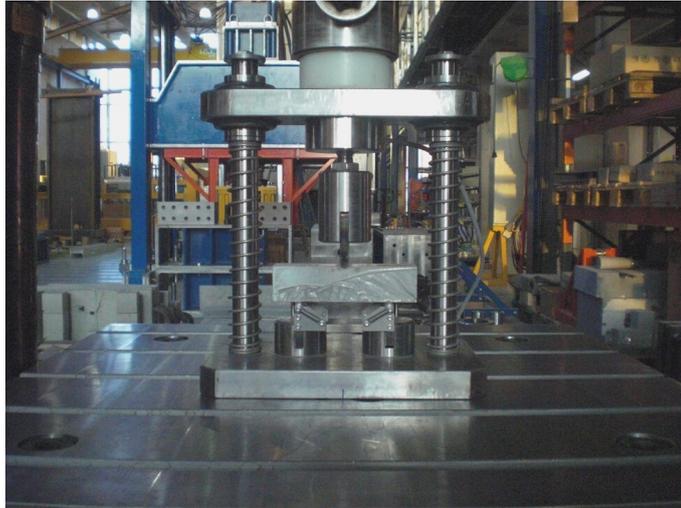
### Prüfverfahren

Die Frischbetoneigenschaften der verschiedenen Rezepturen wurden anhand des Ausbreitfließmaßes (Hägermann-Setzmaß) und der dazugehörigen Fließzeit  $t_{200}$  bestimmt. Das Ausbreitfließmaß und die Fließzeit sind Indikatoren für die rheologischen Eigenschaften Fließgrenze bzw. Viskosität. Das Ausbreitfließmaß wurde gemäß EN 1015-3 mit dem Hägermann-Konus auf einer trockenen Glasplatte, allerdings ohne Verdichtungsschläge, bestimmt. Durch das zweimalige Messen des Durchmessers des Ausbreitkuchens und anschließender Bildung des Mittelwertes ergibt sich das Hägermann-Setzmaß. Rund zwei Minuten nach dem Hochziehen des Konus wurde das Ausbreitfließmaß bestimmt. Die Fließzeit  $t_{200}$  gibt die Zeitspanne vom Hochziehen des Hägermann-Konus bis zum Erreichen eines Ausbreitmaßes von 200 mm an mindestens zwei Stellen des Ausbreitkuchens an. [10]

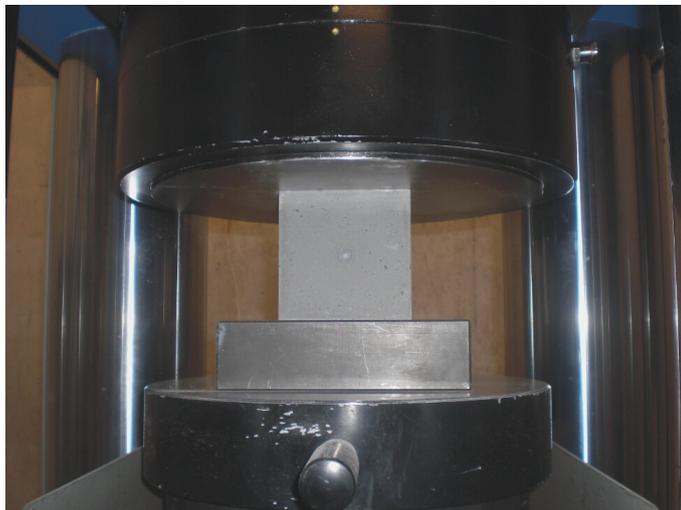


**Abb. 4.3:** Hägermann-Konus [3]

Die Druckfestigkeiten der Probekörper wurden gemäß ÖNORM B 3303 und ÖNORM EN 12390-3 bestimmt. Für die Druckprüfungen wurden Würfel mit einer Kantenlänge von 100 mm verwendet. Die Druckfestigkeiten der wärmebehandelten Prismen wurden an den Prismenhälften mit den Abmessungen  $\sim 80 \times 40 \times 40$  mm mit einer Stempelaufgabe von  $40 \times 40$  mm bestimmt. Die Biegezugfestigkeitsprüfungen wurden gemäß ÖNORM EN 196-1 an Prismen mit den Abmessungen  $160 \times 40 \times 40$  mm durchgeführt. Der E-Modul und die Spaltzugfestigkeit wurden gemäß ONR 23303 bzw. ÖNORM EN 12390-6 bestimmt. Zur Verwendung kamen dabei Zylinder mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 200 mm.



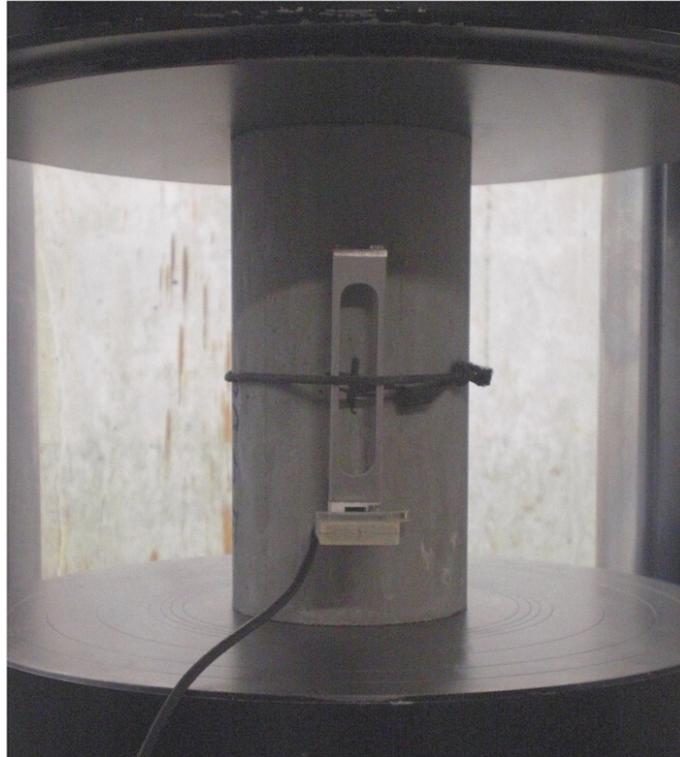
**Abb. 4.4:** Aufbau Biegezugfestigkeitsprüfung



**Abb. 4.5:** Aufbau Druckfestigkeitsprüfung, Würfel



**Abb. 4.6:** Aufbau Druckfestigkeitsprüfung, Prismen



**Abb. 4.7:** Aufbau E-Modul-Prüfung



**Abb. 4.8:** Aufbau Spaltzugprüfung

#### 4.2.2 Einfluss des Fließmittels

Die ersten Untersuchungen galten dem Einfluss des Fließmittels auf die Frisch- sowie auch auf die Festbetoneigenschaften. Dazu wurden vier verschiedene Fließmittel unterschiedlicher Hersteller getestet (siehe Kapitel 3.5). Als Ausgangsbasis für die Betonrezeptur wurde ein vom Industriepartner entwickelter Premix mit folgender Zusammenstellung verwendet:

- QM 2; 0 - 125  $\mu\text{m}$ ; 20%,

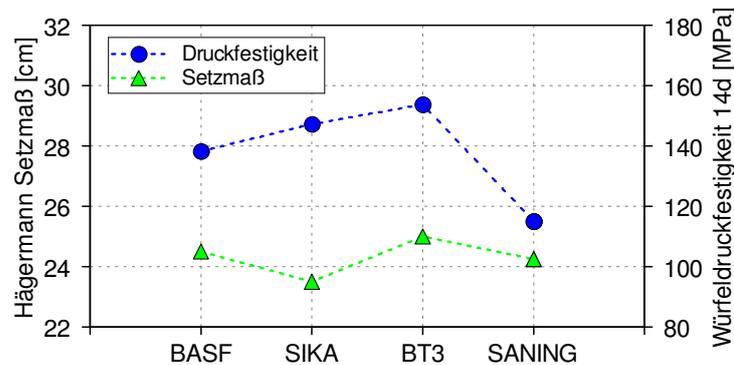
- QM 5; 0 - 63  $\mu\text{m}$ , 21%,
- QS 1; 0,06 - 0,25 mm; 31%,
- Elkem Microsilica<sup>®</sup> Grade 971U; 28%.

Durch den hohen Wasseranspruch dieses Premix musste der Zementgehalt bzw. das Leimvolumen auf einen relativ hohen Wert von  $780 \text{ kg/m}^3$  bzw.  $673 \text{ l/m}^3$  festgesetzt werden. Zur Untersuchung des Einflusses des Fließmittels kam folgende Rezeptur zur Anwendung:

Ausgangsstoffe	Verhältnis [-]	Gehalt [ $\text{kg/m}^3$ ]
W&P CEM I 42.5 R	1,00	780
ursprünglicher Premix	0,64	499
Wasser	0,25	170
Fließmittel	0,045	35
QS 3	1,11	867

**Tab. 4.5:** Betonrezeptur zur Bestimmung des Einflusses verschiedener Fließmittel

In Abbildung 4.9 ist zu erkennen, dass mit dem Fließmittel Premment H500 der Firma BT3 sowohl bei der Druckfestigkeit als auch bei der Fließfähigkeit des Betons die besten Ergebnisse erzielt wurden. Für die weiteren Untersuchungen wurde deswegen nur mehr dieses Fließmittel mit einer Rohdichte von  $1,07 \text{ g/cm}^3$  und einem Feststoffgehalt von 30% verwendet.

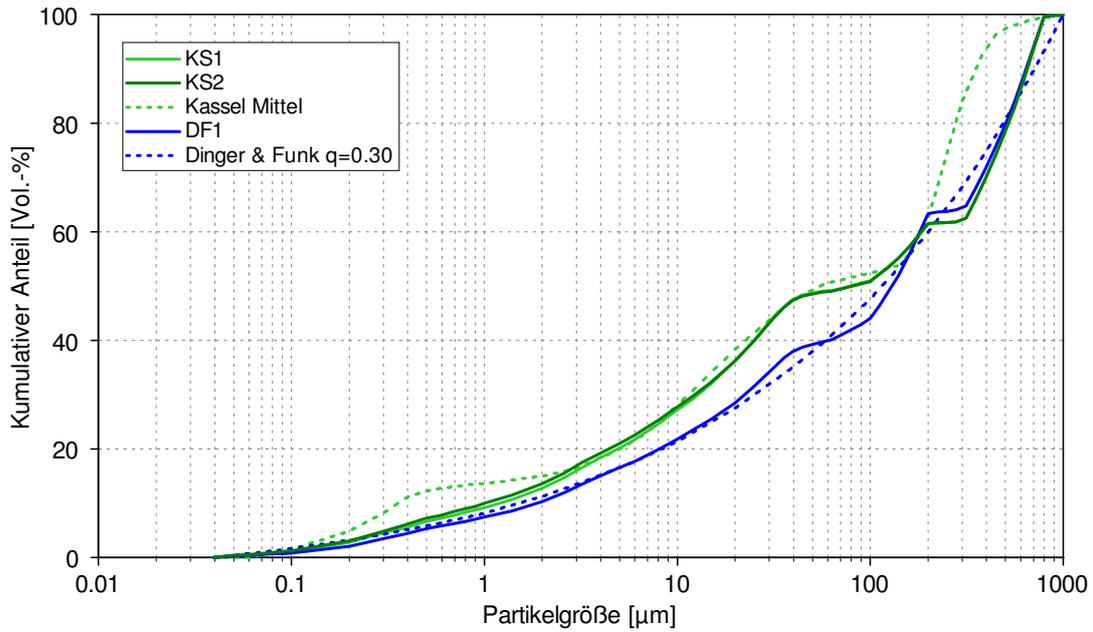


**Abb. 4.9:** Einfluss verschiedener Fließmittel auf die Betoneigenschaften

### 4.2.3 Theoretische Optimierung

Die Ergebnisse aus der theoretischen Sieblinienoptimierung (siehe Kapitel 4.1) wurden in den ersten Versuchsreihen experimentell überprüft. In Abbildung 4.10 und Tabelle 4.6 sind exemplarisch für diese Versuchsreihen drei Rezepturen und deren Sieblinien aufgelistet. Die Betoneigenschaften der drei Mischungen sind relativ ähnlich, obwohl das Leimvolumen verhältnismäßig stark voneinander abweicht. Es zeigt sich, dass mit

einem Fließmittelgehalt von 4,5% Gewichtsprozent vom Zementgehalt keine hohen Druckfestigkeiten erreicht werden können, da das Fließmittel die Hydratation zu stark behindert. Anzumerken ist des Weiteren, dass die Referenzsieblinie nach Kassel ein Größtkorn von 0,5 mm aufweist und in den eigenen Untersuchungen ein Größtkorn von 0,8 mm verwendet wurde. Deswegen kommt es im Bereich zwischen 200  $\mu\text{m}$  und 800  $\mu\text{m}$  zu größeren Abweichungen.



**Abb. 4.10:** Sieblinien der Versuchsreihe Theoretische Optimierung

Ausgangsstoffe		KS1	KS2	DF1
W&P CEM I 42.5 R	[kg/m <sup>3</sup> ]	700	750	700
MS RW-Füller	[%] <sup>1</sup>	23,00	23,00	17,00
QM 2	[%] <sup>1</sup>	-	-	16,18
QM 6	[%] <sup>1</sup>	33,16	20,67	-
FM BT3 PR H500	[%] <sup>1</sup>	4,50	4,50	4,50
Wasser	[-]	0,25	0,25	0,25
$V_{Leim}$	[l/m <sup>3</sup> ]	593,3	598,7	529,1
$V_{Zuschlag}$	[l/m <sup>3</sup> ]	406,7	401,3	470,9
QS 1	[%] <sup>2</sup>	25,28	25,63	39,43
QS 3	[%] <sup>2</sup>	74,72	74,37	60,57

<sup>1</sup> Gewichtsprozent vom Zementgehalt

<sup>2</sup> Volumenprozent vom Zuschlagsvolumen

**Tab. 4.6:** Betonrezepturen der Versuchsreihe Theoretische Optimierung

#### 4.2.4 Einfluss des Mikrosilikas

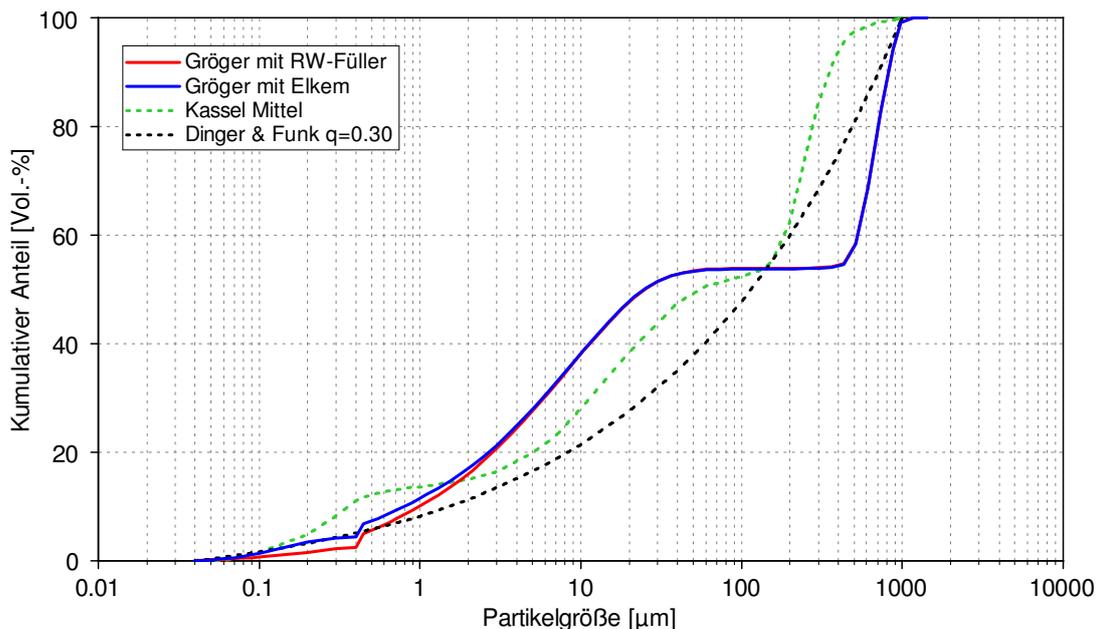
Anschließend an die Analyse der physikalisch optimierten Rezepturen wurde der Einfluss verschiedener Mikrosilikaprodukte auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften ermittelt. Verwendet wurden dazu das Mikrosilika RW-Füller des Unternehmens RW silicium GmbH und das Produkt Grade 971U der Firma Elkem. Der Einfluss des Mikrosilikagehaltes wurde mittels einer Rezeptur, welche von Herrn Dipl.-Ing. Johannes Gröger am Institut für Betonbau der TU Graz entwickelt wurde, untersucht (siehe Tabelle 4.7). Dazu wurde der Zement-, der Quarzmehl und der Fließmittelgehalt sowie der w/z-Wert konstant gehalten und nur der Mikrosilikagehalt variiert. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Leimvolumen, die wiederum die Fließfähigkeit beeinflussen.

Ausgangsstoffe		Gröger
W&P CEM I 42.5 R	[kg/m <sup>3</sup> ]	725,0
MS	[%] <sup>1</sup>	6,0-18,0
QM 9	[%] <sup>1</sup>	53,9
FM BT3 PR H500	[%] <sup>1</sup>	4,0
Wasser	[-]	0,25
$V_{Leim}$	[l/m <sup>3</sup> ]	614-654
<hr/>		
$V_{Zuschlag}$	[l/m <sup>3</sup> ]	346-386
QS 3	[%] <sup>2</sup>	100,0

<sup>1</sup> Gewichtsprozent vom Zementgehalt

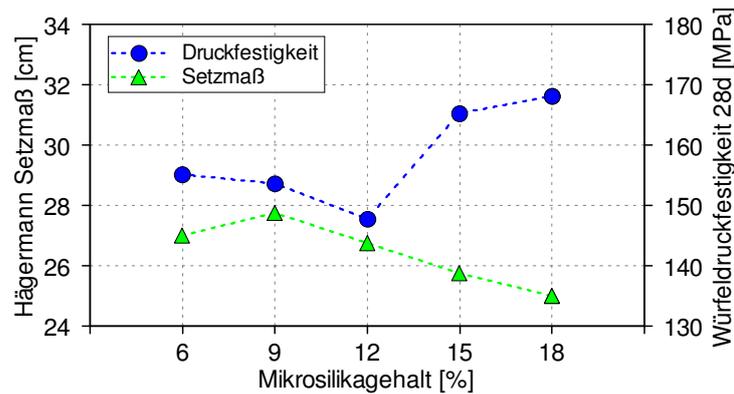
<sup>2</sup> Volumenprozent vom Zuschlagsvolumen

**Tab. 4.7:** Betonrezeptur Gröger



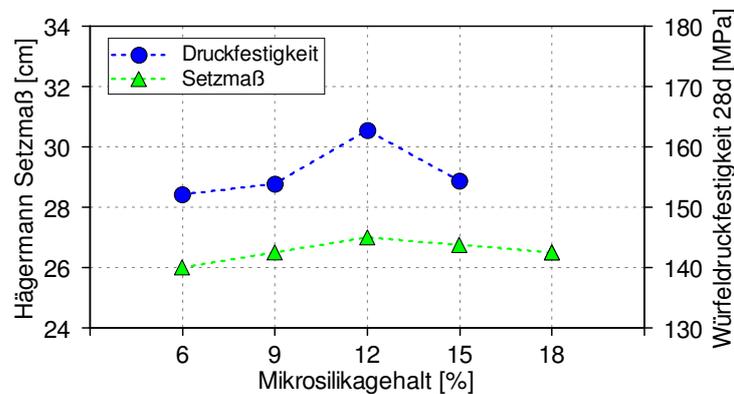
**Abb. 4.11:** Sieblinie der Rezeptur Gröger mit 12% Mikrosilikagehalt

In den Abbildungen 4.12 und 4.13 sind die Ergebnisse zusammengefasst und dargestellt. Die Prozentangaben der Mikrosilika beziehen sich dabei immer auf den Zementgehalt. Man kann erkennen, dass beim Einsatz des Mikrosilika der Firma Elkem die Druckfestigkeiten bis zu einem Gehalt von 12% abfallen, um anschließend mit steigendem Mikrosilikagehalt zuzunehmen. Die Fließfähigkeit des Frischbetons dagegen erreicht bei einem Anteil von 9% ihr Maximum und nimmt mit zunehmenden Gehalt an Mikrosilika ab.



**Abb. 4.12:** Einfluss des Mikrosilikas Elkem „Grade 971U“ auf die Betoneigenschaften

Die Mischung mit dem Mikrosilika „RW-Füller“ hingegen hat sowohl für die Fließfähigkeit, als auch für die Druckfestigkeit ihr Maximum bei 12%. Für die Rezeptur mit einem Mikrosilikagehalt von 18% wurde nur das Ausbreitfließmaß bestimmt.



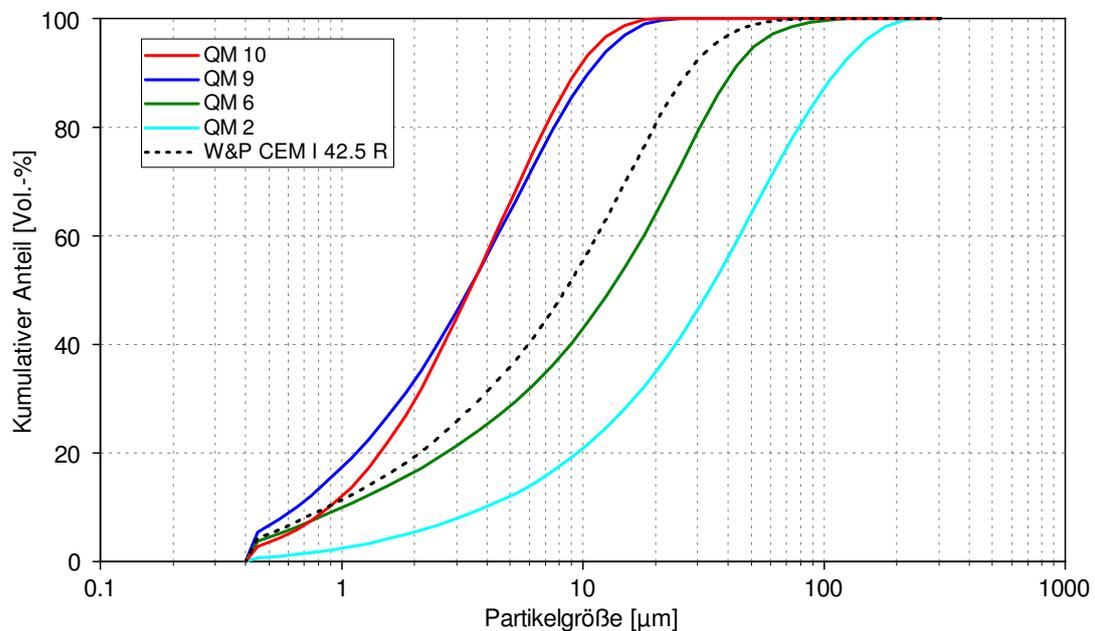
**Abb. 4.13:** Einfluss des Mikrosilikas „RW-Füller“ auf die Betoneigenschaften

Aufgrund der Tatsache, dass das Mikrosilika einen erheblichen Teil der Kosten einer UHPC-Rezeptur verursacht und den zuvor gewonnenen Erkenntnissen aus den experimentellen Laborversuchen, wurde für die nachfolgenden Untersuchungen ein Mikrosilikaanteil von 13% des Zementgehaltes festgelegt.

### 4.2.5 Einfluss des Quarzmehles

Aufbauend auf den Ergebnissen aus den Versuchen zur theoretischen Optimierung und des Einflusses des Mikrosilikagehaltes wurden weitere experimentelle Versuchsreihen durchgeführt, um den Einfluss des Quarzmehles auf die Fließfähigkeit und die Druckfestigkeit des Betons zu ermitteln. Dazu wurden folgende Quarzmehle eingesetzt, deren Sieblinien in Abbildung 4.14 dargestellt sind:

- QM 2; 0 - 125  $\mu\text{m}$ ,
- QM 6; 0 - 40  $\mu\text{m}$ ,
- QM 9; 0 - 10  $\mu\text{m}$ ,
- QM 10; 0 - 10  $\mu\text{m}$ .



**Abb. 4.14:** Sieblinien der eingesetzten Quarzmehle im Vergleich zum verwendeten Zement

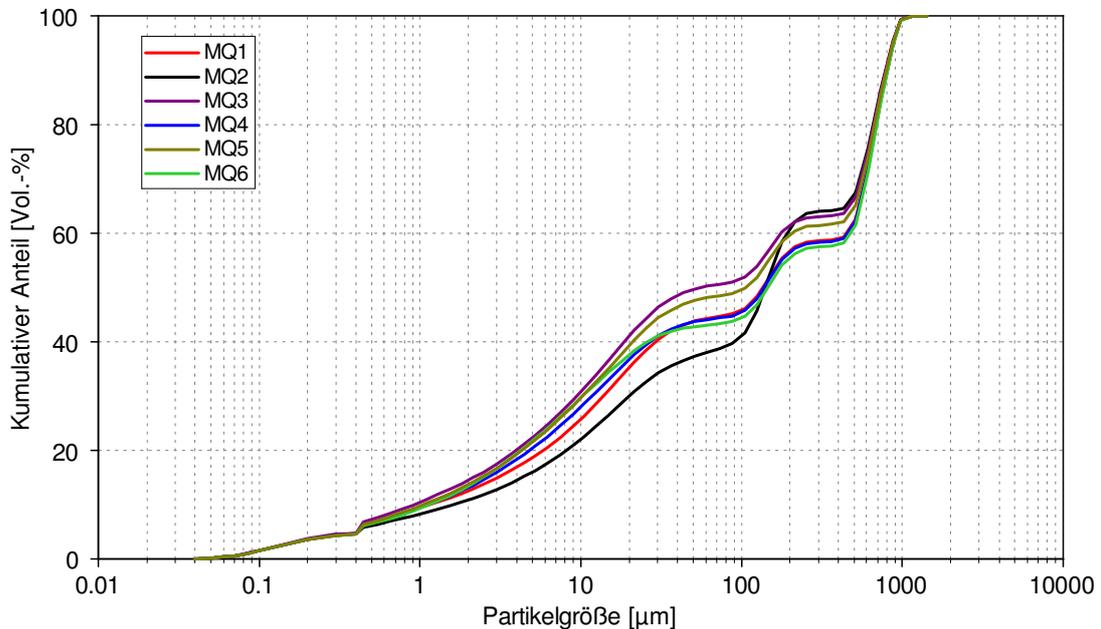
In Tabelle 4.8 und den Abbildungen 4.15 und 4.16 sind die einzelnen Rezepturen der Versuchsreihe und deren Frisch- und Festbetoneigenschaften dargestellt. Man kann erkennen, dass die Ergebnisse trotz großer Unterschiede in der Zusammensetzung und auch im Leimvolumen relativ ähnlich sind.

Ausgangsstoffe		MQ1	MQ2	MQ3	MQ4	MQ5	QM6
W&P CEM I 42.5 R	[kg/m <sup>3</sup> ]	710	690	720	705	695	690
MS Elkem Grade 971	[%] <sup>1</sup>	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0
QM 2	[%] <sup>1</sup>	-	20,0	-	-	-	-
QM 6	[%] <sup>1</sup>	30,0	-	30,0	15,0	30,0	-
QM 9	[%] <sup>1</sup>	-	-	15,0	-	-	-
QM 10	[%] <sup>1</sup>	-	-	-	15,0	15,0	30,0
FM BT3 PR H500	[%] <sup>1</sup>	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Wasser	[-]	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
$V_{Leim}$	[l/m <sup>3</sup> ]	559,0	517,5	607,6	555,2	587,2	543,8
$V_{Zuschlag}$	[l/m <sup>3</sup> ]	441,0	482,5	392,4	444,8	412,8	456,2
QS 1	[%] <sup>2</sup>	25,0	40,0	25,0	25,0	25,0	25,0
QS 3	[%] <sup>2</sup>	75,0	60,0	75,0	75,0	75,0	75,0
Druckfestigkeit 28d	[MPa]	166,7	157,2	171,4	161,2	162,7	143,4
$t_{200}$	[s]	9,0	13,0	7,0	6,0	8,5	8,0
Hägermann-Setzmaß	[cm]	30,25	29,00	29,75	31,25	30,00	29,00

<sup>1</sup> Gewichtsprozent vom Zementgehalt

<sup>2</sup> Volumenprozent vom Zuschlagsvolumen

**Tab. 4.8:** Betonrezepturen zur Bestimmung des Einflusses verschiedener Quarzmehle



**Abb. 4.15:** Sieblinien zur Bestimmung des Einflusses verschiedener Quarzmehle

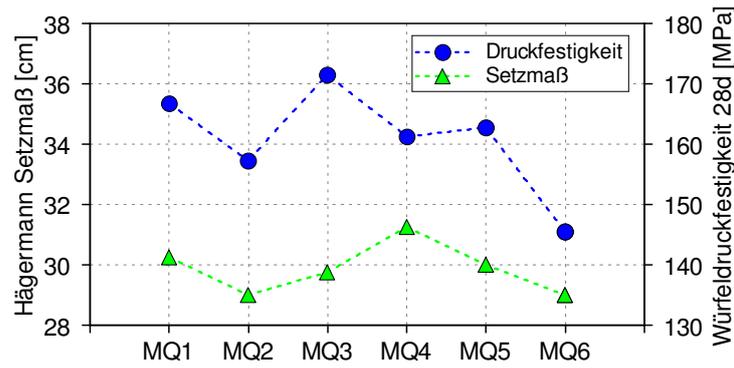
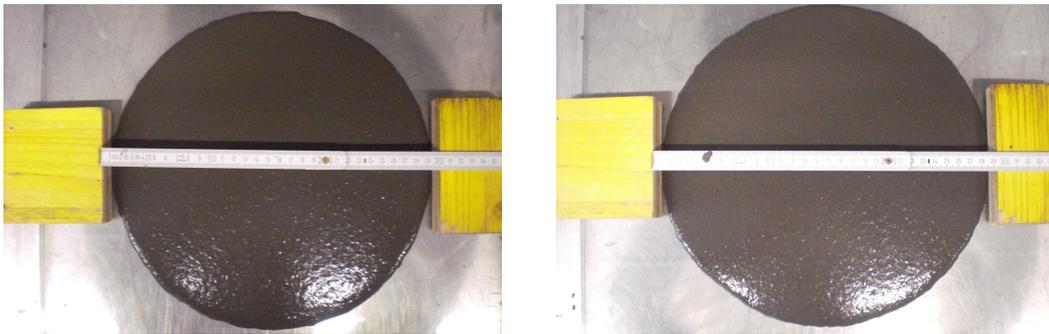


Abb. 4.16: Einfluss der Quarzmehle auf die Betoneigenschaften



a) Hägermann Setzmaß der Mischung MQ1      b) Hägermann Setzmaß der Mischung MQ3

Abb. 4.17: Vergleich Hägermann Setzmaß der Mischungen MQ1 und MQ3

Die Packungsdichte für die folgenden Betrachtungen wurde anhand der vereinfachten Gleichung 4.2 berechnet.

$$D = 1 - \varepsilon \quad \text{wobei} \quad \varepsilon = \left( 1 - \frac{V_W + V_{FM}}{V_{Leim}} \right) \quad (4.2)$$

mit

- $D \dots$  Packungsdichte
- $\varepsilon \dots$  Hohlraumgehalt
- $V_W \dots$  Volumen des Wasser
- $V_{FM} \dots$  Volumen des Fließmittel
- $V_{Leim} \dots$  Leimvolumen

Betrachtet man den Zusammenhang zwischen der Packungsdichte und der Druckfestigkeit, so lässt sich erkennen, dass tendenziell eine höhere Packungsdichte auch zu einer höheren Druckfestigkeit führt. Dies ist auf das geringere Hohlraumvolumen und damit auch weniger Schwachstellen zurückzuführen (siehe Abbildung 4.18). Hingegen kann kein offensichtlicher Zusammenhang zwischen der Packungsdichte und dem Hägermann-Setzmaß gefunden werden (siehe Abbildung 4.19).

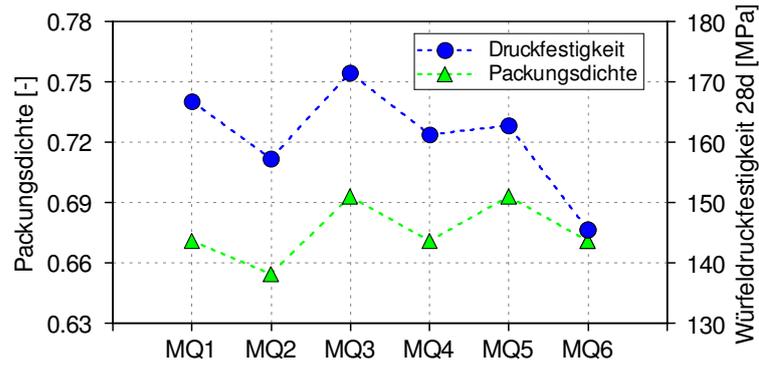


Abb. 4.18: Zusammenhang Packungsdichte und Druckfestigkeit

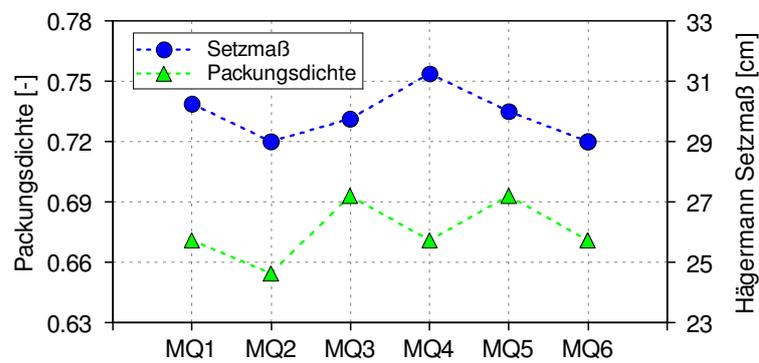


Abb. 4.19: Zusammenhang Packungsdichte und Fließfähigkeit

Auf Grund der besten Kombination zwischen Verarbeitbarkeit und Druckfestigkeit wurde die Mischung MQ3 als Nullbeton- bzw. Standardrezeptur selektiert. Alle weiteren Versuchsreihen bauen somit auf folgender Zusammensetzung auf:

Ausgangsstoffe		MQ3
Zement	[kg/m <sup>3</sup> ]	720
MS	[%] <sup>1</sup>	13,0
QM 6	[%] <sup>1</sup>	30,0
QM 9	[%] <sup>1</sup>	15,0
FM	[%] <sup>1</sup>	4,0
Wasser	[-]	0,25
$V_{Leim}$	[l/m <sup>3</sup> ]	607,6
<hr/>		
$V_{Zuschlag}$	[l/m <sup>3</sup> ]	392,4
QS 1	[%] <sup>2</sup>	25,0
QS 3	[%] <sup>2</sup>	75,0

<sup>1</sup> Gewichtsprozent vom Zementgehalt

<sup>2</sup> Volumenprozent vom Zuschlagsvolumen

Tab. 4.9: Nullbetonrezeptur MQ3

### 4.2.6 Einfluss der Gesteinskörnung

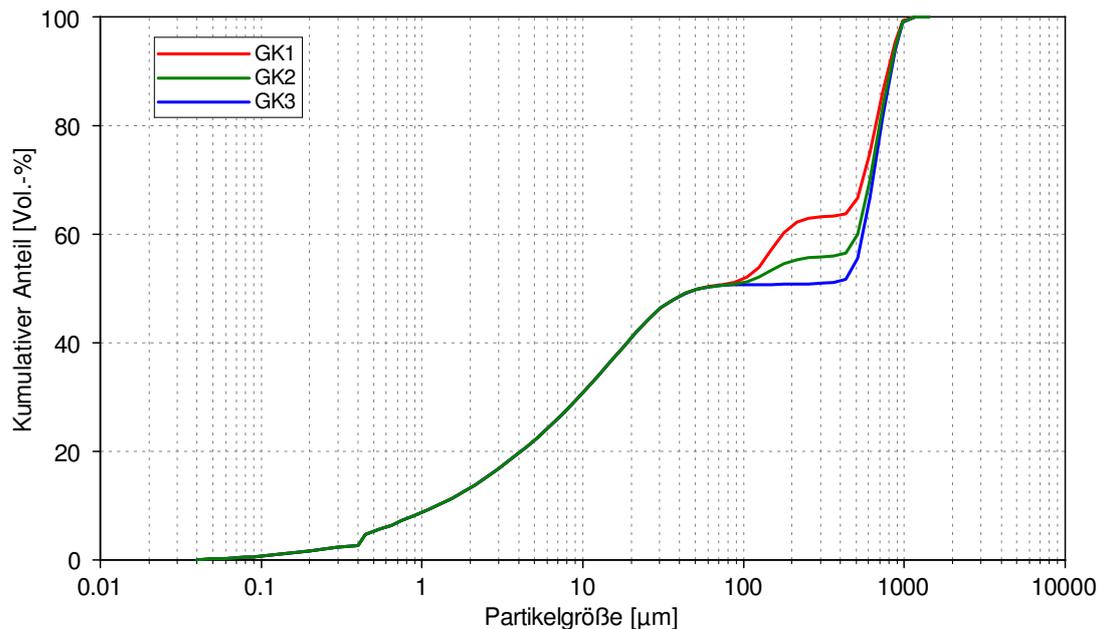
Der Einfluss der Gesteinskörnung wurde anhand einer Modifikation der Quarzsandzusammensetzung überprüft. Dazu wurde die Nullbetonrezeptur aus dem Kapitel 4.2.5 verwendet.

Ausgangsstoffe		GK1	GK2	GK3
W&P CEM I 42.5 R	[kg/m <sup>3</sup> ]	720	720	720
MS RW Füller	[%] <sup>1</sup>	13,0	13,0	13,0
QM 6	[%] <sup>1</sup>	30,0	30,0	30,0
QM 9	[%] <sup>1</sup>	15,0	15,0	15,0
FM BT3 PR H500	[%] <sup>1</sup>	4,0	4,0	4,0
Wasser	[-]	0,25	0,25	0,25
$V_{Leim}$	[l/m <sup>3</sup> ]	608,6	608,6	608,6
$V_{Zuschlag}$	[l/m <sup>3</sup> ]	391,4	391,4	391,4
QS 1	[%] <sup>2</sup>	25,0	10,0	-
QS 3	[%] <sup>2</sup>	75,0	90,0	100,0
Druckfestigkeit 28d	[MPa]	163,4	159,0	154,3
$t_{200}$	[s]	6,5	6,5	7,0
Hägermann-Setzmaß	[cm]	31,00	30,50	30,50

<sup>1</sup> Gewichtsprozent vom Zementgehalt

<sup>2</sup> Volumenprozent vom Zuschlagsvolumen

**Tab. 4.10:** Betonrezepturen zur Bestimmung des Einflusses der Gesteinskörnung



**Abb. 4.20:** Sieblinien zur Bestimmung des Einflusses der Gesteinskörnung

Aus den in den Abbildungen 4.20 und 4.21 dargestellten Ergebnissen ist klar ersichtlich, dass der Einsatz des Feinkristallquarzsandes für die Erhöhung der Druckfestigkeit dringend notwendig ist. Dagegen ändert sich die Fließfähigkeit des Betons bei Änderung der Gesteinskörnung nur sehr gering.

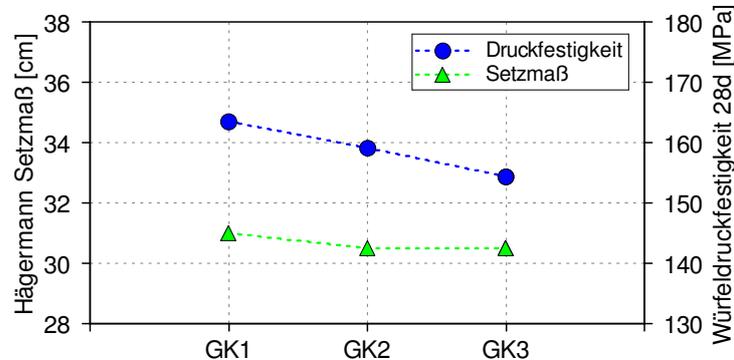


Abb. 4.21: Einfluss der Gesteinskörnung auf die Betoneigenschaften

### Leimfestigkeiten

Des Weiteren wurden Druckfestigkeitsprüfungen am reinen Leim abgewickelt, um einen Vergleich zwischen der Rezeptur ohne Zuschlag und jener mit Gesteinskörnung ziehen zu können. Die Probekörper dieser Versuchsserie wurden anhand der Nullbetonrezeptur aus dem Kapitel 4.2.5 hergestellt. Untersucht wurden vier Mischungen, wobei alle möglichen Kombinationen zwischen zwei Zementarten (W&P CEM I 42.5 R (W&P); Lafarge CEM I 52.5N (LA) ) und zwei Mikrosilikatypen (RW silicium GmbH „RW-Füller“ (RW); Elkem Microsilica<sup>®</sup> Grade 971U (EL) ) ausgeführt wurden.

Abbildung 4.22 zeigt, dass das Mikrosilika der Firma Elkem zu geringfügig höheren Druckfestigkeiten als jenes der Firma RW silicium GmbH führt. Des Weiteren zeigt sich im Vergleich der beiden Zementarten, dass die Mischungen mit dem Zement CEM I 52.5N der Firma Lafarge höhere Festigkeiten erreichen. Auffallend ist darüber hinaus die Tatsache, dass die Probekörper aus reinem Leim Druckfestigkeiten aufweisen, welche nur in einem geringen Maße kleiner sind als jene mit Zuschlägen.

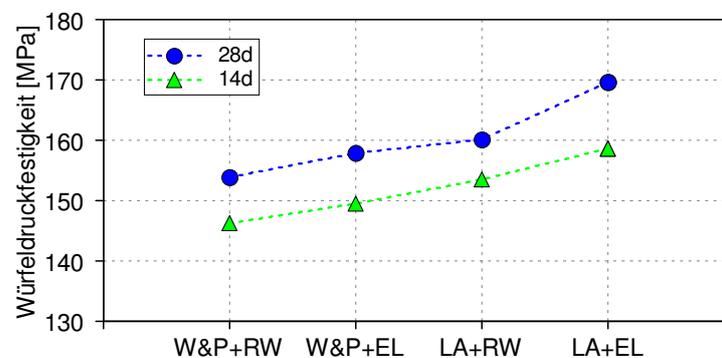
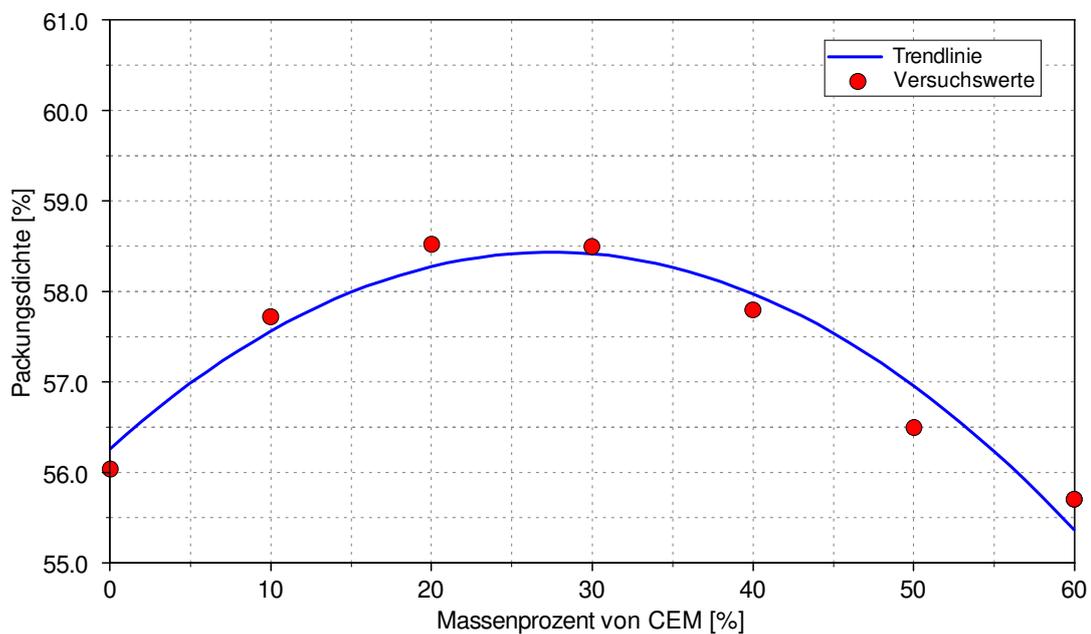


Abb. 4.22: Leimfestigkeiten

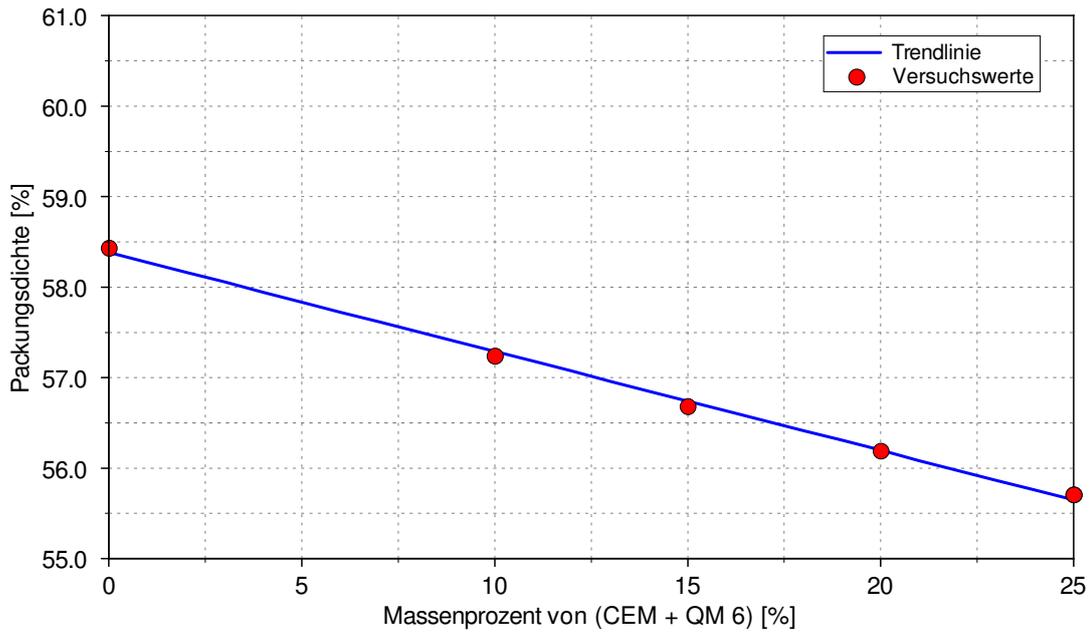
### 4.3 Untersuchungen Leimzusammensetzung

Am Institut für Betonbau an der Technischen Universität Graz wurden parallel zur vorliegenden Arbeit von Herrn Hoang Kim weitere Untersuchungen zur Leimzusammensetzung durchgeführt. Hierbei wurde anhand des Mischenergieverfahrens die Packungsdichte berechnet. Es wurden drei Testserien durchgeführt, wobei der optimale Gehalt an Quarzmehl und Mikrosilika bestimmt wurde. Als Ausgangsstoffe dienten der Zement CEM I 52.5N C<sub>3</sub>A-frei der Firma Lafarge, das Mikrosilika Grade 971U der Firma Elkem und die Quarzmehle QM 6 und QM 9.

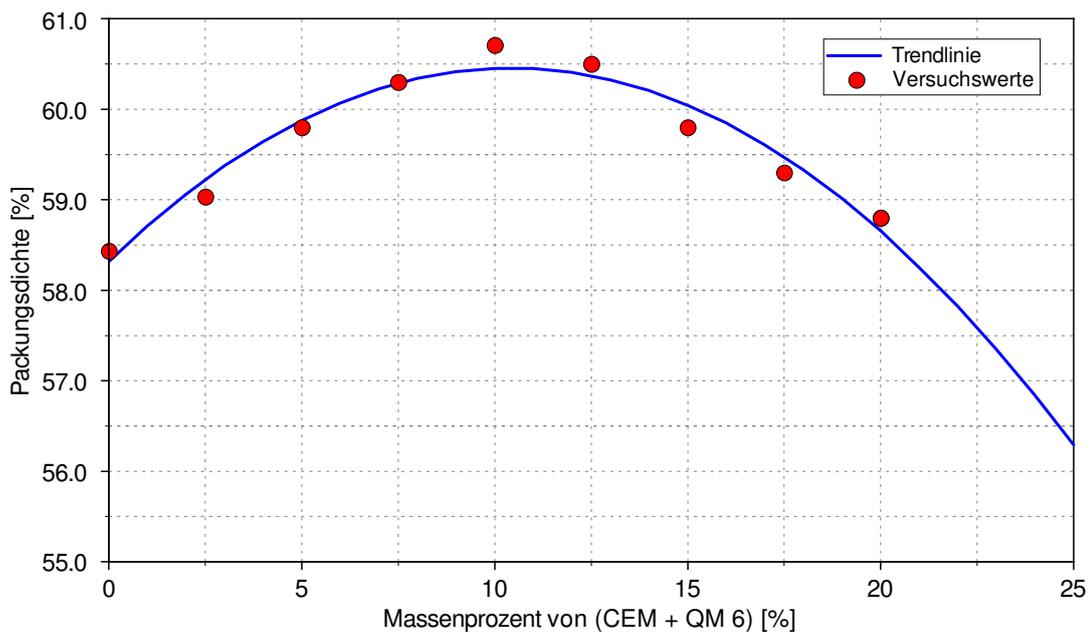
In den Abbildungen 4.23 und 4.24 ist ersichtlich, dass die höchste Packungsdichte mit einem Gehalt an QM 6 von 28 Massenprozent vom Zement erreicht werden kann. Wird das Quarzmehl QM 9 dazugegeben sinkt die Packungsdichte ab. Abbildung 4.25 zeigt des Weiteren, dass bei ca. 10% bezogen auf die Gesamtmasse vom Zement und 28% Quarzmehl QM 6 ein Maximum erreicht wird. Umgerechnet auf Massenprozent vom Zementgehalt ergibt sich ein Wert von rund 13%. Die theoretisch optimale Rezeptur kann somit mit 13% Mikrosilika und 28% Quarzmehl QM 6 erreicht werden. Aufgrund der Tatsache, dass nur Versuchsergebnisse mit 13% Mikrosilika und 30% Quarzmehl vorliegen (Mischung MQ1 aus Kapitel 4.2.5), wird diese als alternative Premixrezeptur vorgeschlagen.



**Abb. 4.23:** Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Quarzmehl QM 6



**Abb. 4.24:** Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Quarzmehl QM 9



**Abb. 4.25:** Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Mikrosilika Elkem Grade 971U

#### 4.4 Premixzusammenstellung

Der Premix wird aus dem Mikrosilika und verschiedenen Quarzmehlen zusammengesetzt. In einer ersten Betrachtung wurde auch der Quarzsand QS 1 als Premixbestandteil vorgesehen. Aufgrund der Tatsache, dass sich dieser Quarzsand mit der Zeit im Silo bzw. Bigbag absetzen könnte, wurde er aus der Premixzusammenstellung gestrichen.

Aufgrund der vorhergehenden Untersuchungen und den daraus gewonnenen Erkenntnissen werden folgende zwei Premixzusammensetzungen zur Herstellung von UHPC vorgeschlagen:

Ausgangsstoffe		Premix A	Premix B
MS	[%] <sup>1</sup>	22,4	30,2
QM 6	[%] <sup>1</sup>	51,7	69,8
QM 9	[%] <sup>1</sup>	25,9	0,0
Dichte	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,545	2,515

<sup>1</sup> Gewichtsprozent

**Tab. 4.11:** Premixzusammensetzung

Daraus ergeben sich folgende Rezepturen, welche die Herstellung von UHPC mit mittleren Druckfestigkeiten von über 170 N/mm<sup>2</sup> ohne Stahlfasern und stark selbstverdichtenden Eigenschaften erlauben:

Ausgangsstoffe		Rezeptur A	Rezeptur B
Zement	[kg/m <sup>3</sup> ]	720	720
Premix	[%] <sup>1</sup>	58,0 <sup>3</sup>	43,0 <sup>4</sup>
Fließmittel	[%] <sup>1</sup>	4,0	4,0
Wasser	[-]	0,25	0,25
$V_{Leim}$	[l/m <sup>3</sup> ]	607,6	559,7
$V_{Zuschlag}$	[l/m <sup>3</sup> ]	392,4	440,3
QS 1	[%] <sup>2</sup>	25,0	25,0
QS 3	[%] <sup>2</sup>	75,0	75,0

<sup>1</sup> Gewichtsprozent vom Zementgehalt

<sup>2</sup> Volumenprozent vom Zuschlagsvolumen

<sup>3</sup> Premix A

<sup>4</sup> Premix B

**Tab. 4.12:** Rezepturen mit Premix

# 5 Eigenschaften und Anwendung des Premix

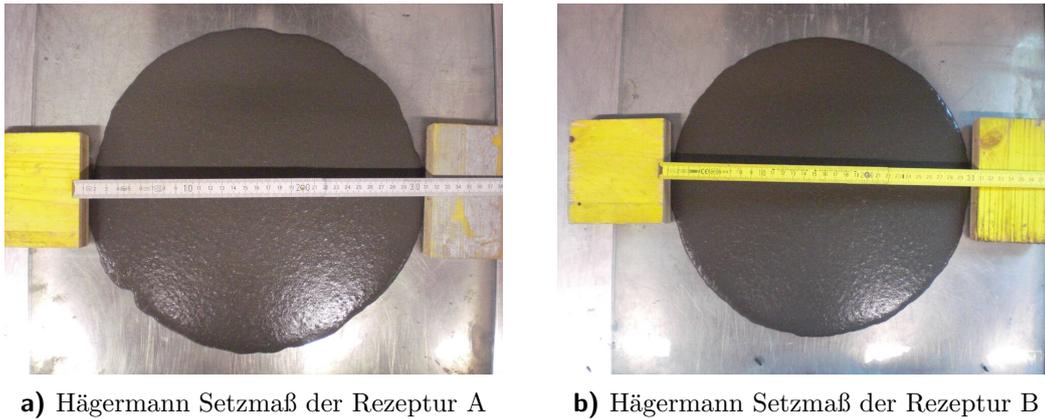
## 5.1 Eigenschaften des Premix

Anhand der im Kapitel 4.4 dargelegten Rezepturen wurde die Druckfestigkeit des UHPC unter Verwendung der jeweiligen Premixzusammensetzung getestet. Aufgrund der Ergebnisse, welche in den Kapitel 5.3.1 und 5.4 näher erläutert werden, wurde für diese Untersuchungen der Zement CEM I 52,5N der Firma Lafarge aus dem Werk Mannersdorf und das Mikrosilika RW-Füller Q1 der RW silicium GmbH verwendet.

In Tabelle 5.1 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zusammengefasst. Für die Rezeptur A ergibt sich eine mittlere Festigkeit von rund  $175 \text{ N/mm}^2$ , welche deutlich unter jener der Rezeptur B mit ca.  $185 \text{ N/mm}^2$  liegt. Das Hägermann Setzmaß der beiden Rezepturen beläuft sich auf  $31,75 \text{ cm}$  für die Rezeptur A und  $30,75 \text{ cm}$  für die Rezeptur B, wobei jene der Mischung A nach drei Minuten und jene der Mischung B nach zwei Minuten gemessen wurde. Mit Hilfe der Studentverteilung wurde das 5%-Quantil beider Rezepturen bestimmt, welches der charakteristischen Druckfestigkeit entspricht. Aufgrund der geringen Probekörperanzahl und der großen Streuung wird bei der Mischung A nur ein Wert von  $145,8 \text{ N/mm}^2$  erreicht. Das 5%-Quantil der Rezeptur B hingegen hat einen deutlich höheren Wert von knapp  $179 \text{ N/mm}^2$ . Für die Mischung B wurde zeitgleich ein E-Modul von  $51.600 \text{ N/mm}^2$  bestimmt.

Ergebnisse		Rezeptur A	Rezeptur B
Hägermann Setzmaß	[cm]	31,75	30,75
$t_{200}$	[s]	6,0	6,0
Druckfestigkeit Probe 1	[MPa]	176,8	187,4
Druckfestigkeit Probe 2	[MPa]	184,9	184,4
Druckfestigkeit Probe 3	[MPa]	164,7	181,9
Druckfestigkeit Probe 4	[MPa]	-	187,8
Mittelwert	[MPa]	175,5	185,4
Standardabweichung	[MPa]	10,166	2,769
Variationskoeffizient	[%]	5,794	1,494
5%-Quantil	[MPa]	145,8	178,9

**Tab. 5.1:** Eigenschaften der Premixrezeptur



a) Hägermann Setzmaß der Rezeptur A

b) Hägermann Setzmaß der Rezeptur B

Abb. 5.1: Vergleich Hägermann Setzmaß der Rezepturen A und B

## 5.2 Großversuch Graspontner

In einem Großversuch im Fertigteilwerk des Unternehmens Graspontner wurde die Praxistauglichkeit des Premix ermittelt. Dazu wurden für zwei verschiedene Mischungen Würfel mit einer Kantenlänge von 100 mm und Prismen mit den Abmessungen 160x40x40 mm zur Bestimmung der zeitlichen Druckfestigkeits- bzw. Biegezugfestigkeitsentwicklung, sowie Zylinder mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 200 mm zur Bestimmung des E-Moduls und der Spaltzugfestigkeit hergestellt. In Tabelle 5.2 ist die Betonzusammensetzung der beiden Mischungen dargestellt.

Ausgangsstoffe		M1	M2
W&P CEM I 42.5N	[kg/m <sup>3</sup> ]	720	-
Leube CEM I 52.5R	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	795
Premix A <sup>3</sup>	[%] <sup>1</sup>	58,0	57,3
FM BT3 Premment H500	[%] <sup>1</sup>	4,0	4,2
VZ BT3 Premtard VZ-G100/300	[%] <sup>1</sup>	1,0	0,0
Wasser	[-]	0,25	0,27
$V_{Leim}$	[l/m <sup>3</sup> ]	602,7	684,2
Stahlfasern 9/0,15 mm	[Vol.-%]	0,0	0,88
$V_{Zuschlag}$	[l/m <sup>3</sup> ]	397,3	307,0
QS 1	[%] <sup>2</sup>	35,0	30,0
QS 3	[%] <sup>2</sup>	65,0	70,0
Druckfestigkeit 28d	[MPa]	156,4	137,2
Biegezugfestigkeit 28d	[MPa]	13,7	10,6
Hägermann-Setzmaß	[cm]	24,50	25,25

<sup>1</sup> Gewichtsprozent vom Zementgehalt

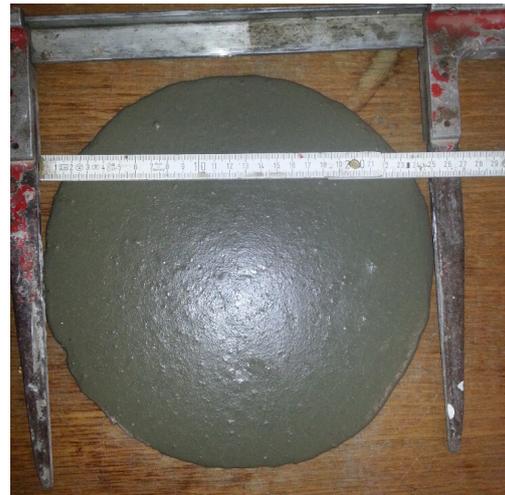
<sup>2</sup> Volumenprozent vom Zuschlagsvolumen

<sup>3</sup> Premix A mit MS Elkem Grade 971U

Tab. 5.2: Betonrezepturen Großversuch



a) Hägermann Setzmaß der Mischung M1



b) Hägermann Setzmaß der Mischung M2

**Abb. 5.2:** Vergleich Hägermann Setzmaß der Mischungen M1 und M2



a) Oberfläche der Mischung M1



b) Oberfläche der Mischung M2

**Abb. 5.3:** Vergleich Oberfläche der Mischungen M1 und M2

Aufgrund der Tatsache, dass nicht alle Materialien in ausreichender Menge im Werk vorhanden waren, mussten die im Kapitel 4.4 vorgeschlagenen Rezepturen angepasst werden. Bei der Mischung M1 wurde der Zement CEM I 42.5N des Unternehmens W&P verwendet. Für die Mischung M2 musste hingegen der Standardzement aus dem Silo des Unternehmens Graspöntner mit einer Mahlfeinheit von  $5.500 \text{ cm}^2/\text{g}$  und einer 28-Tage-Normdruckfestigkeit von rund  $62 \text{ N/mm}^2$  benutzt werden (CEM I 52.5R der Firma Leube). Da dieser Zement einen sehr hohen Wasseranspruch hat, musste das Leimvolumen und der Wasser-Zementwert erhöht werden.

Der Stahlfasergehalt der Mischung M2 musste angesichts des großen Betonvolumens und der daraus folgenden großen Menge an Stahlfasern und der begrenzten Fördermenge des Zugabeförderbandes auf knapp 0,9% beschränkt werden. Es hätte sonst die Gefahr bestanden, dass die Stahlfasern sich nicht gleichmäßig im Beton verteilen und Konglomerate bilden. In Abbildung 5.4 sind die Stahlfasern in der Bruchfläche dargestellt.

Des Weiteren zeigte sich am Ende des Mischvorgangs, dass die Dichtung des Mischers

nicht ganz geschlossen war und deswegen weniger Wasser zur Verfügung stand. Das erklärt auch die geringe Fließfähigkeit des Betons im Vergleich zu den Laborversuchen. Angesichts dieser Komplikationen sind die Festigkeiten der untersuchten Proben auch geringer als jene der im Labor hergestellten.



**Abb. 5.4:** Bruchfläche der Mischung M2 nach der Biegezugfestigkeitsprüfung

### 5.2.1 Zeitliche Festigkeitsentwicklung

Die Festigkeitsentwicklung von normalfestem Beton hängt im Allgemeinen vom  $w/z$ -Wert, der Zementart und der Nachbehandlungstemperatur ab. Zur Untersuchung der zeitlichen Festigkeitsentwicklung von UHPC müssen noch andere Parameter berücksichtigt werden. Zum einen verzögert die große Menge an PCE-Fließmittel das Erstarren und Erhärten des Betons und zum anderen beeinflusst die puzzolanische Reaktion durch das Mikrosilika die Entwicklung. Der Einfluss des Fließmittels auf den Verlauf kann erst nach sieben Tagen vernachlässigt werden. [3]

Laut CEB-FIB Model Code 1990 [46] kann die zeitliche Festigkeitsentwicklung von Normalbeton, welcher bei 20 °C gelagert wurde, nach Gleichung 5.1 bestimmt werden.

$$f_c(t) = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^n \right] \right\} \cdot f_{c,28d} \quad (5.1)$$

mit

$f_c(t) \dots$	Festigkeit zum Zeitpunkt $t$
$f_{c,28d} \dots$	Festigkeit nach 28 Tagen
$s \dots$	Beiwert zur Beschreibung der Aktivität des Zementes
$n \dots$	Beiwert zur Beschreibung des Verlaufs der Festigkeitsentwicklung

Laut Model Code kann für den Parameter  $n$  ein Wert von 0,5 angenommen werden und der Beiwert  $s$  ist für die benutzten Zemente auf 0,2 festgelegt. Bei der Festigkeitsentwicklung von UHPC müssen noch die zuvor erwähnten Einflüsse des Fließmittels und des Mikrosilikas berücksichtigt werden und deswegen sollten die Beiwerte  $s$  und  $n$  angepasst werden. In [3] wurden für UHPC durch Regression Werte von 0,217 für  $s$  und 0,549 für  $n$  ermittelt. Für die Mischung M1 ergeben sich für die Druckfestigkeitsentwicklung die

Parameter zu 0,306 für  $s$  und 0,401 für  $n$  und für die Biegezugfestigkeitsentwicklung zu 0,544 bzw. 0,203. Der Fit der Messwerte der Mischung M2 liefert Ergebnisse, die weit von den vorgeschlagenen Parametern abweichen ( $n < 0,01$  und  $s > 10$ ). Aufgrund des hohen Zementgehaltes der Rezeptur M2 kam es nach dem Betonieren zu einer großen Wärmeentwicklung, welche offensichtlich zu Mikrorissen führte. Die Festigkeitsentwicklung für die Mischung M2 ist am Anfang sehr rapide, flacht mit der Zeit allerdings schnell ab.

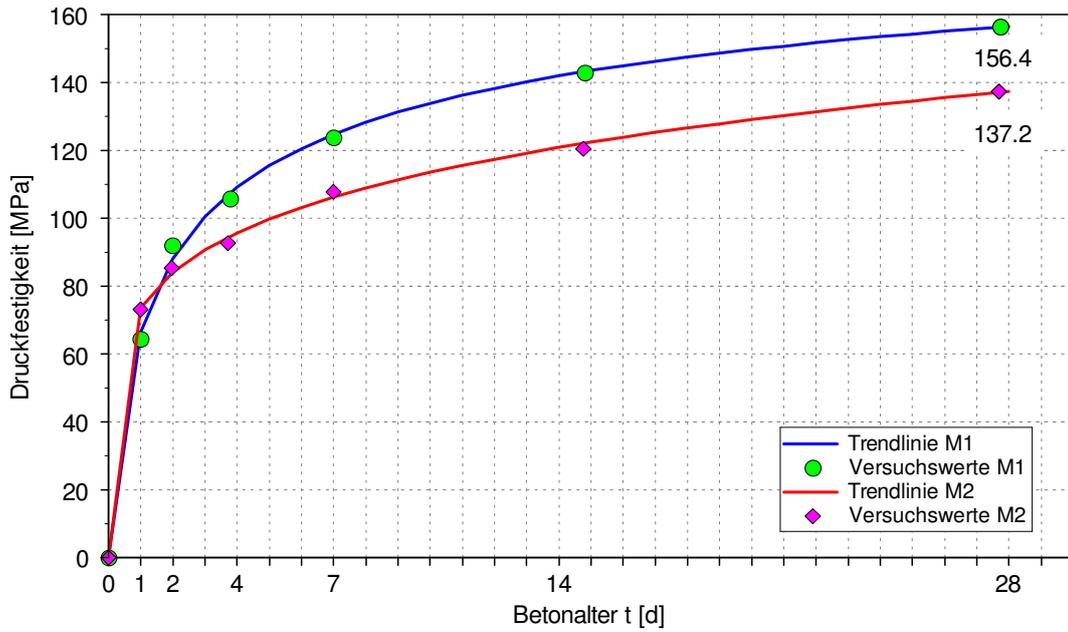


Abb. 5.5: Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit

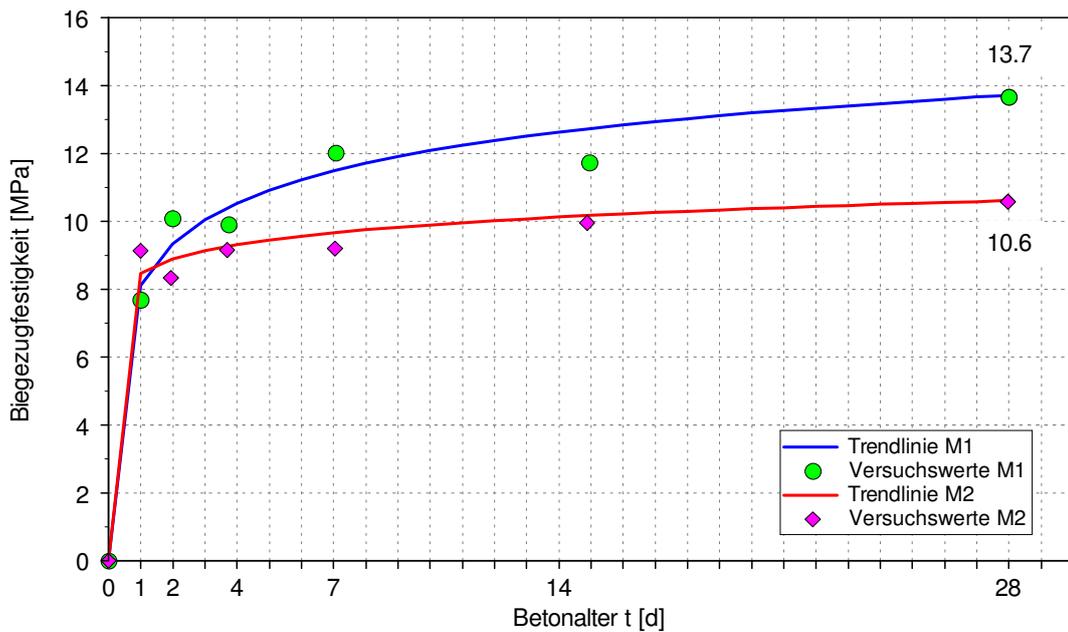


Abb. 5.6: Zeitliche Entwicklung der Biegezugfestigkeit



**Abb. 5.7:** Bruchform der Mischung M1 nach der Druckfestigkeitsprüfung

### 5.2.2 Materialcharakterisierung

Für die Materialcharakterisierung wurde der E-Modul und die Spaltzugfestigkeit an Zylindern mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 200 mm bestimmt. Gleichzeitig mit der E-Modul-Prüfung wurde die Druckfestigkeit an den selben Zylindern gemessen. In Tabelle 5.3 sind die Versuchsergebnisse zusammengefasst.

Ergebnisse		M1	M2
Spaltzugfestigkeit 36d	[MPa]	9,6	8,6 <sup>1</sup>
Zugfestigkeit 36d <sup>2</sup>	[MPa]	8,8	7,8 <sup>1</sup>
E-Modul 28d	[MPa]	43.750	37.300
Druckfestigkeit 28d, Zylinder	[MPa]	154,5	134,0
Druckfestigkeit 28d, Würfel	[MPa]	156,4	137,2

<sup>1</sup> nur 1 Probekörper

<sup>2</sup> Rückrechnung über Spaltzugfestigkeit mit dem Faktor 1/1,1

**Tab. 5.3:** Materialcharakterisierung Großversuch

Der E-Modul für UHPC liegt, wie zuvor schon erwähnt, normalerweise im Bereich zwischen 43.000 und 55.000 N/mm<sup>2</sup>. Angesichts der geringen Druckfestigkeit der Proben erreicht auch der Elastizitätsmodul nur Werte von 43.750 N/mm<sup>2</sup> bzw. 37.300 N/mm<sup>2</sup> für die Mischung M1 bzw. M2. Laut den Untersuchungen von Ma [3] lässt sich der E-Modul  $E_{c0}$  von feinkörnigem UHPC mit Quarzsandzuschlag anhand folgender Gleichung aus der Druckfestigkeit  $f_c$  ableiten:

$$E_{c0} = 8.800 f_c^{1/3} \quad (5.2)$$

Für die geprüften Mischungen ergibt sich anstelle des Vorfaktor 8.800 ein Wert von

8.150 für die Mischung M1 und 7.300 für die Mischung M2. Diese Abweichungen und der geringe Elastizitätsmodul können auf die zuvor beschriebenen nicht optimalen Bedingungen während des Betonierens im Fertigteilwerk des Unternehmens Graspointher zurückgeführt werden. Im Vergleich dazu erreicht eine der Mischung M1 sehr ähnliche Rezeptur unter Laborbedingungen einen Elastizitätsmodul von über 51.000 N/mm<sup>2</sup> (siehe Kapitel 5.1).



a) Zylindrische Probekörper der Mischung M1

b) Zylindrische Probekörper der Mischung M2

**Abb. 5.8:** Zylindrische Probekörper der Mischungen M1 und M2



a) Bruchbild der Mischung M1 nach der Spaltzugprüfung

b) Bruchbild der Mischung M2 nach der Druckfestigkeitsprüfung

**Abb. 5.9:** Bruchbilder der Mischungen M1 und M2

Der Vergleich der Zylinderdruckfestigkeit mit jener der Würfeldruckfestigkeit zeigt, dass die zylindrischen Probekörper mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 200 mm einen Wert von 98% der Würfeldruckfestigkeit (Kantenlänge 100 mm) aufweisen. Die Untersuchungen von Ma [3] ergaben einen ähnlichen Wert von 96%.

Die Spaltzugfestigkeit der Mischung M1 liegt bei 9,6 N/mm<sup>2</sup>. Der Wert von 8,6 N/mm<sup>2</sup> für die Mischung M2 ist mit Vorsicht zu betrachten, da er aus einer Prüfung von nur einem Probekörper stammt. Laut Ma [3] kann bei einer trockenen Lagerung, wie bei diesen Untersuchungen, eine Reduktion von bis zu 25% gegenüber wassergelagerter Proben erwartet werden. Für UHPC liegt die Spaltzugfestigkeit gemäß Schmidt et al. [9] im Größenbereich der zentrischen Zugfestigkeit. Rinder [47] gibt in seiner Veröffentlichung über hochfesten Beton ein Verhältnis von 1,1 zu 1 bezüglich der Spaltzug- bzw. zentrischen Zugfestigkeit an. Anhand dieses Faktors ergeben sich Zugfestigkeiten von 8,8 N/mm<sup>2</sup> bzw. 7,8 N/mm<sup>2</sup> für die Mischungen M1 bzw. M2.

## 5.3 Einfluss verschiedener Materialien

### 5.3.1 Einfluss verschiedener Mikrosilika

In einer weiteren Versuchsserie sollte abgeklärt werden, welches Mikrosilikaprodukt bzw. welcher Mikrosilikagehalt sich am besten für die Herstellung von UHPC mit ausreichend guten Frisch- und Festbetoneigenschaften eignet. Für die Studie wurde der Mikrosilikagehalt der folgenden Produkte zwischen 13% und 18% variiert:

- RW silicium GmbH „RW-Füller“
- RW silicium GmbH „RW-Füller Q1“
- Elkem Microsilica<sup>®</sup> Grade 971U

Die benutzte Rezeptur geht auf die Nullbetonrezeptur aus dem Kapitel 4.4 zurück, wobei für die Mischungen mit den Mikrosilika Elkem Grade 971U (Elkem) und RW-Füller (RW) im Unterschied zur Mischung mit dem Mikrosilika RW-Füller Q1 (RW Q1) kein Quarzsand QS 1 benutzt wurde. Des Weiteren wurde bei der Rezeptur RW Q1 der Zement CEM I 52,5N des Unternehmens Lafarge anstelle des CEM I 42.5R der Firma W&P verwendet. Aufgrund dieser Tatsache sind die Ergebnisse dieser Mischung nicht direkt mit den Resultaten der anderen Rezepturen vergleichbar. Anhand durchgeführter Versuche kann angenommen werden, dass durch den Einsatz des Quarzsandes QS 1 bzw. des Zementes Lafarge CEM I 52,5N eine Festigkeitszunahme von rund 5% bzw. 3% erreicht werden kann (siehe Kapitel 4.2.6 und 5.4). Die Fließfähigkeit ändert sich durch diese Maßnahmen kaum, deswegen wurde für den Vergleich der Druckfestigkeiten der einzelnen Mikrosilikaprodukte eine angepasste Festigkeit anhand der zuvor genannten Reduktionen für die Mischung RW Q1 ermittelt.

Ausgangsstoffe		Elkem	RW	RW Q1
Zement	[kg/m <sup>3</sup> ]	720 <sup>3</sup>	720 <sup>3</sup>	720 <sup>4</sup>
MS	[%] <sup>1</sup>	13-18	13-18	13-18
QM 6	[%] <sup>1</sup>	30,0	30,0	30,0
QM 9	[%] <sup>1</sup>	15,0	15,0	15,0
FM BT3 PR H500	[%] <sup>1</sup>	4,00	4,00	4,00
Wasser	[-]	0,25	0,25	0,25
V <sub>Leim</sub>	[l/m <sup>3</sup> ]	607,6 - 623,6	608,6 - 624,9	601,8 - 618,2
V <sub>Zuschlag</sub>	[l/m <sup>3</sup> ]	376,4 - 392,4	375,1 - 391,4	381,8 - 398,2
QS 1	[%] <sup>2</sup>	0,00	0,00	25,00
QS 3	[%] <sup>2</sup>	100,00	100,00	75,00
Druckfestigkeit 28d; 13,0%	[MPa]	162,8	154,3	175,5
Druckfestigkeit 28d; 15,5%	[MPa]	164,5	155,7	176,9
Druckfestigkeit 28d; 18,0%	[MPa]	163,4	156,2	166,5
Hägermann Setzmaß; 13,0%	[cm]	29,75	30,50	31,75
Hägermann Setzmaß; 15,5%	[cm]	30,25	30,25	29,25
Hägermann Setzmaß; 18,0%	[cm]	30,00	30,00	28,75
t <sub>200</sub>	[s]	7,0	6,0	6,0

<sup>1</sup> Gewichtsprozent vom Zementgehalt

<sup>2</sup> Volumenprozent vom Zuschlagsvolumen

<sup>3</sup> Zement W&P CEM I 42.5R

<sup>4</sup> Zement Lafarge CEM I 52,5N

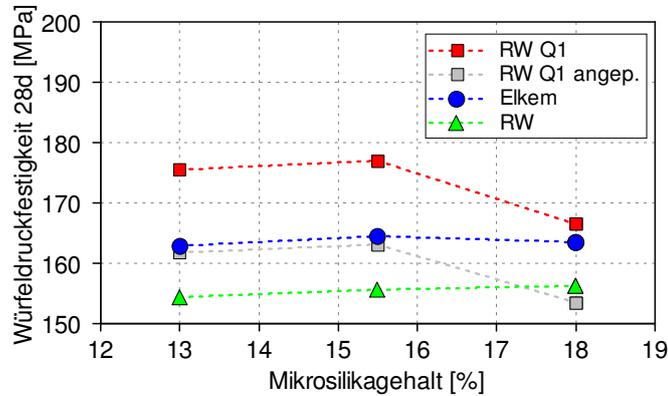
**Tab. 5.4:** Betonrezepturen zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Mikrosilika

Abbildung 5.10 zeigt, dass die Druckfestigkeiten für die Mischung RW Q1 am größten sind. Berücksichtigt man die zuvor erwähnten Umstände für die Festigkeitssteigerung, so sind die Festigkeiten der Rezepturen RW Q1 und Elkem sehr ähnlich. Die Druckfestigkeiten der Mischung mit dem Mikrosilika RW-Füller liegen ca. 5% darunter. Des Weiteren ist zu erkennen, dass der Mikrosilikagehalt in dem untersuchten Bereich relativ wenig Einfluss auf die Festigkeit hat. Eine Ausnahme dabei ist die Mischung RW Q1, welche bei einem Mikrosilikagehalt von 18% deutlich geringere Festigkeiten aufweist.

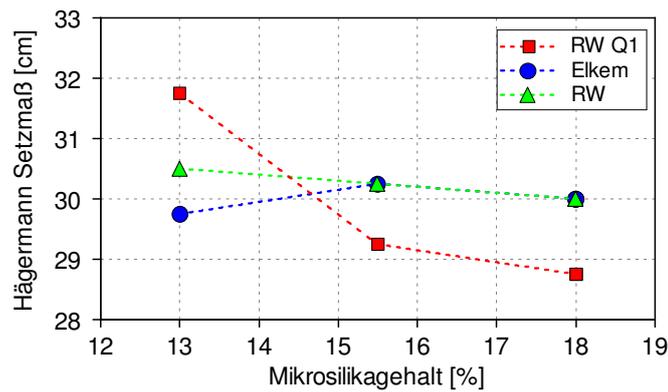
Im Vergleich des Hägermann Setzmaßes (Abbildung 5.11) zeigt sich, dass das Mikrosilika Elkem Grade 971U und RW-Füller ähnliche Fließeigenschaften haben, die unabhängig vom Mikrosilikagehalt sind. Die Mischung mit dem Mikrosilika RW-Füller Q1 dagegen hat bei 13% eine höhere Fließfähigkeit als jene der beiden anderen Produkte. Das Setzmaß nimmt aber mit zunehmenden Mikrosilikagehalt ab.

Für die Verwendung im vorgestellten Premix kommen somit nur das Mikrosilika Elkem Grade 971U und jenes des Unternehmens RW silicium GmbH mit dem Produktnamen RW-Füller Q1 in Frage. Beide weisen eine ähnliche Druckfestigkeit auf und bei den vorgeschlagenen 13% an Mikrosilika haben beide eine gute Fließfähigkeit, wobei jene

des RW-Füller Q1 geringfügig größer ist. Aufgrund der Tatsache, dass das Produkt der Firma Elkem im Gegensatz zu jenem des Unternehmens RW Silicium GmbH sehr schwer erhältlich ist und es zu Lieferengpässen kommen kann, wird die Verwendung des Mikrosilikas RW-Füller Q1 vorgeschlagen.



**Abb. 5.10:** Einfluss des Mikrosilikagehalts und -typs auf die Betondruckfestigkeit



**Abb. 5.11:** Einfluss des Mikrosilikagehalts und -typs auf die Betonfließfähigkeit

### 5.3.2 Einfluss des Basaltsplitts

Für die Herstellung von grobkörnigen UHPC mit einem Größtkorn größer als 1 mm wird oft Basaltsplitt verwendet. Aus diesem Grund wurde der Einfluss des Basaltsplitts auf die Betoneigenschaften untersucht. Dazu wurden Vergleichstests durchgeführt, bei denen ein Teil des Quarzsandes durch Basalt (0-2 mm bzw. 2-4 mm) ersetzt wurde. In Tabelle 5.5 sind die verwendeten Rezepturen aufgelistet. Die in Abbildung 5.12 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die Druckfestigkeit unter Einsatz des Basaltsplitts mit einer Korngröße von 0 bis 2 mm konstant bleibt. Wird hingegen der größere Basaltsplitt von 2 bis 4 mm verwendet, steigt die Festigkeit um rund 5% an. Die Fließfähigkeit sinkt unter Verwendung der beiden Gesteinskörnungen nur unwesentlich.

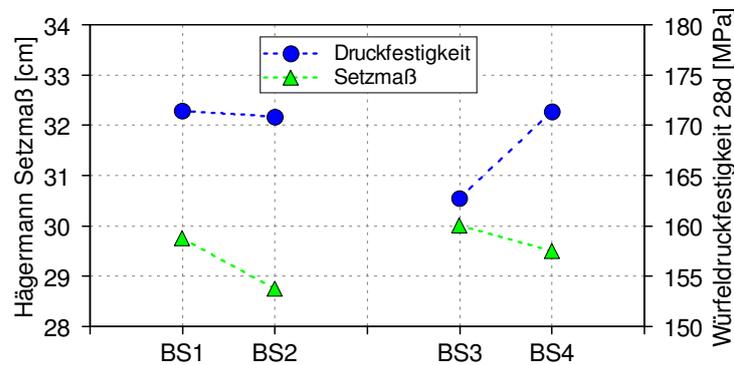
Ausgangsstoffe		BS1	BS2	BS3	BS4
W&P CEM I 42.5 R	[kg/m <sup>3</sup> ]	720	740	695	680
Premix A <sup>4</sup>	[%] <sup>1</sup>	58	58	58 <sup>3</sup>	58 <sup>3</sup>
FM BT3 PR H500	[%] <sup>1</sup>	4,00	4,00	4,00	4,00
Wasser	[-]	0,25	0,25	0,25	0,25
$V_{Leim}$	[l/m <sup>3</sup> ]	607,6	623,9	587,2	575,0
$V_{Zuschlag}$	[l/m <sup>3</sup> ]	392,4	376,1	412,8	425,0
QS 1	[%] <sup>2</sup>	25,00	25,00	25,00	25,00
QS 3	[%] <sup>2</sup>	75,00	25,00	75,00	25,00
Basaltsplitt 0-2 mm	[%] <sup>2</sup>	0,00	50,00	0,00	0,00
Basaltsplitt 2-4 mm	[%] <sup>2</sup>	0,00	0,00	0,00	50,00
Druckfestigkeit 28d	[MPa]	171,4	170,8	162,7	171,3
t <sub>200</sub>	[s]	7,0	10,0	8,5	6,5
Hägermann Setzmaß	[cm]	29,75	28,75	30,00	29,50

<sup>1</sup> Gewichtsprozent vom Zementgehalt

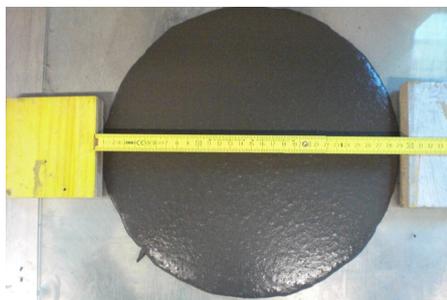
<sup>2</sup> Volumenprozent vom Zuschlagsvolumen <sup>3</sup> Premix A mit QM10 statt QM9

<sup>4</sup> Premix A mit MS Elkem Grade 971U

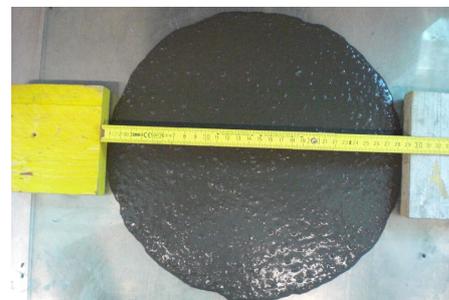
**Tab. 5.5:** Betonrezepturen zur Untersuchung des Einflusses des Basaltsplitts



**Abb. 5.12:** Einfluss des Basaltsplitts auf die Betoneigenschaften



a) Hägermann Setzmaß Mischung BS3 ohne Basaltsplitt



b) Hägermann Setzmaß Mischung BS4 mit Basaltsplitt 2-4 mm

**Abb. 5.13:** Vergleich Hägermann Setzmaß ohne und mit Basaltsplitt

### 5.3.3 Einfluss der Stahlfasern

Wie zuvor schon erwähnt werden zur Steigerung der Duktilität von UHPC Stahlfasern hinzugegeben. Die hier dargestellten Untersuchungen zeigen, dass durch die Zugabe von Stahlfasern auch die Druckfestigkeit erhöht wird. Zurückzuführen ist dieses Phänomen in erster Linie auf die Behinderung der Querdehnung durch die Stahlfasern [11]. In Tabelle 5.6 und Abbildung 5.14 sind die untersuchten Mischungen und deren Frisch- und Festbetoneigenschaften aufgeführt. Die Erhöhung der Druckfestigkeit liegt im Bereich zwischen 4% und 13% und beträgt im Mittel 8,5%. Die Fließfähigkeit des UHPC wird durch den Einsatz von Stahlfasern verringert, wobei die Reduktion des Hägermann Setzmaßes bei einem Stahlfasergehalt von 2% zwischen 0,5 und 2,0 cm liegt.

Ausgangsstoffe		SF1	SF2	SF3	SF4	SF5	SF6
W&P CEM I 42.5 R	[kg/m <sup>3</sup> ]	720	730	720	720	720	720
Premix A	[%] <sup>1</sup>	58 <sup>3</sup>	58 <sup>3</sup>	58 <sup>4</sup>	58 <sup>4</sup>	58 <sup>4</sup>	58 <sup>4</sup>
FM BT3 PR H500	[%] <sup>1</sup>	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Wasser	[-]	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
V <sub>Leim</sub>	[l/m <sup>3</sup> ]	607,6	615,8	608,6	608,6	608,6	608,6
Stahlfasern 13/0,2 mm	[Vol.-%]	0,0	2,0	0,0	2,0	0,0	2,0
V <sub>Zuschlag</sub>	[l/m <sup>3</sup> ]	392,4	364,2	391,4	371,4	391,4	371,4
QS 1	[%] <sup>2</sup>	25,00	25,00	10,00	10,00	0,00	0,00
QS 3	[%] <sup>2</sup>	75,00	75,00	90,00	90,00	100,00	100,00
Druckfestigkeit 28d	[MPa]	171,4	184,8	159,0	179,9	154,3	161,1
t <sub>200</sub>	[s]	7,0	7,5	6,5	11	7,0	12
Hägermann Setzmaß	[cm]	29,75	29,25	30,50	29,50	30,50	28,50

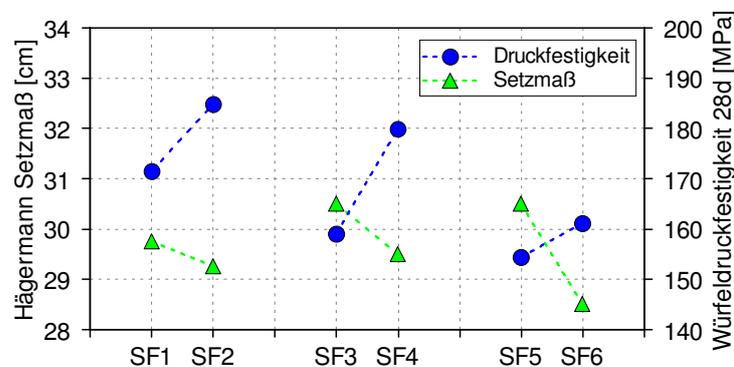
<sup>1</sup> Gewichtsprozent vom Zementgehalt

<sup>2</sup> Volumenprozent vom Zuschlagsvolumen

<sup>3</sup> Premix A mit MS Elkem Grade 971U

<sup>4</sup> Premix A mit MS RW-Füller

**Tab. 5.6:** Betonrezepturen zur Untersuchung des Einflusses der Stahlfasern



**Abb. 5.14:** Einfluss der Stahlfasern auf die Betoneigenschaften

### 5.3.4 Zugabe von Stahlfasern und Basaltsplitt

Untersucht wurde neben dem Einfluss der Stahlfasern und des Basaltsplitts auch die Veränderung der Betoneigenschaften durch gleichzeitige Zugabe beider Komponenten. Die in Tabelle 5.7 dargestellten Rezepturen BF2 und BF3 werden mit der Grundrezeptur BF1 ohne Basaltsplitt und ohne Stahlfasern verglichen. Wie in Abbildung 5.15 ersichtlich ist, sind die in den vorherigen Kapiteln genannten Einflüsse der beiden Zusatzkomponenten auch in Kombination gültig und verstärken sich gegenseitig. Es ist ein positiver Effekt für die Druckfestigkeiten erkennbar, wobei die Fließfähigkeit stark abnimmt. Deswegen sind bei gleichzeitigem Einsatz von Stahlfasern und Basaltsplitt unbedingt vorhergehende Versuche durchzuführen.

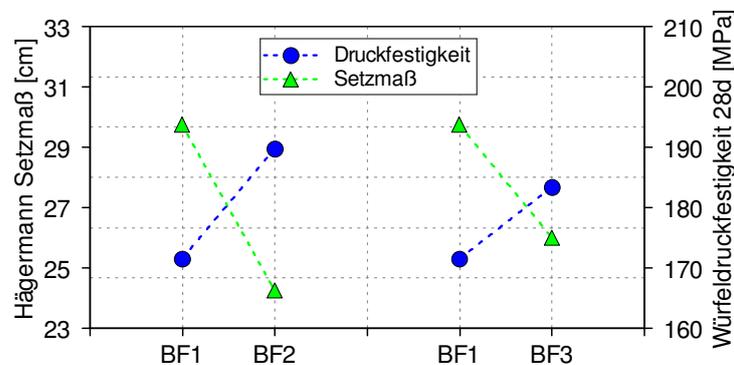
Ausgangsstoffe		BF1	BF2	BF3
W&P CEM I 42.5 R	[kg/m <sup>3</sup> ]	720	720	700
Premix A <sup>3</sup>	[%] <sup>1</sup>	58	58	58
FM BT3 PR H500	[%] <sup>1</sup>	4,00	4,00	4,00
Wasser	[-]	0,25	0,25	0,25
$V_{Leim}$	[l/m <sup>3</sup> ]	607,6	607,6	591,3
<hr/>				
Stahlfasern 13/0,2 mm	[Vol.-%]	0,0	1,5	1,5
<hr/>				
$V_{Zuschlag}$	[l/m <sup>3</sup> ]	392,4	377,4	393,7
QS 1	[%] <sup>2</sup>	25,00	15,00	17,50
QS 3	[%] <sup>2</sup>	75,00	20,00	52,50
Basaltsplitt 2-4 mm	[%] <sup>2</sup>	0,00	65,00	30,00
<hr/>				
Druckfestigkeit 28d	[MPa]	171,4	189,7	183,3
$t_{200}$	[s]	7,0	21,0	k.A.
Hägermann Setzmaß	[cm]	29,75	24,25	26,00

<sup>1</sup> Gewichtsprozent vom Zementgehalt

<sup>2</sup> Volumenprozent vom Zuschlagsvolumen

<sup>3</sup> Premix A mit MS Elkem Grade 971U

**Tab. 5.7:** Betonrezepturen zur Untersuchung des Einflusses des Basaltsplitts und der Stahlfasern



**Abb. 5.15:** Einfluss des Basaltsplitts und der Stahlfasern auf die Betoneigenschaften

## 5.4 Zementparameterstudie

Anhand mehrerer Versuchsserien sollte der Einfluss unterschiedlicher Zemente untersucht werden. Verwendet wurden Portlandzemente (CEM I) und Portlandhüttenzemente (CEM II/A-S) der Festigkeitsklassen 42,5 und 52,5 mit normaler (N) und schneller (R) Erhärtung verschiedenster Hersteller (siehe Tabelle 5.8). Bei den Portlandzementen wurden einige  $C_3A$ -freie Zemente benutzt, da sich diese, wie zuvor beschrieben, zur Herstellung von UHPC besonders eignen. Die verwendeten Rezepturen der einzelnen Versuchsserien sind in Tabelle 5.9 zusammengefasst.

Nr.	Hersteller	Zementtyp	VV	V1	V2
			[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
Z1	W&P	CEM I 42.5R $C_3A$ -frei	720	720	720
Z2	Lafarge	CEM I 52.5N $C_3A$ -frei	720	730	730
Z3	Aalborg	CEM I 52.5R $C_3A$ 5%	720	-	700
Z4	Kirchdorfer	CEM I 52.5R	-	-	850
Z5	W&P	CEM II/A-M(S-L) 42.5N	850	850	850
Z6	Lafarge	CEM II/A-S 52.5N	800	830	850
Z7	W&P	CEM II/A-S 52.5N	-	850	850

**Tab. 5.8:** Verwendete Zemente und deren Gehalt für die jeweilige Serie

Mittels einer ersten Vorversuchsserie (VV) sollte jener Zementgehalt im UHPC für die jeweiligen Zemente ermittelt werden, bei dem die Fließfähigkeit annähernd ident ist. Grund dafür ist die Tatsache, dass jeder Zementtyp einen anderen Wasseranspruch hat und unterschiedlich mit dem Fließmittel reagiert. Da alle Inhaltsstoffe des Leims (Wasser, Fließmittel, Quarzmehl, Mikrosilika) vom Zementgehalt direkt abhängig sind, kann das Fließverhalten der Rezeptur über jenen gesteuert werden. In der Serie VV wurde zuerst mit Hilfe des Hobart-Mischers mit einem einfachen Planetenrührsystem eine Referenzmischung mit dem CEM I 42.5R der Firma W&P und einem Zementgehalt von 720 kg/m<sup>3</sup> hergestellt. Es wurde diese einfache Art von Mischer gewählt, da ähnliche Mischer in vielen Betonwerken vorhanden sind und somit eine schnelle Überprüfung der Fließeigenschaften des UHPC mit dem jeweiligen Zement ermöglicht wird. Für die anderen Zemente wurde jeweils eine Mischung mit einem Zementgehalt von 720 kg/m<sup>3</sup> produziert und das Hägermann Setzmaß gemessen. Nun konnte für jeden Zement ein optimaler Gehalt ermittelt werden, bei welchem die Fließfähigkeit in etwa jener der Referenzmischung mit dem CEM I 42.5R entsprach. Hierbei wurde eine Obergrenze des Zementgehaltes von 850 kg/m<sup>3</sup> festgelegt. Unter Verwendung der ermittelten Zementgehalte wurde mit dem Intensivmischer der Marke Eirich ein UHPC mit Stahlfasern hergestellt, wobei die Fließfähigkeit annähernd konstant war (Prüfserie V1 mit MS RW-Füller). Zum Abschluss wurde die Versuchsserie V2 durchgeführt, bei welcher im Gegensatz zur Prüfserie V1 ein Teil des Quarzsandes QS 3 mit der Gesteinskörnung QS 1 ersetzt wurde. Des Weiteren wurde nochmals der Einfluss des Mikrosilikaproduktes

getestet, indem die identischen Rezepturen einerseits mit dem Mikrosilika RW-Füller (V2a) und andererseits mit dem Mikrosilika Grade 971U (V2b) ausgeführt wurden.

Ausgangsstoffe		VV	V1	V2
Zement	[kg/m <sup>3</sup> ]	siehe Tab. 5.8	siehe Tab. 5.8	siehe Tab. 5.8
Premix A	[%] <sup>1</sup>	58,0	58,0	58,0
FM BT3 PR H500	[%] <sup>1</sup>	4,0	4,0	4,0
Wasser	[-]	0,25	0,25	0,25
V <sub>Leim</sub>	[l/m <sup>3</sup> ]	608,6 - 714,8	591,8 - 714,8	591,8 - 714,8
Stahlfasern	[Vol.-%]	0,0	2,0	2,0
V <sub>Zuschlag</sub>	[l/m <sup>3</sup> ]	285,2 - 391,4	265,2 - 388,2	265,2 - 388,2
QS 1	[%] <sup>2</sup>	0,0	0,0	25,0
QS 3	[%] <sup>2</sup>	100,0	100,0	75,0

<sup>1</sup> Gewichtsprozent vom Zementgehalt

<sup>2</sup> Volumenprozent vom Zuschlagsvolumen

**Tab. 5.9:** Betonrezepturen Zementparameterstudie

Tabelle 5.10 gibt eine Übersicht über die Frisch- und Festbetoneigenschaften aller untersuchten Rezepturen. Dabei ist zu beachten, dass die Druckfestigkeiten der Serie VV nach 14 Tagen und jene der Serien V1, V2a und V2b nach 28 Tagen geprüft wurden. Nicht alle Zementtypen wurden bei jeder Serie eingesetzt. Deswegen liegen für die Serie VV bzw. V1 keine Ergebnisse für die Zemente Z4 und Z7 bzw. Z3 und Z4 vor.

Nr.	VV		V1		V2a		V2b	
	DF14 <sup>1</sup>	HÄ <sup>3</sup>	DF28 <sup>2</sup>	HÄ <sup>3</sup>	DF28 <sup>2</sup>	HÄ <sup>3</sup>	DF28 <sup>2</sup>	HÄ <sup>3</sup>
	[MPa]	[cm]	[MPa]	[cm]	[MPa]	[cm]	[MPa]	[cm]
Z1	137,7	30,00	161,1	28,50	174,5	27,75	182,5	27,25
Z2	153,5	29,25	173,5	28,25	176,2	28,50	185,6	28,00
Z3	158,5	32,25	-	-	155,8	30,50	166,6	29,75
Z4	-	-	-	-	145,2	18,25	150,1	18,00
Z5	121,6	27,25	134,5	27,00	137,7	26,75	143,6	25,75
Z6	126,6	26,75	137,0	26,25	139,6	25,25	140,9	25,00
Z7	-	-	140,1	23,50	145,9	22,50	149,1	25,25

<sup>1</sup> Würfeldruckfestigkeit 14d

<sup>2</sup> Würfeldruckfestigkeit 28d

<sup>3</sup> Hägermann Setzmaß

**Tab. 5.10:** Ergebnisse Zementparameterstudie

Die Ergebnisse der Vorversuchsserie (VV) sind in den folgenden Abbildungen zusammengefasst. Abbildung 5.16 zeigt die erforderliche Zementmenge zur Herstellung von UHPC mit annähernd gleichen Fließigenschaften in Abhängigkeit des gemessenen Setzmaßes

der Mischung mit einem Zementgehalt von  $720 \text{ kg/m}^3$ . Anhand Abbildung 5.18 ist des Weiteren ersichtlich, dass eine hohe Druckfestigkeit und Fließfähigkeit nur mit Zementen des Typs CEM I (Z1-Z3) erreicht werden kann. Die Zemente des Typs CEM II (Z5-Z6) erreichen trotz höherem Zementgehalt nicht die Fließfähigkeit und auch nicht die Festigkeit der Mischungen mit den Portlandzementen. Dies ist unter anderem auch in Abbildung 5.17 erkennbar, wobei hier in Abhängigkeit des verwendeten Zementgehaltes in der Prüferie V1 das jeweilige Hägermann Setzmaß aufgetragen ist.

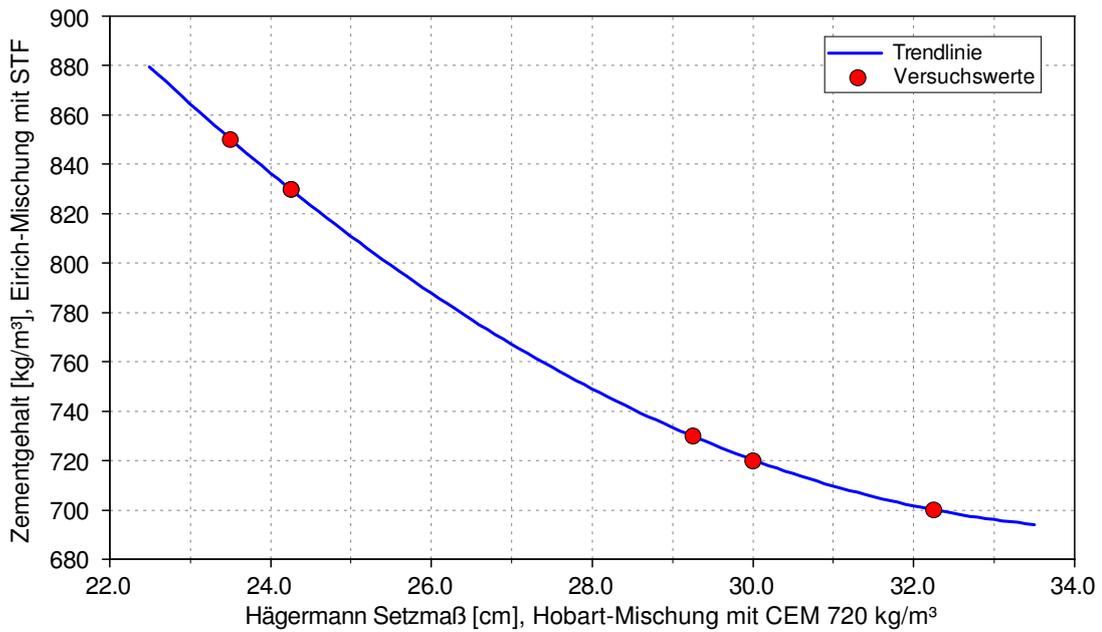


Abb. 5.16: Zusammenhang Fließfähigkeit Hobart-Mischung und Zementgehalt

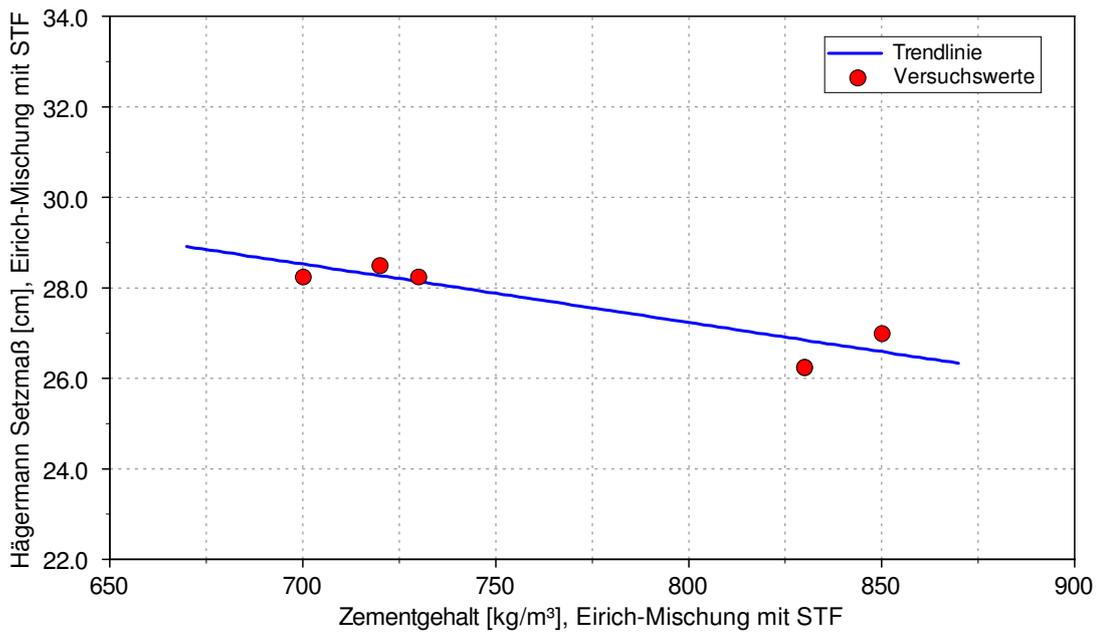


Abb. 5.17: Zusammenhang Zementgehalt und Fließfähigkeit Eirich-Mischung

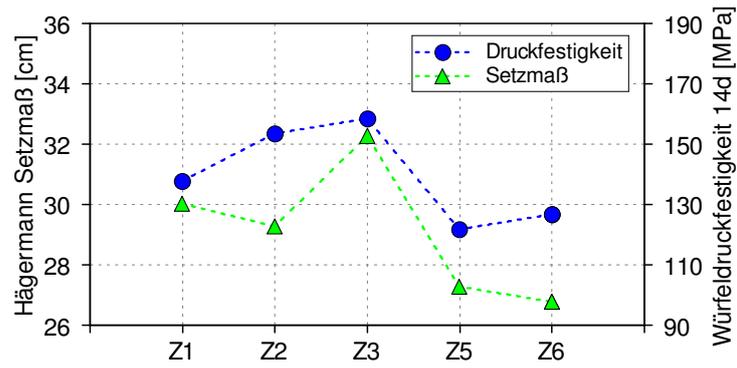


Abb. 5.18: Betoneigenschaften der Versuchsserie VV



a) Hägermann Setzmaß der Mischung VV mit Z1



b) Hägermann Setzmaß der Mischung VV mit Z2



c) Hägermann Setzmaß der Mischung VV mit Z3



d) Hägermann Setzmaß der Mischung VV mit Z5



e) Hägermann Setzmaß der Mischung VV mit Z6

Abb. 5.19: Hägermann Setzmaße der Mischung VV mit verschiedenen Zementen

Die Erkenntnisse aus der Versuchsserie VV können durch die Ergebnisse aus den Serien V1, V2a und V2b bestätigt werden. Grundsätzlich können mit den Portlandzementen Festigkeiten bis zu  $185 \text{ N/mm}^2$  (Lafarge CEM I 52.5N C<sub>3</sub>A-frei) erzielt werden, wo hingegen die Rezepturen mit den Portlandhüttenzementen nur Druckfestigkeiten von bis zu  $150 \text{ N/mm}^2$  erreichen. Ausnahme bildet dabei der verwendete Portlandzement der Firma Kirchdorfer (Z4), der aufgrund der hohen Mahlfeinheit einen extrem hohen Wasseranspruch hat und somit im Vergleich zu anderen Portlandzementen eine geringere Fließfähigkeit und auch Druckfestigkeit aufweist. Die Gegenüberstellung der Serien V1 und V2a zeigt, dass bei den identischen Rezepturen nur durch Ersetzen eines Teils des Quarzsandes QS 3 mit QS 1 eine Steigerung der Druckfestigkeit von rund 3,5% erzielt werden kann. Die Fließfähigkeit nimmt dabei geringfügig ab. Im Unterschied zur Serie V2a wurde in der Serie V2b anstatt des Mikrosilika RW-Füller jenes des Unternehmens Elkem verwendet. Dadurch kann eine weitere Steigerung der Festigkeit von 4% erreicht werden, wobei sich die Fließfähigkeit nur unwesentlich verschlechtert. Die Frisch- und Festbetoneigenschaften der Serien V1, V2a und V2b sind in den Abbildungen 5.20, 5.21 und 5.22 dargestellt.

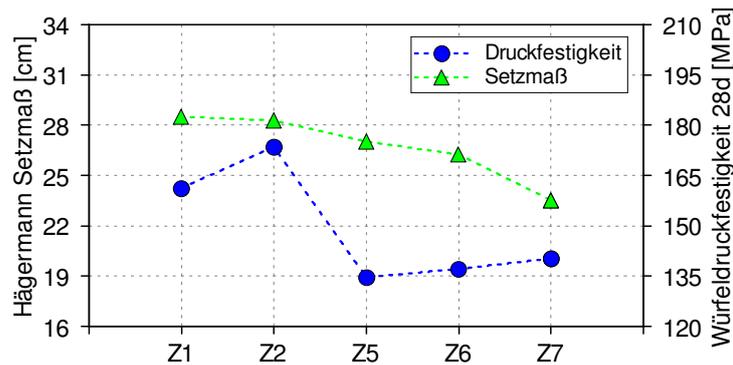


Abb. 5.20: Betoneigenschaften der Versuchsserie V1

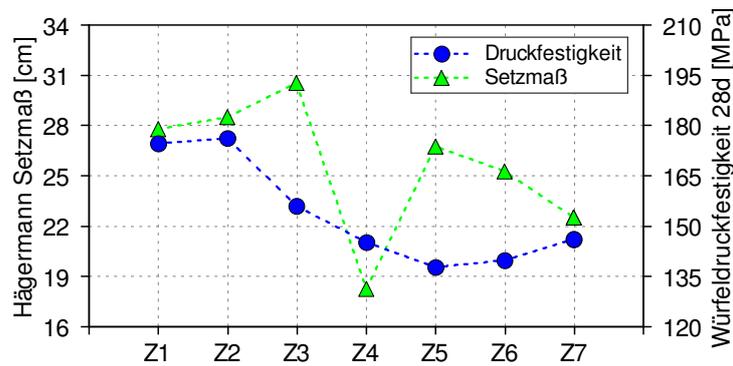
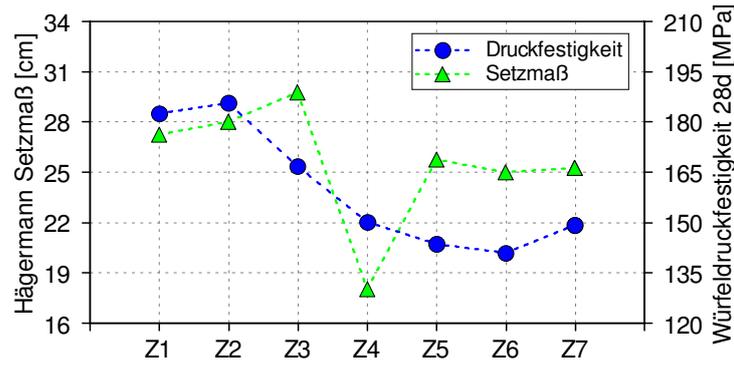


Abb. 5.21: Betoneigenschaften der Versuchsserie V2a



**Abb. 5.22:** Betoneigenschaften der Versuchsserie V2b

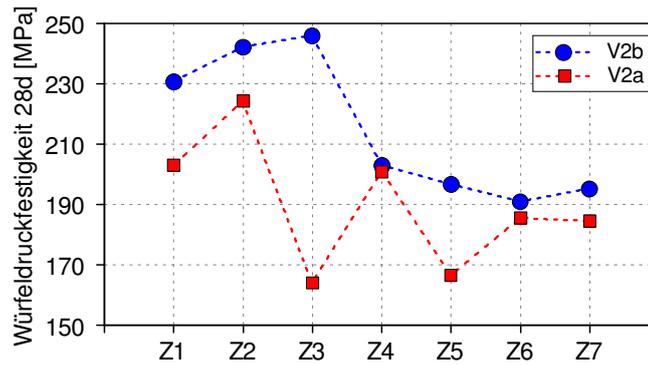
Begleitend zu den Versuchsserien V2a und V2b wurden prismatische Probekörper mit den Abmessungen 160x40x40 mm hergestellt. Diese wurden nach einem Tag ausgeschalt und anschließend einer dreitägigen Wärmebehandlung von 90 °C unterzogen. Die Proben wurden nach der Wärmebehandlung auf ihre Druckfestigkeit geprüft. In Tabelle 5.11 und Abbildung 5.23 sind die Ergebnisse zusammengefasst. Die Resultate sind dabei kritisch zu hinterfragen, da die Probekörper zu schnell abgekühlt sind und somit Mikrorisse entstehen konnten. Die Abkühlung der Probekörper der Versuchsreihe V2a geschah schneller als jene der Serie V2b, weshalb die Druckfestigkeiten der Serie V2a auch mehr streuen und weniger aussagekräftig sind.

Die Versuchsergebnisse der Serie V2b zeigen wiederum die hohen Druckfestigkeiten der Portlandzemente, welche nach der dreitägigen Wärmebehandlung schon eine Druckfestigkeit, gemessen an den Prismenhälften mit einer Auflagerfläche von 40x40 mm, von bis zu 245 N/mm<sup>2</sup> aufweisen. Die Portlandhüttenzemente erreichen höchstens Festigkeiten von rund 200 N/mm<sup>2</sup>.

Nr.	V2a	V2b
	DF4 <sup>1</sup> [MPa]	DF4 <sup>1</sup> [MPa]
Z1	202,9	230,7
Z2	224,2	242,1
Z3	164,0	245,9
Z4	200,8	202,9
Z5	166,5	196,6
Z6	185,4	190,9
Z7	184,5	195,2

<sup>1</sup> Prismendruckfestigkeit 4d

**Tab. 5.11:** Ergebnisse Zementparameterstudie (Wärmebehandlung)



**Abb. 5.23:** Druckfestigkeit der Versuchsserie V2a und V2b nach dreitägiger Wärmebehandlung mit 90 °C

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mit dem entwickelten Premix sichere Festigkeiten größer 160 N/mm<sup>2</sup> nur mit Zementen des Typs CEM I mit geringer Mahlfeinheit möglich sind. Druckfestigkeiten größer 140 N/mm<sup>2</sup> sind mit nahezu allen Zementen erreichbar. Die besten Ergebnisse im Bezug auf die Druckfestigkeit konnte mit dem C<sub>3</sub>A-freien CEM I 52.5N des Unternehmens Lafarge erzielt werden. Der Einfluss der Mahlfeinheit des Zements ist sehr entscheidend für die Fließfähigkeit des UHPC.

## 5.5 Kostenschätzung

Anhand von üblichen Marktpreisen wurde eine Schätzung der Kosten einerseits für den Premix und andererseits für eine UHPC-Rezeptur mit dem entwickelten Premix erstellt. Unter Anbetracht der Kosten für die Ausgangsstoffe, die Beschaffung, die Lagerung und den Vertrieb ergibt sich schätzungsweise ein Preis von 900 €/to für den Premix A, als auch für den Premix B. Auf die genaue Berechnung kann aus Gründen der Verschwiegenheit nicht eingegangen werden.

Somit würden sich folgende Kosten für die Rezepturen aus Kapitel 4.4 ergeben:

Ausgangsstoffe	Anteil [% vom CEM-Gehalt]	Gehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	Preis [€/to]	effektive Kosten [€/m <sup>3</sup> ]
Zement	-	720	120	86
Premix A	58	418	900	376
Fließmittel	4	29	2000	58
Wasser	25	180	0	0
Quarzsand	-	1040	65	68
<b>Summe</b>				<b>587 €/m<sup>3</sup></b>
ggf. Stahlfasern	2 Vol.-%	157	2500	393
<b>Summe</b>				<b>980 €/m<sup>3</sup></b>

**Tab. 5.12:** Kostenschätzung Rezeptur A

Ausgangsstoffe	Anteil [% vom CEM-Gehalt]	Gehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	Preis [€/to]	effektive Kosten [€/m <sup>3</sup> ]
Zement	-	720	120	86
Premix A	43	310	900	279
Fließmittel	4	29	2000	58
Wasser	25	180	0	0
Quarzsand	-	1167	65	76
<b>Summe</b>				<b>498 €/m<sup>3</sup></b>
ggf. Stahlfasern	2 Vol.-%	157	2500	393
<b>Summe</b>				<b>891 €/m<sup>3</sup></b>

Tab. 5.13: Kostenschätzung Rezeptur B

Die Kosten für den Premix dieser beiden Rezepturen belaufen sich laut Schätzung auf rund drei Fünftel der Gesamtkosten (ohne Stahlfasern). Betrachtet man die Kosten für einen UHPC mit Stahlfasern, so reduziert sich der Kostenanteil des Premix auf ca. ein Drittel. Aus der Kostenzusammenstellung ist des weiteren zu erkennen, dass die Hauptkosten bei UHPC mit Stahlfasern bei jenen liegen. Rund zwei Fünftel der Kosten für einen solchen Beton fallen auf die Stahlfasern.

## 5.6 Herstellung von HPC

Mit dem entwickelten Premix können zusammen mit grobkörnigen Zuschlägen (Sand 0/2 und Kies 4/16) hochfeste Betone sehr leicht und kostengünstig hergestellt werden. Dies sollte insbesondere für Fertigteilwerke interessant sein. Es werden Druckfestigkeiten von über 150 N/mm<sup>2</sup> erreicht, wobei der grobkörnige HPC fast selbstverdichtende Eigenschaften hat und ein sehr dichtes Gefüge aufweist. In Tabelle 5.14 sind die verwendeten Rezepturen und die jeweiligen Druckfestigkeiten aufgelistet.

Anhand Abbildung 5.24 lässt sich gut erkennen, dass bei ähnlicher Mischung die Rezeptur mit Basaltsplitt höhere Festigkeiten aufweist als jene mit dem grobkörnigeren Kies. Die Verarbeitbarkeit hingegen ist mit dem verwendeten Kies deutlich besser. Diese Mischung ist weist zwar selbstverdichtende Eigenschaften auf, wurde dennoch leicht verdichtet. Die Rezeptur mit Basaltsplitt hingegen hat eine schlechte Verarbeitbarkeit und benötigte eine hohe Verdichtungsenergie. Die Mischungen KI2 und BA2 erreichen annähernd die Festigkeiten der UHPC-Rezepturen, obwohl der Zementgehalt bzw. das Leimvolumen deutlich geringer ist. In Abbildung 5.25 ist das dichte Gefüge des Betons zu erkennen.

Ausgangsstoffe		KI1	BA1	KI2	BA2
Zement	[kg/m <sup>3</sup> ]	450 <sup>3</sup>	450 <sup>3</sup>	450 <sup>4</sup>	450 <sup>4</sup>
Premix A <sup>5</sup>	[%] <sup>1</sup>	29	29	29	29
FM BT3 Premment H500	[%] <sup>1</sup>	2,3	2,3	2,6	2,6
Wasser	[-]	0,28	0,28	0,28	0,28
$V_{Leim}$	[l/m <sup>3</sup> ]	339,5	339,5	337,8	337,8
$V_{Zuschlag}$	[l/m <sup>3</sup> ]	660,5	660,5	662,2	662,2
Sand 0/2 mm	[%] <sup>2</sup>	50,0	50,0	40,0	30,0
Kies 4/16 mm	[%] <sup>2</sup>	50,0	-	60,0	-
Basaltsplitt 2/4 mm	[%] <sup>2</sup>	-	50,0	-	70,0
Druckfestigkeit 28d	[MPa]	148,3	153,7	164,2	174,5

<sup>1</sup> Gewichtsprozent vom Zementgehalt

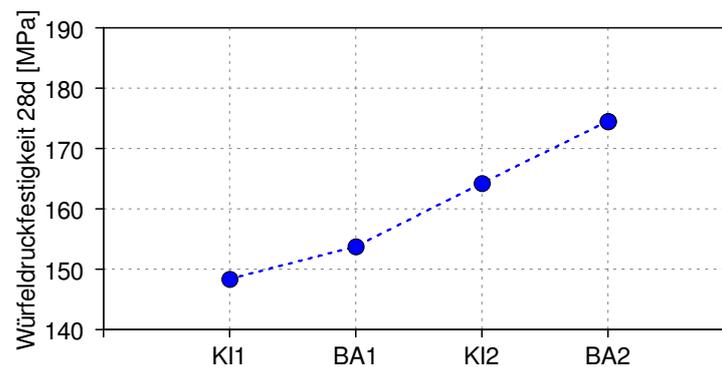
<sup>2</sup> Volumenprozent vom Zuschlagsvolumen

<sup>3</sup> Zement W&P CEM I 42.5R

<sup>4</sup> Zement Lafarge CEM I 52.5N

<sup>5</sup> Premix A mit MS Elkem Grade 971U

**Tab. 5.14:** Betonrezepturen HPC



**Abb. 5.24:** Druckfestigkeit der HPC-Rezepturen



**a)** Gefüge der Mischung BA2



**b)** Gefüge der Mischung KI2

**Abb. 5.25:** Gefüge der Mischungen BA2 und KI2

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde mittels einer theoretischen Optimierung der Packungsdichte unter Verwendung ausgewählter Ausgangsstoffe und begleitenden experimentellen Kleinversuchen ein Premix zur Herstellung von HPC und UHPC entwickelt. Zur Ermittlung der bestmöglichen Packungsdichte wurde der Ansatz der Kurvenoptimierungsmethode gewählt, wobei als Referenzsieblinien zum einen die von Dinger und Funk vorgeschlagene Kurve und zum anderen eine an der Universität Kassel entwickelte Sieblinie dienten. Mit Hilfe dieses Ansatzes wurde ein Algorithmus zur Lösung dieses Optimierungsproblems entworfen. Anhand der begleitenden Versuche konnte der Einfluss verschiedener Ausgangsstoffe und die mechanischen Eigenschaften der entwickelten UHPC-Rezeptur bestimmt werden.

Das wesentliche Resultat dieser Untersuchungen ist ein Premix, zusammengesetzt aus Mikrosilika und Quarzmehl, welcher unter Verwendung von ausgewählten Zementen und Zuschlagstoffen Druckfestigkeiten von über  $180 \text{ N/mm}^2$  bei selbstverdichtenden Eigenschaften erreichen kann. Aus der Analyse zum Einfluss einzelner Materialien lassen sich mehrere Rückschlüsse ziehen. So kann unter anderem festgestellt werden, dass trotz des im Vergleich zur Literatur geringen Mikrosilikagehaltes von 13% eine gute Fließfähigkeit und eine hohe Druckfestigkeit erreicht werden kann. Der Vergleich mit den Rezepturen mit einem Mikrosilikaanteil von 18% des Zementgewichtes zeigt, dass die Druckfestigkeit der Proben im selben Größenbereich liegen und die Abweichungen vernachlässigbar sind. Die Untersuchungen zum Einfluss der Quarzmehle zeigen, dass trotz größeren Unterschieden im Leimvolumen und in der Sieblinie verschiedener Rezepturen die Frisch- und Festbetoneigenschaften relativ ähnlich sind. Aus diesem Grund sollte eine Optimierung bezüglich des Quarzmehlgehaltes immer mit experimentellen Versuchen verifiziert werden. Des Weiteren ist ersichtlich, dass die Festigkeit des reinen Leims, bestehend aus Zement, Mikrosilika, Quarzmehl, Wasser und Fließmittel, im Vergleich zum UHPC nur unerheblich geringere Druckfestigkeiten aufweist. Zur Verbesserung der Frisch- und Festbetoneigenschaften ist neben der Optimierung der Leimzusammensetzung auch eine genaue Betrachtung der Gesteinskornverteilung erforderlich. Eine weitere Erkenntnis, welche im Zuge der Erstellung dieser Arbeit gezogen werden kann, ist, dass durch die Zugabe von Stahlfasern und Basaltsplitt die Druckfestigkeit des UHPC bei gleichzeitiger Abnahme der Fließfähigkeit erhöht werden kann.

Anhand einer Zementparameterstudie konnte gezeigt werden, dass für die Herstellung von UHPC mit hohen Festigkeiten grundsätzlich nur Portlandzemente eingesetzt werden sollen. Dabei können vor allem mit  $\text{C}_3\text{A}$ -freien Zementen gute Ergebnisse erzielt werden.

Die Mahlfineinheit des Zementes hat einen großen Einfluss auf die Fließfähigkeit des Betons und deswegen sollten Betone mit einer geringeren Mahlfineinheit und somit geringerem Wasseranspruch bevorzugt werden.

Unter Verwendung von herkömmlichen Zuschlägen wie Sand (0/2 mm) und Kies (4/16 mm) kann mit Hilfe des Premix ein hochfester Beton mit guten Fließeigenschaften und Druckfestigkeiten bis zu 165 N/mm<sup>2</sup> hergestellt werden.

Die Kosten für 1 m<sup>3</sup> UHPC unter Einsatz des ausgearbeitetem Premix belaufen sich laut einer Schätzung auf rund 500 €. Werden dieser Mischung noch 2 Vol.-% Stahlfasern hinzugegeben, so erhöht sich der Preis um weitere 400 €.

Im Rahmen der Parameterstudie konnte die Machbarkeit des Premix gezeigt werden, was wiederum das Potential des Produktes verdeutlicht. Obwohl bereits der Einfluss unterschiedlicher Zemente getestet wurde, so sind in Zukunft weitere Forschungsarbeiten mit weiteren Zementen und eventuell regional verfügbaren Zuschlagstoffen notwendig. Das angestrebte Ziel sollte die österreichweite Anwendbarkeit des Premix für die Herstellung von HPC und UHPC sein.

Durch die Fortschritte im Bereich der Forschung, die Regelung der Bemessung von UHPC, die Ausführung einiger Pilotprojekte und die allmähliche Akzeptanz in der Bauwirtschaft kann davon ausgegangen werden, dass UHPC zum Baustoff der Zukunft werden kann.

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Entwicklung der Betondruckfestigkeit im Hochhausbau [4] . . . . .	1
Abb. 1.2	Ausgangsstoffe zur Herstellung von UHPC mit dem vorgestellten Premix . . . . .	3
Abb. 2.1	Fußgängerbrücken ausgeführt in UHPC . . . . .	4
Abb. 2.2	Qualitativer Vergleich der Spannungs-Dehnungsbeziehung unter Druck verschiedener Betonfestigkeitsklassen [17] . . . . .	6
Abb. 3.1	Übersicht Ausgangsstoffe: Zement (1), Mikrosilika (2), Quarzmehle (3,4), Quarzsande (5,6), Basaltsplitt (7), Fließmittel (8), Wasser (9)	12
Abb. 4.1	Referenzsieblinien zur Sieblinienoptimierung . . . . .	17
Abb. 4.2	Verwendete Mischer . . . . .	20
Abb. 4.3	Hägermann-Konus [3] . . . . .	21
Abb. 4.4	Aufbau Biegezugfestigkeitsprüfung . . . . .	22
Abb. 4.5	Aufbau Druckfestigkeitsprüfung, Würfel . . . . .	22
Abb. 4.6	Aufbau Druckfestigkeitsprüfung, Prismen . . . . .	22
Abb. 4.7	Aufbau E-Modul-Prüfung . . . . .	23
Abb. 4.8	Aufbau Spaltzugprüfung . . . . .	23
Abb. 4.9	Einfluss verschiedener Fließmittel auf die Betoneigenschaften . . .	24
Abb. 4.10	Sieblinien der Versuchsreihe Theoretische Optimierung . . . . .	25
Abb. 4.11	Sieblinie der Rezeptur Gröger mit 12% Mikrosilikagehalt . . . . .	26
Abb. 4.12	Einfluss des Mikrosilikas Elkem „Grade 971U“ auf die Betoneigenschaften . . . . .	27
Abb. 4.13	Einfluss des Mikrosilikas „RW-Füller“ auf die Betoneigenschaften .	27
Abb. 4.14	Sieblinien der eingesetzten Quarzmehle im Vergleich zum verwendeten Zement . . . . .	28
Abb. 4.15	Sieblinien zur Bestimmung des Einflusses verschiedener Quarzmehle	29
Abb. 4.16	Einfluss der Quarzmehle auf die Betoneigenschaften . . . . .	30
Abb. 4.17	Vergleich Hägermann Setzmaß der Mischungen MQ1 und MQ3 . .	30
Abb. 4.18	Zusammenhang Packungsdichte und Druckfestigkeit . . . . .	31
Abb. 4.19	Zusammenhang Packungsdichte und Fließfähigkeit . . . . .	31
Abb. 4.20	Sieblinien zur Bestimmung des Einflusses der Gesteinskörnung . . .	32
Abb. 4.21	Einfluss der Gesteinskörnung auf die Betoneigenschaften . . . . .	33
Abb. 4.22	Leimfestigkeiten . . . . .	33

Abb. 4.23 Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Quarzmehl QM 6 . . .	34
Abb. 4.24 Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Quarzmehl QM 9 . . .	35
Abb. 4.25 Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Mikrosilika Elkem Grade 971U . . . . .	35
Abb. 5.1 Vergleich Hägermann Setzmaß der Rezepturen A und B . . . . .	38
Abb. 5.2 Vergleich Hägermann Setzmaß der Mischungen M1 und M2 . . . . .	39
Abb. 5.3 Vergleich Oberfläche der Mischungen M1 und M2 . . . . .	39
Abb. 5.4 Bruchfläche der Mischung M2 nach der Biegezugfestigkeitsprüfung	40
Abb. 5.5 Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit . . . . .	41
Abb. 5.6 Zeitliche Entwicklung der Biegezugfestigkeit . . . . .	41
Abb. 5.7 Bruchform der Mischung M1 nach der Druckfestigkeitsprüfung . .	42
Abb. 5.8 Zylindrische Probekörper der Mischungen M1 und M2 . . . . .	43
Abb. 5.9 Bruchbilder der Mischungen M1 und M2 . . . . .	43
Abb. 5.10 Einfluss des Mikrosilikagehalts und -typs auf die Betondruckfestigkeit	46
Abb. 5.11 Einfluss des Mikrosilikagehalts und -typs auf die Betonfließfähigkeit	46
Abb. 5.12 Einfluss des Basaltsplitts auf die Betoneigenschaften . . . . .	47
Abb. 5.13 Vergleich Hägermann Setzmaß ohne und mit Basaltsplitt . . . . .	47
Abb. 5.14 Einfluss der Stahlfasern auf die Betoneigenschaften . . . . .	48
Abb. 5.15 Einfluss des Basaltsplitts und der Stahlfasern auf die Betoneigen- schaften . . . . .	49
Abb. 5.16 Zusammenhang Fließfähigkeit Hobart-Mischung und Zementgehalt	52
Abb. 5.17 Zusammenhang Zementgehalt und Fließfähigkeit Eirich-Mischung .	52
Abb. 5.18 Betoneigenschaften der Versuchsserie VV . . . . .	53
Abb. 5.19 Hägermann Setzmaße der Mischung VV mit verschiedenen Zementen	53
Abb. 5.20 Betoneigenschaften der Versuchsserie V1 . . . . .	54
Abb. 5.21 Betoneigenschaften der Versuchsserie V2a . . . . .	54
Abb. 5.22 Betoneigenschaften der Versuchsserie V2b . . . . .	55
Abb. 5.23 Druckfestigkeit der Versuchsserie V2a und V2b nach dreitägiger Wärmebehandlung mit 90 °C . . . . .	56
Abb. 5.24 Druckfestigkeit der HPC-Rezepturen . . . . .	58
Abb. 5.25 Gefüge der Mischungen BA2 und KI2 . . . . .	58
Abb. D.1 Übersicht Versuchsergebnisse: Einfluss Fließmittel (Kap. 4.2.2) . .	90
Abb. D.2 Übersicht Versuchsergebnisse: Einfluss Mikrosilika (Kap. 4.2.4) . .	91
Abb. D.3 Übersicht Versuchsergebnisse: Einfluss Quarzmehl und Gesteinskörnung (Kap. 4.2.5 und 4.2.6) . . . . .	92
Abb. D.4 Übersicht Versuchsergebnisse: Leimfestigkeiten (Kap. 4.2.6) . . . .	93
Abb. D.5 Übersicht Versuchsergebnisse: Charakterisierung und Einfluss ver- schiedener Materialien (Kap. 5.1 und 5.3) . . . . .	94
Abb. D.6 Übersicht Versuchsergebnisse: Einfluss verschiedener Mikrosilika (Kap. 5.3.1) . . . . .	95

Abb. D.7 Übersicht Versuchsergebnisse: Großversuch Druckfestigkeit (Kap. 5.2)	96
Abb. D.8 Übersicht Versuchsergebnisse: Großversuch Biegezugfestigkeit, E- Modul, Spaltzugfestigkeit (Kap. 5.2)	97
Abb. D.9 Übersicht Versuchsergebnisse: Zementparameterstudie Versuchsserie VV (Kap. 5.4)	98
Abb. D.10 Übersicht Versuchsergebnisse: Zementparameterstudie Versuchsserie V1 (Kap. 5.4)	99
Abb. D.11 Übersicht Versuchsergebnisse: Zementparameterstudie Versuchsserie V2a (Kap. 5.4)	100
Abb. D.12 Übersicht Versuchsergebnisse: Zementparameterstudie Versuchsserie V2b (Kap. 5.4)	101
Abb. D.13 Übersicht Versuchsergebnisse: HPC (Kap. 5.6)	102

# Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Vergleich Umweltverträglichkeit, Brücke von Sherbrooke [9]	7
Tab. 2.2	Typische Betonrezepturen für UHPC (1)	10
Tab. 2.3	Typische Betonrezepturen für UHPC (2)	11
Tab. 3.1	Verwendete Zemente und Eigenschaften	13
Tab. 4.1	Eingabedaten Sieblinienoptimierung	18
Tab. 4.2	Mischabfolge im Intensivmischer	19
Tab. 4.3	Mischabfolge Großversuch, Mischung M1	20
Tab. 4.4	Mischabfolge Großversuch, Mischung M2	20
Tab. 4.5	Betonrezeptur zur Bestimmung des Einflusses verschiedener Fließmittel	24
Tab. 4.6	Betonrezepturen der Versuchsreihe Theoretische Optimierung	25
Tab. 4.7	Betonrezeptur Gröger	26
Tab. 4.8	Betonrezepturen zur Bestimmung des Einflusses verschiedener Quarz- mehle	29
Tab. 4.9	Nullbetonrezeptur MQ3	31
Tab. 4.10	Betonrezepturen zur Bestimmung des Einflusses der Gesteinskörnung	32
Tab. 4.11	Premixzusammensetzung	36
Tab. 4.12	Rezepturen mit Premix	36
Tab. 5.1	Eigenschaften der Premixrezeptur	37
Tab. 5.2	Betonrezepturen Großversuch	38
Tab. 5.3	Materialcharakterisierung Großversuch	42
Tab. 5.4	Betonrezepturen zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Mi- krosilika	45
Tab. 5.5	Betonrezepturen zur Untersuchung des Einflusses des Basaltsplitts	47
Tab. 5.6	Betonrezepturen zur Untersuchung des Einflusses der Stahlfasern	48
Tab. 5.7	Betonrezepturen zur Untersuchung des Einflusses des Basaltsplitts und der Stahlfasern	49
Tab. 5.8	Verwendete Zemente und deren Gehalt für die jeweilige Serie	50
Tab. 5.9	Betonrezepturen Zementparameterstudie	51
Tab. 5.10	Ergebnisse Zementparameterstudie	51
Tab. 5.11	Ergebnisse Zementparameterstudie (Wärmebehandlung)	55
Tab. 5.12	Kostenschätzung Rezeptur A	56
Tab. 5.13	Kostenschätzung Rezeptur B	57

Tab. 5.14 Betonrezepturen HPC . . . . . 58

# Literaturverzeichnis

- [1] SCHMIDT, Michael: Von der Nanotechnologie zum Ultra-Hochfesten Beton. In: *Ultra high performance concrete (UHPC); 10 years of research and development at the University of Kassel*, Kassel University Press, 2007, S. 98–110
- [2] SCHACHINGER, Axel I.: *Maßnahmen zur Herstellung von rissefreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität*, Technische Universität München, Diss., 2007
- [3] MA, Jianxin: *Faserfreier Ultrahochfester Beton - Entwicklung und Materialeigenschaften*, Universität Leipzig, Diss., 2010
- [4] VIET TUE, Nguyen; KÜCHLER, Michael; MA, Jianxin; HENZE, Stefan: Überlegungen zur anwendungsorientierten Stoffzusammensetzung von UHFB. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 101 (2006), Nr. 11, S. 834–841
- [5] BORNEMANN, Roland; SCHMIDT, Michael; FEHLING, Ekkehard; MIDDENDORF, Bernhard: Ultra-Hochleistungsbeton UHPC - Herstellung, Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 96 (2001), Nr. 7, S. 458–467
- [6] LAFARGE: *Produktinformationen Ductal*. <http://www.ductal.com/>, Abruf: 01.12.2014
- [7] SIKA: *Produktinformationen Ceracem*. <http://www.nxtbook.com/newpress/sika/ceracem/>, Abruf: 01.12.2014
- [8] DYCKERHOFF: *Produktinformationen Nanodur Compound 5941*. <http://www.dyckerhoff.de/online/Home/Zement/Premium-Zement/NANODUR.html>, Abruf: 01.12.2014
- [9] SCHMIDT, Michael; BUNJE, Kai; DEHN, Frank; DROLL, Klaus; FEHLING, Ekkehard; GREINER, Stefan; HORVATH, Johannes; KLEEN, Eugen; MÜLLER, Christoph; REINECK, Karl-Heinz; SCHACHINGER, Axel I.; TEICHMANN, Thomas; TEUTSCH, Manfred; THIEL, Roland; VIET TUE, Nguyen: *DAfStb-Heft*. Bd. 561: *Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton*. Beuth, 2008
- [10] JUHART, Joachim: *Adhäsion von UHPC an Stahl und Glas*, Technische Universität Graz, Diss., 2011

- [11] FEHLING, Ekkehard; SCHMIDT, Michael; TEICHMANN, Thomas; BUNJE, Kai; BORNEMANN, Roland; MIDDENDORF, Bernhard: *Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung ultrahochfester Betone (UHPC) Forschungsbericht DFG FE 497/1-1*. Kassel University Press, 2005
- [12] BLAIS, Pierre Y.; COUTURE, Marco: Precast, Prestressed Pedestrian Bridge - World's First Reactive Powder Concrete Structure. In: *PCI Journal* (1999), Nr. 44, S. 60–71
- [13] LAFARGE: *Fußgängerübergang Seonyu*. [http://img.archiexpo.de/images\\_ae/photo-mg/fussganger-ubergang-70029-3993357.jpg](http://img.archiexpo.de/images_ae/photo-mg/fussganger-ubergang-70029-3993357.jpg), Abruf: 13.11.2014
- [14] AFGC: *Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concretes; Recommendations*. Association Française de Génie Civil, 2013
- [15] JSCE-USC: *Recommendations for Design and Construction of Ultra-High Strength Fiber-Reinforced Concrete Structures (Draft)*. Japan Society of Civil Engineers, 2006
- [16] CNR: *Instruction for design, execution and control of fibre reinforced concrete structures, Italian Standards; CNR-DT 204*. Consiglio nazionale delle ricerche, 2006
- [17] REICHEL, Michael M.: *Dünnwandige Segmentfertigteildeckbauweisen im Brückenbau aus gefasertem Ultrahochleistungsbeton (UHFB) - Tragverhalten, Bemessung und Konstruktion*, Technische Universität Graz, Diss., 2010
- [18] LEUTBECHER, Torsten: *Rissbildung und Zugtragverhalten von mit Stabstahl und Fasern bewehrtem Ultrahochfesten Beton (UHPC)*, Universität Kassel, Diss., 2007
- [19] RANDL, Norbert; STEINER, Thomas; OFNER, Sandra; BAUMGARTNER, Erwin; MÉSZÖLY, Tamas: Development of UHPC mixtures from an ecological point of view. In: *Construction and Building Materials* 67, Part C (2014), S. 373–378
- [20] TEICHMANN, Thomas: *Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein*, Universität Kassel, Diss., 2007
- [21] DAVID, Gheorghe A.: *Messung der Packungsdichte feiner Kornhaufwerke für Ressourceneffizienten Beton*, Technische Universität Graz, Diplomarbeit, 2014
- [22] GEISENHANSLÜKE, Carsten: Modellierung und Berechnung hochdichter Feinstkornpackungen für Beton. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 100 (2005), Nr. S2, S. 65–68
- [23] PUNTKE, Wolfgang: Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken. In: *Beton* 52 (2002), Nr. 5, S. 242–248

- [24] OKAMURA, Hajime; OZAWA, Kazumasa: Mix Design for Self-Compacting Concrete. In: *Concrete Library of JSCE* (1995), Nr. 25, S. 107–120
- [25] OKAMURA, Hajime; OZAWA, Kazumasa; SAKATA, Nobura: Evaluation of Self-Compact ability of Fresh Concrete Using the Funnel Test. In: *Concrete Library of JSCE* (1995), Nr. 25, S. 59–75
- [26] FULLER, William B.; THOMPSON, Sanford E.: The laws of proportioning concrete. In: *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 59 (1907), S. 67–143
- [27] FUNK, James E.; DINGER, Dennis R.; FUNK, James E. J.: *Coal grinding and particle size distribution studies for coalwater-slurries at high solids content. Final report.* Empire State Electric Energy Research Corporation (ESEERCO), 1980
- [28] FURNAS, Clifford C.: *Flow of gases through beds of broken solids.* United States government printing office, 1929 (Bureau of Mines Bulletin 307)
- [29] SCHWANDA, Fritz: Das rechnerische Verfahren zur Bestimmung des Hohlraums und Zementleimanspruchs von Zuschlägen und seine Bedeutung für Spannbetonbau. In: *Zement und Beton* 37 (1966), S. 8–17
- [30] FENNIS, Sonja A.: *Design of ecological concrete by particle packing optimization,* Delft University of Technology, Diss., 2011
- [31] STROEVEN, Piet; STROEVEN, Martijn: Assessment of packing characteristics by computer simulation. In: *Cement and Concrete Research* 29 (1999), Nr. 8, S. 1201–1206
- [32] FENNIS, Sonja A. A. M.; WALRAVEN, Joost C.: Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design. In: *Heron* 57 (2012), Nr. 2, S. 73–101
- [33] ANDREASEN, Alfred H.; ANDERSEN, J.: Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). In: *Colloid and Polymer Science* 50 (1930), Nr. 3, S. 217–228
- [34] VOGT, Carsten: *Ultrafine particles in concrete: Influence of ultrafine particles on concrete properties and application to concrete mix design,* Royal Institute of Technology (KTH), School of Architecture and the Built Environment, Diss., 2010
- [35] FISCHBÖCK, Eva; NISCHER, Peter: Kornzusammensetzung des Mehlkorns - Notwendigkeit der Ermittlung und Einfluss der Bestimmungsmethode auf das Ergebnis. In: *zement + beton* (2009), Nr. 5, S. 20–25
- [36] STOVALL, T.; LARRARD, de F.; BUIL, M.: Linear packing density model of grain mixtures. In: *Powder Technology* 48 (1986), Nr. 1, S. 1–12
- [37] LARRARD, de F.: *Concrete mixture proportioning: a scientific approach.* E and FN Spon, 1999 (Modern Concrete Technology)

- [38] GEISENHANSLÜKE, Carsten: *Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen*, Universität Kassel, Diss., 2008
- [39] RESCHKE, Thorsten: *Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton*, Universität Weimar, Diss., 2000
- [40] JUNGWIRTH, Jörg: *Zum Tragverhalten von zugbeanspruchten Bauteilen aus Ultra-Hochleistungs-Faserbeton*, École polytechnique fédérale de Lausanne, Diss., 2006
- [41] SCHNEIDER, Ulrich; HORVATH, Johannes; KÖNIG, Gert; DEHN, Frank: Materialverhalten von ultrahochfesten Betonen (UHPC). In: *Beton- und Stahlbetonbau* 96 (2001), Nr. 7, S. 468–477
- [42] LOWKE, Dirk; STENGEL, Thorsten; SCHIESSL, Peter; GEHLEN, Christoph: Control of Rheology, Strength and Fibre Bond of UHPC with Additions – Effect of Packing Density and Addition Type. In: *Ultra-high Performance Concrete and Nanotechnology in Construction - Proceedings of Hipermat 2012, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, March 7 - 9, 2012*, Kassel Univ. Press, 2012, S. 215–224
- [43] MAEDER, Urs; CHAIGNON, Joel; LALLEMANT-GAMBOA, Isabelle; LOMBARD, Jean-Pierre: Ceracem, a new high performance concrete: characterisations and applications. In: *Ultra High Performance Concrete (UHPC) - Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, September 13 - 15, 2004*, Kassel Univ. Press, 2004, S. 59–68
- [44] SCHMIDT, Michael; GEISENHANSLÜKE, Carsten: Optimierung der Zusammensetzung des Feinstkorns von Ultra-Hochleistungs- und von Selbstverdichtendem Beton. In: *Ultra high performance concrete (UHPC); 10 years of research and development at the University of Kassel*, Kassel University Press, 2007, S. 141–164
- [45] MATHWORKS: *quadprog*. <http://de.mathworks.com/help/optim/ug/quadprog.html>, Abruf: 28.11.2014
- [46] CEB: *Design of concrete structures - CEB-FIP Model Code 1990*. Comité Euro-International du Béton, 1993
- [47] RINDER, Tassilo: *Hochfester Beton unter Dauerzuglast*, Universität Stuttgart, Diss., 2002

## **A Anhang - Datenblätter Zemente**

# Dolomiten Zement

**Portlandzement CEM I 42,5 R – SR0**

**WT 33 C<sub>3</sub>A-frei**

<b>Produkt</b>	Portlandzement gemäß ÖNORM EN 197-1 und ÖNORM B 3327-1, hergestellt im Werk Wietersdorf der w&p Zement GmbH.
<b>Zusammensetzung</b>	Portlandzementklinker C3A-frei, Gips,
<b>Anwendung</b>	Portlandzement mit stark erhöhtem Widerstand gegen Sulfatangriff für alle üblichen Betonanwendungen und für Betone in allen Expositionsklassen. Besonders geeignet für Bauwerke und Bauteile, die mit sulfathaltigen Böden und Wässern in Berührung kommen. Vorteilhaft für Anwendungen, bei denen eine geringe Wärmeentwicklung erforderlich ist, wie z.B. Tunnelinnenschalen oder Weiße Wannen. Gut geeignet für Spezialanwendungen im landwirtschaftlichen Bau.
<b>Eigenschaften</b>	Gute Verarbeitbarkeit durch günstigen Wasseranspruch und geringe Wasserabsonderung. Rasche Festigkeitsentwicklung, hohe Frühfestigkeit und gute Nacherhärtung. Stark erhöhte Widerstandsfähigkeit gegen Sulfatangriffe und niedrige Wärmeentwicklung. Die Betoneigenschaften, vor allem auch das Zusammenwirken aller Betonbestandteile ist in Prüfungen nachzuweisen. Für eine optimale Betonqualität ist eine gute Verdichtung und Nachbehandlung besonders zu beachten.
<b>Technische Daten</b>	Druckfestigkeit bei Normenprüfung nach ÖNORM EN 196 1 Tag ca. 14 N/mm <sup>2</sup> 2 Tage ca. 26 N/mm <sup>2</sup> 28 Tage ca. 57 N/mm <sup>2</sup> Erstarrungsbeginn ca. 150 min Mahlfeinheit (Blaine) ca. 4300 cm <sup>2</sup> /g Hydratationswärme ca. 25 K Temperaturanstieg nach ÖNORM B 3303 Wasserabsonderung ca. 2 ml (2 h) nach ÖNORM B 3303 C3A-frei (SR0) gemäß ÖNORM EN 197-1 Chromatarm gemäß Verordnung (EG) Nr.1907/2006
<b>Lieferform</b>	Lose im Silowagen oder Bahnwaggon
<b>Lagerung</b>	Vor Feuchtigkeit geschützt max. 1 Monat lagerfähig.
<b>Qualitätssicherung</b>	Konformitätsnachweise durch interne Überwachungsprüfungen. Kennnummer der Zertifizierungsstelle 0989-CPD-0090.



# DER CONTRAGRESS®



## EN 197-1 - CEM I 52,5 N - SR 0 WT 38 C<sub>3</sub>A-frei



Chromatarm gem. Verordnung (EG) Nr. 1907/2006  
 Portlandzement gem. ON EN 197-1; Werk Mannersdorf  
 WT 38 C<sub>3</sub>A-frei gem. ON B 3327-1  
 CE-Kennzahl 2523-CPR-0040, ÜA: Z-1.1.1-13-1280  
 Fremdüberwacht durch das FI der VÖZ

**Anwendungsbereich:**

Diese Zementart verbindet die ausgezeichnete chemische Widerstandsfähigkeit von C<sub>3</sub>A-freien Zementen, insbesondere gegen Sulfatangriff, mit dem Erhärtungsverhalten eines frühhochfesten Portlandzementes. Trotz des raschen Erhärtungsverlaufes zeichnet sich der CEM I 52,5 N-SR 0 WT 38 C<sub>3</sub>A-frei durch geringe Wärmeentwicklung, gute Verarbeitbarkeit, geringen Wasserbedarf und hervorragende Nacherhärtung aus. Seine Anwendung geht von Fertigteil- bzw. Rohrherstellung zu Tunnel-Innenschalen, WDI und Hochleistungsbeton.

Eigenschaften gem. laufender Eigenüberwachung	Richtwerte	Normanforderungen	
		ON EN 197-1	ON B 3327-1
Dichte in kg/dm <sup>3</sup>	3,14	-	-
Druckfestigkeit (bei 20° C) in MPa (=N/mm <sup>2</sup> )			
1 Tag	20	-	≥ 11
2 Tage	32	≥ 20	-
7 Tage	-	-	-
28 Tage	61	≥ 52,5	-
Biegezugfestigkeit (bei 20° C) 28 Tage in MPa	-	-	-
Mahlfeinheit (Blainwert) in cm <sup>2</sup> /g	4.500	-	≤ 5% Schwankung
Erstarrungsbeginn (bei 20° C) in min	140	≥ 45	≥ 90
Bluten in cm <sup>3</sup> nach 120 min	3	-	≤ 20
Wärmeentwicklung in J/g Zement nach 15 h	250	-	≤ 290
Sulfatbeständigkeit bzw. C <sub>3</sub> A-frei	0%	0% C <sub>3</sub> A im Klinker	C <sub>3</sub> A-frei

Lieferform:	Lose im (Silo)-LKW oder Bahnwagon	gültig ab 17.07.2014
Lagerung:	Trocken, geschlossen im Silo, vor Feuchtigkeit Zutritt schützen	
Haltbarkeit (chromatarm):	Trocken im Silo 1 Monat	Sicherheits- datenblatt anfordern bzw. beachten
Farbe als Pulver:	Hellgrau, Farbunterschiede zu anderen Zementarten bzw. - sorten möglich	

**Typische Testergebnisse – Februar 2014**
**AALBORG WHITE<sup>®</sup>** *Made in Denmark*
**Zweites Halbjahr 2013**

Der Zement trägt das CE-Kennzeichen und wird als CEM I 52,5 R – SR5 bezeichnet und ist durch die Zertifizierungsgesellschaft Bureau Veritas Certification mit dem EC-Zertifikat Nr. 0615-CPR-9806 versehen.

---

**Physikalische Eigenschaften**


---

Druckfestigkeit (EN 196-1)		
1 Tag	MPa	23
2 Tage	MPa	41
7 Tage	MPa	59
28 Tage	MPa	72
Abbindezeit (Vicat)	min	151
Ausdehnung	mm	0,5
Feinheit (Blaine)	m <sup>2</sup> /kg	390
Hellbezugswert (DIN 5033)	%	86
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	3130
Schüttdichte	kg/m <sup>3</sup>	1100

---

**Chemische Eigenschaften der Klinker**


---

SiO <sub>2</sub>	%	24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	2,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0,3
CaO	%	69
Zusammensetzung nach Bogue – ASTM		
C <sub>3</sub> S	%	77
C <sub>2</sub> S	%	15
C <sub>3</sub> A	%	5
C <sub>4</sub> AF	%	1

---

**Chemische Eigenschaften des Zements**


---

SO <sub>3</sub>	%	2,2
MgO	%	0,6
Na <sub>2</sub> O – Äquivalent	%	0,2
Cl <sup>-</sup>	%	0,01
Glühverlust	%	1,1
Unlöslicher Rückstand	%	0,1
Wasserlösliches Cr <sup>6+</sup>	mg/kg	≤ 2

---



# Tauern Zement

## Portlandkompositzement

### CEM II/A-M(S-L) 42,5 N WT 38

<b>Produkt</b>	Portlandzement gemäß ÖNORM EN 197-1, hergestellt im Werk Wietersdorf der w&p Zement GmbH.
<b>Zusammensetzung</b>	Portlandzementklinker, Gips, Hüttensand, Kalkstein
<b>Anwendung</b>	Portlandzement für alle üblichen Betonanwendungen und für Betone in allen Expositionsklassen (außer treibender Angriff durch Sulfate). Besonders geeignet für Transportbeton- und Betonwerke.
<b>Eigenschaften</b>	Gute Verarbeitbarkeit durch günstigen Wasseranspruch und geringe Wasserabsonderung. Günstige Festigkeitsentwicklung und erhöhte Frühfestigkeit. Die Betoneigenschaften, vor allem auch das Zusammenwirken aller Betonbestandteile ist in Prüfungen nachzuweisen. Für eine optimale Betonqualität ist eine gute Verdichtung und Nachbehandlung besonders zu beachten.
<b>Technische Daten</b>	Druckfestigkeit bei Normenprüfung nach ÖNORM EN 196 1 Tag ca. 15 N/mm <sup>2</sup> 2 Tage ca. 27 N/mm <sup>2</sup> 28 Tage ca. 55 N/mm <sup>2</sup> Erstarrungsbeginn ca. 150 min Mahlfeinheit ca. 4400 cm <sup>2</sup> /g Hydratationswärme ca. 35 K Temperaturanstieg nach ÖNORM B 3303 Wasserabsonderung ca. 10 ml (2 h) nach ÖNORM B 3303 Chromatarm gemäß Verordnung (EG) Nr.1907/2006
<b>Lieferform</b>	Sack 25 kg Lose im Silowagen oder Bahnwaggon
<b>Lagerung</b>	Sackware vor Feuchtigkeit geschützt max. 3 Monate lagerfähig, loses Material maximal 1 Monat lagerfähig.
<b>Qualitätssicherung</b>	Konformitätsnachweise durch interne Überwachungsprüfungen. Kennnummer der Zertifizierungsstelle 0989-CPD-0445.
<b>Einstufung lt. Chemikaliengesetz</b>	Xi Reizend  R 36/38 Reizt die Augen und die Haut R 37 Reizt die Atmungsorgane R 43 Sensibilisierung durch Hautkontakt möglich S 2 Darf nicht in die Hände von Kinder gelangen S 22 Staub nicht einatmen S 24 Berührung mit der Haut vermeiden S 25 Berührung mit den Augen vermeiden S 26 Bei Berührung mit den Augen sofort gründlich mit Wasser abspülen und Arzt konsultieren S 28 Bei Berührung mit der Haut sofort gründlich mit viel Wasser abspülen S 36/37/39 Bei der Arbeit geeignete Schutzkleidung, Schutzhandschuhe und Schutzbrille / Gesichtsschutz tragen S 46 Bei Verschlucken sofort ärztlichen Rat einholen und Verpackung oder Etikett vorzeigen



**DER GRÜNE®**

ZEMENT



## EN 197-1 - CEM I/A-S 52,5 N WT 42



Chromatarm gem. Verordnung (EG) Nr. 1907/2006  
 Portlandhüttenzement gem. ON EN 197-1, Werk Retznei  
 WT 42 gem. ON B 3327-1  
 CE-Kennzahl 2523-CPR-0048, ÜA: Z-1.1.1-13-1279  
 Fremdüberwacht durch das FI der VÖZ

### Anwendungsbereich:

Für die wesentlichen Anwendungen gem. österreichischer Betonnorm ON B 4710-1 bzw. ÖVBB Richtlinien geeignet. Dieser Zement ist ein frühhochfester Portlandhüttenzement mit normalen Abbindezeiten, jedoch mit rascherem Erhärtungsverlauf, wodurch einerseits früheres Ausschalen und andererseits eine schnellere Belastung von Betonteilen möglich ist. Durch die raschere Festigkeitsentwicklung ist diese Zementsorte auch für das Betonieren bei tiefen Temperaturen, speziell unter 10° C, zu empfehlen. Speziell geeignet für Transportbeton, Betonfertigteile und Tunnelinnenschalen.

Eigenschaften gem. laufender Eigenüberwachung	Richtwerte	Normanforderungen	
		ON EN 197-1	ON B 3327-1
Dichte in kg/dm <sup>3</sup>	3,04	-	-
Druckfestigkeit (bei 20° C) in MPa (=N/mm <sup>2</sup> )			
1 Tag	20	-	≥ 11
2 Tage	33	≥ 20	-
7 Tage	-	-	-
28 Tage	62	≥ 52,5	-
Biegezugfestigkeit (bei 20° C) 28 Tage in MPa	-	-	-
Mahlfeinheit (Blainewert) in cm <sup>2</sup> /g	4.600	-	≤ 5% Schwankung
Erstarrungsbeginn (bei 20° C) in min	150	≥ 60	≥ 90
Bluten in cm <sup>3</sup> nach 120 min	5	-	≤ 15
Wärmeentwicklung in J/g Zement nach 15 h	280	-	≤ 310
Sulfatbeständigkeit bzw. C <sub>3</sub> A-frei	nein	-	-

Lieferform:	Lose und Sack (à 25 kg) im (Silo)-LKW oder Bahnwaggon	gültig ab 17.07.2014
Lagerung:	Trocken, geschlossen im Silo, vor Feuchtigkeit Zutritt schützen	
Haltbarkeit (chromatarm):	Trocken im Silo 1 Monat, trocken im Sack 4 Monate	Sicherheits- datenblatt anfordern
Farbe als Pulver:	Hellgrau, Farbunterschiede zu anderen Zementarten bzw. - sorten möglich	bzw. beachten



## **B Anhang - Datenblätter Quarzmehle**

# TECHNISCHES DATENBLATT

## QM 1

Kristallquarzmehl 0 - 160 µm

**Eigenschaften:** Kristallquarzmehle werden durch eisenfreie, rockene Vermahlung von aufbereitetem Quarzsand und nachfolgender Windsichtung hergestellt. Sie zeichnen sich durch einen hohen SiO<sub>2</sub>-Gehalt aus und enthalten nur geringe Mengen an Nebenbestandteilen. Sie werden in mehreren Mahlfineinheiten geliefert.

### Chemische Analyse

**Lieferform:** Lose oder verpackt in 25 kg Säcke

	[Ma.-%]
SiO <sub>2</sub>	98,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02
TiO <sub>2</sub>	0,03
K <sub>2</sub> O	0,3
Na <sub>2</sub> O	< 0,01
CaO	0,02
MgO	0,01

### Hinweis:

Verpackte Produkte unterliegen der normalen Alterung und sollten nicht länger als 12 Monate gelagert werden. Hinweise auf die Entsorgung etc. können Sie unserem Sicherheitsdatenblatt entnehmen.

**Glühverlust** <sub>1000°C</sub> 0,3

<b>Spezifische Oberfläche</b> (BET) DIN ISO 9277	[m <sup>2</sup> / g]	0,7
<b>Ölabsorption</b> DIN ISO 787, T5	[g / 100 g]	17
<b>pH-Wert</b>	[ - ]	6,5
<b>Weißgrad</b> (R457 abs)	[%]	77

<b>Dichte</b>	[g/ml]	2,63
<b>Schüttdichte</b>	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,1

### Kornverteilung (Luftstrahlsiebung / Sedigraph)

[Ma.-%] ca.

>160 µm	3
100 – 160 µm	8
63 – 100 µm	13
40 – 63 µm	14
20 – 40 µm	17
10 – 20 µm	17
4 – 10 µm	15
< 4 µm	13
<b>d<sub>10</sub></b>	2 µm
<b>d<sub>50</sub></b>	24 µm
<b>d<sub>90</sub></b>	100 µm

Basis: Produktionsdurchschnittswerte 2013

Wir weisen ausdrücklich darauf hin, dass es sich bei den vorliegenden Produkten um Naturprodukte handelt, die veredelt und/oder gemischt sein können (auch mit synthetischen Produkten). Alle angegebenen Daten und Werte sind daher lediglich als Richtwerte, die produktspezifische Toleranzbreiten haben können, zu verstehen. Unser Vertragspartner bleibt verpflichtet, die Tauglichkeit des Produkts für seine Einsatzzwecke zu prüfen und konkrete Auskünfte über Toleranzbreiten und anwendungstechnische Erfahrungen aufgrund der naturgegebenen sowie produktions- und lagerstättenbedingten Toleranzen für den konkreten Verwendungszweck zu erfragen. Im Übrigen gelten unsere "Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen". Die genannten Analysenwerte stellen keine Garantie oder Zusicherung im rechtlichen Sinne dar, sondern basieren auf durchschnittlichen Jahreswerten. Aktuelle Analysenwerte stellen wir auf Wunsch gerne zur Verfügung.

# TECHNISCHES DATENBLATT

## QM 2 Kristallquarzmehl 0 - 125 µm

**Eigenschaften:** Kristallquarzmehle werden durch eisenfreie, trockene Vermahlung von aufbereitetem Quarzsand und nachfolgender Windsichtung hergestellt. Sie zeichnen sich durch einen hohen SiO<sub>2</sub>-Gehalt aus und enthalten nur geringe Mengen an Nebenbestandteilen. Sie werden in mehreren Mahlfeinheiten geliefert.

### Chemische Analyse

**Lieferform:** Lose oder verpackt in 25 kg Säcke

	[Ma.-%]
SiO <sub>2</sub>	98,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02
TiO <sub>2</sub>	0,03
K <sub>2</sub> O	0,3
Na <sub>2</sub> O	< 0,01
CaO	0,02
MgO	0,01
Glühverlust <sub>1000°C</sub>	0,3

**Hinweis:** Verpackte Produkte unterliegen der normalen Alterung und sollten nicht länger als 12 Monate gelagert werden. Hinweise auf die Entsorgung etc. können Sie unserem Sicherheitsdatenblatt entnehmen.

<b>Spezifische Oberfläche</b> (BET) DIN ISO 9277	[m <sup>2</sup> / g]	0,7	<b>Dichte</b>	[g/ml]	2,63
<b>Ölabsorption</b> DIN ISO 787, T5	[g / 100 g]	17	<b>Schüttdichte</b>	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,0
<b>pH-Wert</b>	[ - ]	6,0			
<b>Weißgrad</b> (R457 abs)	[%]	78			

### Kornverteilung (Luftstrahlsiebung / Sedigraph)

	[Ma.-%] ca.
>125 µm	3
63 - 125 µm	17
40 - 63 µm	16
20 - 40 µm	19
10 - 20 µm	17
4 - 10 µm	15
< 4 µm	13
<b>d<sub>10</sub></b>	3 µm
<b>d<sub>50</sub></b>	24 µm
<b>d<sub>90</sub></b>	100 µm

Basis: Produktionsdurchschnittswerte 2013

Wir weisen ausdrücklich darauf hin, dass es sich bei den vorliegenden Produkten um Naturprodukte handelt, die veredelt und/oder gemischt sein können (auch mit synthetischen Produkten). Alle angegebenen Daten und Werte sind daher lediglich als Richtwerte, die produktspezifische Toleranzbreiten haben können, zu verstehen. Unser Vertragspartner bleibt verpflichtet, die Tauglichkeit des Produkts für seine Einsatzzwecke zu prüfen und konkrete Auskünfte über Toleranzbreiten und anwendungstechnische Erfahrungen aufgrund der naturgegebenen sowie produktions- und lagerstättenbedingten Toleranzen für den konkreten Verwendungszweck zu erfragen. Im Übrigen gelten unsere "Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen". Die genannten Analysenwerte stellen keine Garantie oder Zusage im rechtlichen Sinne dar, sondern basieren auf durchschnittlichen Jahreswerten. Aktuelle Analysenwerte stellen wir auf Wunsch gerne zur Verfügung.

# TECHNISCHES DATENBLATT

## QM 3 Kristallquarzmehl 0 - 90 µm

**Eigenschaften:** Kristallquarzmehle werden durch eisenfreie, trockene Vermahlung von aufbereitetem Quarzsand und nachfolgender Windsichtung hergestellt. Sie zeichnen sich durch einen hohen SiO<sub>2</sub>-Gehalt aus und enthalten nur geringe Mengen an Nebenbestandteilen. Sie werden in mehreren Mahlfineinheiten geliefert.

### Chemische Analyse

**Lieferform:** Lose oder verpackt in 25 kg Säcke

	[Ma.-%]
SiO <sub>2</sub>	98,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02
TiO <sub>2</sub>	0,03
K <sub>2</sub> O	0,3
Na <sub>2</sub> O	< 0,01
CaO	0,02
MgO	0,01
Glühverlust <sub>1000°C</sub>	0,3

### Hinweis:

Verpackte Produkte unterliegen der normalen Alterung und sollten nicht länger als 12 Monate gelagert werden. Hinweise auf die Entsorgung etc. können Sie unserem Sicherheitsdatenblatt entnehmen.

<b>Spezifische Oberfläche</b> (BET) DIN ISO 9277	[m <sup>2</sup> / g]	0,85
<b>Ölabsorption</b> DIN ISO 787, T5	[g / 100 g]	18
<b>pH-Wert</b>	[ - ]	6,5
<b>Weißgrad</b> (R457 abs)	[%]	79

<b>Dichte</b>	[g/ml]	2,63
<b>Schüttdichte</b>	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,0

### Kornverteilung (Luftstrahlsiebung / Sedigraph)

[Ma.-%] ca.

> 90 µm	3
63 - 90 µm	6
40 - 63 µm	13
20 - 40 µm	21
10 - 20 µm	20
4 - 10 µm	19
< 4 µm	18
<b>d<sub>10</sub></b>	2 µm
<b>d<sub>50</sub></b>	17 µm
<b>d<sub>90</sub></b>	62 µm

Basis: Produktionsdurchschnittswerte 2013

Wir weisen ausdrücklich darauf hin, dass es sich bei den vorliegenden Produkten um Naturprodukte handelt, die veredelt und/oder gemischt sein können (auch mit synthetischen Produkten). Alle angegebenen Daten und Werte sind daher lediglich als Richtwerte, die produktspezifische Toleranzbreiten haben können, zu verstehen. Unser Vertragspartner bleibt verpflichtet, die Tauglichkeit des Produkts für seine Einsatzzwecke zu prüfen und konkrete Auskünfte über Toleranzbreiten und anwendungstechnische Erfahrungen aufgrund der naturgegebenen sowie produktions- und lagerstättenbedingten Toleranzen für den konkreten Verwendungszweck zu erfragen. Im Übrigen gelten unsere "Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen". Die genannten Analysenwerte stellen keine Garantie oder Zusicherung im rechtlichen Sinne dar, sondern basieren auf durchschnittlichen Jahreswerten. Aktuelle Analysenwerte stellen wir auf Wunsch gerne zur Verfügung.

# TECHNISCHES DATENBLATT

## QM 4 Kristallquarzmehl 0- 71 µm

**Eigenschaften:** Kristallquarzmehle werden durch eisenfreie, trockene Vermahlung von aufbereitetem Quarzsand und nachfolgender Windsichtung hergestellt. Sie zeichnen sich durch einen hohen SiO<sub>2</sub>- Gehalt aus und enthalten nur geringe Mengen an Nebenbestandteilen. Sie werden in mehreren Mahlfineinheiten geliefert.

### Chemische Analyse

**Lieferform:** Lose oder verpackt in 25 kg Säcke

	[Ma.-%]
SiO <sub>2</sub>	98,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02
TiO <sub>2</sub>	0,03
K <sub>2</sub> O	0,3
Na <sub>2</sub> O	0,01
CaO	0,02
MgO	0,01
Glühverlust <sub>1000°C</sub>	0,21

**Hinweis:** Verpackte Produkte unterliegen der normalen Alterung und sollten nicht länger als 12 Monate gelagert werden. Hinweise auf die Entsorgung etc. können Sie unserem Sicherheitsdatenblatt entnehmen.

<b>Spezifische Oberfläche</b> (BET) DIN ISO 9277	[m <sup>2</sup> / g]	0,9	<b>Dichte</b>	[g/ml]	2,63
<b>Ölabsorption</b> DIN ISO 787, T5	[g / 100 g]	19	<b>Schüttdichte</b>	[g/cm <sup>3</sup> ]	0,93
<b>pH-Wert</b>	[-]	6,1			
<b>Weißgrad</b> (R457 abs)	[%]	78			

### Kornverteilung (Luftstrahlsiebung / Sedigraph)

	[Ma.-%] ca.
> 71 µm	3
63 - 71 µm	2
40 - 63 µm	14
20 - 40 µm	24
10 - 20 µm	22
4 - 10 µm	18
< 4 µm	17
<b>d<sub>10</sub></b>	2 µm
<b>d<sub>50</sub></b>	17 µm
<b>d<sub>90</sub></b>	54 µm

Basis: Produktionsdurchschnittswerte 2013

Wir weisen ausdrücklich darauf hin, dass es sich bei den vorliegenden Produkten um Naturprodukte handelt, die veredelt und/oder gemischt sein können (auch mit synthetischen Produkten). Alle angegebenen Daten und Werte sind daher lediglich als Richtwerte, die produktspezifische Toleranzbreiten haben können, zu verstehen. Unser Vertragspartner bleibt verpflichtet, die Tauglichkeit des Produkts für seine Einsatzzwecke zu prüfen und konkrete Auskünfte über Toleranzbreiten und anwendungstechnische Erfahrungen aufgrund der naturgegebenen sowie produktions- und lagerstättenbedingten Toleranzen für den konkreten Verwendungszweck zu erfragen. Im Übrigen gelten unsere "Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen". Die genannten Analysenwerte stellen keine Garantie oder Zusage im rechtlichen Sinne dar, sondern basieren auf durchschnittlichen Jahreswerten. Aktuelle Analysenwerte stellen wir auf Wunsch gerne zur Verfügung.

# TECHNISCHES DATENBLATT

## QM 5 Kristallquarzmehl 0- 63 µm

**Eigenschaften:** Kristallquarzmehle werden durch eisenfreie, trockene Vermahlung von aufbereitetem Quarzsand und nachfolgender Windsichtung hergestellt. Sie zeichnen sich durch einen hohen SiO<sub>2</sub>- Gehalt aus und enthalten nur geringe Mengen an Nebenbestandteilen. Sie werden in mehreren Mahlfineinheiten geliefert.

### Chemische Analyse

**Lieferform:** Lose oder verpackt in 25 kg Säcke

	[Ma.-%]
SiO <sub>2</sub>	98,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02
TiO <sub>2</sub>	0,03
K <sub>2</sub> O	0,3
Na <sub>2</sub> O	0,01
CaO	0,02
MgO	0,01

### Hinweis:

Verpackte Produkte unterliegen der normalen Alterung und sollten nicht länger als 12 Monate gelagert werden. Hinweise auf die Entsorgung etc. können Sie unserem Sicherheitsdatenblatt entnehmen.

**Glühverlust** <sub>1000°C</sub> 0,20

<b>Spezifische Oberfläche</b> (BET) DIN ISO 9277	[m <sup>2</sup> / g]	0,9
<b>Ölabsorption</b> DIN ISO 787, T5	[g / 100 g]	19
<b>pH-Wert</b>	[ - ]	6,1
<b>Weißgrad</b> (R457 abs)	[%]	80

<b>Dichte</b>	[g/ml]	2,63
<b>Schüttdichte</b>	[g/cm <sup>3</sup> ]	0,94

### Kornverteilung (Luftstrahlsiebung / Sedigraph)

	[Ma.-%] ca.
> 63 µm	3
40 - 63 µm	17
30 - 40 µm	12
20 - 30 µm	18
10 - 20 µm	22
4 - 10 µm	16
< 4 µm	12
<b>d<sub>10</sub></b>	3 µm
<b>d<sub>50</sub></b>	19 µm
<b>d<sub>90</sub></b>	53 µm

Basis: Produktionsdurchschnittswerte 2013

Wir weisen ausdrücklich darauf hin, dass es sich bei den vorliegenden Produkten um Naturprodukte handelt, die veredelt und/oder gemischt sein können (auch mit synthetischen Produkten). Alle angegebenen Daten und Werte sind daher lediglich als Richtwerte, die produktspezifische Toleranzbreiten haben können, zu verstehen. Unser Vertragspartner bleibt verpflichtet, die Tauglichkeit des Produkts für seine Einsatzzwecke zu prüfen und konkrete Auskünfte über Toleranzbreiten und anwendungstechnische Erfahrungen aufgrund der naturgegebenen sowie produktions- und lagerstättenbedingten Toleranzen für den konkreten Verwendungszweck zu erfragen. Im Übrigen gelten unsere "Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen". Die genannten Analysenwerte stellen keine Garantie oder Zusicherung im rechtlichen Sinne dar, sondern basieren auf durchschnittlichen Jahreswerten. Aktuelle Analysenwerte stellen wir auf Wunsch gerne zur Verfügung.

# TECHNISCHES DATENBLATT

## QM 6 Kristallquarzmehl 0- 40 µm

**Eigenschaften:** Kristallquarzmehle werden durch eisenfreie, trockene Vermahlung von aufbereitetem Quarzsand und nachfolgender Windsichtung hergestellt. Sie zeichnen sich durch einen hohen SiO<sub>2</sub>- Gehalt aus und enthalten nur geringe Mengen an Nebenbestandteilen. Sie werden in mehreren Mahlfineinheiten geliefert.

### Chemische Analyse

**Lieferform:** Lose oder verpackt in 25 kg Säcke

	[Ma.-%]
SiO <sub>2</sub>	98,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02
TiO <sub>2</sub>	0,03
K <sub>2</sub> O	0,3
Na <sub>2</sub> O	0,01
CaO	0,02
MgO	0,01

**Hinweis:** Verpackte Produkte unterliegen der normalen Alterung und sollten nicht länger als 12 Monate gelagert werden. Hinweise auf die Entsorgung etc. können Sie unserem Sicherheitsdatenblatt entnehmen.

**Glühverlust** <sub>1000°C</sub> 0,23

<b>Spezifische Oberfläche</b> (BET) DIN ISO 9277	[m <sup>2</sup> / g]	1,2
<b>Ölabsorption</b> DIN ISO 787, T5	[g / 100 g]	21
<b>pH-Wert</b>	[ - ]	6,0
<b>Weißgrad</b> (R457 abs)	[%]	81

<b>Dichte</b>	[g/ml]	2,63
<b>Schüttdichte</b>	[g/cm <sup>3</sup> ]	0,84

### Kornverteilung (Luftstrahlsiebung / Sedigraph)

[Ma.-%] ca.

> 40 µm	3
30 - 40 µm	8
20 - 30 µm	18
10 - 20 µm	30
4 - 10 µm	24
2 - 4 µm	9
<2 µm	8
<b>d<sub>10</sub></b>	2 µm
<b>d<sub>50</sub></b>	13 µm
<b>d<sub>90</sub></b>	31 µm

Basis: Produktionsdurchschnittswerte 2013

Wir weisen ausdrücklich darauf hin, dass es sich bei den vorliegenden Produkten um Naturprodukte handelt, die veredelt und/oder gemischt sein können (auch mit synthetischen Produkten). Alle angegebenen Daten und Werte sind daher lediglich als Richtwerte, die produktspezifische Toleranzbreiten haben können, zu verstehen. Unser Vertragspartner bleibt verpflichtet, die Tauglichkeit des Produkts für seine Einsatzzwecke zu prüfen und konkrete Auskünfte über Toleranzbreiten und anwendungstechnische Erfahrungen aufgrund der naturgegebenen sowie produktions- und lagerstättenbedingten Toleranzen für den konkreten Verwendungszweck zu erfragen. Im Übrigen gelten unsere "Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen". Die genannten Analysenwerte stellen keine Garantie oder Zusicherung im rechtlichen Sinne dar, sondern basieren auf durchschnittlichen Jahreswerten. Aktuelle Analysenwerte stellen wir auf Wunsch gerne zur Verfügung.

# TECHNISCHES DATENBLATT

## QM 7 - 10

### Korngrößenverteilung (Sedigraph)

	> 40 µm	> 20 µm	> 10 µm	> 6 µm	> 4 µm	> 2 µm	< 2 µm	d <sub>50</sub> [µm]
	Anteil in Ma-%							
QM 10	-	0,6	3	10	17	32	38	2,6
QM 9	-	0,7	6	16	19	28	30	3,2
QM 8	-	2	13	20	18	23	24	4,0
QM 7	0,2	5	22	21	15	17	19	6,0

### Chemische Analyse in Ma-%

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Glühverlust
98,5	1	0,02	0,04	0,1	0,01	0,02	0,01	0,4

### Technische Daten

	QM 10	QM 9	QM 8	QM 7
Schüttdichte in g/cm <sup>3</sup>	0,6			0,7
Korndichte in g/cm <sup>3</sup>	2,63			
Ölzahl in g/100g	29	28	25	24
Härte nach Mohs	7			

Basis: Produktionsdurchschnittswerte 2012

Wir weisen ausdrücklich darauf hin, dass es sich bei den vorliegenden Produkten um Naturprodukte handelt, die veredelt und/oder gemischt sein können (auch mit synthetischen Produkten). Alle angegebenen Daten und Werte sind daher lediglich als Richtwerte, die produktspezifische Toleranzbreiten haben können, zu verstehen. Unser Vertragspartner bleibt verpflichtet, die Tauglichkeit des Produkts für seine Einsatzzwecke zu prüfen und konkrete Auskünfte über Toleranzbreiten und anwendungstechnische Erfahrungen aufgrund der naturgegebenen sowie produktions- und lagerstättenbedingten Toleranzen für den konkreten Verwendungszweck zu erfragen. Im Übrigen gelten unsere "Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen". Die genannten Analysenwerte stellen keine Garantie oder Zusicherung im rechtlichen Sinne dar, sondern basieren auf durchschnittlichen Jahreswerten. Aktuelle Analysenwerte stellen wir auf Wunsch gerne zur Verfügung.

## C Anhang - Algorithmus zur Sieblinienoptimierung

```
1 % Laden der Datei mit den Sieblinien der Ausgangsstoffe
2 MAT = load('Ausgangsstoffe_Matrix_RW.txt');
3
4 % Eingabe Anzahl Unbekannte und Zementart
5 anzahlUB = 14;
6 cemart = 4; % 4 = 42.5; 5 = 52.5
7
8 % Eingabe Materialdaten
9 LP = 2; % in [Vol.-%] Luftporen
10 CEM = 700:10:850; % in [kg/m^3] Zementgehalt
11 FM = 4.5; % in [Massenprozent vom Zementgehalt]
    Fliessmittel
12 W = 0.25; % w/z-Wert
13 lenCEM = length(CEM);
14
15 % Eingabe Dichte
16 DICHTE_CEM = 3.05; %Dichte Zement
17 DICHTE_FM = 1.07; %Dichte Fliessmittel
18 DICHTE_W = 1.00; %Dichte Wasser
19 DICHTE_MS = 2.25; %Dichte Mikrosilika
20 DICHTE_QM = 2.63; %Dichte Quarzmehle
21 DICHTE_QS = 2.65; %Dichte Quarzsande
22
23 % Eingabe Dinger-Funk oder Kassel (M1Q - M2Q)
24 Ref = 1; % 1... Dinger-Funk; 2... Kassel
25 q = 0.30;
26
27 % Speichern der Variablen aus Ausgangsstoffmatrix
28 nr = MAT(:,1);
29 kornd = MAT(:,2);
30 ms = MAT(:,3);
31 cem = MAT(:,cemart);
32 QM1 = MAT(:,6);
33 QM2 = MAT(:,7);
34 QM3 = MAT(:,8);
35 QM4 = MAT(:,9);
36 QM5 = MAT(:,10);
```

```

37 QM6 = MAT(:,11);
38 QM7 = MAT(:,12);
39 QM8 = MAT(:,13);
40 QM9 = MAT(:,14);
41 QM10 = MAT(:,15);
42 QS1 = MAT(:,16);
43 QS2 = MAT(:,17);
44 QS3 = MAT(:,18);
45
46 nMAT = length(MAT);
47
48 % Berechnung Stoffraum
49 SR_GES = 1000;
50 SR_LP = LP * 10;
51 SR_CEM = CEM / DICHTCEM;
52 SR_FM = (CEM * FM / 100) / DICHTCEM;
53 SR_W = (CEM * W - 0.7 * SR_FM * DICHTCEM) / DICHTCEM;
54
55 SR_REST = SR_GES - (SR_LP + SR_CEM + SR_FM + SR_W);
56 SR_FEST = SR_CEM + SR_REST;
57
58 % Berechnung Referenz-Sieblinie
59 Dmin = kornd(end);
60 Dmax = kornd(1);
61
62 if Ref==1
63     SLref = ( kornd.^q - Dmin.^q ) / ( Dmax.^q - Dmin.^q ) *
        100; % Dinger Funk
64 else
65     SLref = load('Kassel.txt'); % Kassel
66 end
67
68 SLref = SLref';
69
70 % Berechnung effektiver Sieblinie
71 % Aufstellen der Gleichung mit den Unbekannten
72
73 DIFFERENZ = zeros(lenCEM,1);
74 SR=zeros(4+anzahlUB,lenCEM);
75 GEW=zeros(4+anzahlUB,lenCEM);
76
77 outFile = 'Ergebnis.txt';
78 fid = fopen( outFile, 'w' );
79 fprintf( fid, ' Luftporen Zement Fließmittel Wasser
        Mikrosilika QM1 QM2 QM3 QM4 QM5 QM6 QM7 QM8 QM9 QM10
        QS1 QS2 QS3\n' );
80

```

```

81 for z = 1:length(CEM)
82 syms A B C D E F G H I J K L M N
83
84 clear Summe_SL
85 for i = 1:nMAT
86     Summe_SL(i) = SR_CEM(z)/SR_FEST(z)*cem(i) + vpa(A*QM1(i)
            + B*QM2(i) + C*QM3(i) + D*QM4(i) + E*QM5(i) + F*QM6
            (i) + G*QM7(i) + H*QM8(i) + I*QM9(i) + J*QM10(i) + K*
            QS1(i) + L*QS2(i) + M*QS3(i) + N*ms(i),100);
87 end
88
89 for i = 2:nMAT
90     Summe_SL(i) = Summe_SL(i-1) + Summe_SL(i);
91 end
92
93 SL = 100-Summe_SL;
94 ERG = sum((vpa(SL-SLref,100)).^2); % Optimierungsgleichung
95
96 % Ermitteln der Koeffizienten der Unbekannten
97 co = coeffs(ERG);
98 co = co(end:-1:1);
99 co = double(co);
100
101 % Erstellen der Eingabewerte fuer quadprog
102 H = tril(ones(anzahlUB));
103 coQ = zeros(sum(1:anzahlUB),1); % Koeffizienten fuer H
104 f = zeros(anzahlUB,1); % Koeffizienten fuer f
105 k = 0;
106 j = 1;
107 for i = anzahlUB:-1:1
108     coQ(j:j+i-1) = co(k+1:k+i);
109     k = k+i+1;
110     f(i)=co(k);
111     j = j+i;
112 end
113
114 H(H==1) = coQ;
115 H = H + transpose(H);
116
117 f = f(end:-1:1);
118
119 lb = zeros(anzahlUB,1);
120 lb(anzahlUB) = (CEM(z)*0.17/DICHTE_MS) / SR_FEST(z);
121
122 ub = ones(anzahlUB,1);
123 ub(anzahlUB) = (CEM(z)*0.23/DICHTE_MS) / SR_FEST(z);
124

```

```

125 A = ones(1,anzahlUB);
126
127 fix = SR_CEM(z) / SR_FEST(z);
128 b = 1-fix;
129
130 opt = optimset('largescale','off','simplex','on');
131 [x,fval] = quadprog(H,f,[],[],A,b,lb,ub,[],opt);
132
133 % Zuweisung der errechneten Werte an die Variablen
134 A = x(1);
135 B = x(2);
136 C = x(3);
137 D = x(4);
138 E = x(5);
139 F = x(6);
140 G = x(7);
141 H = x(8);
142 I = x(9);
143 J = x(10);
144 K = x(11);
145 L = x(12);
146 M = x(13);
147 N = x(14);
148
149 % Auswertung und Darstellung der effektiven Sieblinie
150 SLeff = subs(SL);
151
152 semilogx(kornd,SLeff,kornd,SLref,'LineWidth',2)
153 axis([0.01 Dmax 0 100])
154 grid on
155 legend('effektive Sieblinie','Referenz-Sieblinie','Location
        ','NorthWest')
156
157 % Berechnung Stoffzusammensetzung
158 SR(1,z) = SR_LP;
159 SR(2,z) = SR_CEM(z);
160 SR(3,z) = SR_FM(z);
161 SR(4,z) = SR_W(z);
162 SR(5,z) = N * SR_FEST(z);
163 SR(6,z) = A * SR_FEST(z);
164 SR(7,z) = B * SR_FEST(z);
165 SR(8,z) = C * SR_FEST(z);
166 SR(9,z) = D * SR_FEST(z);
167 SR(10,z) = E * SR_FEST(z);
168 SR(11,z) = F * SR_FEST(z);
169 SR(12,z) = G * SR_FEST(z);
170 SR(13,z) = H * SR_FEST(z);

```

```

171 SR(14,z) = I * SR_FEST(z);
172 SR(15,z) = J * SR_FEST(z);
173 SR(16,z) = K * SR_FEST(z);
174 SR(17,z) = L * SR_FEST(z);
175 SR(18,z) = M * SR_FEST(z);
176
177 GEW(2,z) = CEM(z);
178 GEW(3,z) = CEM(z)*FM/100;
179 GEW(4,z) = CEM(z)*W;
180 GEW(5,z) = SR(5,z) *DICHTE_MS;
181 GEW(6,z) = SR(6,z) * DICHTE_QM;
182 GEW(7,z) = SR(7,z) * DICHTE_QM;
183 GEW(8,z) = SR(8,z) * DICHTE_QM;
184 GEW(9,z) = SR(9,z) * DICHTE_QM;
185 GEW(10,z) = SR(10,z) * DICHTE_QM;
186 GEW(11,z) = SR(11,z) * DICHTE_QM;
187 GEW(12,z) = SR(12,z) * DICHTE_QM;
188 GEW(13,z) = SR(13,z) * DICHTE_QM;
189 GEW(14,z) = SR(14,z) * DICHTE_QM;
190 GEW(15,z) = SR(15,z) * DICHTE_QM;
191 GEW(16,z) = SR(16,z) * DICHTE_QS;
192 GEW(17,z) = SR(17,z) * DICHTE_QS;
193 GEW(18,z) = SR(18,z) * DICHTE_QS;
194
195 DIFFERENZ(z) = co(end)+fval;
196
197 % Ausgabe in Datei
198 fprintf( fid, '\nStoffraum [dm^3/m^3]');
199 fprintf( fid, '%12.3f', SR(:,z) );
200
201 fprintf( fid, '\nGewicht [kg/m^3] ');
202 fprintf( fid, '%12.3f', GEW(:,z) );
203
204 fprintf( fid, '\nDifferenz ');
205 fprintf( fid, '%10.3f', DIFFERENZ(z) );
206
207 % Ausgabe Sieblinie als Grafik
208 print( strcat( 'Sieblinie', num2str(CEM(z)), '.png'), '-
    dpng' );
209 end

```

# D Anhang - Übersicht der durchgeführten Versuche

In den folgenden Abbildungen werden die Zusammensetzung und die Ergebnisse der durchgeführten Versuche aufgelistet. Die Prozentangaben des Mikrosilika, des Quarzmehl und des Fließmittel geben die Gewichtsprozentage bezogen auf den Zementgehalt an. Für die Gesteinskörnungen (Quarzsand, Basaltsplitt, Sand, Kies) werden die Volumenprozentage vom Zuschlagsvolumen angegeben. Der Prozentanteil der Stahlfasern bezieht sich auf das Gesamtvolumen. Die Festigkeiten des Betons werden in N/mm<sup>2</sup> angegeben und die Fließfähigkeit wird durch die Fließzeit t<sub>200</sub> in Sekunden und durch das Hägermann Setzmaß in cm charakterisiert.

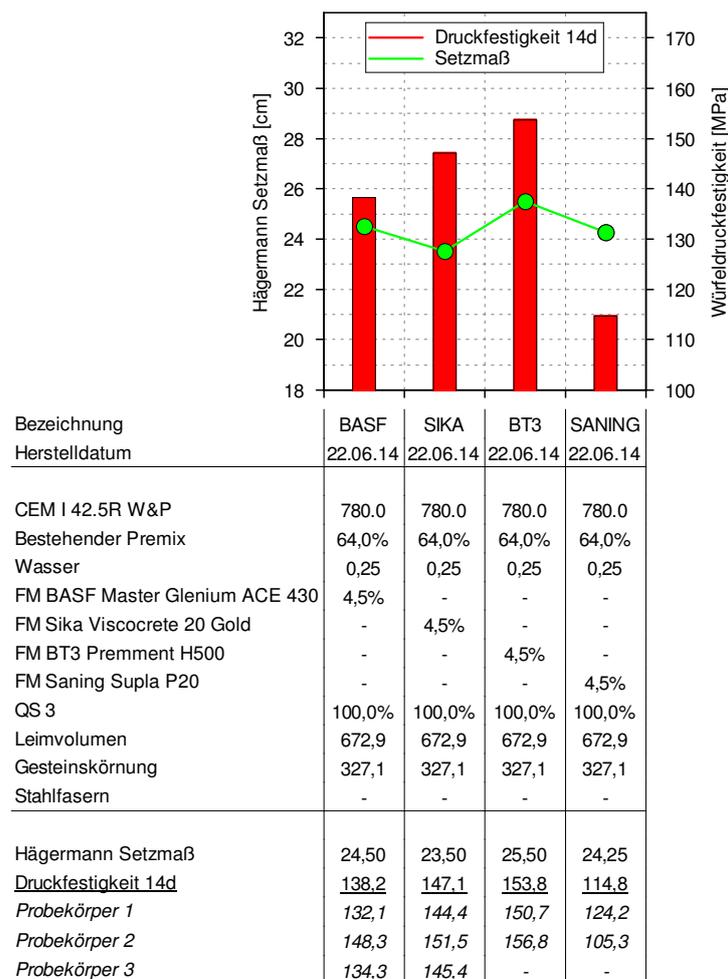


Abb. D.1: Übersicht Versuchsergebnisse: Einfluss Fließmittel (Kap. 4.2.2)

D Anhang - Übersicht der durchgeführten Versuche

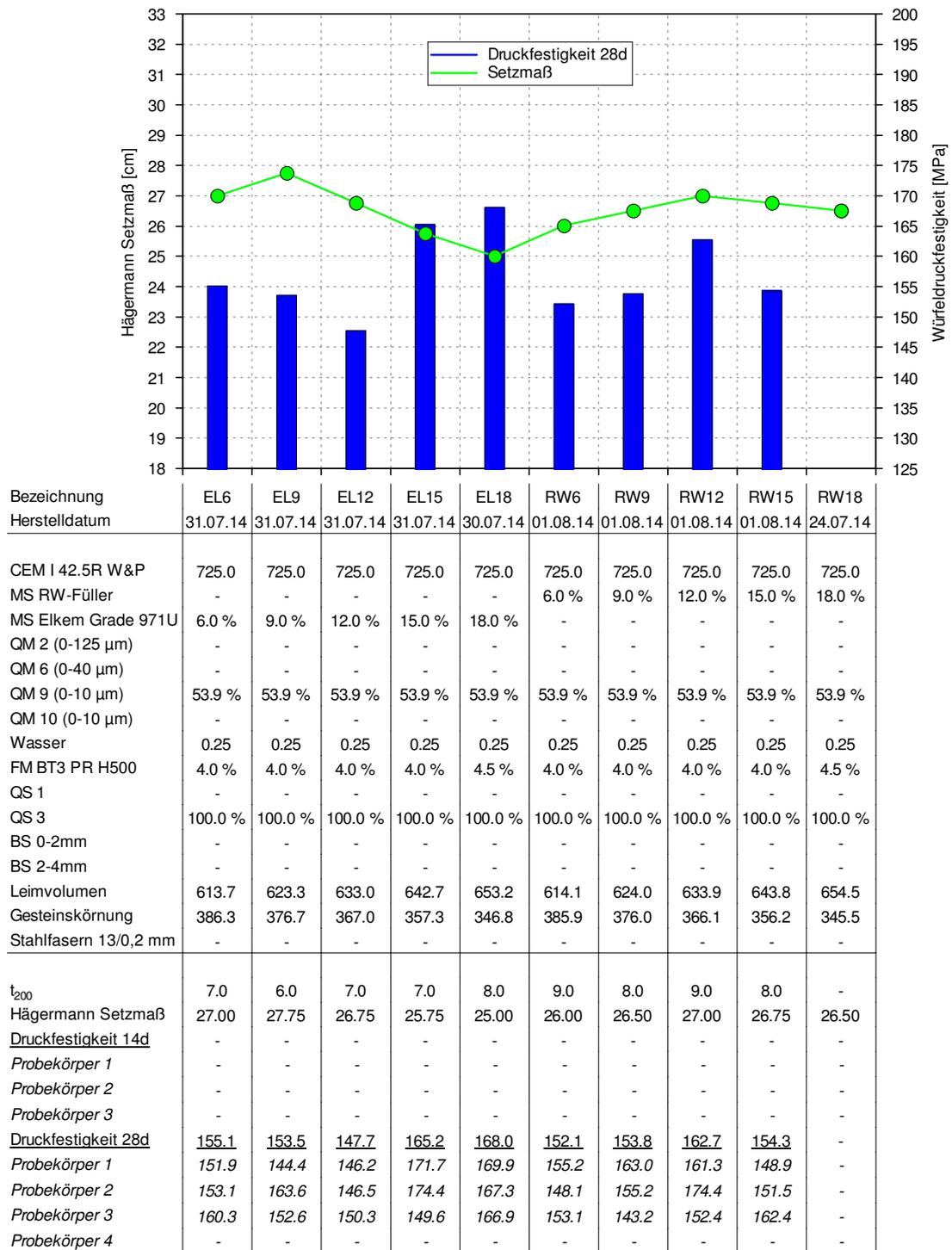
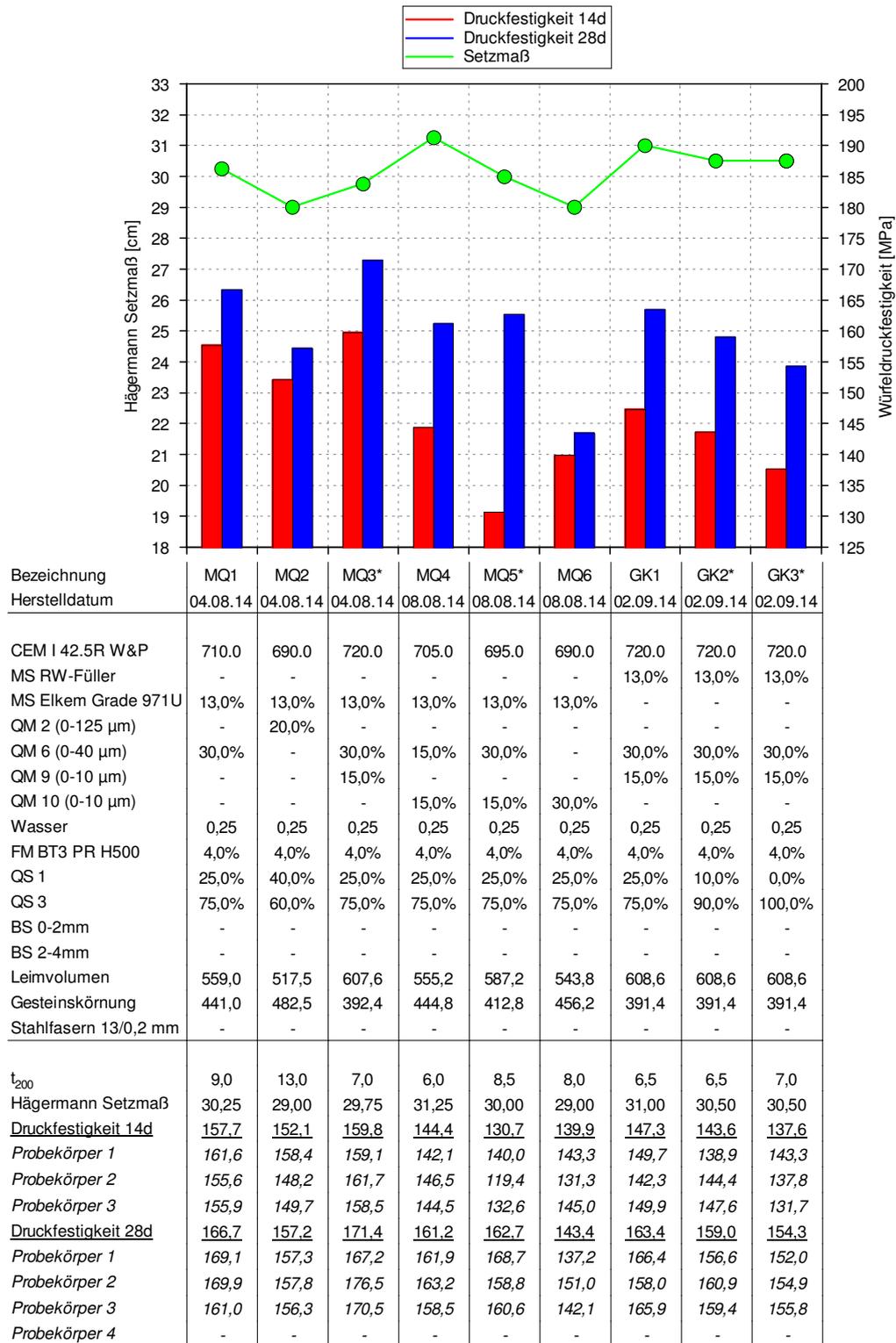


Abb. D.2: Übersicht Versuchsergebnisse: Einfluss Mikrosilika (Kap. 4.2.4)

D Anhang - Übersicht der durchgeführten Versuche



\* Alternative Bezeichnung für MQ3: BS1, SF1, BF1; für MQ5: BS3; für GK2: SF3; für GK3: SF5

Abb. D.3: Übersicht Versuchsergebnisse: Einfluss Quarzmehl und Gesteinskörnung (Kap. 4.2.5 und 4.2.6)

D Anhang - Übersicht der durchgeführten Versuche

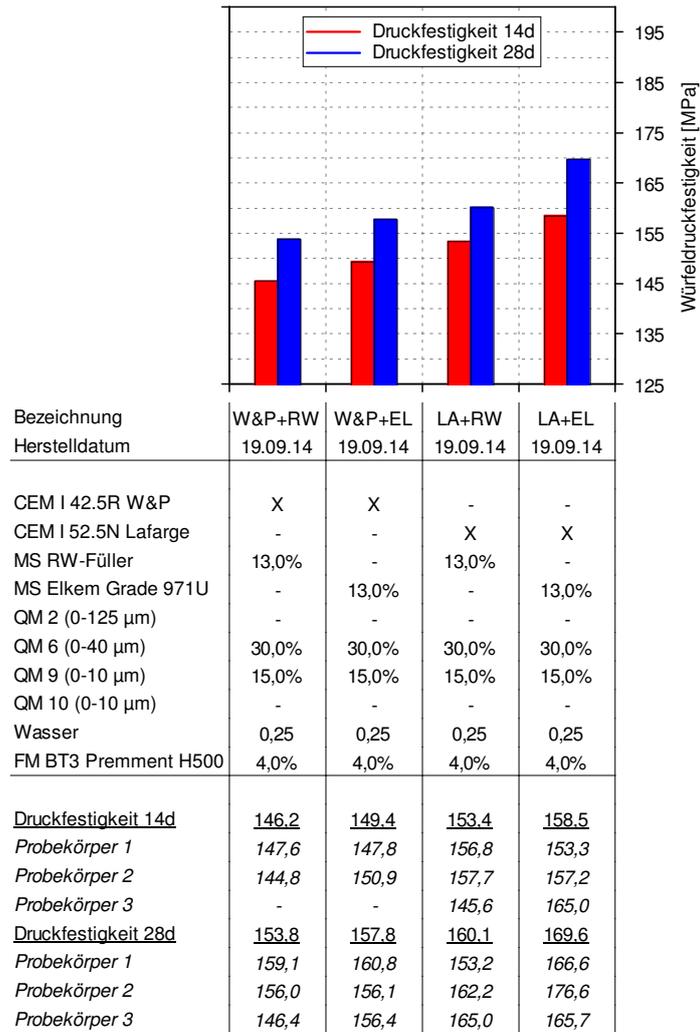
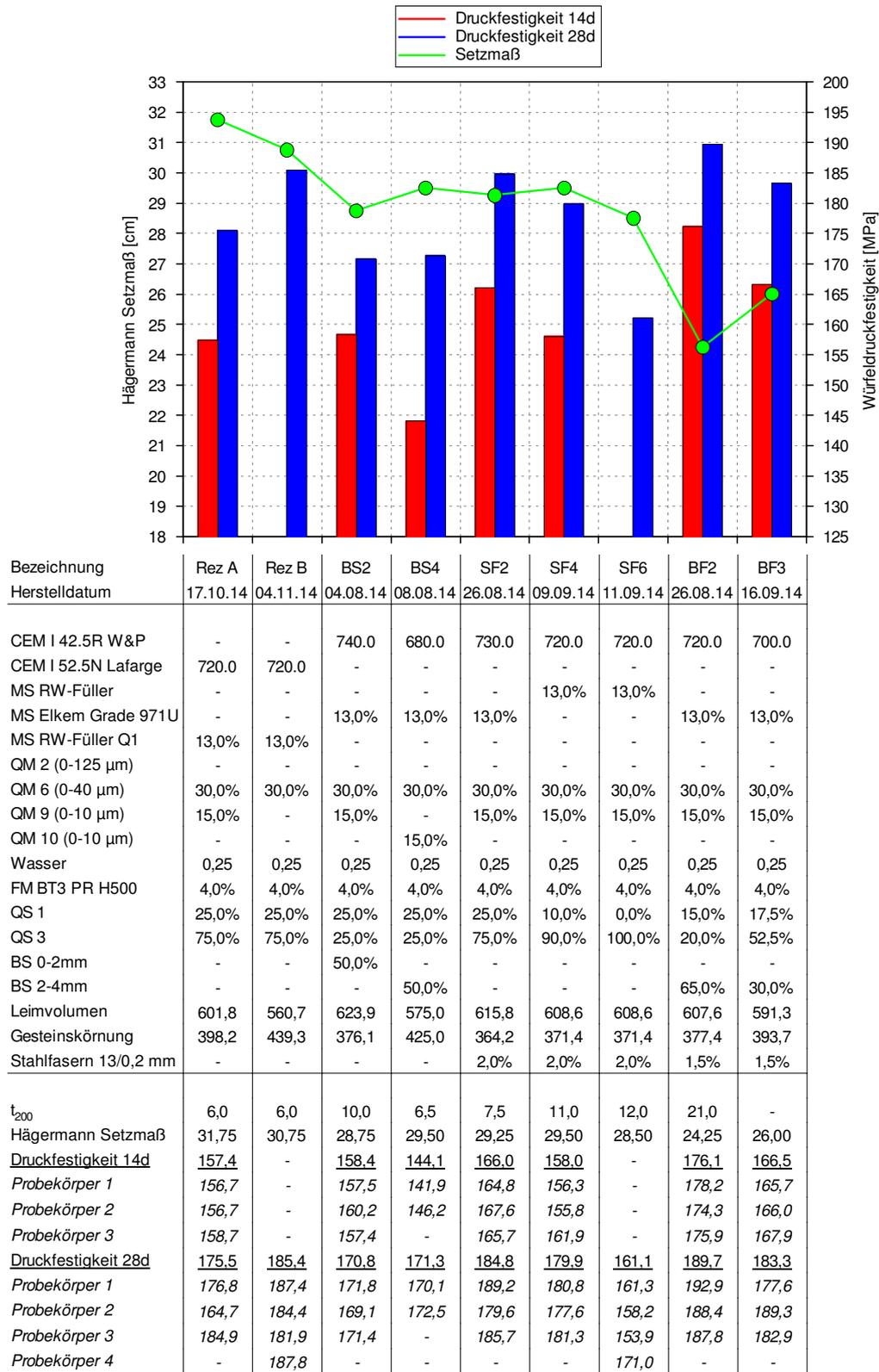


Abb. D.4: Übersicht Versuchsergebnisse: Leimfestigkeiten (Kap. 4.2.6)

D Anhang - Übersicht der durchgeführten Versuche



\* BS1, SF1, BF1: siehe MQ1; BS3: siehe MQ5; SF3: siehe GK2; SF5: siehe GK3

Abb. D.5: Übersicht Versuchsergebnisse: Charakterisierung und Einfluss verschiedener Materialien (Kap. 5.1 und 5.3)

D Anhang - Übersicht der durchgeführten Versuche

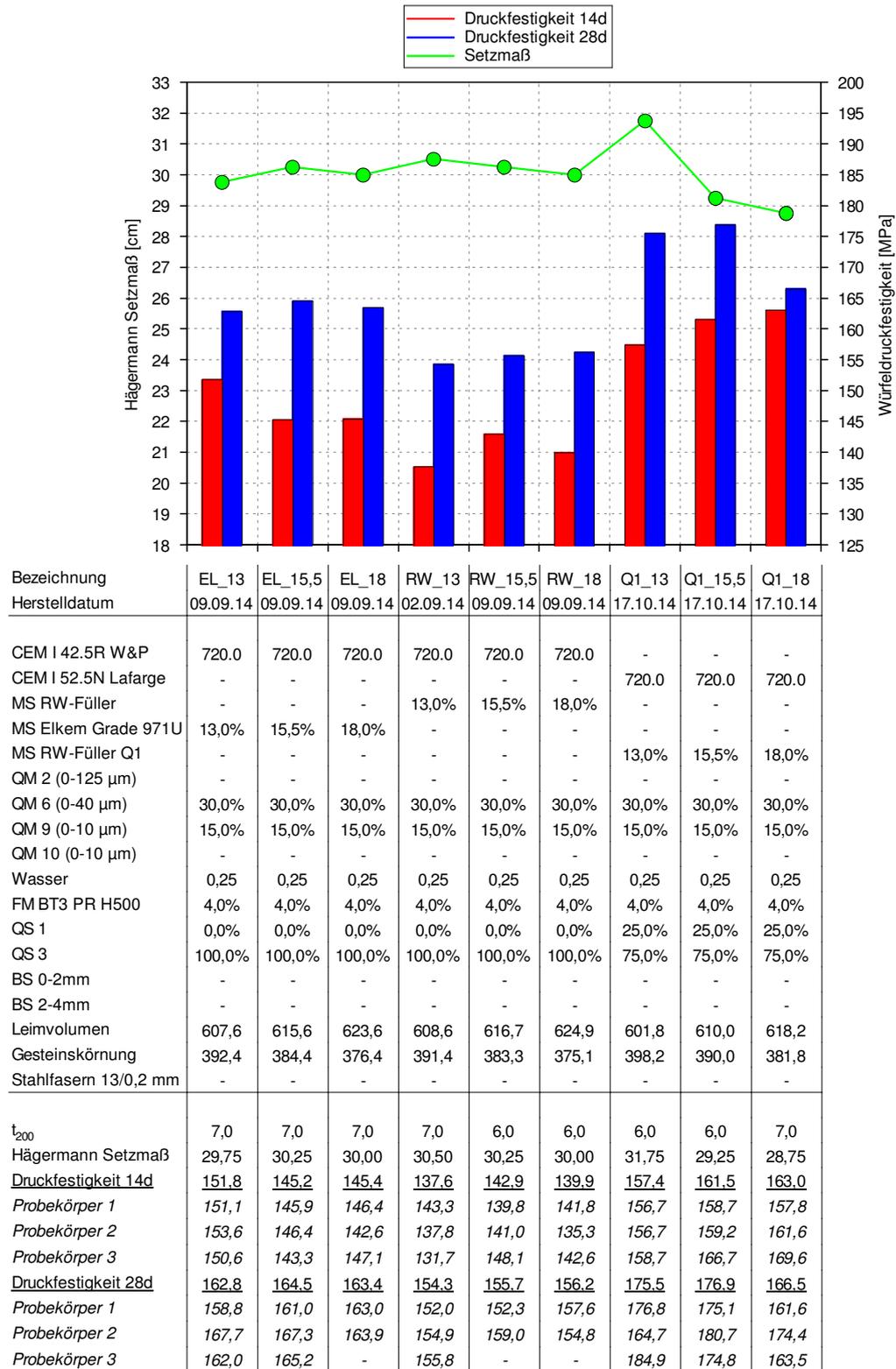
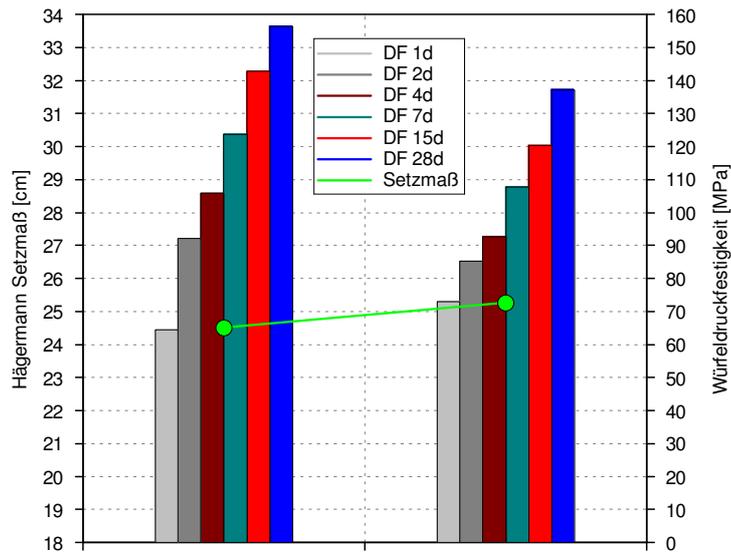


Abb. D.6: Übersicht Versuchsergebnisse: Einfluss verschiedener Mikrosilika (Kap. 5.3.1)

D Anhang - Übersicht der durchgeführten Versuche



Bezeichnung	M1	M2
Herstelldatum	30.10.14	30.10.14
CEM I 42.5N W&P	720.0	-
CEM I 52.5R Leube	-	795.0
MS Elkem Grade 971U	13,0%	12,8%
QM 6 (0-40 µm)	30,0%	29,6%
QM 9 (0-10 µm)	15,0%	14,8%
Wasser	0,25	0,27
FM BT3 Premment H500	4,0%	4,2%
VZ BT3 Premtard VZ-G100/300	1,0%	-
QS 1	35,0%	30,0%
QS 3	65,0%	70,0%
Leimvolumen	602,7	684,2
Gesteinskörnung	397,3	307,0
Stahlfasern 9/0,15 mm	-	0,9%
Hägermann Setzmaß	24,50	25,25
<u>Druckfestigkeit 1d</u>	<u>64,4</u>	<u>72,9</u>
Probekörper 1	66,8	65,2
Probekörper 2	62,3	75,7
Probekörper 3	64,0	77,9
<u>Druckfestigkeit 2d</u>	<u>92,0</u>	<u>85,2</u>
Probekörper 1	89,8	85,0
Probekörper 2	93,6	85,8
Probekörper 3	92,7	84,7
<u>Druckfestigkeit 4d</u>	<u>105,7</u>	<u>92,6</u>
Probekörper 1	105,0	93,3
Probekörper 2	105,1	90,9
Probekörper 3	107,1	93,6
<u>Druckfestigkeit 7d</u>	<u>123,7</u>	<u>107,7</u>
Probekörper 1	124,1	106,3
Probekörper 2	125,8	107,9
Probekörper 3	121,3	109,0
<u>Druckfestigkeit 15d</u>	<u>142,8</u>	<u>120,3</u>
Probekörper 1	144,0	120,7
Probekörper 2	140,5	121,5
Probekörper 3	144,0	118,6
<u>Druckfestigkeit 28d</u>	<u>156,4</u>	<u>137,2</u>
Probekörper 1	158,6	138,3
Probekörper 2	152,0	136,3
Probekörper 3	158,6	137,0

Abb. D.7: Übersicht Versuchsergebnisse: Großversuch Druckfestigkeit (Kap. 5.2)

D Anhang - Übersicht der durchgeführten Versuche

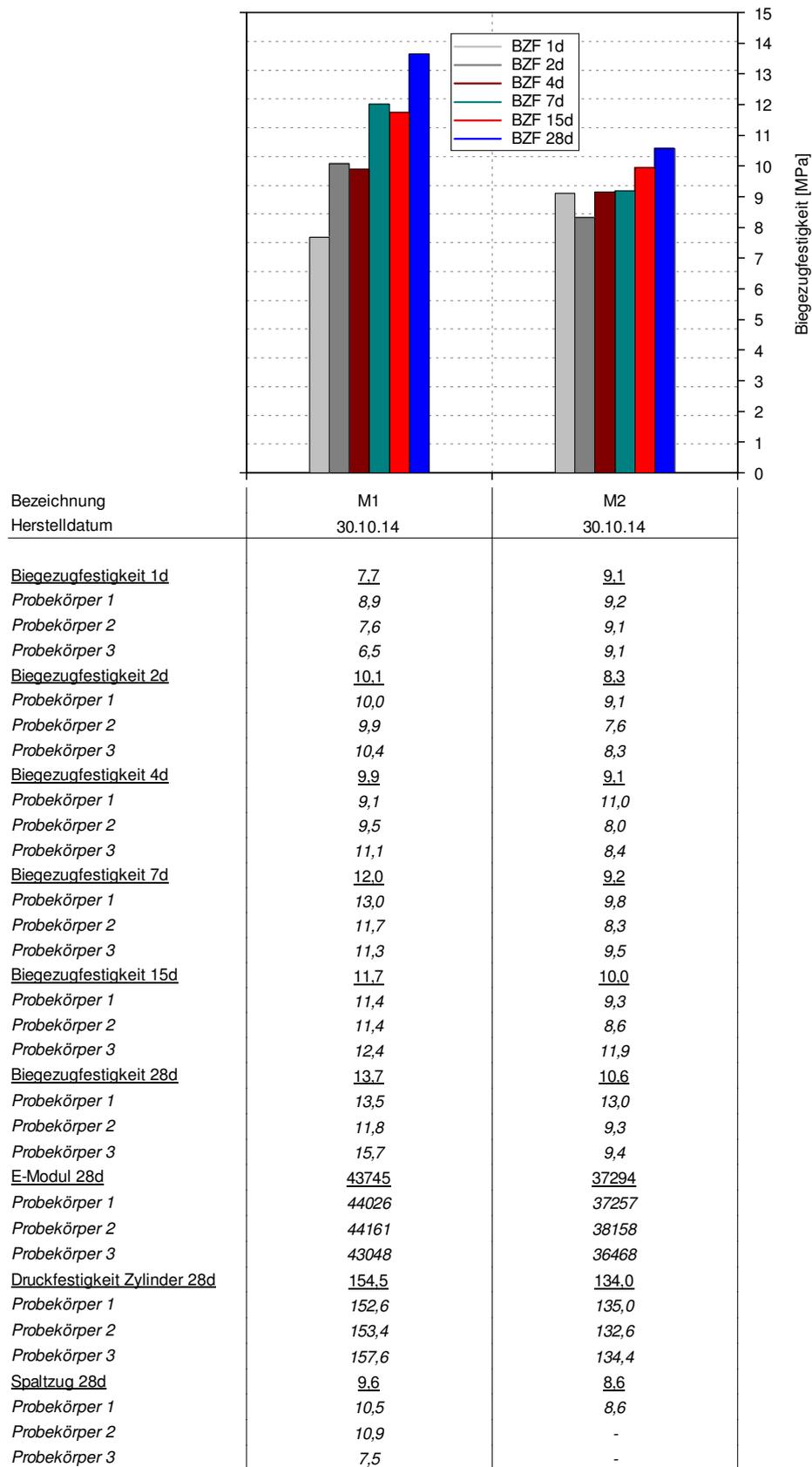


Abb. D.8: Übersicht Versuchsergebnisse: Großversuch Biegezugfestigkeit, E-Modul, Spaltzugfestigkeit (Kap. 5.2)

D Anhang - Übersicht der durchgeführten Versuche

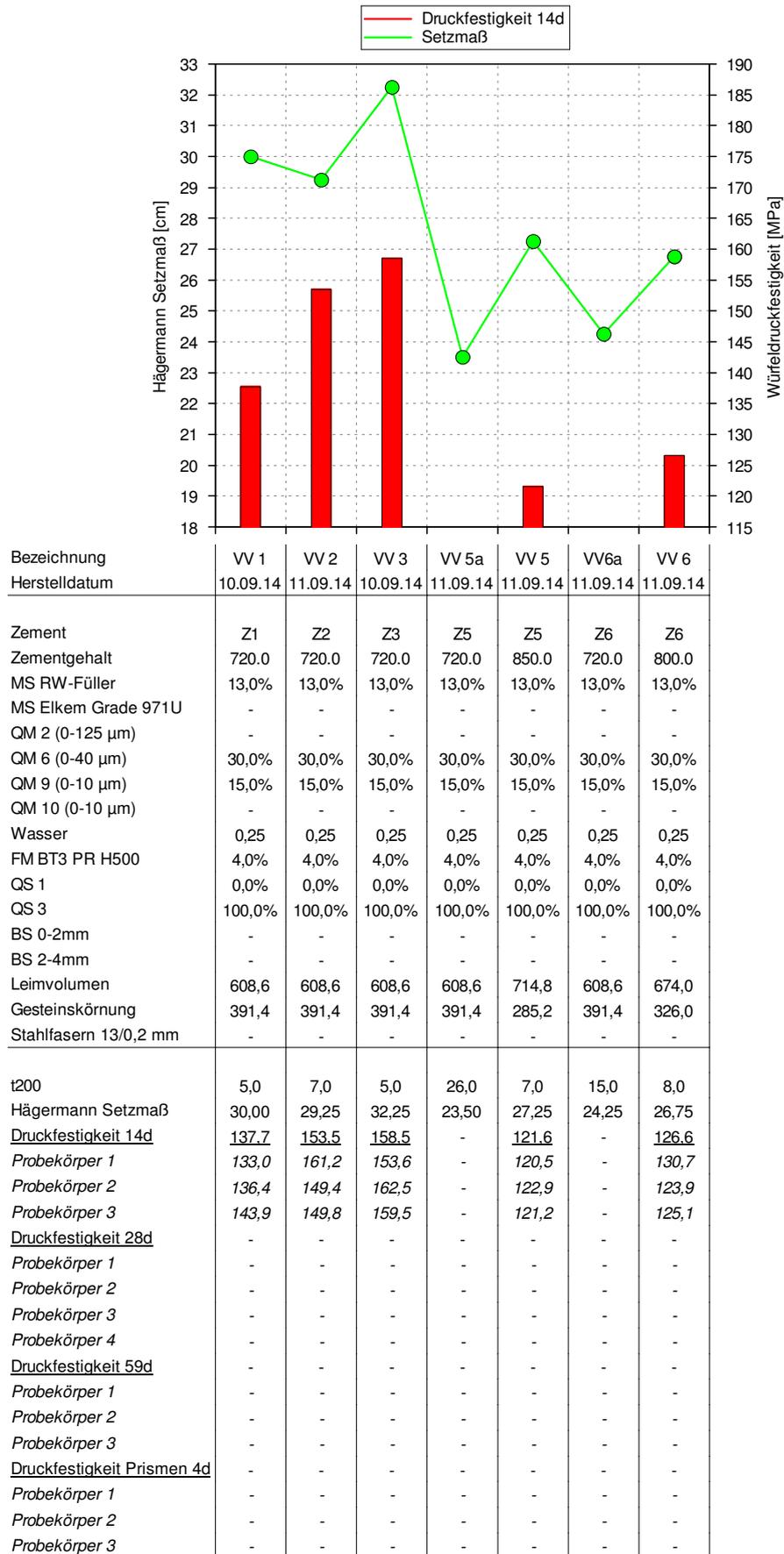


Abb. D.9: Übersicht Versuchsergebnisse: Zementparameterstudie Versuchsserie VV (Kap. 5.4)

D Anhang - Übersicht der durchgeführten Versuche

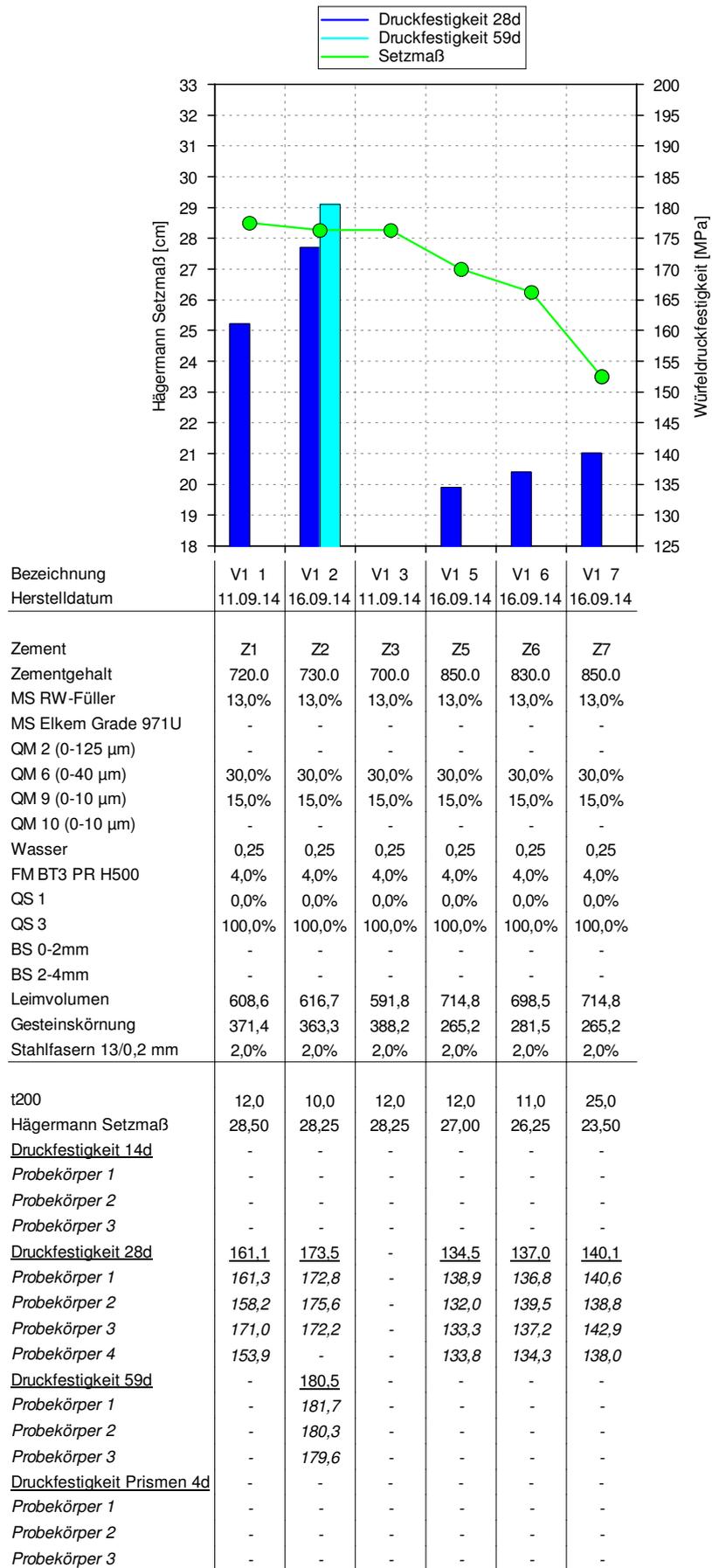


Abb. D.10: Übersicht Versuchsergebnisse: Zementparameterstudie Versuchsserie V1 (Kap. 5.4)

D Anhang - Übersicht der durchgeführten Versuche

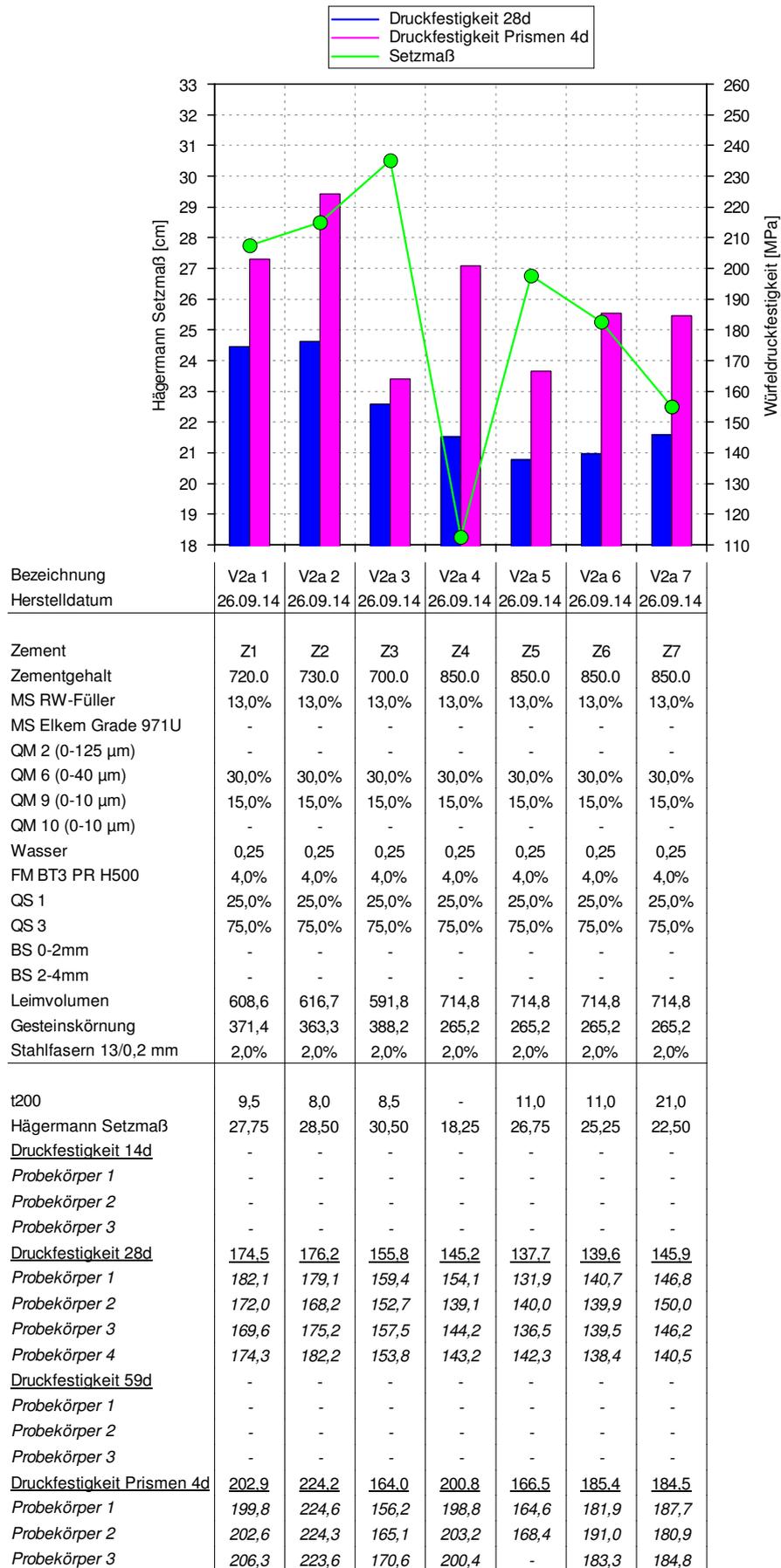


Abb. D.11: Übersicht Versuchsergebnisse: Zementparameterstudie Versuchsserie V2a (Kap. 5.4)

D Anhang - Übersicht der durchgeführten Versuche

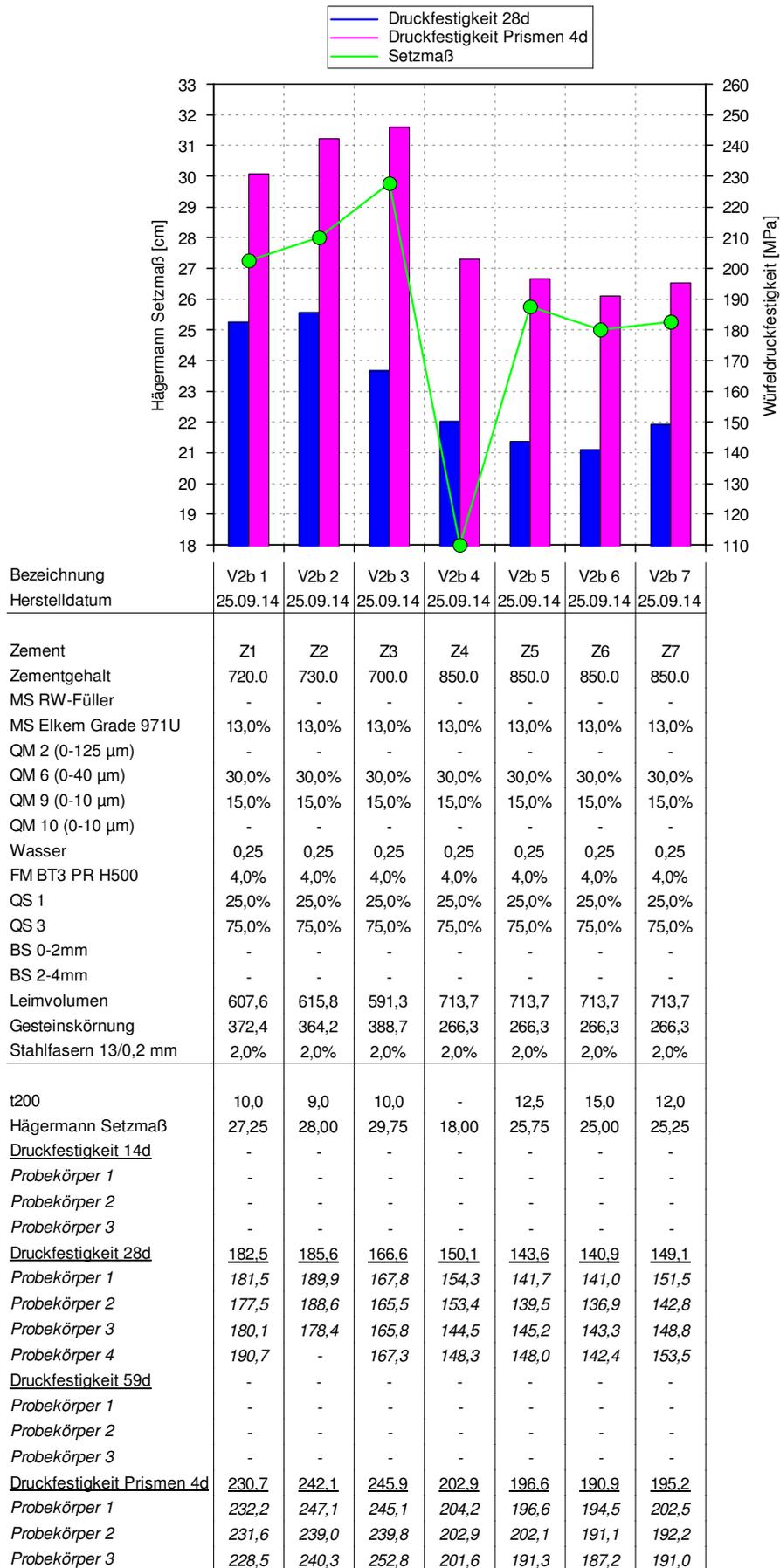
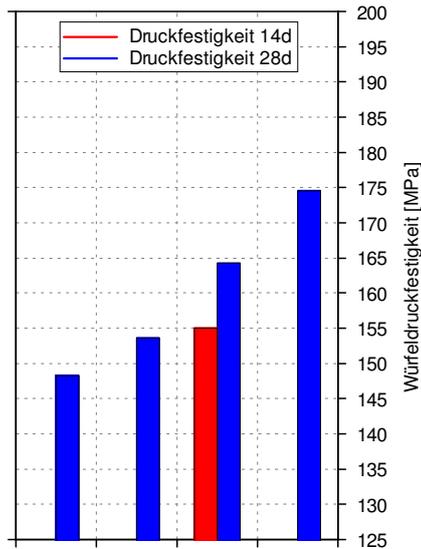


Abb. D.12: Übersicht Versuchsergebnisse: Zementparameterstudie Versuchsserie V2b (Kap. 5.4)

D Anhang - Übersicht der durchgeführten Versuche



Bezeichnung	K11	BA1	K12	BA2
Herstelldatum	10.09.14	10.09.14	10.10.14	10.10.14
CEM I 42.5R W&P	450.0	450.0	-	-
CEM I 52.5N Lafarge	-	-	450.0	450.0
MS RW-Füller	7,5%	7,5%	6,5%	6,5%
MS Elkem Grade 971U	-	-	-	-
MS RW-Füller Q1	-	-	-	-
QM 2 (0-125 µm)	-	-	-	-
QM 6 (0-40 µm)	15,0%	15,0%	15,0%	15,0%
QM 9 (0-10 µm)	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%
QM 10 (0-10 µm)	-	-	-	-
Wasser	0,28	0,28	0,28	0,28
FM BT3 PR H500	2,3%	2,3%	2,6%	2,6%
Sand 0/2	50,0%	50,0%	40,0%	30,0%
Kies 4/16	50,0%	-	60,0%	-
Basaltplitt 2/4	-	50,0%	-	70,0%
Leimvolumen	339,5	339,5	337,8	337,8
Gesteinskörnung	660,5	660,5	662,2	662,2
Stahlfasern 13/0,2 mm	-	-	-	-
<b>Druckfestigkeit 14d</b>	-	-	<u>155.1</u>	-
Probekörper 1	-	-	153,5	-
Probekörper 2	-	-	154,8	-
Probekörper 3	-	-	155,7	-
Probekörper 4	-	-	156,2	-
<b>Druckfestigkeit 28d</b>	<u>148.3</u>	<u>153.7</u>	<u>164.2</u>	<u>174.5</u>
Probekörper 1	150,0	156,7	164,0	173,0
Probekörper 2	146,2	150,3	165,7	177,9
Probekörper 3	148,6	154,0	163,1	174,9
Probekörper 4	-	-	164,2	172,3

Abb. D.13: Übersicht Versuchsergebnisse: HPC (Kap. 5.6)